

Normas de seguridad del OIEA

para la protección de las personas y el medio ambiente

Material explicativo para la aplicación del Reglamento del OIEA para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos (Edición de 2018)

Guía de Seguridad Específica
N° SSG-26 (Rev. 1)



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA Y PUBLICACIONES CONEXAS

NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Con arreglo a lo dispuesto en el artículo III de su Estatuto, el OIEA está autorizado a establecer o adoptar normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad, y a disponer lo necesario para aplicar esas normas.

Las publicaciones mediante las cuales el OIEA establece las normas pertenecen a la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*. Esta colección abarca la seguridad nuclear, radiológica, del transporte y de los desechos. La colección comprende las siguientes categorías: **Nociones Fundamentales de Seguridad, Requisitos de Seguridad y Guías de Seguridad**.

Para obtener información sobre el programa de normas de seguridad del OIEA puede consultarse el sitio del OIEA:

www.iaea.org/es/recursos/normas-de-seguridad

En este sitio se encuentran los textos en inglés de las normas de seguridad publicadas y de los proyectos de normas. También figuran los textos de las normas de seguridad publicados en árabe, chino, español, francés y ruso, el *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA* y un informe de situación sobre las normas de seguridad que están en proceso de elaboración. Para más información se ruega ponerse en contacto con el OIEA en la dirección: Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria.

Se invita a los usuarios de las normas de seguridad del OIEA a informar al Organismo sobre su experiencia en la utilización de las normas (por ejemplo, si se han utilizado como base de los reglamentos nacionales, para realizar exámenes de la seguridad o para impartir cursos de capacitación), con el fin de asegurar que sigan satisfaciendo las necesidades de los usuarios. Se puede hacer llegar la información a través del sitio del OIEA o por correo postal a la dirección anteriormente señalada, o por correo electrónico a la dirección: Official.Mail@iaea.org.

PUBLICACIONES CONEXAS

El OIEA facilita la aplicación de las normas y, con arreglo a las disposiciones de los artículos III y VIII.C de su Estatuto, pone a disposición información relacionada con las actividades nucleares pacíficas, fomenta su intercambio y sirve de intermediario para ello entre sus Estados Miembros.

Los informes sobre seguridad en las actividades nucleares se publican como **Informes de Seguridad**, en los que se ofrecen ejemplos prácticos y métodos detallados que se pueden utilizar en apoyo de las normas de seguridad.

Existen asimismo otras publicaciones del OIEA relacionadas con la seguridad, como las relativas a la **preparación y respuesta para casos de emergencia**, los **informes sobre evaluación radiológica**, los **informes del INSAG** (Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear), los **informes técnicos** y los **documentos TECDOC**. El OIEA publica asimismo informes sobre accidentes radiológicos, manuales de capacitación y manuales prácticos, así como otras obras especiales relacionadas con la seguridad.

Las publicaciones relacionadas con la seguridad física aparecen en la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*.

La *Colección de Energía Nuclear del OIEA* comprende publicaciones de carácter informativo destinadas a fomentar y facilitar la investigación, el desarrollo y la aplicación práctica de la energía nuclear con fines pacíficos. Incluye informes y guías sobre la situación y los adelantos de las tecnologías, así como experiencias, buenas prácticas y ejemplos prácticos en relación con la energía nucleoelectrónica, el ciclo del combustible nuclear, la gestión de desechos radiactivos y la clausura.

MATERIAL EXPLICATIVO
PARA LA APLICACIÓN DEL
REGLAMENTO DEL OIEA PARA
EL TRANSPORTE SEGURO DE
MATERIALES RADIATIVOS
(EDICIÓN DE 2018)

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

ALBANIA	FINLANDIA	PAÍSES BAJOS, REINO DE LOS
ALEMANIA	FRANCIA	PAKISTÁN
ANGOLA	GABÓN	PALAU
ANTIGUA Y BARBUDA	GAMBIA	PANAMÁ
ARABIA SAUDITA	GEORGIA	PAPUA NUEVA GUINEA
ARGELIA	GHANA	PARAGUAY
ARGENTINA	GRANADA	PERÚ
ARMENIA	GRECIA	POLONIA
AUSTRALIA	GUATEMALA	PORTUGAL
AUSTRIA	GUINEA	QATAR
AZERBAIYÁN	GUYANA	REINO UNIDO DE GRAN BRETAÑA E IRLANDA DEL NORTE
BAHAMAS	HAITÍ	REPÚBLICA ÁRABE SIRIA
BAHREIN	HONDURAS	REPÚBLICA CENTROAFRICANA
BANGLADESH	HUNGRÍA	REPÚBLICA CHECA
BARBADOS	INDIA	REPÚBLICA DE MOLDOVA
BELARÚS	INDONESIA	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DEL CONGO
BÉLGICA	IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA POPULAR LAO
BELICE	IRAQ	REPÚBLICA DOMINICANA
BENIN	IRLANDA	REPÚBLICA UNIDA DE TANZANÍA
BOLIVIA, ESTADO PLURINACIONAL DE	ISLANDIA	RUMANIA
BOSNIA Y HERZEGOVINA	ISLAS COOK	RWANDA
BOTSWANA	ISLAS MARSHALL	SAINT KITTS Y NEVIS
BRASIL	ISRAEL	SAMOA
BRUNEI DARUSSALAM	ITALIA	SAN MARINO
BULGARIA	JAMAICA	SAN VICENTE Y LAS GRANADINAS
BURKINA FASO	JAPÓN	SANTA LUCÍA
BURUNDI	JORDANIA	SANTA SEDE
CABO VERDE	KAZAJSTÁN	SENEGAL
CAMBOYA	KENYA	SERBIA
CAMERÚN	KIRGUISTÁN	SEYCHELLES
CANADÁ	KUWAIT	SIERRA LEONA
COLOMBIA	LESOTHO	SINGAPUR
COMORAS	LETONIA	SOMALIA
CONGO	LÍBANO	SRI LANKA
COREA, REPÚBLICA DE	LIBERIA	SUDÁFRICA
COSTA RICA	LIBIA	SUDÁN
CÔTE D'IVOIRE	LIECHTENSTEIN	SUECIA
CROACIA	LITUANIA	SUIZA
CUBA	LUXEMBURGO	TAILANDIA
CHAD	MACEDONIA DEL NORTE	TAYIKISTÁN
CHILE	MADAGASCAR	TOGO
CHINA	MALASIA	TONGA
CHIPRE	MALAWI	TRINIDAD Y TABAGO
DINAMARCA	MALÍ	TÚNEZ
DJIBOUTI	MALTA	TURKMENISTÁN
DOMINICA	MARRUECOS	TÜRKIYE
ECUADOR	MAURICIO	UCRANIA
EGIPTO	MAURITANIA	UGANDA
EL SALVADOR	MÉXICO	URUGUAY
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MÓNACO	UZBEKISTÁN
ERITREA	MONGOLIA	VANUATU
ESLOVAQUIA	MONTENEGRO	VENEZUELA, REPÚBLICA BOLIVARIANA DE
ESLOVENIA	MOZAMBIQUE	VIET NAM
ESPAÑA	MYANMAR	YEMEN
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	NAMIBIA	ZAMBIA
ESTONIA	NEPAL	ZIMBABWE
ESWATINI	NICARAGUA	
ETIOPÍA	NÍGER	
FEDERACIÓN DE RUSIA	NIGERIA	
FIJI	NORUEGA	
FILIPINAS	NUEVA ZELANDIA	
	OMÁN	

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

COLECCIÓN DE NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA
Nº SSG-26 (Rev. 1)

MATERIAL EXPLICATIVO
PARA LA APLICACIÓN DEL
REGLAMENTO DEL OIEA PARA
EL TRANSPORTE SEGURO DE
MATERIALES RADIATIVOS
(EDICIÓN DE 2018)

GUÍA DE SEGURIDAD ESPECÍFICA

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA, 2025

DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas conforme a lo dispuesto en la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Ginebra) y revisada en 1971 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor para incluir la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Podría ser necesaria una autorización para utilizar textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, en formato impreso o electrónico. Para obtener más detalles a ese respecto, sírvase consultar la siguiente dirección: www.iaea.org/es/publicaciones/derechos-y-permisos. Las solicitudes de información pueden dirigirse a:

Sección Editorial
Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Viena, Austria
Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530
Correo electrónico: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/es/publicaciones

© OIEA, 2025

Impreso por el OIEA en Austria
Enero de 2025
STI/PUB/1953

MATERIAL EXPLICATIVO PARA LA APLICACIÓN DEL
REGLAMENTO DEL OIEA PARA EL TRANSPORTE
SEGURO DE MATERIALES RADIATIVOS (EDICIÓN DE
2018)

OIEA, VIENA, 2025
STI/PUB/1953

ISBN 978-92-0-325324-6 (papel) | ISBN 978-92-0-325424-3 (PDF)
| ISBN 978-92-0-325524-0 (EPUB)
ISSN 1020-5837

PREFACIO

Rafael Mariano Grossi
Director General

El Estatuto del OIEA autoriza al Organismo a “establecer (...) normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad”. Estas son normas que el OIEA debe aplicar a sus operaciones y que los Estados pueden aplicar por conducto de su reglamentación nacional.

El OIEA inició su programa de normas de seguridad en 1958 y desde entonces ha habido muchos avances. En mi calidad de Director General, me comprometo a garantizar que el OIEA mantenga y mejore este conjunto integrado, exhaustivo y coherente de normas de seguridad de alta calidad, actualizadas, fáciles de usar y adecuadas a su finalidad. Su correcta aplicación en el uso de la ciencia y la tecnología nucleares debería ofrecer un alto nivel de protección de las personas y el medio ambiente en todo el mundo y brindar la confianza necesaria para posibilitar el uso continuo de la tecnología nuclear en beneficio de todos.

La seguridad es una responsabilidad nacional respaldada por una serie de convenios y convenciones internacionales. Las normas de seguridad del OIEA constituyen la base de estos instrumentos jurídicos y sirven de referencia mundial para ayudar a las partes a cumplir sus obligaciones. Si bien las normas de seguridad no son jurídicamente vinculantes para los Estados Miembros, se aplican ampliamente. Se han convertido en un punto de referencia indispensable y en un denominador común para la inmensa mayoría de los Estados Miembros que han adoptado estas normas para utilizarlas en la reglamentación nacional con el objetivo de mejorar la seguridad en la generación de energía nucleoelectrónica, los reactores de investigación y las instalaciones del ciclo del combustible, así como en las aplicaciones nucleares en la medicina, la industria, la agricultura y la investigación.

Las normas de seguridad del OIEA se basan en la experiencia práctica de sus Estados Miembros y se elaboran mediante consenso internacional. La participación de los miembros de los comités sobre normas de seguridad, el Comité de Orientación sobre Seguridad Física Nuclear y la Comisión sobre Normas de Seguridad es especialmente importante, y doy las gracias a todas las personas que aportan sus conocimientos y experiencias a esta labor.

El OIEA también utiliza estas normas de seguridad cuando presta asistencia a los Estados Miembros mediante sus misiones de examen y servicios de asesoramiento. Esto ayuda a los Estados Miembros en la aplicación de estas normas y permite el intercambio de experiencias y conocimientos valiosos. Las observaciones recibidas sobre estas misiones y servicios, así como las enseñanzas

extraídas de los eventos y la experiencia en el uso y la aplicación de las normas de seguridad se tienen en cuenta durante su revisión periódica.

Estoy convencido de que las normas de seguridad del OIEA y su aplicación son una aportación inestimable para garantizar un alto nivel de seguridad en el uso de la tecnología nuclear. Animo a todos los Estados Miembros a que promuevan y apliquen estas normas, y a que colaboren con el OIEA para mantener su calidad en el presente y en el futuro.

NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

ANTECEDENTES

La radiactividad es un fenómeno natural y las fuentes naturales de radiación son una característica del medio ambiente. Las radiaciones y las sustancias radiactivas tienen muchas aplicaciones beneficiosas, que van desde la generación de electricidad hasta los usos en la medicina, la industria y la agricultura. Los riesgos radiológicos que estas aplicaciones pueden entrañar para los trabajadores y el público y para el medio ambiente deben evaluarse y, de ser necesario, controlarse.

Para ello es preciso que actividades tales como los usos de la radiación con fines médicos, la explotación de instalaciones nucleares, la producción, el transporte y la utilización de material radiactivo y la gestión de los desechos radiactivos estén sujetas a normas de seguridad.

La reglamentación relativa a la seguridad es una responsabilidad nacional. Sin embargo, los riesgos radiológicos pueden trascender las fronteras nacionales, y la cooperación internacional ayuda a promover y aumentar la seguridad en todo el mundo mediante el intercambio de experiencias y el mejoramiento de la capacidad para controlar los peligros, prevenir los accidentes, responder a las emergencias y mitigar las consecuencias nocivas.

Los Estados tienen una obligación de diligencia, y deben cumplir sus compromisos y obligaciones nacionales e internacionales.

Las normas internacionales de seguridad ayudan a los Estados a cumplir sus obligaciones dimanantes de los principios generales del derecho internacional, como las que se relacionan con la protección del medio ambiente. Las normas internacionales de seguridad también promueven y afirman la confianza en la seguridad, y facilitan el comercio y los intercambios internacionales.

Existe un régimen mundial de seguridad nuclear que es objeto de mejora continua. Las normas de seguridad del OIEA, que apoyan la aplicación de instrumentos internacionales vinculantes y la creación de infraestructuras nacionales de seguridad, son una piedra angular de este régimen mundial. Las normas de seguridad del OIEA constituyen un instrumento útil para las partes contratantes en la evaluación de su desempeño en virtud de esas convenciones internacionales.

LAS NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Las normas de seguridad del OIEA se basan en el Estatuto de este, que autoriza al OIEA a establecer o adoptar, en consulta y, cuando proceda, en colaboración con los órganos competentes de las Naciones Unidas y con los organismos especializados interesados, normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad, y proveer a la aplicación de estas normas.

Con miras a garantizar la protección de las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante, las normas de seguridad del OIEA establecen principios fundamentales de seguridad, requisitos y medidas para controlar la exposición de las personas a las radiaciones y la emisión de materiales radiactivos al medio ambiente, reducir la probabilidad de sucesos que puedan dar lugar a una pérdida de control sobre el núcleo de un reactor nuclear, una reacción nuclear en cadena, una fuente radiactiva o cualquier otra fuente de radiación, y mitigar las consecuencias de esos sucesos si se producen. Las normas se aplican a instalaciones y actividades que dan lugar a riesgos radiológicos, comprendidas las instalaciones nucleares, el uso de la radiación y de las fuentes radiactivas, el transporte de materiales radiactivos y la gestión de los desechos radiactivos.

Las medidas de seguridad tecnológica y las medidas de seguridad física tienen en común la finalidad de proteger la vida y la salud humanas y el medio ambiente. Las medidas de seguridad tecnológica y de seguridad física¹ deben diseñarse y aplicarse en forma integrada, de modo que las medidas de seguridad física no comprometan la seguridad tecnológica y las medidas de seguridad tecnológica no comprometan la seguridad física.

Las normas de seguridad del OIEA reflejan un consenso internacional con respecto a lo que constituye un alto grado de seguridad para proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. Las normas se publican en la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, que comprende tres categorías (véase la fig. 1).

Nociones Fundamentales de Seguridad

Las Nociones Fundamentales de Seguridad presentan los objetivos y principios fundamentales de protección y seguridad, y constituyen la base de los requisitos de seguridad.

¹ Véanse también las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*.



Fig. 1. Estructura a largo plazo de la Colección de Normas de Seguridad del OIEA

Requisitos de Seguridad

Un conjunto integrado y coherente de requisitos de seguridad establece los requisitos que se han de cumplir para garantizar la protección de las personas y el medio ambiente, tanto en el presente como en el futuro. Los requisitos se rigen por los objetivos y principios de las Nociones Fundamentales de Seguridad. Si los requisitos no se cumplen, deben adoptarse medidas para alcanzar o restablecer el grado de seguridad requerido. El formato y el estilo de los requisitos facilitan su uso para establecer, de forma armonizada, un marco nacional de reglamentación. En los requisitos de seguridad se emplean formas verbales imperativas, junto con las condiciones conexas que deben cumplirse. Muchos de los requisitos no se dirigen a una parte en particular, lo que significa que incumbe cumplirlos a las partes que corresponda.

Guías de Seguridad

Las guías de seguridad ofrecen recomendaciones y orientación sobre cómo cumplir los requisitos de seguridad, lo que indica un consenso internacional en el sentido de que es necesario adoptar las medidas recomendadas (u otras medidas equivalentes). Las guías de seguridad contienen ejemplos de buenas prácticas

internacionales y dan cuenta cada vez más de las mejores prácticas que existen para ayudar a los usuarios que tratan de alcanzar altos grados de seguridad. En la formulación de las recomendaciones de las guías de seguridad se emplean formas verbales condicionales.

APLICACIÓN DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Los principales usuarios de las normas de seguridad en los Estados Miembros del OIEA son órganos reguladores y otras autoridades nacionales competentes. También hacen uso de las normas de seguridad del OIEA organizaciones copatrocinadoras y muchas organizaciones que diseñan, construyen y explotan instalaciones nucleares, así como organizaciones en las que se usan radiaciones o fuentes radiactivas.

Las normas de seguridad del OIEA se aplican, según el caso, a lo largo de toda la vida de todas las instalaciones y actividades —existentes y nuevas— que tienen fines pacíficos, y a las medidas protectoras destinadas a reducir los riesgos existentes en relación con las radiaciones. Los Estados también pueden usarlas como referencia para sus reglamentos nacionales relativos a instalaciones y actividades.

De conformidad con el Estatuto del OIEA, las normas de seguridad tienen carácter vinculante para el OIEA en relación con sus propias operaciones, así como para los Estados en relación con las operaciones realizadas con la asistencia del OIEA.

Las normas de seguridad del OIEA también constituyen la base de los servicios de examen de la seguridad que este brinda; el OIEA recurre a esos servicios en apoyo de la creación de capacidad, incluida la elaboración de planes de enseñanza y la creación de cursos de capacitación.

Los convenios internacionales contienen requisitos similares a los que figuran en las normas de seguridad del OIEA y tienen carácter vinculante para las partes contratantes. Las normas de seguridad del OIEA, complementadas por convenios internacionales, normas de la industria y requisitos nacionales detallados, forman una base coherente para la protección de las personas y el medio ambiente. Existen también algunos aspectos de la seguridad especiales que se deben evaluar a nivel nacional. Por ejemplo, muchas de las normas de seguridad del OIEA, en particular las que tratan aspectos relativos a la seguridad en la planificación o el diseño, se conciben con el fin de aplicarlas principalmente a nuevas instalaciones y actividades. Es posible que algunas instalaciones existentes construidas conforme a normas anteriores no cumplan plenamente los requisitos especificados en las normas de seguridad del OIEA. Corresponde a

cada Estado decidir el modo en que deberán aplicarse las normas de seguridad del OIEA a esas instalaciones.

Las consideraciones científicas en las que descansan las normas de seguridad del OIEA proporcionan una base objetiva para la adopción de decisiones acerca de la seguridad; sin embargo, las instancias decisorias deben también formarse opiniones fundamentadas y determinar la mejor manera de equilibrar los beneficios de una medida o actividad con los riesgos radiológicos conexos y cualquier otro efecto perjudicial a que pueda dar lugar esa medida o actividad.

PROCESO DE ELABORACIÓN DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

En la elaboración y el examen de las normas de seguridad participan la Secretaría del OIEA y cinco comités de normas de seguridad, que se ocupan de la preparación y respuesta para casos de emergencia (EPreSC), la seguridad nuclear (NUSSC), la seguridad radiológica (RASSC), la seguridad de los desechos radiactivos (WASSC) y el transporte seguro de materiales radiactivos (TRANSSC), así como la Comisión sobre Normas de Seguridad (CSS), que supervisa el programa de normas de seguridad del OIEA (véase la fig. 2).

Todos los Estados Miembros del OIEA pueden designar expertos para que participen en los comités de normas de seguridad y formular observaciones sobre los proyectos de normas. Los miembros de la Comisión sobre Normas de Seguridad son designados por el Director General y figuran entre ellos altos funcionarios gubernamentales encargados del establecimiento de normas nacionales.

Se ha creado un sistema de gestión para los procesos de planificación, desarrollo, examen, revisión y establecimiento de normas de seguridad del OIEA. Ese sistema articula el mandato del OIEA, la visión relativa a la futura aplicación de las normas de seguridad, las políticas y las estrategias, y las correspondientes funciones y responsabilidades.

INTERACCIÓN CON OTRAS ORGANIZACIONES INTERNACIONALES

En la elaboración de las normas de seguridad del OIEA se tienen en cuenta las conclusiones del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y las recomendaciones de órganos internacionales de expertos, en particular la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Algunas normas de seguridad se elaboran

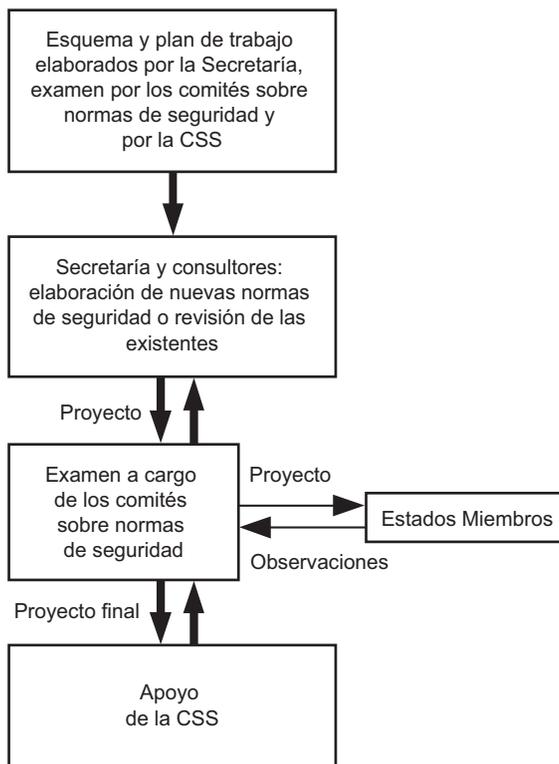


Fig. 2. Proceso de elaboración de una nueva norma de seguridad o de revisión de una norma existente

en cooperación con otros órganos del sistema de las Naciones Unidas u otros organismos especializados, entre ellos la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Organización Internacional del Trabajo, la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, la Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud.

INTERPRETACIÓN DEL TEXTO

Los términos relacionados con la seguridad y con la seguridad física nuclear se interpretarán como se definen en el *Glosario de seguridad nuclear tecnológica y física del OIEA* (véase la dirección <https://www.iaea.org/resources/publications/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary>). En el caso de las guías de seguridad, el texto en inglés es la versión autorizada.

En la Introducción que figura en la sección 1 de cada publicación se presentan los antecedentes y el contexto de cada norma de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, así como sus objetivos, alcance y estructura.

Todo el material para el cual no existe un lugar adecuado en el cuerpo del texto (por ejemplo, información de carácter complementario o independiente del texto principal, que se incluye en apoyo de declaraciones que figuran en el texto principal, o que describe métodos de cálculo, procedimientos o límites y condiciones) puede presentarse en apéndices o anexos.

Cuando figuran en la publicación, los apéndices se consideran parte integrante de la norma de seguridad. El material que figura en un apéndice tiene el mismo valor que el texto principal y el OIEA asume su autoría. Los anexos y notas de pie de página del texto principal, en su caso, se utilizan para proporcionar ejemplos prácticos o información o explicaciones adicionales. Los anexos y notas de pie de página no son parte integrante del texto principal. La información publicada por el OIEA en forma de anexos no es necesariamente de su autoría; la información que corresponda a otros autores podrá presentarse en forma de anexos. La información procedente de otras fuentes que se presenta en los anexos ha sido extraída y adaptada para que sea de utilidad general.

ÍNDICE

SECCIÓN I:	INTRODUCCIÓN.....	1
	Antecedentes (101.1–103.8).....	1
	Objetivo (104.1).....	5
	Alcance (106.1–110.1).....	6
	Referencias de la sección I.....	12
SECCIÓN II:	DEFINICIONES.....	14
	Referencias de la sección II.....	39
SECCIÓN III:	DISPOSICIONES GENERALES.....	41
	Protección radiológica (301.1–303.5).....	41
	Respuesta a emergencias (304.1–305.3).....	46
	Sistema de gestión (306.1–306.5).....	47
	Verificación del cumplimiento (307.1–308.2).....	49
	Incumplimiento (309.1–309.5).....	51
	Arreglo especial (310.1–310.4).....	53
	Capacitación (311.1–314.1).....	54
	Referencias de la sección III.....	56
SECCIÓN IV:	LÍMITES DE ACTIVIDAD Y CLASIFICACIÓN.....	59
	Disposiciones generales (401.1).....	59
	Valores básicos de los radionucleidos (402.1–402.11).....	60
	Determinación de los valores básicos de los radionucleidos (403.1–407.2).....	62
	Clasificación de los materiales (409.1–420.8).....	66
	Clasificación de los bultos (422.1–433.3).....	84
	Referencias de la sección IV.....	89
SECCIÓN V:	REQUISITOS Y CONTROLES APLICABLES AL TRANSPORTE.....	92
	Requisitos antes de la primera expedición (501.1–501.10).....	92
	Requisitos antes de cada expedición (502.1–503.10).....	94
	Transporte de otras mercancías (505.1–506.2).....	98

Otras propiedades peligrosas del contenido (507.1–507.9)	99
Requisitos y controles relativos a la contaminación y a los bultos que presenten fugas (508.1–514.2).	101
Requisitos y controles para el transporte de bultos exceptuados (515.1–516.5)	108
Requisitos y controles para el transporte de materiales de baja actividad específica y de objetos contaminados en la superficie en bultos industriales o sin embalar (517.1–522.4).	109
Determinación del índice de transporte (IT) (523.1–524.1)	113
Determinación del índice de seguridad con respecto a la criticidad correspondiente a remesas, contenedores y sobreenvasos (525.1) . .	115
Límites de índice de transporte, del índice de seguridad con respecto a la criticidad y de las tasas de dosis correspondientes a bultos y sobreenvasos (526.1–528.3)	115
Categorías (529.1–529.5)	117
Marcado, etiquetado y rotulado (530.1–544.1)	118
Obligaciones del remitente (545.1–561.1)	126
Transporte y almacenamiento en tránsito (562.1–581.1).	129
Formalidades aduaneras (582.1–582.5)	145
Remesas que no puedan entregarse (583.1)	146
Conservación y disponibilidad de los documentos de transporte por parte de los transportistas (584.1).	147
Referencias de la sección V	147

SECCIÓN VI: REQUISITOS RELATIVOS A LOS MATERIALES
 RADIATIVOS Y A LOS EMBALAJES Y BULTOS.. 151

Requisitos relativos a los materiales radiactivos (602.1–605.9)	151
Requisitos relativos a los materiales exceptuados de la clasificación como fisibles (606.1–606.10).	155
Requisitos generales relativos a todos los embalajes y bultos (607.1–617.2)	159
Requisitos complementarios relativos a los bultos transportados por vía aérea (619.1–621.3).	165
Requisitos relativos a los bultos industriales (623.1–630.2)	167
Requisitos relativos a los bultos que contengan hexafluoruro de uranio (631.1–634.4)	174
Requisitos relativos a los bultos del Tipo A (636.1–651.3)	177
Requisitos relativos a los bultos del Tipo B(U) (652.1–666.3)	184
Requisitos relativos a los bultos del Tipo B(M) (667.1–668.6)	206
Requisitos relativos a los bultos del Tipo C (669.1–672.4).	207

Requisitos relativos a los bultos que contengan materiales fisibles (673.1–685.5)	209
Determinación del índice de seguridad con respecto a la criticidad (ISC) de los bultos (686.1–686.3)	230
Referencias de la sección VI	231
SECCIÓN VII: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.	236
Demostración del cumplimiento (701.1–702.2	236
Ensayos para los materiales radiactivos en forma especial (704.1–711.2).	245
Ensayos de materiales radiactivos de baja dispersión (712.1–712.4) .	247
Ensayos de bultos (713.1–737.14)	248
Referencias de la sección VII	286
SECCIÓN VIII: REQUISITOS ADMINISTRATIVOS Y DE APROBACIÓN.	290
Disposiciones generales (801.1–802.9)	290
Aprobación de los materiales radiactivos en forma especial y de los materiales radiactivos de baja dispersión (803.1–804.1)	293
Aprobación de los diseños de bultos (807.1–815.1).	293
Disposiciones de transición (819.1–823.3).	297
Notificación y registro de números de serie (824.1–824.3)	303
Aprobación de expediciones (825.1–826.2).	303
Aprobación de expediciones en virtud de arreglos especiales (829.1, 830.1)	305
Certificados de aprobación de la autoridad competente (832.1–832.3)	306
Contenido de los certificados de aprobación (834.1–838.1)	307
Validación de los certificados (840.1–840.3)	316
Referencias de la sección VIII	317
APÉNDICE I: EL SISTEMA Q PARA EL CÁLCULO Y APLICACIÓN DE LOS VALORES A_1 Y A_2.	319
APÉNDICE II: PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS, COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA..	391

APÉNDICE III:	EJEMPLOS DE CÁLCULOS PARA ESTABLECER DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEPARACIÓN.	440
APÉNDICE IV:	ESTIBA Y SUJECCIÓN DE BULTOS DURANTE EL TRANSPORTE.	451
APÉNDICE V:	DIRECTRICES PARA EL DISEÑO SEGURO DE LOS BULTOS CONTRA LA FRACTURA FRÁGIL...	464
APÉNDICE VI:	EVALUACIONES DE SEGURIDAD CON RESPECTO A LA CRITICIDAD.	485
APÉNDICE VII:	ORIENTACIONES PARA CALCULAR LA INCORPORACIÓN DE ACTIVIDAD EN EL TRANSPORTE DE OCS-III.	516
APÉNDICE VIII:	TRANSPORTE EN DETERMINADAS SITUACIONES.	525
	COLABORADORES EN LA PREPARACIÓN Y REVISIÓN.	529

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1:	Factores de corrección según las dimensiones del bulto y del detector	22
CUADRO 2:	Ejemplos de separación entre diferentes clases	133
CUADRO 3:	Comparación de los cuatro métodos de ensayo por fugas volumétricas recomendados por Aston y otros.	152
CUADRO 4:	Lista de códigos VRI por países	308
CUADRO I.1:	Coefficientes de dosis por inmersión	334
CUADRO I.2:	Límites del contenido de bultos del Tipo A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2	347
CUADRO II.1:	Período de semidesintegración y actividad específica de los radionucleidos	391
CUADRO II.2:	Coefficientes de dosis y de tasa de dosis de los radionucleidos	415
CUADRO II.3:	Valores de actividad específica del uranio con distintos niveles de enriquecimiento	438
CUADRO III.1:	Factores de transmisión	444
CUADRO III.2:	Variación de la distancia de separación en función del índice de transporte de un único grupo de bultos estibado debajo de la cubierta principal de una aeronave de pasajeros	446
CUADRO III.3:	Variación de la distancia de separación en función del índice de transporte para la estiba en la cubierta principal de aeronaves combi o de carga	449
CUADRO IV.1:	Valores de aceleración para el análisis de resistencia mecánica.....	457
CUADRO IV.2:	Valores de aceleración para el análisis de resistencia mecánica de bultos específicos	459
CUADRO IV.3:	Valores de aceleración para el análisis de fatiga	460

Sección I

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

101.1. La radiación y las sustancias radiactivas son elementos naturales y permanentes del medio ambiente y, por tanto, los riesgos asociados con la exposición a la radiación solo pueden restringirse, pero no eliminarse por completo. Además, el empleo de la radiación artificial está muy extendido. Las fuentes de radiación son indispensables para la atención de la salud en la actualidad. La utilización de la energía nuclear y las aplicaciones de sus subproductos (por ejemplo, radiación y sustancias radiactivas) siguen aumentando a nivel mundial.

101.2. Se ha reconocido que la exposición a altos niveles de radiación puede causar daños a los tejidos del cuerpo humano y que la exposición a la radiación podría causar la inducción de tumores malignos. Por tanto, es fundamental que las actividades que entrañan la exposición a la radiación, como el transporte de materiales radiactivos, estén sujetas a ciertas normas de seguridad con objeto de proteger a las personas expuestas a la radiación. Las normas de seguridad radiológica del OIEA aportan un instrumento de consenso internacional para este fin.

101.3. La aceptación por la sociedad de los riesgos asociados a la radiación depende de los beneficios que se obtengan del uso de las aplicaciones relacionadas con la radiación. El Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos (el Reglamento de Transporte¹) se basa en la información derivada de extensas actividades de investigación y desarrollo que han llevado a cabo organizaciones científicas y técnicas, a nivel nacional e internacional, con respecto a los efectos de la radiación en la salud y a las técnicas para el diseño seguro de bultos de transporte, así como en la experiencia adquirida en las operaciones de transporte. En el Reglamento de Transporte no solo se utilizan elementos puramente científicos; también se hacen juicios acerca de la importancia relativa de los riesgos de distintos tipos y del establecimiento de un equilibrio entre los riesgos y los beneficios.

¹ En la presente publicación la referencia al “Reglamento de Transporte” siempre deberá remitir a la última edición, salvo que se indique lo contrario.

101.4. Sin duda se producirán algunas exposiciones a la radiación en condiciones de transporte rutinarias y su magnitud será previsible. Asimismo, pueden preverse situaciones en que podría darse una exposición pero sin certeza de que ella realmente se produzca. Esas exposiciones imprevistas pero factibles se denominan “exposiciones potenciales”. Las exposiciones potenciales pueden convertirse en exposiciones reales si ocurre la situación imprevista. La optimización de la protección radiológica exige que se tengan en cuenta tanto las exposiciones normales como potenciales. Si pueden preverse esas situaciones, podrá estimarse la probabilidad de que se produzcan con la consiguiente exposición a la radiación. En las exposiciones normales la optimización exige que se tengan en cuenta la magnitud prevista de las dosis individuales y el número de personas expuestas; además, en las exposiciones potenciales también se debe tener en cuenta la probabilidad de que ocurran accidentes o sucesos, o secuencias de sucesos.

101.5. El medio especificado en el Reglamento de Transporte para controlar las exposiciones normales es la restricción de las dosis recibidas. El medio primordial para controlar las exposiciones potenciales es el diseño de los bultos de transporte y de procedimientos operacionales que satisfagan los requisitos relativos a las tasas de dosis, la posible contaminación externa, la emisión de actividad y la prevención de la criticidad. Tales medios también están destinados a reducir la probabilidad de sucesos que puedan originar exposiciones imprevistas y restringir la magnitud de las exposiciones que puedan producirse si esos sucesos ocurriesen.

101.6. El transporte de materiales radiactivos se ha establecido como factor necesario en los programas nacionales e internacionales para el uso de los materiales radiactivos en la medicina, la agricultura, la industria, la investigación y la generación de energía nucleoelectrónica. Por lo tanto, se reconoce en general que el transporte de material radiactivo está ampliamente justificado.

101.7. Los límites de dosis establecidos para los miembros del público en la publicación *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSR Part 3)* [1], se aplican a la persona representativa de la población y a la dosis individual total recibida de todas las fuentes de exposición, excluidas la radiación natural de fondo y la exposición médica de las personas. Para tener en cuenta otras fuentes de exposición, en la definición de las condiciones de exposición de la persona representativa los requisitos del Reglamento de Transporte se formulan en la práctica sobre la base de supuestos de carácter conservador con el fin de proporcionar garantías razonables de

que las dosis reales recibidas en el transporte de esos bultos no excederán de determinadas fracciones de los límites de dosis.

101.8. La responsabilidad con respecto al desarrollo y optimización de los procedimientos operacionales y el cumplimiento del Reglamento de Transporte recae fundamentalmente en el explotador.

101.9. El suministro de información y capacitación forma parte integrante de todo sistema de protección radiológica. El nivel de instrucción debe estar en proporción con la índole y el tipo de actividad que se realice.

101.10. Véanse las disposiciones sobre la capacitación en los párrafos 311 a 315 del Reglamento de Transporte.

101.11. El sistema de gestión estipulado en el Reglamento de Transporte debería establecerse y aplicarse de manera oportuna antes de que comiencen las operaciones de transporte. Cuando proceda, la autoridad competente verificará si se aplica ese sistema de gestión de conformidad con el Reglamento de Transporte.

103.1. Cuando se realizan expediciones nacionales o internacionales es necesario consultar la reglamentación aplicable a la modalidad de transporte en particular que vaya a ser utilizada para los países a los que se efectuará la expedición. Aunque la mayor parte de los requisitos del transporte modal están en conformidad con el Reglamento de Transporte, puede haber diferencias en la asignación de responsabilidades para algunas actividades específicas. En el caso de envíos aéreos, especialmente con respecto a las discrepancias entre los Estados y operadores, deberían consultarse las Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) [2] y la Reglamentación sobre Mercancías Peligrosas de la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA) [3]. Para las expediciones por vía marítima debe consultarse el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG) de la Organización Marítima Internacional (OMI) [4]. Algunos países han adoptado el Reglamento de Transporte como referencia, mientras que otros lo han incorporado en su normativa nacional, posiblemente con algunos pequeños cambios.

103.2. El Reglamento de Transporte se ha elaborado a lo largo de muchos años para lograr consenso entre los Estados Miembros del OIEA y las organizaciones internacionales de transporte y normalización (la OMI, la OACI, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, la Unión Postal Universal y la Organización Internacional de Normalización (ISO), entre otras). Para establecer

el Reglamento de Transporte estas organizaciones utilizaron principios científicos, datos e investigaciones internacionalmente aceptados. El Reglamento de Transporte tiene por objeto proporcionar a los países y las organizaciones de reglamentación del transporte modal requisitos de transporte basados en el consenso que protejan la salud y la seguridad de los trabajadores, el público y el medio ambiente, y posibiliten el comercio internacional.

103.3. Aunque el Reglamento de Transporte no es vinculante en lo que se refiere a la adopción o aplicación por los Estados, la adopción e incorporación del Reglamento de Transporte por las organizaciones internacionales de reglamentación del transporte hace obligatorio su cumplimiento por parte de los Estados.

103.4. El Reglamento de Transporte se basa, por tanto, en la presunción de que se ha establecido una infraestructura nacional que permita al gobierno cumplir sus responsabilidades en relación con la seguridad del transporte.

103.5. El actual nivel de seguridad en el transporte de materiales radiactivos se ha alcanzado a escala mundial mediante la adopción del Reglamento de Transporte en las reglamentaciones internacionales, regionales y modales para el transporte de todas las mercancías peligrosas, en que los materiales radiactivos son solo una (Clase 7) de las nueve clases de mercancías peligrosas. En publicaciones afines se explica el Reglamento de Transporte, se brinda asesoramiento sobre cómo puede aplicarse, y en las referencias [5 a 8] se exponen en mayor detalle temas como la respuesta a emergencias, la verificación del cumplimiento, el sistema de gestión y las listas de disposiciones.

103.6. También se recomienda que los Estados Miembros adopten el Reglamento de Transporte en su reglamentación nacional sobre el transporte de mercancías peligrosas. Incluso los Estados Miembros que no poseen una industria nucleoelectrónica necesitan establecer requisitos para controlar con seguridad el transporte de materiales radiactivos de uso común, por ejemplo, en aplicaciones médicas, industriales o de investigación.

103.7. Los elementos esenciales de una infraestructura nacional de seguridad del transporte son: la legislación y los reglamentos; una autoridad competente facultada para autorizar e inspeccionar actividades reglamentadas y hacer cumplir la legislación y los reglamentos; recursos financieros suficientes, y plantilla suficiente de personal capacitado. La infraestructura también debe proporcionar medios para hacer frente a las preocupaciones de la sociedad que rebasan el marco de las responsabilidades legales de las personas autorizadas a realizar el transporte de materiales radiactivos.

103.8. En la edición del Reglamento de Transporte de 2018 (la edición actual) se introducen los siguientes cambios importantes en comparación con la edición de 2012 (la edición anterior):

- a) se especifican los requisitos para los bultos (“cofres de doble uso”) destinados al transporte después del almacenamiento;
- b) se prevén disposiciones para la expedición de objetos contaminados en la superficie del grupo III (OCS-III) (es decir, el transporte de objetos grandes sin embalaje);
- c) se especifica el requisito de que el diseño del bulto tenga en cuenta los mecanismos de envejecimiento;
- d) se refuerza el requisito de protección del tapón en los cilindros de hexafluoruro de uranio (UF_6);
- e) se suprime el ensayo de lixiviación de los requisitos para los materiales de baja actividad específica del grupo III (materiales BAE-III);
- f) se incluyen otros siete radionucleidos en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte.

En la edición del Reglamento de Transporte de 2018 se prevén disposiciones transitorias para los embalajes diseñados con arreglo a las ediciones del Reglamento de Transporte de 1985, 1996 y posteriores, hasta la de 2012. Las disposiciones transitorias de la edición de 1973 son obsoletas.

OBJETIVO

104.1. En general, el Reglamento de Transporte tiene como objetivo proporcionar un nivel de seguridad uniforme y adecuado que sea proporcional al peligro inherente que presentan los materiales radiactivos durante su transporte. Dentro de lo posible, los elementos de seguridad deben ser incluidos en el diseño del bulto. Al depositar la confianza primordial en el diseño y la preparación del bulto, queda reducida la necesidad de adoptar medidas especiales durante el transporte (es decir, por parte del transportista). Sin embargo, se requieren algunos controles operacionales por motivos de seguridad. Además, deben tomarse las medidas apropiadas para planificar y preparar la respuesta a emergencias con el fin de mitigar las consecuencias radiológicas que puedan producirse en el caso de accidentes razonablemente previsibles (incluidos sucesos de una gravedad superior a la de las condiciones de accidente durante el transporte mencionadas en el párr. 106.5).

ALCANCE

106.1. El transporte incluye el acarreo por el transportista habitual o por el propietario de los materiales radiactivos (o un empleado del propietario) cuando el acarreo es inherente a la utilización de los materiales radiactivos, como es el caso de vehículos que transportan dispositivos de radiografía que son conducidos por el radiógrafo hacia y desde el lugar de las operaciones, vehículos que transportan sondas medidoras de densidad hacia y desde el lugar de la construcción y vehículos para la exploración de pozos petrolíferos que transportan dispositivos de medición que contienen materiales radiactivos y materiales radiactivos utilizados para su inyección en pozos petrolíferos.

106.2 El almacenamiento en tránsito es una parte del transporte que está regulada por el Reglamento de Transporte. El almacenamiento en un bulto de transporte, que puede prolongarse durante varios años o décadas, significa la retención de material radiactivo en un bulto dispuesto para su contención, con la intención de recuperarlo (en relación con el combustible gastado, véase también la publicación *Storage of Spent Nuclear Fuel (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° SSG-15 (Rev. 1))* [9] y, en el caso de los desechos radiactivos, véase también la publicación *Almacenamiento de desechos radiactivos (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° WS-G-6.1)* [10]. El almacenamiento anterior a la expedición se rige por los reglamentos de almacenamiento internacionales o nacionales y queda fuera del ámbito de aplicación del Reglamento de Transporte. La expedición después del almacenamiento se rige por el Reglamento de Transporte; se trata de una operación de transporte específica que requiere tomar en consideración el envejecimiento de los componentes del bulto, así como los cambios habidos en el Reglamento de Transporte y en los conocimientos técnicos durante el período de almacenamiento.

106.3. El escenario mencionado como “condiciones de transporte rutinarias” tiene el propósito de abarcar el uso y transporte cotidianos de bultos cuando no hay ningún percance menor ni incidente que dañe los bultos (libre de incidentes). Sin embargo, es preciso que un bulto, incluidos sus sistemas de retención internos y externos, sea capaz de soportar los efectos de las aceleraciones durante el transporte que se señalan en el párrafo 613.1. (En los cuadros IV.1 y IV.2 del apéndice IV se explican en detalle las aceleraciones típicas que pueden aplicarse).

106.4. El escenario mencionado como “condiciones de transporte normales” tiene la finalidad de abarcar desde las situaciones en que el bulto está sometido a percances o incidentes (pequeños percances) de diversa gravedad hasta los requisitos de los ensayos aplicables al tipo de bulto de que se trate (Tipo BI-2,

Tipo BI-3 o Tipo A). Por ejemplo, las condiciones normales de un ensayo de caída libre para un bulto del Tipo A tienen por objeto simular el tipo de percance que experimentaría un bulto si cayese de la plataforma de un vehículo o se dejase caer durante su manipulación. En la mayoría de los casos, los bultos quedarían relativamente intactos y continuarían su viaje después de haber sufrido esos pequeños percances.

106.5. El escenario mencionado como “condiciones de accidente durante el transporte” está encaminada a abarcar situaciones en que el bulto está sometido a incidentes o accidentes cuya gravedad es mayor que la que abarcan las condiciones de transporte normales hasta los niveles de gravedad máximos impuestos en los requisitos de ensayo aplicables al tipo de bulto de que se trate (es decir, hasta la gravedad de daños resultante de los ensayos aplicables para las condiciones de accidente de transporte detalladas en los párrafos 726 a 737 del Reglamento de Transporte). En el supuesto de que probablemente se utilicen bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) en todas las modalidades de transporte, los requisitos de ensayo establecidos para los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) se han concebido para tener en cuenta una amplia diversidad de accidentes de transporte por vía terrestre, marítima y aérea que pueden exponer los bultos a fuerzas dinámicas graves, si bien los niveles de gravedad indicados por el criterio de ensayo no tienen la finalidad de representar una situación en que se produce el peor accidente posible. Las fuerzas potencialmente más graves producidas en un accidente de transporte aéreo se tienen en cuenta en los requisitos de los ensayos correspondientes al Tipo C.

107.1. El Reglamento de Transporte no está concebido para ser aplicado a lo siguiente:

- a) el material radiactivo que forma parte integrante de un medio de transporte, como los contrapesos de uranio empobrecido o las señales de salida de tritio que se utilizan en las aeronaves;
- b) el material radiactivo presente en personas o animales con fines médicos o veterinarios, como los marcapasos cardíacos o el material radiactivo introducido en seres humanos o en animales durante procedimientos de diagnóstico o terapéuticos;
- c) el material radiactivo en o sobre una persona que va a ser transportada para recibir tratamiento médico por haber ingerido accidental o deliberadamente material radiactivo o por haber estado expuesta a contaminación.

El médico, el profesional sanitario habilitado o el veterinario deben brindar el asesoramiento adecuado en relación con la seguridad radiológica. Debe

contemplarse la posibilidad de descontaminar la piel de las personas antes de transportarlas y velarse por que la demora en el transporte de la persona a causa de la descontaminación no acarree otro peligro para la salud de la persona.

107.2. Los productos de consumo son artículos que están a disposición del público como usuario final sin más control o restricción. Puede tratarse de dispositivos como detectores de humo, cuadrantes luminosos o tubos generadores de iones que contengan pequeñas cantidades de sustancias radiactivas. Los productos de consumo quedan fuera del ámbito de aplicación del Reglamento de Transporte solo después de su venta al usuario final. Todo transporte, incluido el uso de medios de transporte entre los fabricantes, los distribuidores y los minoristas, entra en el ámbito de aplicación del Reglamento de Transporte para garantizar que no se transporten de manera no regulada grandes cantidades de productos de consumo individualmente exentos.

107.3. Los principios de exención y su aplicación al transporte de materiales radiactivos se abordan en el párrafo 402 del Reglamento de Transporte.

107.4. En el ámbito de aplicación del Reglamento de Transporte no se incluyen los minerales ni los materiales naturales o procesados que contienen radionucleidos naturales siempre que la concentración de actividad de los materiales no supere en 10 veces el valor de concentración de actividad fijado para su exención (conforme al cuadro 2 del Reglamento de Transporte, o calculado con arreglo a los párrafos 403 a 407 del Reglamento de Transporte). Los materiales y los minerales naturales son toda materia física que proceda del suelo; también se consideran materiales naturales los minerales que pueden extraerse de ellos. Algunos ejemplos de materiales y minerales naturales son la tantalita y las escorias de estaño, el fosfato, la potasa, el circonio (arenas de circón) y otros materiales para las industrias cerámicas, las cascarillas de óxido de las industrias de extracción de petróleo y gas, el carbón y las cenizas de carbón, los desechos de la extracción de tierras raras, y los minerales y materiales de desecho procedentes de las minas de uranio.

El proyecto coordinado de investigación (PCI) del OIEA relativo al control reglamentario para el transporte seguro de materiales radiactivos naturales (NORM) [11] llegó a la conclusión de que esa exclusión no dependerá de la utilización previa o prevista de los materiales (es decir, si esos materiales se habrán de utilizar por sus nucleidos radiactivos, ya sean fisibles o no). En el marco de este PCI, los modelos y el análisis de hipótesis de transporte realistas mostraron que, en los casos en que se aplique el factor de 10 veces el valor de concentración de actividad fijado para la exención de esos materiales,

la dosis anual máxima debida al transporte no reglamentado de los materiales normalmente sería muy inferior a 1 mSv. Según el párrafo 71 de la Publicación N° 104 de la ICRP [12], el criterio de dosis anual de 10 μ Sv no se aplica a las situaciones de exposición a fuentes naturales, ya que este valor está al menos uno o dos órdenes de magnitud por debajo de la variabilidad de la radiación de fondo. En la publicación GSR Part 3 [1] se establece un límite de dosis anual de 1 mSv para la exención aplicable a los NORM. El PCI llegó a la conclusión de que la exclusión es apropiada desde el punto de vista de la protección radiológica y de la reglamentación basada en los riesgos, ya que la posible dosis recibida de los materiales durante su transporte depende de la concentración de actividad de los materiales. En los párrafos 403 a 407 del Reglamento de Transporte se proporcionan orientaciones que sirven de referencia para utilizar el cuadro 2 con el fin de determinar los niveles de actividad y los valores básicos de los nucleidos

En los minerales y otros materiales naturales o procesados que contienen radionucleidos naturales del uranio-radio o de la cadena de desintegración del torio, los valores básicos de los nucleidos con respecto a la concentración de actividad para la exención que figura en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte en relación con el U(nat) y el Th(nat) solo pueden utilizarse si los radionucleidos están en equilibrio secular. Si no es así, esto significa que, debido a actividades de procesamiento como la lixiviación química o el tratamiento térmico, no existe el estado de equilibrio natural radiactivo y que para calcular la concentración de actividad para la exención debe utilizarse la fórmula aplicable a las mezclas de radionucleidos enunciada en el párrafo 405 del Reglamento de Transporte.

Por ejemplo, en lo que concierne a la cadena de desintegración del Th 232, el valor de la concentración de actividad para el material exento correspondiente al Th 228 en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte es inferior en un factor de 10 al valor del Ra 228; en consecuencia, el valor de la concentración de actividad global para el material exento depende predominantemente de la fracción de Th 228 presente en la mezcla de nucleidos. Esta cuestión se ilustra mejor con el ejemplo siguiente:

- En el proceso de extracción del petróleo y el gas natural se produce oxidación en las paredes internas de las tuberías de producción. En la mayoría de los casos las cascarillas de óxido son de sulfato de bario, cuyos isótopos de radio (Ra 226 y Ra 228) se coprecipitan sin la presencia de los nucleidos predecesores (U 238, Th 232) en el depósito de óxido. En consecuencia, se trastorna el equilibrio secular de la cadena de desintegración.
- Mientras que el Pb 210 y el Po 210 recrecen lentamente a partir del Ra 226 (el equilibrio se alcanza después de unos 100 años), el Th 228 también recrece,

y alcanza finalmente un equilibrio 1,46 veces mayor que la concentración de actividad del Ra 228 en unos cuantos años. Por ejemplo, la inserción en la fórmula del párrafo 405 del Reglamento de Transporte de las concentraciones de actividad medidas que se indican en la referencia [13] se traduce en la siguiente concentración de actividad para la exención (actividad total):

$$f(\text{Ra } 226) + f(\text{Pb } 210) + f(\text{Po } 210) + f(\text{Ra } 228) = 0,84, \text{ y } f(\text{Th } 228) = 0,16$$

donde f es la fracción de concentración de actividad de cada radionucleido.

- De ello se deduce que $0,84/10 + 0,16/1 = 0,244$ y que $1/0,244 = 4,1$ Bq/g es la concentración de actividad para la exención (es decir, la actividad total de todos los radionucleidos de interés, donde 10 Bq/g es el límite de concentración de actividad del material para la exención en el caso del Ra 226, el Pb 210, el Po 210 y el Ra 228, y 1 Bq/g es el límite de concentración de actividad del material para la exención en el caso del Th 228). Este valor puede multiplicarse por 10 según se indica en el párrafo 107 f) del Reglamento de Transporte para determinar la concentración de actividad para la exclusión.

Hay materiales y minerales naturales cuya concentración de actividad es muy superior a los valores de exención. El transporte de esos minerales puede requerir la aplicación de medidas de protección radiológica. Por consiguiente, se decidió que un factor de 10 veces el valor de concentración de la actividad para la exención proporcionaba un equilibrio adecuado entre los intereses de protección radiológica y el inconveniente práctico de regular grandes cantidades de material con bajas concentraciones de actividad de radionucleidos naturales.

107.5. Para comprobar los niveles de exención con respecto a la contaminación superficial, véase el párrafo 413.9.

108.1. Aunque el Reglamento de Transporte proporciona la seguridad indispensable en el transporte sin la necesidad de itinerarios específicos, las autoridades reguladoras de algunos Estados Miembros han impuesto requisitos en relación con las rutas. Al determinar las rutas deberían tenerse en cuenta los riesgos normales y de accidente, tanto radiológicos como no radiológicos, así como los aspectos demográficos. Las políticas que incorporan restricciones en las rutas deberían basarse en todos los factores que contribuyen al riesgo total en el transporte de materiales radiactivos y no solo en preocupaciones en torno a la “peor” situación (por ejemplo, los accidentes de “poca probabilidad/graves consecuencias”). Dado que las autoridades nacionales, provinciales o incluso

locales pueden intervenir en las decisiones sobre los itinerarios, a menudo quizás sea necesario facilitarles evaluaciones para el estudio de rutas alternativas o métodos sencillos que puedan utilizar.

108.2. Para evaluar los peligros radiológicos y asegurar que los requisitos referentes a las rutas no menoscaben las normas de seguridad especificadas en el Reglamento de Transporte, deberían llevarse a cabo análisis que utilicen códigos de evaluación de riesgos apropiados. Uno de los códigos que puede ser utilizado es INTERTRAN [14]. Este código informatizado referente al impacto ambiental está disponible para su uso por los Estados Miembros. A pesar de que existen muchas incertidumbres sobre la aplicación de un modelo generalizado y de la dificultad para seleccionar valores de entrada adecuados para las condiciones de accidente, este código puede utilizarse para calcular y conocer, al menos sobre una base cualitativa, los factores significativos para determinar el impacto radiológico de las rutas alternativas que pueden emplearse en el transporte de materiales radiactivos. Estos factores son aspectos importantes que deberían ser considerados en cualquier decisión sobre rutas. Para la adopción de decisiones sobre rutas en que se utilice una única modalidad de transporte pueden formularse muchas hipótesis que simplifiquen los procedimientos y utilizarse factores comunes que den por resultado técnicas de evaluación de riesgos relativos fáciles de aplicar.

108.3. También tal vez se requiera que el remitente aporte pruebas de que se aplican las medidas necesarias para cumplir con los requisitos de salvaguardias y protección física asociados con las expediciones de materiales nucleares (como las que se definen en la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares, que figura en el documento INFCIRC/274/Rev.1 [15]).

109.1. Quizás sea necesario que los órganos reguladores adopten otras medidas que brinden protección física apropiada en el transporte de materiales radiactivos e impidan actos ilícitos que consistan en recibir, poseer, utilizar, transferir, alterar, evacuar o dispersar materiales radiactivos, si tales actos causan o es probable que causen, la muerte o lesiones graves a una persona o daños materiales importantes. Véanse las referencias [15 y 16]; la publicación *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre la protección física de los materiales nucleares y las instalaciones nucleares* (INFCIRC/225/Rev.5) (Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA, N° 13) [17]; la publicación *Seguridad física de los materiales nucleares durante el transporte* (Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA, N° 26-G) [18]; la publicación *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre materiales radiactivos e instalaciones conexas* (Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA, N° 14) [19]; la publicación *La*

seguridad física de los materiales radiactivos durante su transporte (Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA, N° 9-G (Rev. 1)) [20]; el Código de Conducta sobre la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas [21], y las Directrices sobre la importación y exportación de fuentes radiactivas [22].

109.2. También el remitente quizás necesite aportar pruebas de que se aplican medidas para cumplir con los requisitos de seguridad física de determinadas expediciones de materiales radiactivos.

110.1. Véanse los párrafos 506.1, 506.2 y 507.1 a 507.9.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN I

- [1] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.*
- [2] ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, *Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea*, Edición de 2021-2022, OACI, Montreal, 2020.
- [3] ASOCIACIÓN DE TRANSPORTE AÉREO INTERNACIONAL, *Reglamentación sobre Mercancías Peligrosas*, 63ª edición, IATA, Montreal, 2022.
- [4] ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Código IMDG: Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG)*, Edición de 2020, OMI, Londres, 2020.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency Involving the Transport of Radioactive Material*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-65, IAEA, Vienna (2022).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Compliance Assurance for the Safe Transport of Radioactive Material*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-78, IAEA, Vienna.
- [7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Sistema de gestión para el transporte seguro de materiales radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° TS-G-1.4, OIEA, Viena, 2018.*

- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Schedules of Provisions of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition), IAEA Safety Standards Series No. SSG-33 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2021).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA Safety Standards Series No. SSG-15 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2020).
- [10] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Almacenamiento de desechos radiactivos*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° WS-G-6.1, OIEA, Viena, 2009.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulatory Control for the Safe Transport of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM), IAEA-TECDOC-1728, IAEA, Vienna (2013).
- [12] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Scope of Radiological Protection Control Measures, Publication 104, Elsevier, Amsterdam (2007).
- [13] GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (GRS) mbH, Exposure of Transport Workers from the Transport of Most Important NORM in Germany, Rep. GRS-A-3541, GRS, Cologne (2010).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERTRAN: A System for Assessing the Impact from Transporting Radioactive Material, IAEA-TECDOC-287, IAEA, Vienna (1983).
- [15] *Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares*, INFCIRC/274/Rev.1, OIEA, Viena, 1980.
- [16] *Enmienda de la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares*, INFCIRC/274/Rev.1/Mod.1, OIEA, Viena, 2016.
- [17] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre la protección física de los materiales y las instalaciones nucleares* (INFCIRC/225/Rev. 5), Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA, N° 13, OIEA, Viena, 2012.
- [18] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Seguridad física de los materiales nucleares durante el transporte*, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 26-G, OIEA, Viena, 2021.
- [19] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre materiales radiactivos e instalaciones conexas*, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 14, OIEA, Viena, 2012.
- [20] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *La seguridad física de los materiales radiactivos durante su transporte*, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 9-G (Rev. 1), OIEA, Viena, 2022.
- [21] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Código de Conducta sobre la Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas*, IAEA/CODEOC/2004, OIEA, Viena, 2004.
- [22] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Directrices sobre la Importación y Exportación de Fuentes Radiactivas*, IAEA/CODEOC/IMO-EXP/2012, OIEA, Viena, 2012.

Sección II

DEFINICIONES

A_1 y A_2

201.1. Véase el apéndice I.

Aprobación

204.1. En los requisitos de aprobación del Reglamento de Transporte se ha aplicado un enfoque graduado de modo que esos requisitos sean proporcionales a los peligros que plantean los materiales radiactivos que serán transportados o amparados por una aprobación de diseño. La aprobación tiene por objeto asegurar que el diseño o expedición cumpla con los requisitos pertinentes y que los controles de seguridad que se requieren sean adecuados para el país y las circunstancias de la expedición. Debido a que las operaciones y las condiciones de transporte varían entre los países, la aplicación del método de “aprobación multilateral” brinda la oportunidad de que cada autoridad competente se cerciore de que el envío se habrá realizar de manera adecuada y teniendo debidamente en cuenta las condiciones peculiares del país.

204.2. El concepto de aprobación multilateral se aplica al transporte tal como está previsto que tenga lugar. Esto significa que solo participan en su aprobación las autoridades competentes bajo cuya jurisdicción el envío está previsto que se transporte. Las desviaciones no previstas que sucedan durante el transporte y que provoquen que la expedición entre en un país donde el transporte no haya sido previamente aprobado, necesitarían un tratamiento por separado. Sin embargo, si está programado que una aeronave aterrice en un país, la aprobación multilateral incluirá la aprobación de la autoridad competente de ese país (véase el párr. 243.1).

204.3. Los usuarios del Reglamento de Transporte deberían tener en cuenta que un Estado Miembro puede exigir en su normativa nacional una aprobación adicional emitida por su autoridad competente para materiales radiactivos en forma especial, bultos del Tipo B(U) o bultos del Tipo C, la que será utilizada para el transporte interior dentro de su territorio, aun cuando el diseño ya haya sido aprobado en otro país.

205.1. Con respecto a las aprobaciones unilaterales, se considera que el Reglamento de Transporte tiene en cuenta las condiciones de transporte que pueden presentarse en cualquier país. Por tanto, solamente se requiere la aprobación de la autoridad competente del país de origen del diseño.

Transportista

206.1. El término “persona” incluye tanto a personas jurídicas como físicas (véanse también los párrs. 3.7 a 3.9 de la publicación GSR Part 3 [1]).

Autoridad competente

207.1. La autoridad competente es la entidad definida por la autoridad legislativa o ejecutiva para actuar en nombre de un país, o una autoridad internacional, en asuntos relacionados con el transporte de materiales radiactivos. El marco jurídico de un país determina cómo se designa la autoridad nacional competente y cómo se le atribuyen responsabilidades para garantizar la aplicación del Reglamento de Transporte. En algunos casos, la facultad sobre distintos aspectos del Reglamento de Transporte se asigna a organismos diferentes, según la modalidad de transporte de que se trate (por vía aérea, marítima, por carretera, ferrocarril o aguas interiores), o el bulto y el tipo de materiales radiactivos (bultos exceptuados, industriales del Tipo A, del Tipo B(U), del Tipo B(M) y del Tipo C, materiales radiactivos en forma especial, materiales radiactivos de baja dispersión, materiales fisibles o hexafluoruro de uranio). En algunos casos la autoridad nacional competente puede delegar la aprobación de los diseños de bulto y de determinados tipos de expedición en otra organización que tenga la competencia técnica necesaria. La autoridad nacional competente también constituye la autoridad competente de referencia para cualquier convención o acuerdo sobre transporte de materiales radiactivos al que pueda adherirse la nación.

207.2. La autoridad competente debería dar a conocer su identidad a los remitentes, transportistas, destinatarios y el público general, y cómo pueden establecer contacto con ella. Esto puede conseguirse mediante la publicación del organigrama (departamentos, administración, oficinas), con una descripción de las tareas y actividades de la entidad en cuestión, y una dirección postal detallada, números de teléfono y fax, dirección de correo electrónico, etc.

207.3. La fuente principal de información sobre autoridades competentes es la lista de autoridades nacionales competentes encargadas de las aprobaciones y autorizaciones con respecto al transporte de materiales radiactivos, que mantiene

el OIEA¹. Cada país debería asegurarse de que la información consignada esté actualizada y sea exacta. El OIEA solicita la verificación de esta información anualmente y la respuesta rápida de los Estados Miembros garantizará la constante utilidad de esta lista.

207.4. Con vistas a la aplicación plena y correcta del Reglamento de Transporte es preciso que el gobierno establezca una autoridad competente para reglamentar la seguridad del transporte. Esta autoridad competente debería recibir suficientes poderes y recursos para la reglamentación y observancia eficaces, y debería ser independiente de los departamentos y organismos estatales que lleven a cabo el transporte de materiales radiactivos. La autoridad competente también debería ser independiente de los titulares registrados, los titulares de licencias y los autores del diseño y fabricantes de los sistemas de transporte. La separación efectiva de las responsabilidades entre las funciones de la autoridad competente y las de otras partes debería definirse claramente de modo que los reguladores conserven su independencia de juicio y decisión en su calidad de autoridades de seguridad.

207.5. Las funciones generales de la autoridad competente son, entre otras, las siguientes: la evaluación de las solicitudes de aprobación del diseño de los bultos; la expedición de certificados de aprobación y la autorización de envíos cuando proceda, con sujeción a determinadas condiciones especificadas; la ejecución de inspecciones periódicas para verificar el cumplimiento de las condiciones; y las medidas de observancia necesarias para garantizar el cumplimiento del Reglamento de Transporte. Un programa eficaz de verificación del cumplimiento debería, como mínimo, incluir medidas relacionadas con el examen y la evaluación del diseño del bulto; la expedición de certificados de aprobación; y la inspección y observancia.

207.6. Las facultades de los inspectores de la autoridad competente deberían definirse y debería mantenerse la coherencia en la observancia. La autoridad competente quizás deba proporcionar orientaciones sobre cómo habrán de cumplirse algunos requisitos reglamentarios para diversas actividades de transporte.

207.7. La autoridad competente debería alentar a todas las partes a desarrollar una cultura de la seguridad que comprenda lo siguiente: adhesión individual y colectiva a la seguridad por parte de los trabajadores, el personal directivo y los reguladores; responsabilidad de todas las personas respecto de la protección y la

¹ La lista de autoridades competentes puede obtenerse en <https://gnssn.iaea.org/main/GlobalTransportNetworks/Pages/CompetentAuthorities.aspx>

seguridad, incluso personas que ocupen puestos directivos superiores; y medidas para estimular una actitud de cuestionamiento y aprendizaje y para desalentar la complacencia con respecto a la seguridad.

Verificación del cumplimiento

208.1. Véanse los párrafos 307.1 a 307.9.

Sistema de confinamiento

209.1. El sistema de confinamiento es la parte de un bulto necesaria para mantener los materiales fisibles en la configuración considerada en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad de un bulto (véase el párr. 681 del Reglamento de Transporte). El sistema de confinamiento podría ser i) un receptáculo interior con dimensiones definidas, ii) una estructura interior que mantenga las dimensiones exteriores de un conjunto combustible y cualquier veneno neutrónico fijo intersticial, o iii) un bulto completo, como un bulto sin contenedor interior. El sistema de confinamiento consiste en los componentes especificados del embalaje y el contenido del bulto. Aunque el sistema de confinamiento puede tener el mismo límite que el sistema de contención, no siempre será así, ya que el sistema de confinamiento mantiene el control de la criticidad, mientras que el sistema de contención previene la fuga de materiales radiactivos. Las autoridades competentes deben coincidir en que el sistema de confinamiento, definido en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad, es apropiado para el diseño del bulto, tanto para configuraciones con daño como sin él (véase el párr. 681 del Reglamento de Transporte).

Sistema de contención

213.1. El sistema de contención puede ser todo el embalaje, pero con más frecuencia es una parte de él. Por ejemplo, en un bulto del Tipo A, el sistema de contención puede considerarse que es el contenedor de los materiales radiactivos. El contenedor, su blindaje de plomo y la caja de cartón serían el embalaje. El sistema de contención no necesariamente incluye el blindaje. En el caso de materiales radiactivos en forma especial y de materiales radiactivos de baja dispersión, los materiales radiactivos pueden formar parte del sistema de contención.

213.2. El sistema de contención del diseño del bulto debería definirse explícitamente, incluso el límite de contención del sistema, en particular los sellos y dispositivos de fijación. En el sistema del límite de contención deberían

tenerse en cuenta elementos como orificios de venteo y desagüe que puedan presentar una vía de fuga desde el sistema de contención. En los sistemas de bultos que contienen sellos dobles o concéntricos, debería definirse el sello del sistema de contención. Contenedores secundarios como bolsas, cajas y botes utilizados como contenedores de productos o para facilitar la manipulación del material radiactivo no deberían considerarse parte del sistema de contención en lo que respecta al cumplimiento de los requisitos del párrafo 659 del Reglamento de Transporte. El sistema de contención debería estar compuesto por elementos técnicos cuyo diseño esté definido en los planos del embalaje.

213.3. Los requisitos de estanqueidad para el sistema de contención en los bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C dependen de la radiotoxicidad del contenido radiactivo; por ejemplo, en un bulto del Tipo B(U) o del Tipo C en las condiciones de accidente la pérdida de estanqueidad del contenido radiactivo en una semana no debería superar un valor A_2 (o $10A_2$ para el Kr 85). Esta conexión con el valor A_2 significa que para radionucleidos de alta toxicidad como el plutonio y el americio la tasa de fuga volumétrica permitida será mucho menor que para el uranio poco enriquecido. Con todo, si fuera factible que los materiales fisibles pudieran escapar del sistema de contención en condiciones de accidente, debería demostrarse que la cantidad de material dispersado es compatible con la supuesta en las evaluaciones de seguridad con respecto a la criticidad, en cumplimiento del párrafo 685 c) del Reglamento de Transporte (véase también el párr. 685.2 de la presente guía de seguridad).

Contaminación

214.1. El término “contaminación” incluye dos tipos, en función de si los materiales radiactivos están sobre las superficies o embebidos en ellas, es decir, contaminación transitoria o contaminación fija. No se ha hecho una distinción definitiva entre la contaminación fija y la transitoria: para fines prácticos se hace una distinción entre la contaminación que permanece *in situ* durante las condiciones de transporte rutinarias (es decir, la contaminación fija) y que, por lo tanto, no puede dar lugar a su ingestión, inhalación o dispersión y, por otra parte, la contaminación transitoria, que sí puede contribuir a esos riesgos. El único peligro de la contaminación fija se debe a la exposición externa a la radiación, mientras la contaminación transitoria incluye el peligro potencial de exposición interna debida a la inhalación e ingestión, así como de exposición externa debida a la contaminación de la piel con el material que pudiera haberse desprendido de la superficie. En condiciones de accidente y en ciertas condiciones de uso, como la alteración por exposición a la intemperie, la contaminación fija puede acabar pasando a ser contaminación transitoria.

214.2. Los niveles de contaminación inferiores a $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ para emisores beta, gamma y emisores alfa de baja toxicidad, o a $0,04 \text{ Bq/cm}^2$ para el resto de emisores alfa, solo pueden producir un aumento insignificante de la exposición por cualquiera de las vías mencionadas en el párrafo 214.1.

214.3. Cualquier superficie con niveles de contaminación inferiores a $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ en emisores beta, gamma y emisores alfa de baja toxicidad, o a $0,04 \text{ Bq/cm}^2$ para el resto en emisores alfa, se considera como superficie no contaminada en aplicación del Reglamento de Transporte. Por ejemplo, un objeto sólido no radiactivo con niveles de contaminación superficial más bajos que los niveles anteriormente citados está fuera del alcance del Reglamento de Transporte y no le es aplicable ningún requisito para su transporte.

214.4. Para comprobar los niveles de contaminación, las técnicas de medición mencionadas en el párrafo 413.9 son aplicables.

215.1. Véanse los párrafos 214.1 a 214.3.

216.1. Véanse los párrafos 214.1 a 214.3.

Índice de seguridad con respecto a la criticidad

218.1. El índice de seguridad con respecto a la criticidad (ISC) es un término definido por primera vez en la edición de 1996 del Reglamento de Transporte. Es el principio más importante utilizado en la seguridad con respecto a la criticidad para limitar la acumulación de bultos que contengan materiales fisibles durante el transporte y el almacenamiento en tránsito.

El ISC es un valor obtenido dividiendo el número 50 por el valor N (véase el párr. 686 del Reglamento de Transporte) o aplicando las disposiciones de los párrafos 674 y 675. El ISC total debe controlarse en cada uno de los bultos (véase el párr. 526), remesas (véase el párr. 525), medios de transporte, contenedores y sobreenvases (véanse los párrs. 566 c) y 567) y en los lugares de almacenamiento en tránsito (véanse los párrs. 568 y 569). Para facilitar tales controles, el ISC debe consignarse en una etiqueta (véanse los párrs. 541 y 542), específicamente diseñada para indicar la presencia de materiales fisibles en el caso de bultos, sobreenvases o contenedores que comprendan materiales fisibles no exceptuados con arreglo a las disposiciones del párrafo 417 del Reglamento de Transporte.

218.2. Los límites de acumulación másica de nucleidos fisibles fijados para los bultos y remesas solo se aplican en casos especiales cuando no se controla el

ISC (véase el párr. 417 c), d) y e) del Reglamento de Transporte) en que se ha considerado adecuado establecer amplios márgenes de seguridad para prevenir la posibilidad de criticidad.

Tasa de dosis

220A.1. En la protección radiológica, una de las magnitudes limitativas para evitar la exposición del público es la dosis efectiva (las otras son la dosis equivalente en el cristalino del ojo y la piel; véase el cuadro III de la publicación GSR Part 3 [1]). Como las magnitudes de protección no son directamente mensurables, tuvieron que determinarse magnitudes operacionales que sí lo fueran. Estas magnitudes son la dosis equivalente ambiental para la radiación de alto poder de penetración y la dosis equivalente direccional para la radiación de bajo poder de penetración. La tasa de dosis debería tomarse como el valor de la dosis equivalente ambiental o la dosis equivalente direccional, según proceda. La dosis equivalente ambiental se emplea para controlar la dosis efectiva y la dosis equivalente direccional, para controlar la dosis en la piel, las manos y los pies, y el cristalino del ojo [2].

220A.2. En algunos casos debería considerarse la posibilidad de un incremento en la tasa de dosis como resultado de la acumulación de nucleidos descendientes durante el transporte. En tales casos debería aplicarse una corrección que represente la tasa de dosis más alta prevista durante el transporte.

220A.3. En los casos en que estén mezclados emisores gamma y neutrónicos puede ser necesario hacer mediciones separadas. Debería garantizarse que los instrumentos de medición utilizados sean adecuados para la energía y la tasa de dosis emitidas por los radionucleidos. Los instrumentos de monitorización deben estar calibrados y la calibración de los instrumentos debe ser válida.

220A.4. Los instrumentos de monitorización pueden depender mucho de la energía de los neutrones, de modo que la distribución de energía de los neutrones que se medirán puede afectar considerablemente a la exactitud de la determinación de la tasa de dosis. Idealmente, la distribución de la energía de los neutrones utilizados para la calibración y la de los neutrones que se medirán deberían ser similares. Si estas son muy diferentes, y si se conoce la dependencia de la energía de la lectura del instrumento y la distribución de la energía de los neutrones que se medirán, debería aplicarse el correspondiente factor de corrección.

220A.5. En el Reglamento de Transporte se establece que no deben superarse determinadas tasas de dosis en las superficies de los bultos y sobreenvases. En

la mayoría de los casos, la medición hecha con un instrumento portátil en la superficie del bulto indica la lectura a cierta distancia de la superficie debido al volumen físico del detector. Siempre que sea posible, el instrumento que se emplee para la medición de la tasa de dosis debería ser pequeño con respecto a las dimensiones del bulto o del sobreenvase. Los instrumentos que son relativamente grandes en relación con el tamaño físico del bulto o sobreenvase no deberían utilizarse porque podría subestimarse la tasa de dosis superficial. Cuando la distancia de la fuente de radiación al instrumento es grande en relación con el volumen del detector (por ejemplo, en un factor de cinco), el efecto es insignificante y puede obviarse; en otro caso, deberían utilizarse los valores del cuadro I de la presente guía de seguridad para corregir la medición. Para los dispositivos radiográficos, en que la distancia de la fuente a la superficie se mantiene generalmente al mínimo, este efecto no suele ser despreciable y debería aplicarse una corrección en función del volumen del detector.

220A.6. Al realizar mediciones de contenedores con aletas u otros bultos de transporte, debería tenerse precaución donde puedan encontrarse haces estrechos de radiación. Un detector con área de detección mucho más grande que el área transversal del haz que va a medir dará lugar a una lectura proporcionalmente reducida de la tasa de dosis por tener que promediar la tasa en un área de detección mucho más grande. Para estos trabajos debería elegirse el instrumento de medición más apropiado.

220A.7. Las tasas de dosis determinadas deberían ser valores absolutos (es decir, los de la remesa de materiales radiactivos solamente). Por consiguiente, la tasa de dosis de fondo en el área de medición debe sustraerse de los valores medidos.

Uso exclusivo

221.1. Las características especiales de una expedición en “uso exclusivo” consisten en que un único remitente realiza la expedición y debe tener, mediante acuerdos con el transportista, el uso único del medio de transporte o del contenedor; y en que todas las operaciones de carga y descarga de la remesa iniciales, intermedias y finales, y la expedición de la remesa se llevan a cabo rigurosamente de acuerdo con las instrucciones del remitente o del destinatario.

221.2. Dado que en la modalidad de uso exclusivo no existirán las condiciones de manipulación en tránsito ordinarias de una remesa, pueden rebajarse algunos de los requisitos aplicables a las expediciones normales. En vista de que se ejerce

CUADRO 1. FACTORES DE CORRECCIÓN SEGÚN LAS DIMENSIONES DEL BULTO Y DEL DETECTOR

Distancia entre el centro del detector y la superficie del bulto (cm)	Dimensión lineal media del bulto (cm)	Factor de corrección ^a
1	>10	1,0
2	10 a 20	1,4
	>20	1,0
5	10 a 20	2,3
	20 a 50	1,6
	>50	1,0
10	10 a 20	4,0
	20 a 50	2,3
	50 a 100	1,4
	>100	1,0

^a La lectura del instrumento debe multiplicarse por el factor de corrección para estimar la tasa de dosis en la superficie del bulto.

un control adicional sobre las remesas en uso exclusivo, se han establecido disposiciones específicas para ellas, que permiten:

- a) el uso de bultos industriales de menor integridad para materiales de baja actividad específica (BAE);
- b) expediciones de bultos con niveles de radiación que excedan de 2 mSv/h (pero no más de 10 mSv/h) en su superficie, o un índice de transporte (IT) que exceda de 10, y
- c) en determinados casos, el incremento en un factor de dos del valor total del ISC para bultos que contengan material fisible.

Muchos remitentes encuentran ventajoso hacer las gestiones necesarias con el transportista para realizar el transporte en la modalidad de uso exclusivo, de

tal forma que el remitente pueda aplicar una o más de las disposiciones citadas anteriormente.

221.3. En el caso de los materiales BAE embalados, en el Reglamento de Transporte se tienen en cuenta las condiciones para el control de la carga y descarga derivadas del transporte en la modalidad de uso exclusivo. Los controles adicionales impuestos en la modalidad de uso exclusivo tienen que estar de conformidad con las instrucciones preparadas por el remitente o el destinatario, cuando así lo estipule el Reglamento de Transporte (ambos tienen plena información sobre la carga y sus posibles peligros), y permitir cierta reducción de la resistencia de los embalajes. Dado que en la modalidad de uso exclusivo no se producirá una manipulación incontrolada de los bultos, se ha relajado el conservadurismo implícito en los requisitos habituales de los embalajes de materiales BAE respecto de su manipulación, aunque han de mantenerse niveles de seguridad equivalentes.

221.4. Los bultos deben tener límites fijados con respecto a su tasa de dosis para proteger a los trabajadores que los manipulan. La imposición de las condiciones de uso exclusivo y el control de la manipulación durante el transporte ayudan a garantizar que se tomen las medidas de protección radiológica adecuadas. Al imponer restricciones y fijar un límite a las tasas de dosis alrededor del vehículo, aunque la tasa de dosis alrededor del bulto pueda aumentar, no aumenta significativamente el peligro.

221.5. Puesto que los controles en la modalidad de uso exclusivo previenen eficazmente la incorporación no autorizada de materiales radiactivos en una remesa y posibilitan que el remitente tenga un estricto control sobre ella, en el Reglamento de Transporte se tiene en cuenta la autorización de más bultos de materiales fisibles que para remesas ordinarias.

221.6. Para medios de transporte o contenedores en uso exclusivo, el requisito de uso único y el requisito de control único son factores determinantes. Aunque un vehículo puede ser utilizado para transportar solamente materiales radiactivos, no por ello debe considerarse automáticamente la remesa en uso exclusivo. Para cumplir con la definición de uso exclusivo, toda la remesa tiene que proceder de un único remitente o ser controlada por él. Esto excluye la práctica del transporte colectivo de remesas de varios remitentes en un único vehículo. Aunque el transportista reúna varias remesas en un solo vehículo, este transporte no podrá considerarse en uso exclusivo porque interviene más de un remitente. Sin embargo, esto no impide que un transportista o un destinatario debidamente cualificado que acumule expediciones de más de un origen asuma las

responsabilidades del remitente respecto de estas expediciones y sea designado a tales efectos.

221.7. En el anexo III del Reglamento de Transporte figura una lista de expediciones para las que se requiere el transporte en uso exclusivo.

Nucleidos fisibles y materiales fisibles

222.1. La cadena de fisión es propagada por neutrones. Puesto que la reacción en cadena depende del comportamiento de los neutrones, los materiales fisibles se embalan y transportan con arreglo a requisitos concebidos para mantener la subcriticidad y así proporcionar seguridad con respecto a la criticidad en el transporte.

222.2. La mayoría de los radionucleidos de gran masa atómica pueden provocar una fisión de neutrones, pero muchos solo pueden hacerlo con dificultad y con equipo especial y en condiciones controladas. Los nucleidos fisibles incluidos en la definición tienen la característica distintiva de que son capaces de generar una reacción en cadena autosostenida de neutrones térmicos (neutrones de energías inferiores a 0,3 eV aproximadamente) con solo acumular la masa suficiente. No se requiere ninguna otra acción, mecanismo ni condición especial. Por ejemplo, el Pu 238 ya no se incluye en la definición porque, aunque se le puede hacer sufrir una reacción en cadena de neutrones rápidos en estrictas condiciones de laboratorio, en la forma en que se encuentra para su transporte no tiene esa propiedad. El plutonio 238 no puede, en ninguna circunstancia, sustentar una reacción en cadena generada por neutrones térmicos. Es, por lo tanto, “fisionable” más que “fisible”.

222.3. Como se indica en el párrafo 222.2, la base para seleccionar los nucleidos definidos como fisibles a efectos del Reglamento de Transporte depende de la facilidad de acumular masa suficiente para una posible criticidad. En la referencia [3] se analizan otros nucleidos que pueden alcanzar la criticidad y se indican los límites de masa subcrítica para unidades aisladas de Np 237, Pu 238, Pu 240, Pu 242, Am 241, Am 242m, Am 243, Cm 243, Cm 244, Cm 245, Cm 247, Cf 249 y Cf 251. Los límites de masa subcrítica calculados para esos nucleidos van desde unos pocos gramos (Cf 251) hasta decenas de kilogramos. Sin embargo, la carencia de datos experimentales sobre criticidad, el conocimiento limitado del comportamiento de esos nucleidos en diferentes condiciones de moderación y reflexión, y la incertidumbre sobre los datos de secciones eficaces para muchos de esos nucleidos exigen una adecuada atención (y el margen subcrítico conexo) en las operaciones en que pueda estar presentes cantidades suficientes

de esos nucleidos (o en que se produzcan por desintegración antes o durante el transporte). Siempre que puedan transportarse cantidades significativas de esos materiales, debería procurarse el asesoramiento de la autoridad competente sobre la necesidad y los medios para realizar evaluaciones de seguridad con respecto a la criticidad en función de los requisitos de los párrafos 673 a 686 del Reglamento de Transporte.

222.4. Por material fisible se entiende todo material que contenga alguno de los nucleidos fisibles, excluidos los casos en que, teniendo en cuenta las propiedades físicas y las prácticas de transporte actuales, se considere inverosímil un riesgo de criticidad. Para los bultos que contienen material definido como material fisible deben aplicarse los párrafos 417, 418 y 673 del Reglamento de Transporte.

222.5. Los bultos que contengan menos de 0,25 g de nucleidos fisibles tendrían que acumularse en muy gran número (varios miles) para que incluso teóricamente se produjera criticidad. Además, no se ha considerado verosímil la probabilidad de que haya un número suficientemente grande de tales bultos para que se afecte a la seguridad con respecto a la criticidad de una remesa con bultos fisibles si se controla el ISC.

222.6. La principal justificación para excluir bultos que tengan cada uno de ellos una masa máxima de nucleidos fisibles de 0,25 g es que se suponga muy poco probable que se expidan varios miles de bultos que contengan material fisible esencialmente “puro” (sin otros nucleidos que absorban neutrones). Por ejemplo, no se prevé que sea viable transportar varios miles de pastillas de UO_2 , con un enriquecimiento del 3,5 % en U 235, y que contengan aproximadamente 0,25 g de U 235 por pastilla, en bultos separados con una pastilla por bulto. Se tendrá que observar y analizar cualquier indicio de modificación de las prácticas en el futuro. Los bultos que tengan concentraciones ínfimas de nucleidos fisibles (por ejemplo, desechos) no constituyen un problema de seguridad con respecto a la criticidad, incluso en grandes volúmenes, si se cumple el límite de masa por bulto.

222.7. Solamente queda excluido de la definición de material fisible el uranio natural y empobrecido no irradiado o solo el irradiado en reactores térmicos, pero siempre que no haya otro material con nucleidos fisibles en el bulto. Los nucleidos fisibles en el uranio natural y empobrecido podrían aumentar la multiplicación neutrónica de un bulto que contenga otros materiales con nucleidos fisibles. Así, cuando se sepa que el diseño o el contenido del bulto comprenden uranio natural o empobrecido, este deberá tenerse en cuenta en la evaluación de la seguridad y en los requisitos de aprobación. Esto es lo que suele ocurrir con el combustible

de los reactores modernos de agua ligera, que pueden contener zonas axiales extremas con uranio natural o empobrecido.

222.8. Si los bultos se separan de otros materiales fisibles, no se considera verosímil la probabilidad de criticidad de los que solo contengan en parte uranio natural o empobrecido. Por este motivo el uranio natural o empobrecido solo se define como fisible cuando están presentes otros materiales fisibles en el bulto.

222.9. En muchas expediciones de materiales ligeramente radiactivos puede encontrarse uranio natural y empobrecido sin embalar. Con todo, no se considera verosímil la probabilidad de que se transporte uranio natural o empobrecido de alta pureza en el mismo medio que transporte materiales fisibles en bultos y que se presente un problema de seguridad con respecto a la criticidad al introducirse bultos con materiales fisibles que se mezclen con materiales fisibles que escapen de esos bultos, que se dispersen entre esos bultos o que se coloquen en las proximidades de los materiales fisibles presentes en los bultos.

222.10. La irradiación del uranio natural o empobrecido podría aumentar la probabilidad de que el material sostenga una reacción en cadena de neutrones. La restricción de la irradiación en los reactores térmicos tiene la finalidad de evitar este posible problema. Los operadores que deseen aplicar lo establecido en el párrafo 222 del Reglamento de Transporte para excluir el uranio natural o empobrecido irradiado de la definición de los materiales fisibles deberían garantizar que cualquier tratamiento posterior a la irradiación no aumente su reactividad. La producción de plutonio durante la irradiación será mayor en la superficie de una barra de combustible que en el centro. La capa superficial tendrá una concentración de plutonio mucho mayor que el valor medio encontrado en todo el combustible y puede tener características de criticidad semejantes a las del uranio poco enriquecido. Si esta capa superficial se separa del grueso del combustible, el material que contenga (por ejemplo, residuos de las vainas) tal vez no sea adecuado para su exclusión en virtud del párrafo 222 del Reglamento de Transporte.

222.11. Las disposiciones de exclusión que figuran en el párrafo 222 a) y b) del Reglamento de Transporte también se aplican si un embalaje contiene uranio natural o empobrecido no irradiado e irradiado (solo en reactores térmicos), por ejemplo, como material de blindaje.

Contenedores

223.1. Desde aproximadamente 1965 los métodos y sistemas empleados en el trasbordo de mercancías han experimentado una transformación; los contenedores han ocupado en gran parte el lugar de la carga fraccionada o la carga general, que antes se realizaba por separado. Las mercancías embaladas y sin embalar son cargadas por el remitente en contenedores y transportadas al destinatario sin ninguna manipulación intermedia. De esta forma el riesgo de daño de los bultos se reduce, las mercancías sin embalar se consolidan dentro de unidades de manipulación adecuadas y se economiza el transporte. El contenedor puede realizar la función de embalaje, tal como permite lo dispuesto en el párrafo 629 del Reglamento de Transporte. Los tipos de contenedores pueden ser los siguientes:

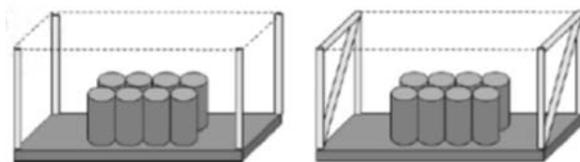
- de carga estándar o seca: completamente cerrado con una base, paredes laterales y un techo;
- descubierto: con techo desmontable (lona o metal) o sin techo;
- de plataforma: solo con la base, sin paredes laterales ni techo, y
- de bastidor plano: con una plataforma habilitada con cuatro postes laterales o dos armazones de extremo que pueden ser plegables.

Los contenedores de plataforma y bastidor plano también se conocen como contenedores sin paredes laterales.

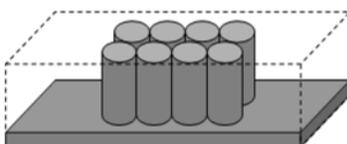
223.2. En los contenedores de bastidor plano (véase la fig. 1), el volumen del prisma rectangular que engloba la estructura del contenedor puede utilizarse como volumen interno. En los contenedores de plataforma (véase la fig. 1), el volumen del prisma rectangular que abarca la plataforma y la altura de la carga pueden utilizarse como volumen interno.

223.3. Los contenedores normalmente están diseñados y ensayados según las normas de la ISO [4]. Estos deberían ser aprobados y mantenidos con arreglo a la referencia [5] para facilitar las operaciones de transporte internacional. Sin embargo, debería tenerse en cuenta que los ensayos previstos en la referencia [5] no son equivalentes a los establecidos en la referencia [4]. Si se utilizan otros contenedores, debería consultarse a la autoridad competente.

223.4. Asimismo, las organizaciones de transporte modal pueden especificar normas especiales. Por ejemplo, el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas [6] contiene disposiciones para el transporte marítimo de mercancías peligrosas en contenedores, incluidos los materiales radiactivos.



(A) Para contenedores de bastidor plano



(B) Para contenedores de plataforma

Fig. 1. Volumen interno de los contenedores sin paredes laterales

Materiales radiactivos de baja dispersión

225.1. El concepto de material radiactivo de baja dispersión se aplica solamente a la cualificación del contenido radiactivo de un bulto con vistas a la exención de los requisitos de los bultos del Tipo C para el transporte aéreo.

225.2. Los materiales radiactivos de baja dispersión tienen propiedades tales que no generan emisiones ni exposiciones potencialmente significativas a la radiación. Aun cuando el material se someta a altas velocidades de impacto y condiciones térmicas, solo una fracción limitada del material se dispersará en el aire. La exposición radiológica potencial de personas que se encuentren en las proximidades de un accidente debida a la inhalación de material transportado en el aire sería muy limitada.

225.3. Los criterios sobre los materiales radiactivos de baja dispersión se han determinado en consonancia con otros criterios de seguridad del Reglamento de Transporte, así como sobre la base de métodos establecidos para demostrar la aceptabilidad de las consecuencias radiológicas. El Reglamento de Transporte estipula que se demuestre el comportamiento de los materiales radiactivos de baja dispersión sin dar ningún crédito al embalaje del Tipo B(U) o del Tipo B(M) en el que se transportan.

225.4. Los materiales radiactivos de baja dispersión pueden ser materiales radiactivos en sí mismos, en forma de sólido no dispersable, o de una cápsula sellada de alta integridad que contenga los materiales radiactivos, dentro de la cual el material encapsulado actúe esencialmente como sólido no dispersable. Los polvos o materiales similares no pueden calificarse como materiales radiactivos de baja dispersión.

Materiales de baja actividad específica

226.1. La razón por la que se estableció la categoría de materiales de baja actividad específica (BAE) en el Reglamento de Transporte fue la existencia de ciertos materiales sólidos cuyas actividades específicas son tan bajas que hacen sumamente improbable que, en las circunstancias que se presenten durante el transporte, una masa suficiente de tales materiales pueda ser incorporada en el organismo de una persona como para producir un peligro importante de radiación. Los minerales de uranio y torio y sus concentrados físicos o químicos son materiales que se enmarcan en esta categoría. El concepto fue ampliado para incluir otros materiales sólidos sobre la base de un modelo que supone una probabilidad muy escasa de que una persona permanezca en una atmósfera de polvo suficiente tiempo como para inhalar más de 10 mg del material. Si la cantidad específica del material es tal que equivale a una actividad no superior a la que se supone que incorporaría una persona afectada en un accidente medio con un bulto del Tipo A, a saber, $10^{-6}A_2$, entonces este material no presentaría un riesgo mayor durante el transporte que el planteado por un bulto del Tipo A. Esto lleva a un límite de materiales BAE de $10^{-4}A_2/g$.

226.2. Se consideró la posibilidad de transportar objetos sólidos sin ningún embalaje. Se planteó la cuestión con respecto a los bloques de hormigón (con actividad distribuida por toda la masa), los objetos irradiados y los objetos con contaminación fija. Siempre y cuando la actividad específica sea relativamente baja y permanezca dentro del objeto o fijada en su superficie, el objeto puede ser considerado como un bulto. En aras de la coherencia y la seguridad, los límites de radiación en la superficie del objeto sin embalar no deberían exceder de los límites fijados para el material embalado. Por lo tanto, se consideró que por encima de los límites de las tasas de dosis en la superficie para los bultos (2 mSv/h para uso no exclusivo y 10 mSv/h para uso exclusivo), el objeto debe ser embalado en un bulto industrial, de manera que se garantice la retención del blindaje en condiciones de transporte rutinarias. Se consideraron argumentaciones similares para establecer los niveles de contaminación superficial de objetos contaminados en la superficie (OCS) sin embalar.

226.3. El preámbulo de la definición de materiales BAE no incluye el límite de tasa de dosis del material sin blindar de 10 mSv/h a 3 m (véase el párr. 517 del Reglamento de Transporte) porque es una propiedad inherente a la cantidad de material depositado en un único bulto más que una propiedad del material en sí mismo (aunque en el caso de los objetos sólidos que no pueden ser divididos es una propiedad del objeto sólido).

Emisores alfa de baja toxicidad

227.1. La identificación de los emisores alfa de baja toxicidad se basa en la actividad específica del radionucleido (o del radionucleido en su estado “según se transporte”). No es razonable esperar que la incorporación de un nucleido con una actividad específica muy baja, debido a su masa, dé lugar a dosis próximas al límite de dosis. Los radionucleidos U 235, U 238 y Th 232 tienen actividades específicas de cuatro a ocho órdenes de magnitud más bajas que el Pu 238 o el Pu 239 (4×10^3 a 8×10^4 Bq/g frente a 2×10^9 a 6×10^{11} Bq/g). Aunque el Th 228 y el Th 230 tienen actividades específicas comparables a las del Pu 238 y el Pu 239, solamente se permite considerarlos como “emisores alfa de baja toxicidad” cuando están presentes en minerales y concentrados físicos y químicos, que ya intrínsecamente tienen la baja concentración de actividad requerida.

Sistema de gestión

228.1. La expresión “sistema de gestión” se define en el Glosario de Seguridad del OIEA [7] y recoge e incluye el concepto de “control de calidad” (control de calidad de los productos) y su evolución a través de la “garantía de calidad” (sistema para garantizar la calidad de los productos) y el “sistema de gestión de calidad” (sistema para gestionar la calidad). El sistema de gestión tiene como objetivo proporcionar suficiente confianza en que el grado de seguridad establecido en el Reglamento de Transporte se alcanza en la práctica.

228.2. Además de las normas internacionalmente reconocidas que tratan de los sistemas de gestión de la calidad (por ejemplo, la norma ISO 9001:2015 [8]), la publicación N° GSR Part 2 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, titulada *Leadership and Management for Safety* [9] establece los requisitos para el sistema de gestión.

228.3. En la publicación *Sistema de Gestión para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° TS-G-1.4)* [10], se formulan recomendaciones sobre la forma de dar

cumplimiento a los requisitos del Reglamento de Transporte relacionados con el sistema de gestión [10].

Presión normal de trabajo máxima

229.1. La presión normal de trabajo máxima (PNTM) es la diferencia entre la presión interna máxima del sistema de contención y la presión atmosférica media al nivel del mar en las condiciones especificadas en los párrafos 229.2 a 229.4.

229.2. Las condiciones ambientales que se aplicarán a un bulto para determinar la PNTM son las condiciones ambientales normales especificadas en los párrafos 656 y 657 del Reglamento de Transporte o, en el caso del transporte aéreo, en el párrafo 620 del Reglamento de Transporte. Otras condiciones que se aplicarán para determinar la PNTM son la suposición de que el bulto está desatendido durante un período de un año y que asimismo está sometido a su máxima carga térmica interna.

229.3. El período de un año supera el tiempo en tránsito previsto de un bulto de materiales radiactivos; además de proporcionar un margen importante de seguridad en relación con las condiciones de transporte rutinarias, también tiene en cuenta la posibilidad de la pérdida de un bulto en tránsito. El período de un año es arbitrario, pero se ha acordado como un límite superior razonable para que un bulto permanezca inexplicablemente en tránsito. Puesto que se supone que el bulto ha quedado desatendido durante un año, debe tenerse en cuenta cualquier cambio físico o químico en el embalaje o en su contenido de carácter transitorio que pueda contribuir a aumentar la presión del sistema de contención. Las condiciones transitorias que deberían considerarse son, entre otras, cambios en la capacidad de disipación del calor, la acumulación de gas debida a la radiolisis, la corrosión, reacciones químicas o la emisión de gas de las agujas de combustible o de otros encapsulamientos incluidos en el sistema de contención. Algunas condiciones transitorias pueden propender a reducir la PNTM, como la reducción de la presión con el tiempo causada por una disminución del calor interno como resultado de la desintegración radiactiva del contenido. Estas condiciones pueden tenerse en cuenta si se justifican adecuadamente.

229.4. La posible acumulación de presión antes del envío, en caso de envío después del almacenamiento, por ejemplo, debe considerarse en el cálculo de la PNTM.

Sobreenvase

230.1. El transporte de una remesa de un remitente a un destinatario puede facilitarse embalando dentro de un único sobreenvase, por ejemplo, una caja o una bolsa, varios bultos o un solo bulto que cumplan completamente las disposiciones del Reglamento de Transporte. Para el sobreenvase no se establecen requisitos específicos de diseño, ensayo o aprobación, puesto que es el embalaje el que realiza la función de protección. El sobreenvase es solo una unidad de manipulación para facilitar el transporte. Sin embargo, debería tenerse en cuenta la interacción entre el sobreenvase y los bultos, especialmente con respecto al comportamiento térmico de los bultos durante las condiciones de transporte rutinarias y normales.

230.2. Un recinto rígido o una consolidación de bultos para su fácil manejo de tal modo que las etiquetas de los bultos sigan siendo visibles en todos ellos no debe ser considerado un sobreenvase a menos que el remitente saque provecho de la determinación del IT del sobreenvase por medición directa de la tasa de dosis.

Bulto

231.1. Los términos “bulto” y “embalaje” se utilizan para distinguir entre el conjunto de componentes destinados a contener los materiales radiactivos (embalaje) y ese conjunto de componentes más el contenido (bulto).

231.2. Debido a que el bulto puede ser transportado con cierto equipo estructural o sin él, quizás sea necesario evaluar ambas situaciones para determinar la idoneidad y conformidad del embalaje.

231.3. Si un equipo determinado se sujeta al bulto durante el transporte para fines de manipulación, quizás sea necesario también considerar su efecto en condiciones de transporte normales y de accidente. En el caso de los bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M), del Tipo C y de los bultos diseñados para contener material fisible, el diseñador debería alcanzar un acuerdo con la autoridad competente.

231.4. Una cisterna, un contenedor cerrado o un recipiente intermedio para graneles con su contenido radiactivo pueden utilizarse en virtud del Reglamento de Transporte como uno de los tipos de bulto, a condición de que cumplan con el diseño establecido, los ensayos y los requisitos de aprobación aplicables a ese tipo de bultos. Por otra parte, una cisterna, un contenedor cerrado o un recipiente metálico intermedio para graneles con su contenido radiactivo

pueden utilizarse como un bulto industrial del Tipo BI-2 o del Tipo BI-3 si cumplen con los requisitos del Tipo BI-1, así como con los otros requisitos que están específicamente indicados en los párrafos 627 a 630 del Reglamento de Transporte.

Embalaje

232.1. Otras funciones de seguridad incluidas en esta definición (véanse los párrs. 231.1 y 231.2) son el blindaje, el control de criticidad, la prevención de daños debidos al calor y el funcionamiento de los elementos necesarios para que el bulto pueda cumplir los criterios de comportamiento especificados en el Reglamento de Transporte con respecto a las condiciones de transporte rutinarias, normales y de accidente aplicables al tipo de bulto.

232.2. A los efectos del diseño y la verificación del cumplimiento, un embalaje puede incluir cualquier parte o todo el equipo estructural necesario para manipular o asegurar el bulto que se sujeta permanentemente o se ensambla como parte integrante del embalaje.

232.3. Con objeto de determinar los componentes estructurales que deberían ser considerados parte del embalaje, es necesario examinar el uso y propósito de tal equipo con respecto a la seguridad del transporte. Si, para los fines de seguridad, un embalaje solo puede ser transportado con determinadas estructuras, es normal considerar esas estructuras como parte del embalaje. Esto no significa que un remolque o vehículo de transporte deba ser considerado parte del embalaje en el caso de un transporte especial. Un medio de transporte no debe ser considerado parte del embalaje aun tratándose de un transporte especial.

Materiales radiactivos

236.1. Los criterios de protección radiológica definidos en la publicación GSR Part 3 [1] se utilizan para establecer los valores de exención específicos de los radionucleidos (que figuran en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte) a los efectos del transporte (véase el párr. 402.3 de la presente guía de seguridad).

236.2. El valor de concentración de actividad es el del material radiactivo dentro de un bulto o de cualquier sistema de contención interior o receptáculo del bulto. La concentración de actividad se calcula para el material radiactivo solo o, en su caso, distribuido uniformemente en el material no radiactivo. El cálculo de la concentración no debería tener en cuenta la masa de los materiales de embalaje, ni tampoco el contenido no radiactivo que no esté mezclado con el material

radiactivo o que pueda separarse del material radiactivo en las condiciones de transporte rutinarias. Si la concentración de actividad varía entre los bultos de la remesa o entre los sistemas de contención interior o los receptáculos dentro de los bultos, la concentración de actividad más alta debería considerarse como la concentración de actividad de la remesa.

236.3. El Reglamento de Transporte se basa en el supuesto de que un material fisible siempre es un material radiactivo. No obstante, las características de un material fisible se basan en propiedades totalmente diferentes (con probabilidad de fisión y multiplicidad neutrónica pero sin actividad) de las características de un material radiactivo (actividad, tipo de radiación y energía). Siempre que se modifiquen las especificaciones para la clasificación de un material como radiactivo en el Reglamento de Transporte, es indispensable que se tenga en cuenta el potencial de criticidad. El límite actual fijado para el U 235 se considera suficientemente seguro. Un material con nucleidos fisibles distintos de los del U 235 no podría tener potencial de criticidad mientras sus concentraciones de actividad y actividades totales no superaran los valores especificados en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte.

236.4. También se entiende por material radiactivo cualquier objeto contaminado con sustancias radiactivas cuya contaminación supere los niveles indicados en el párrafo 214 del Reglamento de Transporte y la actividad total del envío supere los valores especificados en los párrafos 402 a 407 del Reglamento de Transporte.

Expedición

237.1. En el contexto del transporte de los materiales radiactivos, por “destino” se entiende el punto final de un viaje en que el bulto es o probablemente sea abierto, excepto durante las formalidades aduaneras descritas en el párrafo 582 del Reglamento de Transporte.

Arreglo especial

238.1. Solo debería recurrirse al arreglo especial cuando fuera poco práctico efectuar una expedición con arreglo a todos los requisitos aplicables del Reglamento de Transporte. Este tipo de expedición está previsto para las situaciones en que los requisitos normales del Reglamento de Transporte no puedan cumplirse. Un ejemplo sería la disposición final de equipo obsoleto con materiales radiactivos cuando no existiera una manera razonable de enviar los materiales radiactivos en un bulto aprobado. El peligro asociado al reembalaje

y manipulación del material radiactivo podría sobrepasar la ventaja de crear y utilizar un bulto aprobado, suponiendo que se dispusiera de un bulto adecuado. Otro ejemplo podría ser el diseño de un bulto, aprobado según la reglamentación anterior, que no puede cumplir la reglamentación vigente. En tal caso, se necesitaría tiempo para modificar el diseño del bulto (por ejemplo, el desarrollo de un nuevo diseño de limitadores de impacto) y actualizar el embalaje; de modo que, para evitar el retraso, quizás fuera necesario entretanto recurrir a un arreglo especial para el transporte del bulto con el diseño anterior. Las disposiciones del arreglo especial deberían compensar el incumplimiento de todos los requisitos del Reglamento de Transporte proporcionando un nivel equivalente de seguridad. En consonancia con los conceptos subyacentes del Reglamento de Transporte, la dependencia de las medidas administrativas debería reducirse al mínimo al establecer las medidas compensatorias de los arreglos especiales. En cualquier caso, debería minimizarse el número de envíos en virtud de arreglos especiales.

Materiales radiactivos en forma especial

239.1. El Reglamento de Transporte se basa en la premisa de que el peligro potencial asociado al transporte de material radiactivo no fisible depende de cuatro parámetros importantes:

- a) la dosis por unidad de incorporación (por ingestión o inhalación) del radionucleido;
- b) la actividad total presente en el bulto;
- c) la forma física del radionucleido, y
- d) las tasas de dosis externas potenciales.

239.2. En el Reglamento de Transporte se reconoce que los materiales radiactivos en forma no dispersable, o sellados dentro de una cápsula metálica resistente, presentan un peligro de contaminación mínimo, aunque todavía existe el peligro de radiación directa. Los materiales protegidos de este modo contra el riesgo de dispersión en condiciones de accidente se designan como materiales radiactivos en forma especial. Los materiales radiactivos que en sí mismos son dispersables pueden fijarse por adsorción, absorción o depósito en un sólido inerte de manera que actúen como sólidos no dispersables (por ejemplo, láminas de metal). Véanse los párrafos 603.1, a 603.4, 604.1 y 604.2.

239.3. A menos que el contenido radiactivo de un bulto esté en forma especial, la cantidad de materiales radiactivos que puede transportarse en un bulto exceptuado o en un bulto del Tipo A se limitará a A_2 o a sus múltiplos. Por ejemplo, un bulto del Tipo A se limita a A_2 y el contenido de los bultos exceptuados se

limita a valores que van desde A_2 hasta valores tan bajos como $10^{-4}A_2$, o $10^{-5}A_2$ si es para transporte por correo, lo que depende de que el material sea sólido, líquido o gaseoso y de que esté o no incorporado dentro de un instrumento o un artículo. Sin embargo, si el material está en forma especial, los límites del bulto cambian de A_2 a A_1 o a sus múltiplos apropiados. Según el radionucleido o los radionucleidos de que se trate, los valores A_1 difieren de los valores A_2 en factores que van desde 1 hasta 10 000 (véase el cuadro 2 del Reglamento de Transporte). La capacidad para expedir una cantidad superior en un bulto, si está en forma especial, se aplica solamente a los bultos del Tipo A y los exceptuados.

Actividad específica

240.1. La definición de la actividad específica abarca en la práctica dos situaciones diferentes. La primera, la definición de la actividad específica de un radionucleido, es similar a la definición de la actividad específica de un elemento establecida por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU). La segunda, la definición de la actividad específica de un material a los efectos del Reglamento de Transporte, se refiere más concretamente a una concentración de actividad (actividad por unidad de masa). Así, la definición de la actividad específica es válida para ambos casos y depende de su aplicación en los requisitos del Reglamento de Transporte. La expresión “concentración de actividad” también se utiliza en algunos párrafos del Reglamento de Transporte (por ejemplo, véase el párr. 402 y el cuadro 2 conexo del Reglamento de Transporte).

240.2. El período de semidesintegración y la actividad específica de cada radionucleido que figuran en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte se muestran en el cuadro II.1 del apéndice II. Estos valores de actividad específica han sido calculados empleando la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Actividad específica (Bq/g)} &= \frac{(\text{Número de Avogadro}) \times \lambda}{(\text{Masa atómica})} \\ &= \frac{4,17 \times 10^{23}}{A \times T_{1/2}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde

A es la masa atómica del radionucleido;

$T_{1/2}$ es el período de semidesintegración del radionucleido en segundos;

λ es la constante de desintegración en s^{-1} del radionucleido = $\ln 2/T_{1/2}$.

240.3. La actividad específica de cualquier radionucleido no enumerado en el cuadro II.1 del apéndice II puede calcularse mediante la ecuación (2.1).

240.4. La actividad específica del uranio, con varios niveles de enriquecimiento, se muestra en el cuadro II.3 del apéndice II.

240.5. Para determinar la actividad específica de un material en que están distribuidos los radionucleidos es necesario incluir en el componente de masa toda la masa de ese material o un subconjunto de este (es decir, la masa de los radionucleidos y la masa de cualquier otro material). También deberían tenerse en cuenta las diferentes interpretaciones de la actividad específica incluidas en la definición de los materiales BAE (véase el párr. 226 del Reglamento de Transporte) y el cuadro II.1 de la presente guía de seguridad.

Cisterna

242.1. Con objeto de conseguir la armonización con las actuales Recomendaciones de las Naciones Unidas [11] se incluyó el límite de capacidad mínima de 450 L al volumen de la cisterna.

242.2. En el párrafo 242 del Reglamento de Transporte se incluye el contenido sólido de las cisternas; dicho contenido generalmente se encuentra en forma de polvo o granulado.

Transporte a través de países o hacia países

243.1. La definición de la aprobación multilateral se limita a los países a través de los cuales o hacia los cuales se transporte la remesa, y excluye concretamente los países sobre cuyo territorio una aeronave pueda transportar la remesa siempre que la aeronave no tenga escalas programadas en ellos.

Índice de transporte

244.1. El índice de transporte (IT) cumple muchas funciones en el Reglamento de Transporte, incluso la de establecer la base sobre la cual el transportista debe separar los materiales radiactivos de las personas, de las películas fotográficas sin revelar y de otras remesas de materiales radiactivos, y limitar el nivel de exposición a las radiaciones de los miembros del público y de los trabajadores del transporte durante el transporte y el almacenamiento en tránsito.

244.2. Desde la edición de 1996 del Reglamento de Transporte, el IT ya no hace ninguna contribución al control de la acumulación de los bultos que contienen material fisible desde el punto de vista de la seguridad con respecto a la criticidad. Esto ahora se logra mediante un ISC independiente (véanse los párrs. 218.1 y 218.2). Aunque el anterior enfoque basado en un único valor de control para la protección radiológica y para la seguridad con respecto a la criticidad fue definido para una aplicación operacional simple, el uso actual de un IT y un ISC independientes elimina limitaciones importantes en la separación durante el transporte y el almacenamiento en tránsito de los bultos que no contienen materiales fisibles. La razón de conservar la designación de IT es que en la inmensa mayoría de las remesas de materiales radiactivos no hay materiales fisibles y, por lo tanto, el uso de un nuevo nombre para el IT de material “solamente radiactivo” habría podido crear confusión debido a la necesidad de introducir y de explicar dos nuevos nombres. Debería tenerse cuidado y no confundir el uso del valor del IT y considerar el valor del ISC como el único control de la acumulación de los bultos desde el punto de vista de la seguridad con respecto a la criticidad.

244.3. Véanse los párrafos 523.4 a 523.6, 524.1 y 524A.1.

Torio no irradiado

245.1. La expresión “torio no irradiado” utilizada para definir los materiales BAE trata de excluir todo el torio que se haya irradiado en un reactor nuclear o por otra fuente de neutrones para transformar parte del Th 232 en U 233, un material fisible. La definición habría podido prohibir la presencia de U 233, pero el torio natural puede contener trazas de U 233. El límite de 10^{-7} g de U 233 por gramo de Th 232 tiene el objetivo de prohibir la presencia de cualquier cantidad de torio irradiado y reconocer a la vez la presencia de trazas de U 233 en el torio natural.

Uranio no irradiado

246.1. La expresión “uranio no irradiado” tiene la finalidad de excluir el uranio que haya sido irradiado en un reactor nuclear o por otra fuente de neutrones para transformar parte del U 238 en Pu 239 y parte del U 235 en productos de fisión. La definición podría haber prohibido la presencia de cualquier cantidad de plutonio o de productos de fisión, pero el uranio natural puede contener trazas de plutonio y productos de fisión. Los límites de 2×10^3 Bq de plutonio por gramo de U 235 y de 9 MBq de productos de fisión por gramo de U 235 tienen por objeto prohibir

la presencia de cualquier cantidad de uranio irradiado, y reconocen a la vez la presencia de trazas de plutonio y productos de fisión en el uranio natural.

246.2. La presencia de U 236 es un indicador de la exposición a un flujo neutrónico y a base de la referencia [12] se han elegido 5×10^3 gramos de U 236 por gramo de U 235 para el uranio enriquecido de calidad comercial. Este valor denota la posibilidad de una contaminación por trazas de uranio irradiado, pero garantiza que el material todavía pueda tratarse como no irradiado. Esta especificación representa la composición con el valor máximo de radionucleidos de uranio para los que el valor A_2 del hexafluoruro de uranio puede demostrarse que es ilimitado. La diferencia en el valor A_2 para el dióxido de uranio se considera insignificante [13].

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN II

- [1] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.
- [2] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, *Las recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación ICRP 103, editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) con la autorización de la ICRP, Senda Editorial S. A., Madrid, 2008.
- [3] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, Nuclear Criticality Control of Special Actinide Elements, Rep. ANSI/ANS-8.15-1981; R1987; R1995; R2005, (R = Reaffirmed), American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2005).
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Series 1 Freight Containers — Specifications and Testing — Part 1: General Cargo Containers for General Purposes, ISO 1496-1: 2013/AMD 1:2016, ISO, Geneva (2013).
- [5] ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Convenio Internacional sobre la Seguridad de los Contenedores (CSC) 1972*, enmendado en 1993, OMI, Londres, 1993.
- [6] ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Código IMDG: Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG)*, Edición de 2020, OMI, Londres, 2020.
- [7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Glosario de Seguridad del OIEA: Terminología empleada en seguridad nuclear y protección radiológica*, Edición de 2018, OIEA, Viena, 2022.

- [8] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*, ISO 9001:2015, ISO, Ginebra, 2015.
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Liderazgo y gestión en pro de la seguridad*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSR Part 2, OIEA, Viena, 2017.
- [10] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Sistema de gestión para el transporte seguro de materiales radiactivos*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° TS-G-1.4, OIEA, Viena, 2018.
- [11] NACIONES UNIDAS, *Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas: Reglamentación Modelo*, vigésimo segunda edición revisada, ST/SG/AC.10/1/Rev. 22, 2 vol., Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra, 2021.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Uranium Hexafluoride Enriched to Less Than 5% ²³⁵U, ASTM C996-15, ASTM, Philadelphia, PA (2015).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Interim Guidance for the Safe Transport of Reprocessed Uranium, IAEA-TECDOC-750, IAEA, Vienna (1994).

Sección III

DISPOSICIONES GENERALES

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

301.1. En la publicación GSR Part 3 [1] se establecen los requisitos de protección radiológica relativos a las situaciones de exposición planificadas, incluido el transporte de material radiactivo. El sistema de protección radiológica para situaciones de exposición planificadas se basa en los siguientes principios:

- a) ninguna práctica debe ser adoptada a menos que produzca un beneficio neto positivo (requisito 10: justificación de las prácticas).
- b) todas las exposiciones deben ser mantenidas en un valor tan bajo como razonablemente pueda alcanzarse, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales (requisito 11: optimización de la protección y la seguridad).
- c) la exposición de los trabajadores y los miembros del público deben mantenerse por debajo de los límites de dosis establecidos para la exposición ocupacional y para la exposición del público, respectivamente (requisito 12: límites de dosis).

301.2. Para la optimización de la protección y la seguridad se deben considerar las exposiciones normales y las exposiciones potenciales. Exposiciones normales son aquellas que se prevé que se reciban en condiciones de transporte rutinarias y normales, según se definen en el párrafo 106 del Reglamento de Transporte. Exposiciones potenciales son aquellas que no se prevé que sean recibidas con certeza, salvo como resultado de un accidente, de un suceso o de una secuencia de sucesos de índole probabilista, incluidos los fallos de equipo y los errores de operación. En el caso de las exposiciones normales, para la optimización se deberían tomar en cuenta tanto la magnitud prevista de las dosis individuales como el número de personas expuestas. Además, en el caso de las exposiciones potenciales, también se debería tener en cuenta la probabilidad de que ocurran accidentes o sucesos o secuencias de sucesos. Las disposiciones para aplicar el principio de optimización deberían documentarse en el programa de protección radiológica: véanse las publicaciones de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSG-7, *Protección radiológica ocupacional* [2], y N° TS-G-1.3, *Programas de protección radiológica para el transporte de materiales radiactivos* [3] y la referencia [4].

301.3. En la práctica de la protección radiológica, es necesario establecer criterios operacionales basados en magnitudes distintas de los límites de dosis. Los criterios de este tipo se conocen en general como límites derivados (o secundarios), ya que están relacionados con los límites primarios de dosis según un modelo definido. Son ejemplos de límites derivados en el Reglamento de Transporte los límites máximos de actividad A_1 y A_2 , los niveles máximos de contaminación transitoria, las tasas de dosis en las superficies de los bultos y en su proximidad y las distancias de separación asociadas al IT. El Reglamento del Transporte estipula evaluaciones y mediciones para garantizar que se cumplan esos límites.

301.4. El establecimiento de restricciones de dosis forma parte de la optimización; véanse el párrafo 3.25 de la publicación GSR Part 3 [1] y la referencia [5]. En relación con el transporte de material radiactivo, deberían utilizarse las restricciones de dosis descritas en la publicación GSR Part 3. Al establecer las restricciones de dosis para la exposición del público deberían tenerse en cuenta las exposiciones originadas por otras fuentes de interés para las situaciones de exposición previstas.

302.1. Los objetivos del programa de protección radiológica para el transporte de materiales radiactivos son los siguientes:

- a) disponer lo necesario para el examen adecuado de las medidas de protección radiológica en el transporte;
- b) garantizar que el sistema de protección radiológica se aplique adecuadamente;
- c) incrementar la cultura de la seguridad en el transporte de materiales radiactivos, y
- d) proporcionar medidas prácticas para satisfacer estos objetivos.

302.2. El programa de protección radiológica debería comprender, en el grado adecuado, los siguientes elementos:

- a) alcance del programa (véanse los párrs. 302.3 a 302.5);
- b) funciones y responsabilidades para la puesta en práctica del programa (véase el párr. 302.6);
- c) evaluación y optimización de la dosis (véase el párr. 303 del Reglamento de Transporte);
- d) evaluación de la contaminación superficial (véanse los párrs. 508, 513 y 514 del Reglamento de Transporte);
- e) separación y otras medidas de protección (véanse los párrs. 562.1 a 562.13);

- f) medidas de respuesta a emergencias (véanse los párrs. 304 y 305 del Reglamento de Transporte;
- g) capacitación (véanse los párrs. 311 a 315 del Reglamento de Transporte), y
- h) sistema de gestión (véase el párr. 306 del Reglamento de Transporte).

En la publicación N° TS-G-1.3 [3] figuran otras orientaciones detalladas sobre la elaboración y el contenido de un programa de protección radiológica en relación con cada uno de los elementos anteriores a) a h).

302.3. El programa de protección radiológica debería abarcar todos los aspectos del transporte que se definen en el párrafo 106 del Reglamento de Transporte. Sin embargo, se reconoce que, en algunos casos, ciertos aspectos del programa de protección radiológica se pueden incluir en los programas de protección radiológica de las instalaciones de envío, recepción o almacenamiento en tránsito. Habida cuenta de que la naturaleza y el alcance de las medidas que deban emplearse en los programas de protección radiológica dependerán de la probabilidad de que ocurran exposiciones y su magnitud, debería aplicarse un enfoque graduado.

302.4. Se deben considerar el tipo y la categoría del bulto. En el transporte rutinario la radiación externa es un aspecto importante y la categoría del bulto permite conocer su clasificación. Sin embargo, en condiciones de accidente lo importante es el tipo de bulto (exceptuado, industrial, del Tipo A, del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C). No se requiere que los bultos exceptuados, industriales y del Tipo A soporten accidentes. En los aspectos del programa de protección radiológica relacionados con las condiciones de accidente durante el transporte debería considerarse la posibilidad de fuga de estos tipos de bultos como resultado del propio transporte o de accidentes ocurridos durante su manipulación. Por el contrario, se espera que los bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M) y del Tipo C soporten todos los accidentes, salvo los más graves.

302.5. Las tasas de dosis externas de los bultos exceptuados y de los etiquetados con la categoría I-BLANCA son suficientemente bajas para poder manipularlos con seguridad y sin restricción y, por lo tanto, no es necesaria la evaluación de dosis. La consideración de los requisitos de protección radiológica puede limitarse a mantener los tiempos de manipulación al valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse y la separación puede conseguirse evitando el contacto directo prolongado de los bultos con las personas y otras mercancías durante el transporte. Sin embargo, será necesaria una evaluación de la dosis de las personas que manipulan bultos con etiqueta de las categorías II-AMARILLA

y III-AMARILLA y, en vista de ello, habrá que considerar la separación, los límites de dosis, las restricciones y la optimización.

302.6. La cooperación entre los remitentes, transportistas y destinatarios que intervienen en el transporte de materiales radiactivos permitirá definir mejor el programa de protección radiológica. Normalmente los remitentes y los destinatarios deberían tener un programa de protección radiológica apropiado como parte de las operaciones en sus instalaciones fijas. Deberían determinarse y describirse claramente las funciones y responsabilidades de las diferentes partes y personas que participan en la puesta en práctica del programa de protección radiológica. Debería evitarse el solapamiento de responsabilidades. Según la magnitud y la probabilidad de las exposiciones a las radiaciones, la responsabilidad general del establecimiento y de la puesta en práctica del programa de protección radiológica se puede asignar a un “experto cualificado” (es decir, una persona que, mediante la certificación de consejos o sociedades apropiados, la licencia profesional o sus cualificaciones académicas y experiencia, ha sido debidamente reconocida como profesional de experiencia en un campo de especialización pertinente, por ejemplo, en protección radiológica) [1].

302.7. En la publicación G-1.3 [3] y en la referencia [6] figuran más orientaciones sobre el establecimiento y aplicación de los programas de protección radiológica y la monitorización y evaluación de las dosis de radiación. En las referencias [7 a 9] puede obtenerse información práctica sobre la aplicación de los programas de protección radiológica en el transporte.

303.1. En la publicación GSR Part 3 [1] se fijó un límite de dosis efectiva para los miembros del público de 1 mSv en un año, y para los trabajadores de 20 mSv en un año (promediada en cinco años consecutivos y sin que se exceda de 50 mSv en un año). Los límites de dosis para el cristalino del ojo, las extremidades (manos y pies) y la piel, así como los límites de dosis para aprendices de 16 a 18 años de edad, también se establecen en la publicación GSR Part 3 [1], que también incluye otras restricciones con respecto a la exposición de las trabajadoras embarazadas o en periodo de lactancia. Los límites y las restricciones de dosis se aplican a todas las situaciones de exposición planificadas, con excepción de las exposiciones médicas, y deberían considerarse en el contexto de los requisitos del párrafo 303 del Reglamento de Transporte.

303.2. En el párrafo 303 del Reglamento de Transporte figuran tres categorías para la monitorización y la evaluación de las dosis de radiación. La primera categoría (debajo del nivel especificado en el párrafo 303 a)) establece un intervalo de dosis en que no se necesita realizar muchas acciones para la

evaluación y el control de las dosis. El valor superior de este intervalo es de 1 mSv en un año, que se eligió para que coincidiera con el límite de dosis establecido para un miembro del público. Para esta categoría, en que puede demostrarse que es muy poco probable que las dosis de los trabajadores excedan de 1 mSv en un año, no se requieren pautas de trabajo especiales, una monitorización exhaustiva, programas de evaluación de dosis ni el mantenimiento de historiales independientes. La segunda categoría (nivel indicado en el párrafo 303 a)) tiene un valor superior de 6 mSv en un año, que es 3/10 del límite de la dosis efectiva para los trabajadores (promediado en cinco años consecutivos). Este nivel representa una línea divisoria razonable entre las condiciones en que es poco probable que se alcancen los límites de dosis y aquellas en que podrían alcanzarse dichos límites. La tercera categoría (nivel indicado en el párrafo 303 b)) corresponde a cualquier situación en que es probable que la exposición ocupacional rebase el valor superior de 6 mSv en un año. También debería tomarse en consideración la probabilidad y posible magnitud de las exposiciones potenciales.

303.3. Muchos trabajadores del sector del transporte estarán en la primera categoría (menos de 1 mSv en un año) y no se requerirán medidas específicas para la monitorización o el control de la exposición. En el caso de las personas clasificadas en la segunda categoría (1 a 6 mSv en un año), será necesario un programa para la evaluación de dosis que puede basarse en la monitorización individual o en la del lugar de trabajo. En este último caso la monitorización del lugar de trabajo puede consistir a menudo en la medición de la tasa de dosis en las zonas ocupadas, al principio y al final de una etapa concreta del viaje. Sin embargo, en algunos casos también puede requerirse la monitorización del aire, comprobaciones de la contaminación superficial y la monitorización individual. En la tercera categoría (más de 6 mSv en un año) es necesaria la monitorización individual. En la mayoría de los casos esta se llevará a cabo mediante dosimetría personal con dispositivos como dosímetros de película, dosímetros termoluminiscentes o de luminiscencia ópticamente estimulada y, cuando sea necesario, dosímetros para neutrones (véase GSG-7 [2]).

303.4. Se ha demostrado que existe una correlación entre la dosis recibida por los trabajadores y la suma de los índices de transporte para determinadas operaciones. En la publicación TS-G-1.3 [3] se ofrece más orientación.

303.5. Dado que en las condiciones de uso exclusivo se permiten tasas de dosis relativamente altas, lo que significa que sería relativamente fácil superar una dosis de 1 mSv, se debería poner mayor cuidado para asegurar que se cumplan los requisitos del párrafo 303 del Reglamento de Transporte aplicando medidas específicas para la monitorización o el control de las exposiciones. Para evaluar la

exposición total individual deberían valorarse las exposiciones recibidas durante el transporte propiamente dicho junto con las dosis recibidas en otras fases del transporte, especialmente durante la carga y descarga.

RESPUESTA A EMERGENCIAS

304.1. Los requisitos establecidos en el Reglamento de Transporte, cuando los cumplen el diseñador, el remitente, el transportista y el destinatario del bulto, garantizan un alto nivel de seguridad en el transporte de materiales radiactivos. Sin embargo, pueden producirse emergencias relacionadas con este tipo de bultos. En el párrafo 304 del Reglamento de Transporte se reconoce que, para proporcionar una respuesta suficiente y segura ante tales emergencias, se requiere una planificación y preparación previas. En la mayoría de los casos la respuesta será análoga a la de emergencias nucleares o radiológicas en instalaciones fijas. Por lo tanto, es necesario que las organizaciones nacionales o internacionales competentes establezcan procedimientos de emergencia, y que se sigan estos procedimientos cuando se produzca una emergencia nuclear o radiológica durante el transporte de materiales radiactivos.

304.2. En las disposiciones establecidas por los remitentes y los transportistas se incluyen planes y procedimientos de emergencia para dar respuesta a emergencias nucleares o radiológicas durante el transporte de materiales radiactivos. En la entidad explotadora esas disposiciones podrían ajustarse a los planes y procedimientos establecidos para el transporte de otras mercancías peligrosas y para situaciones de emergencia convencionales, y pueden incorporarse a las disposiciones de respuesta a otras emergencias. Los requisitos en materia de preparación y respuesta para casos de emergencia se establecen en la publicación GSR Part 7 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA, Preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica* [10]. En las referencias [11 a 14] figuran más recomendaciones y orientaciones.

304.3. Las disposiciones de preparación y respuesta para casos de emergencia adoptadas por el remitente y el transportista deberían estar disponibles para que las examine la autoridad competente. Estas disposiciones deberían garantizar una colaboración adecuada entre las distintas organizaciones que participan en la respuesta a emergencias. Deberían tener carácter prioritario el establecimiento de contactos con las autoridades nacionales, el suministro de información técnica a esas autoridades, como la descripción de los embalajes y el contenido de los bultos asociados al accidente, y la prestación de apoyo a las medidas de respuesta a emergencias.

305.1. Los remitentes y los transportistas deberían elaborar disposiciones, según proceda, para casos de emergencia durante el transporte de materiales radiactivos, de conformidad con el enfoque graduado. El contenido de las disposiciones debería ser proporcional a la magnitud del peligro que pueda presentarse durante los sucesos relacionados con el transporte. Deberían tomarse en consideración las modalidades de transporte en el momento de determinar las posibles consecuencias.

305.2. El peligro radiactivo quizás no sea el único peligro potencial que plantea el contenido de un bulto. Pueden existir otros peligros, como la piroforicidad, la corrosividad o la posibilidad de oxidación o, si se produce la emisión de su contenido, este puede reaccionar con el medio ambiente (por ejemplo, el aire, el agua) y producir sustancias peligrosas. Este último fenómeno se recoge en el párrafo 305 del Reglamento de Transporte a fin de garantizar una seguridad adecuada frente a los peligros químicos (no radiactivos). Especial atención merece el hexafluoruro de uranio por su propensión a reaccionar, en determinadas condiciones, con la humedad del aire y con el agua, para formar fluoruro de hidrógeno y fluoruro de uranilo (HF y UO_2F_2 , respectivamente).

305.3. Si el sistema de contención de un bulto sufre daños, el aire o el agua pueden alcanzar el contenido y, en algunos casos, reaccionar químicamente con él. En algunos materiales radiactivos estas reacciones químicas pueden producir sustancias cáusticas, ácidas, tóxicas o venenosas que podrían ser peligrosas para la población y el medio ambiente. Este problema debería ser considerado en el diseño del bulto y en los procedimientos de emergencia para reducir las consecuencias de dichas reacciones. En tal caso se deberían considerar las cantidades de materiales de que se trate, la posible cinética de reacción, los efectos atenuantes de los productos de reacción (por ejemplo, autoextinción, autofrenado, insolubilidad) y una posible concentración o dilución dentro del medio ambiente. Estos aspectos pueden dar lugar a restricciones en el diseño o el uso del bulto que van más allá de las relacionadas con la naturaleza radiactiva del contenido.

SISTEMA DE GESTIÓN

306.1. El sistema de gestión es esencialmente un método sistemático y documentado que asegura que se alcancen constantemente las condiciones o los niveles de seguridad necesarios. Toda evaluación y documentación sistemática de la ejecución que se tome en cuenta en función de la norma apropiada es una forma de sistema de gestión. Un enfoque disciplinado con respecto a todas las actividades que afecten a la calidad, entre ellas, cuando proceda, la especificación

y la verificación de la ejecución o la puesta en práctica satisfactoria de las medidas correctoras adecuadas, contribuirá a la seguridad del transporte y será una prueba de que se ha alcanzado la calidad requerida.

306.2. En el Reglamento de Transporte no se estipula un sistema de gestión pormenorizado debido a la amplia variedad de necesidades operacionales y a los requisitos algo diferentes que establecen las autoridades competentes de cada Estado Miembro. En la publicación TS-G-1.4 [15] se define un marco en que puede basarse el sistema de gestión. El grado de detalle del sistema de gestión dependerá de la fase de vida del bulto y del tipo de operación de transporte (por ejemplo, modalidad de transporte, tipo de bulto, frecuencia de transporte) por lo que se adoptará un enfoque graduado con arreglo al párrafo 104 del Reglamento de Transporte.

306.3. El sistema de gestión se debería establecer de manera oportuna, antes del comienzo de las operaciones de transporte. Cuando proceda, la autoridad competente asegurará que tal sistema se aplique como parte de la adopción y aplicación oportunas del Reglamento de Transporte.

306.4. El sistema de gestión debería abarcar el diseño, fabricación, ensayo, documentación, uso, mantenimiento e inspección de todos los materiales radiactivos en forma especial, de los materiales radiactivos de baja dispersión, de los materiales aprobados en virtud del párrafo 417 f) del Reglamento de Transporte y de los bultos para el transporte y el almacenamiento en tránsito. El fabricante, el remitente o el usuario deberían, en particular, estar preparados para demostrar que los métodos y materiales de fabricación utilizados están en conformidad con las especificaciones del diseño aprobado y que todos los embalajes se inspeccionan periódicamente y, de ser necesario, se reparan y mantienen en buenas condiciones para que sigan cumpliendo todos los requisitos y especificaciones pertinentes, incluso después de su uso repetido o en el momento de la expedición después de su almacenamiento.

306.5. Para satisfacer los requisitos del párrafo 306 del Reglamento de Transporte sería aceptable un sistema de gestión que cumpla con una norma internacional como la ISO 9001 [16] y que esté certificado por un organismo acreditado.

VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO

307.1. La adopción de normas para el transporte seguro basadas en el Reglamento de Transporte debería tener lugar dentro de un intervalo de tiempo apropiado en los Estados Miembros y llevarse a cargo por todas las organizaciones internacionales competentes. Debería hacerse hincapié en la oportuna aplicación de programas sistemáticos de verificación del cumplimiento para complementar la adopción del Reglamento de Transporte.

307.2. A los efectos del Reglamento de Transporte, la expresión “verificación del cumplimiento” tiene un amplio significado que incluye todas las medidas aplicadas por una autoridad competente con el fin de asegurar que en la práctica se cumplan las disposiciones del Reglamento de Transporte. “Cumplimiento” significa, por ejemplo, que:

- a) se utilizan bultos adecuados y resistentes;
- b) la actividad de los materiales radiactivos en cada bulto no excede del límite reglamentario de actividad de ese material y ese tipo de bulto;
- c) las tasas de dosis externas y los niveles de contaminación superficial de los bultos no exceden de los límites apropiados;
- d) los bultos están marcados y etiquetados correctamente y los documentos de transporte están completos;
- e) el número de bultos de materiales radiactivos en un medio de transporte se encuentra dentro de los límites reglamentarios;
- f) los bultos de materiales radiactivos son estibados en los medios de transporte y se almacenan manteniendo la correspondiente distancia de seguridad respecto de las personas y los materiales fotosensibles;
- g) solamente los dispositivos de estiba y elevación que han sido ensayados se utilizan en la carga, el transporte y la descarga de los bultos de materiales radiactivos;
- h) los bultos de materiales radiactivos se aseguran correctamente para el transporte, y
- i) solamente personal capacitado manipula los bultos de materiales radiactivos durante el transporte, incluidos los conductores de los vehículos que también puedan cargar o descargar los bultos.

307.3. Los objetivos principales de un programa sistemático de verificación del cumplimiento son:

- a) posibilitar la verificación independiente del cumplimiento reglamentario por parte de los usuarios del Reglamento de Transporte;

- b) servir de realimentación del proceso de reglamentación como base para las mejoras del Reglamento de Transporte y el programa de verificación del cumplimiento.

307.4. Un programa eficaz de verificación del cumplimiento debería incluir, como mínimo, medidas relacionadas con lo siguiente:

- a) la revisión y la evaluación, incluida la emisión de los certificados de aprobación;
- b) la inspección y la observancia.

307.5. Un programa de verificación del cumplimiento solo puede ejecutarse si su alcance y sus objetivos se transmiten a todas las partes que intervienen en el transporte de materiales radiactivos (es decir, diseñadores, fabricantes, remitentes, transportistas). Por lo tanto, los programas de verificación del cumplimiento deberían incluir disposiciones para la difusión de la información. Mediante esta información se debería comunicar a los usuarios la manera en que la autoridad competente espera que cumplan con el Reglamento de Transporte y las novedades en la esfera reglamentaria. Todas las partes deberían disponer de personal capacitado.

307.6. Para asegurar la idoneidad de los materiales radiactivos en forma especial (véase el párr. 239 del Reglamento de Transporte) y de ciertos diseños de bultos, es preciso que la autoridad competente evalúe esos diseños (véase el párr. 802 del Reglamento de Transporte). De esta forma la autoridad competente puede asegurar que los diseños cumplan con los requisitos reglamentarios y que los requisitos sean aplicados de manera uniforme por diferentes usuarios. Cuando así lo estipule el Reglamento de Transporte, las expediciones también estarán sujetas a revisión y aprobación con objeto de garantizar que se adopten las adecuadas medidas de seguridad en las operaciones de transporte.

307.7. La autoridad competente debería realizar auditorías e inspecciones como parte de su programa de verificación del cumplimiento para confirmar que los usuarios cumplen todos los requisitos aplicables del Reglamento de Transporte y aplican su sistema de gestión. Las inspecciones también son necesarias para determinar los casos de incumplimiento que puedan requerir medidas correctoras por parte del usuario o medidas coercitivas por parte de la autoridad competente. El propósito principal de un programa de coerción no es aplicar medidas punitivas sino fomentar el cumplimiento del Reglamento de Transporte.

307.8. Puesto que el Reglamento de Transporte incluye requisitos relativos a la aplicación de disposiciones para casos de emergencia nuclear o radiológica (véase el párr. 304 del Reglamento de Transporte), un programa de verificación del cumplimiento debería comprender actividades asociadas a la planificación y preparación para casos de emergencias y a la respuesta ante emergencias cuando sea necesario. Estas actividades deberían incorporarse en los correspondientes planes nacionales de emergencia. Además, la autoridad competente debería asegurar que los remitentes y los transportistas dispongan de planes de emergencia adecuados.

307.9. En la publicación *Compliance Assurance for the Safe Transport of Radioactive Material* (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° SSG-78) [17] se formulan más recomendaciones.

308.1. Las evaluaciones de las autoridades competentes, incluso las relativas a los programas de protección radiológica, también pueden utilizarse para evaluar la eficacia del Reglamento de Transporte y pueden formar parte de las actividades de verificación del cumplimiento pormenorizadas en la publicación SSG-78 [17] (véanse también los párrs. 307.1 a 307.8). Es especialmente importante evaluar si hay una optimización eficaz de la protección radiológica y la seguridad, lo que también puede contribuir a lograr y mantener la confianza del público.

308.2. Para dar cumplimiento al párrafo 308 del Reglamento de Transporte, debería recabarse información sobre las dosis de radiación que reciben los trabajadores y los miembros del público, información que debería revisarse según corresponda. Por ejemplo, deberían realizarse revisiones si se producen cambios importantes en las pautas de transporte o cuando se implante una nueva tecnología relacionada con los materiales radiactivos. La recopilación de información pertinente puede lograrse realizando mediciones y evaluaciones de la radiación. Las revisiones de las condiciones de accidente durante el transporte son necesarias, además de las relativas a las condiciones rutinarias y normales.

INCUMPLIMIENTO

309.1. Como resultado del incumplimiento de los requisitos del Reglamento de Transporte referentes a la contaminación superficial, y la consiguiente interrupción del transporte de expediciones de combustible irradiado, el OIEA convocó dos reuniones de consulta en 1999 para tratar esta cuestión, a las que siguió una reunión técnica en marzo de 2000. En estas reuniones se recomendó que se añadiera al Reglamento de Transporte un texto relativo a los requisitos

para la adopción de las medidas necesarias en casos de incumplimiento. Además, el Comité de Normas de Seguridad en el Transporte recomendó que el OIEA emprendiera un proyecto coordinado de investigación (PCI) sobre contaminación, cuyos resultados pueden consultarse en la referencia [18].

309.2. Los requisitos establecidos en el Reglamento de Transporte, cuando son cumplidos por el remitente, el transportista, el destinatario y cualquier entidad que intervenga en el transporte, garantizan niveles muy altos de seguridad para el transporte de materiales radiactivos. En el párrafo 309 del Reglamento de Transporte se reconoce que pueden ocurrir casos específicos de incumplimiento y que las organizaciones nacionales e internacionales deberían instaurar programas para investigar y analizar estos sucesos e instituir medidas reparadoras.

309.3. El término “incumplimiento” tiene un significado muy amplio que incluye todas y cada una de las situaciones (salvo accidentes de transporte) en que una expedición no cumple íntegramente los requisitos reglamentarios aplicables. La frase “cualquiera de los límites fijados en el presente Reglamento respecto de la tasa de dosis o de la contaminación” se refiere a todos los párrafos del Reglamento de Transporte que contienen límites respecto de la tasa de dosis o la contaminación, incluidos los párrafos 423, 505, 508, 509, 513, 516, 517, 526 a 529, 566 y 573 del Reglamento de Transporte. En algunos países, las autoridades competentes pueden decidir hacer extensivo el requisito a otros tipos de incumplimiento y al tipo y gravedad del incumplimiento que debe notificarse. De cualquier modo, los remitentes, transportistas y organizaciones que intervengan en el transporte tienen la responsabilidad primordial de evitar que se repitan los casos de incumplimiento.

309.4. El propósito del párrafo 309 del Reglamento de Transporte no es exigir a los transportistas o destinatarios que midan los niveles de contaminación y las tasas de dosis durante las expediciones.

309.5. Un programa eficaz de verificación del cumplimiento debería, como mínimo, establecer objetivos relacionados con la detección y el análisis de casos de incumplimiento y, entre otras cosas:

- a) proporcionar información al proceso reglamentario como base para las mejoras del Reglamento de Transporte y el programa de verificación del cumplimiento (véase el párr. 307 del Reglamento de Transporte),
- b) garantizar que se faciliten comunicaciones adecuadas y apropiadas y el intercambio de información entre el remitente, el transportista, el destinatario, las autoridades competentes pertinentes y cualquier entidad

que intervenga en el transporte que pueda verse afectada en relación con cualquier incumplimiento con el fin de asegurar que se eliminen estos casos en el futuro.

ARREGLO ESPECIAL

310.1. La intención del párrafo 310 del Reglamento de Transporte es permitir el transporte de remesas que no satisfagan todos los requisitos que les sean específicamente aplicables, aunque únicamente en virtud de arreglos especiales. El requisito de que el nivel total de seguridad sea al menos equivalente al que se obtendría si se hubieran cumplido todas las disposiciones aplicables (véase el párr. 104.1) debe cumplirse mediante un control operacional suplementario o medios alternativos. Puesto que no se satisfacen los requisitos reglamentarios normalmente aplicables, cada arreglo especial debe ser aprobado específicamente por todas las autoridades competentes del caso (es decir, se requiere la aprobación multilateral).

310.2. El concepto de arreglos especiales tiene por objeto dar flexibilidad a los remitentes para proponer medidas de seguridad sustitutivas, que sean efectivamente equivalentes a las estipuladas en el Reglamento de Transporte. Esto hace posible la creación de nuevos controles y técnicas para satisfacer a más largo plazo las necesidades existentes y nuevas de la industria, y la aplicación de medidas operacionales especiales para determinadas remesas cuando exista solamente un interés a corto plazo. De hecho, el papel de los arreglos especiales como posible medio para implantar y probar nuevas técnicas de seguridad que puedan asimilarse más adelante en disposiciones reglamentarias específicas es también vital para el desarrollo posterior del Reglamento de Transporte.

310.3. Es evidente que durante el transporte pueden presentarse situaciones imprevistas, como por ejemplo, que un bulto sufra un pequeño daño o que no cumpla, en cierta manera, todos los requisitos pertinentes del Reglamento de Transporte, lo que requerirá la adopción de medidas. Un arreglo especial puede ser adecuado cuando no haya una preocupación inmediata por motivos de salud, seguridad tecnológica o seguridad física. No se deberían exigir arreglos especiales para los casos de incumplimiento que requieran un transporte inmediato con el fin de poner la situación de incumplimiento bajo controles de salud y seguridad apropiados. Se considera que los procedimientos de respuesta a emergencias recomendados en la publicación *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency Involving the Transport of Radioactive Material* (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° SSG-65) [14] y los

programas de verificación del cumplimiento recomendados en la publicación N° SSG-78 [17] constituyen, en la mayoría de los casos, mejores enfoques para acontecimientos imprevistos de este tipo.

310.4. Se puede procurar la aprobación en virtud de un arreglo especial en las expediciones en que se hayan producido variaciones en las características típicas de un diseño de bulto que supongan la necesidad de aplicar medidas de seguridad compensatorias en forma de controles operacionales más rigurosos. En el párrafo 830.1 se incluyen detalles de posibles controles adicionales que pueden utilizarse en la práctica para este fin. La información suministrada para apoyar argumentaciones de seguridad equivalentes puede comprender datos cuantitativos, si se dispone de ellos, y abarcar desde un criterio ponderado y basado en la experiencia del caso hasta un análisis probabilista del riesgo.

CAPACITACIÓN

311.1. El suministro de información y capacitación forma parte integrante de todo sistema de protección radiológica. El grado de instrucción proporcionado debería estar en consonancia con la índole y el tipo de trabajo realizado. Los trabajadores que intervienen en el transporte de materiales radiactivos requieren capacitación relacionada con los riesgos radiológicos de su trabajo y la manera de minimizar estos riesgos en todas las circunstancias.

311.2. La capacitación debería estar asociada con los puestos y funciones específicos, con las medidas de protección concretas que deberían adoptarse ante un accidente o con el uso de determinado equipo. Debería incluir información general referente a la índole del riesgo radiológico y el conocimiento de la naturaleza de la radiación ionizante, sus efectos y su medición, según proceda. La capacitación debería considerarse como un compromiso continuo durante todo el período de empleo y entraña la capacitación inicial y los cursos de perfeccionamiento a intervalos apropiados. La eficacia de la capacitación debería comprobarse periódicamente.

311.3. Se ha publicado información sobre requisitos de capacitación específicos [19, 20].

312.1. La aplicación atinada de las reglamentaciones relativas al transporte de materiales radiactivos y la consecución de sus objetivos dependen en gran medida de que todas las personas interesadas reconozcan los riesgos inherentes y de que se tenga un conocimiento detallado del Reglamento de Transporte.

Esto solo puede lograrse planificando y manteniendo debidamente programas de capacitación iniciales y reiterados dirigidos a todas las personas que intervienen en el transporte de materiales radiactivos.

312.2. Los párrafos 312, 313 y 315 se añadieron en la edición de 2003 del Reglamento de Transporte. En las Recomendaciones de las Naciones Unidas [21] figuran requisitos similares; estas disposiciones complementan un enfoque uniforme de la capacitación en la esfera del transporte de mercancías peligrosas.

312.3. Solo personas debidamente capacitadas deberían participar en el transporte de materiales radiactivos. Los puestos, así como las obligaciones y responsabilidades conexas, deberían indicarse claramente en las descripciones de las organizaciones del remitente, el transportista y el destinatario. También resulta conveniente especificar las obligaciones y responsabilidades de otro tipo de personal, como empleados de la autoridad competente, inspectores independientes y personal de emergencia de modo que la capacitación pueda determinarse y concretarse.

312.4. Además de prever la capacitación de su propio personal, la autoridad competente debería especificar, según corresponda, la capacitación de otras personas relacionadas con el transporte de materiales radiactivos y participar en esa capacitación. Asimismo, la autoridad competente debería garantizar, por medio de su programa de verificación del cumplimiento y su supervisión del sistema de gestión, que se reconozcan y satisfagan todas las necesidades de capacitación de las organizaciones que intervienen en el transporte.

312.5. En la referencia [22] se puede obtener más orientación e información sobre la capacitación de todo el personal relacionado con el transporte de materiales radiactivos.

314.1. Todas las organizaciones deberían mantener registros adecuados de los planes de capacitación y los resultados de cada uno de los participantes. También deberían conservarse registros según los requisitos aplicables del sistema de gestión, que la autoridad reguladora debería examinar o inspeccionar periódicamente. La finalidad principal de estos registros es la siguiente:

- a) proporcionar a la autoridad competente o al órgano regulador pruebas de las cualificaciones apropiadas de todas las personas cuyas funciones tengan relación con la seguridad, y pruebas de las autorizaciones requeridas;

- b) facilitar documentación que pueda utilizarse en las revisiones del programa de capacitación para que puedan adoptarse las medidas correctoras necesarias.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN III

- [1] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.
- [2] OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Protección radiológica ocupacional, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSG-7, OIEA, Viena, 2022.
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Programas de protección radiológica para el transporte de materiales radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° TS-G1.3, Viena, 2011. (Hay una versión revisada de esta publicación en inglés).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Discussion of and Guidance on the Optimization of Radiation Protection in the Transport of Radioactive Material, IAEA-TECDOC-374, IAEA, Vienna (1986).
- [5] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, *Optimización de la protección radiológica en el control de la exposición ocupacional, Colección de Informes de Seguridad* N° 21, OIEA, Viena, 2004.
- [6] NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD, UK Guidance on Radiation Protection Programmes for the Transport of Radioactive Material, NRPB, Chilton, UK (2002).
- [7] WILSON, C.K., The air transport of radioactive materials, *Radiat. Prot. Dosim.* **48** 1 (1993) 129–133.
- [8] WILSON, C.K., SHAW, K.B., GELDER, R., “Radiation doses arising from the sea transport of radioactive materials”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89 (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).
- [9] FAIRBAIRN, A., The development of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, *At. Energy Rev.* **11** 4 (1973) 843.

- [10] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN PREPARATORIA DE LA ORGANIZACIÓN DEL TRATADO DE PROHIBICIÓN COMPLETA DE LOS ENSAYOS NUCLEARES, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE POLICÍA CRIMINAL (INTERPOL), ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSR Part 7, OIEA, Viena, 2018.
- [11] OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Criterios aplicables a la preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSG-2, OIEA, Viena, 2013.
- [12] OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GS-G-2.1, OIEA, Viena, 2010. (Hay una versión revisada de esta publicación en preparación).
- [13] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, OFICINA INTERNACIONAL DE TRABAJO, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE POLICÍA CRIMINAL (INTERPOL), ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Disposiciones para la finalización de una emergencia nuclear o radiológica, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSG-11, OIEA, Viena, 2020.
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency Involving the Transport of Radioactive Material*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-65, IAEA, Vienna (2022).

- [15] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Sistema de gestión para el transporte seguro de materiales radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° TS-G-1.4, OIEA, Viena, 2018.
- [16] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*, ISO 9001:2015, ISO, Ginebra, 2015.
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Compliance Assurance for the Safe Transport of Radioactive Material*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-78, IAEA, Vienna (2023).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiological Aspects of Non-fixed Contamination of Packages and Conveyances*, IAEA-TECDOC-1449, IAEA, Vienna (2005).
- [19] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, COMITÉ DE TRANSPORTES INTERIORES, *Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)*, edición de 2021, CEPE, Nueva York y Ginebra, 2020.
- [20] RIDDER, K., “The training of dangerous goods drivers in Europe”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, PATRAM 95 (Proc. Int. Symp. Las Vegas, 1995), United States Department of Energy, Washington, DC (1995).
- [21] NACIONES UNIDAS, *Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas: Reglamentación Modelo*, vigésimo segunda edición revisada, ST/SG/AC.10/1/Rev. 22, 2 vol., Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra, 2021.
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Safe Transport of Radioactive Material*, Training Course Series No. 1, IAEA, Vienna (2006).

Sección IV

LÍMITES DE ACTIVIDAD Y CLASIFICACIÓN

DISPOSICIONES GENERALES

401.1. Los números de las Naciones Unidas (UN), cada uno de los cuales se asocia con el nombre de expedición correspondiente, tienen la función de identificar las mercancías peligrosas como asientos únicos para sustancias o artículos bien definidos o como asientos genéricos para grupos de sustancias o artículos bien definidos. Los números de las Naciones Unidas para los materiales radiactivos fueron acordados gracias a la cooperación internacional entre el Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas del Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas¹ y el OIEA. El sistema de identificación por medio de números es preferible a otras formas de identificación basadas en símbolos o palabras debido a su relativa simplicidad desde el punto de vista de su reconocimiento internacional. Esta identificación puede utilizarse con muchos propósitos. Los números de las Naciones Unidas, que están armonizados con otras mercancías peligrosas, permiten la identificación rápida y adecuada de las mercancías radiactivas dentro del ámbito más amplio del transporte de mercancías peligrosas en general. Otro ejemplo es el uso de los números de las Naciones Unidas como única identificación en las operaciones de respuesta a emergencias. Cada uno de estos números puede asociarse a una única ficha de respuesta a emergencias, lo que permite que el personal encargado de la respuesta inicial, ante la inevitable ausencia de un especialista, disponga de una información genérica. Durante las primeras etapas de una emergencia, esta información ya elaborada puede ser más fácilmente accesible a un amplio grupo de personal no especializado encargado de prestar servicios de emergencia (véanse también los párrs. 546.1 a 546.5).

¹ En 2001 se reconfiguró el Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas del Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas y pasó a recibir el nombre de Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas y en el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos, que cuenta con un Subcomité de Expertos en Transporte de Mercancías Peligrosas específico.

VALORES BÁSICOS DE LOS RADIONUCLEIDOS

402.1. La limitación de la actividad en el contenido de los bultos del Tipo A (A_1 para el material en forma especial y A_2 para el material en forma no especial) para cualquier radionucleido o combinación de radionucleidos se deduce a base de las consecuencias radiológicas que se estiman como aceptables tras el fallo de un bulto después de un accidente, conforme a los principios de protección radiológica. El método de obtención de los valores A_1 y A_2 se especifica en el apéndice I.

402.2. En el Reglamento de Transporte no se estipulan límites en el número de bultos del Tipo A que puede llevar un medio de transporte. No es inusual que los bultos del Tipo A sean transportados juntos, a veces en grandes cantidades. Por consiguiente, es posible que en el caso de un accidente que entrañe este tipo de envíos, el término fuente sea mayor que la emisión producida por un solo bulto dañado. Sin embargo, se considera innecesario limitar el tamaño del término fuente potencial limitando el número de bultos del Tipo A en un medio de transporte. La mayoría de los bultos del Tipo A lleva una pequeña fracción de la cantidad de A_1 o A_2 ; de hecho, solamente un pequeño porcentaje de las remesas de bultos del Tipo A tiene más actividad que el equivalente de un bulto del Tipo A con su máxima actividad permitida. En un estudio realizado en el Reino Unido [1] se observó que la cantidad más alta cargada en un medio de transporte con muchos bultos del Tipo A era equivalente a menos de cinco bultos del Tipo A con su máxima actividad permitida. La experiencia indica también que los bultos del Tipo A se comportan bien en muchas condiciones de accidente. El conjunto de datos obtenidos en los Estados Unidos [2] y en el Reino Unido [3] durante cerca de 20 años ha proporcionado información sobre 22 accidentes relacionados con remesas múltiples de bultos del Tipo A. Solamente hubo emisión del contenido radiactivo en dos de estos sucesos. Ambos propiciaron emisiones del orden de $10^{-4}A_2$. Otro ejemplo puede encontrarse en la descripción de un accidente que sucedió en los Estados Unidos en 1983 [4] con un vehículo que llevaba a bordo 82 bultos (del Tipo A y exceptuados) con una actividad total equivalente de aproximadamente $4A_2$. Se destruyeron dos bultos que emitieron materiales radiactivos con una actividad de aproximadamente $10^{-4}A_2$.

402.3. El cuadro 2 del Reglamento de Transporte incluye límites de concentración de actividad y límites de actividad para la exención de materiales y remesas, respectivamente, de los requisitos del Reglamento de Transporte, incluidos los requisitos administrativos aplicables. Si un material contiene radionucleidos cuya concentración de actividad o la actividad de la remesa es inferior a los límites del cuadro 2 del Reglamento de Transporte, la expedición

de ese material está exenta, es decir, no se le aplica el Reglamento de Transporte (véase el párr. 236 del Reglamento de Transporte). Los principios generales para la exención [5] requieren que:

- a) el riesgo de radiación para las personas producido por la práctica o la fuente exenta sea lo suficientemente bajo para no provocar ninguna inquietud desde el punto de vista reglamentario;
- b) el impacto radiológico colectivo de la práctica o de la fuente exenta sea lo suficientemente bajo para no necesitar control reglamentario en las circunstancias imperantes, y
- c) las prácticas y las fuentes exentas sean intrínsecamente seguras, sin una probabilidad apreciable de que se produzcan situaciones que puedan llevar a un incumplimiento de los criterios a) y b).

402.4. Los valores de exención en función de la concentración de actividad y la actividad se calcularon inicialmente para incluirlos en las Normas Básicas de Seguridad (NBS) de 1996² (normalmente esos valores básicos de los radionucleidos son numéricamente iguales a los que se indican en el cuadro I.1 de la publicación GSR Part 3 [5]) tomando como base lo siguiente [6]:

- a) una dosis efectiva individual de 10 μ Sv en un año en condiciones normales;
- b) una dosis colectiva de 1 Sv-persona en un año en condiciones normales.

402.5. Los valores de exención se obtuvieron utilizando diversas situaciones hipotéticas y vías de exposición que no contemplaban explícitamente el transporte de materiales radiactivos. No obstante, se realizaron cálculos adicionales para situaciones específicas de transporte [7]. Estos valores de exención específicos para el transporte fueron comparados con los valores de las NBS² de 1996 (que son numéricamente iguales a los que se indican en el cuadro I.1 de la publicación GSR Part 3 [5]). Se concluyó que las diferencias relativamente pequeñas entre ambos conjuntos no justificaban la incorporación en el Reglamento de Transporte de un sistema de valores de exención diferente del existente en las NBS de 1996,

² AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Colección Seguridad del OIEA, N° 115, OIEA, Viena, 1997.*

dado que el uso de diferentes valores de exención en distintas prácticas puede dar lugar a problemas en las interfaces y causar complicaciones legales y procesales.

402.6. Los valores de exención en lo relativo a las concentraciones de actividad y a la actividad se obtuvieron en las NBS² de 1996 y se señalaron en el cuadro I-1 de las NBS² de 1996 (por lo general, esos valores básicos de los radionucleidos son numéricamente iguales a los que se indican en el cuadro I-1 de la publicación GSR Part 3 [5]). Los mismos valores de exención se reproducen en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte.

402.7. En el caso de los radionucleidos que no figuran en las NBS de 1996, se calcularon valores de exención para el Reglamento de Transporte con el empleo del mismo método que se indica en la referencia [6].

402.8. Los valores de exención para la concentración de actividad han de aplicarse a los materiales radiactivos colocados dentro de un embalaje, o dentro de un medio de transporte o sobre él.

402.9. Se han establecido valores de exención de actividad para el transporte de pequeñas cantidades de material que, cuando se transporten conjuntamente, su actividad total sea poco probable que dé lugar a una exposición radiológica significativa, incluso cuando se superen los valores de exención en relación con la concentración de la actividad. Por tanto, los valores de exención de actividad se establecen en función de la remesa más que del bulto.

402.10. En los radionucleidos cuyas cadenas de desintegración se han tenido en cuenta (lo que indica la referencia a la nota b)), los valores de las columnas 4 y 5 del cuadro 2 del Reglamento de Transporte se relacionan con la actividad o la concentración de la actividad del nucleido predecesor.

402.11. Los niveles de exención para las sustancias radiactivas están incorporados en la definición de los materiales radiactivos que figura en el párrafo 236 del Reglamento de Transporte.

DETERMINACIÓN DE LOS VALORES BÁSICOS DE LOS RADIONUCLEIDOS

403.1. En el caso de los radionucleidos que no están incluidos en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte, los límites de las concentraciones de actividad del material exento y los límites de actividad de las remesas exentas se calculan

de conformidad con los principios enunciados en la publicación GSR Part 3 [5]. Con respecto a la metodología del anexo I de la publicación GSR Part 3 [5], el material puede declararse exento sin ulterior examen siempre que en todas las circunstancias razonablemente previsibles, la dosis efectiva que se prevea que recibirá cualquier miembro del público del material exento sea del orden de 10 μSv o menos en un año. A fin de tener en cuenta situaciones de poca probabilidad, podría utilizarse un criterio diferente, a saber, que la dosis efectiva que se prevea que recibirá cualquier miembro del público en esas situaciones de poca probabilidad no exceda de 1 mSv en un año.

403.2. En los instrumentos y artículos que cumplan los requisitos establecidos en el párrafo 423 c) del Reglamento de Transporte, se permiten otros valores básicos de nucleidos en relación con los límites de actividad de una remesa exenta a reserva de su aprobación multilateral.

403.3. Para una remesa de instrumentos y artículos exenta se requiere la aprobación multilateral de los límites de actividad alternativos. La información que ha de presentarse a la autoridad competente se indica en el párrafo 817 del Reglamento de Transporte. Además, convendría incluir la información siguiente:

- a) una descripción de los usos previstos y beneficios previstos del instrumento o artículo y una descripción de la función para la que sirve el radionucleido;
- b) justificación de la elección de un radionucleido, en particular con respecto a otros radionucleidos que puedan tener menor toxicidad radiológica (por ejemplo, que emiten menos radiación penetrante o tienen un período más corto de semidesintegración). También debería justificarse el motivo por el que se ha elegido el material radiactivo con preferencia a otro no radiactivo;
- c) descripción de los ensayos prototipo realizados para demostrar la integridad del producto en uso normal y los resultados de estos ensayos que indiquen un posible uso indebido y daños, y
- d) tasas de dosis externas máximas derivadas del producto y las medidas tomadas para la verificación del cumplimiento.

404.1. Cuando los valores A_1 o A_2 tengan que ser calculados, deberían emplearse los métodos mencionados en el apéndice I. Se han considerado dos situaciones. En primer lugar, para un radionucleido con una cadena de desintegración que incluye uno o más radionucleidos en equilibrio, en la cual los períodos de semidesintegración de toda la progenie (descendientes) sean inferiores a 10 días y en que ningún radionucleido de la progenie tiene un período de semidesintegración más largo que el del nucleido predecesor; y, en segundo lugar, para cualquier otra situación. En la primera situación solamente

debería ser considerado el predecesor de la cadena porque se ha tenido en cuenta la contribución de los descendientes al desarrollar los valores A_1/A_2 (véase el apéndice I), mientras que en la última situación, en consonancia con el párrafo 405 del Reglamento, todos los nucleidos deberían considerarse por separado y como una mezcla de radionucleidos. En el caso en particular del Th(natural), del U(natural), del U(enriquecido hasta el 20 % o menos) y del U(empobrecido), la contribución de todos los nucleidos de las cadenas de desintegración del Th 232, del U 238 y del U 235 ya se tuvo en cuenta para determinar el valor A_1/A_2 “ilimitado” asignado a los asientos del cuadro 2 del Reglamento de Transporte, independientemente de sus respectivos períodos de semidesintegración.

405.1. Véase el apéndice I.

405.2. El plutonio procedente de reactores, recuperado del combustible irradiado de uranio poco enriquecido (menos del 5 % en U 235), constituye un ejemplo típico de una mezcla de radionucleidos en que se conoce la identidad y cantidad de cada componente. Los cálculos basados en el párrafo 405 del Reglamento de Transporte dan por resultado límites de actividad independientes de la abundancia de los radionucleidos del plutonio y del quemado comprendidos en el intervalo de 10 000 a 40 000 MW d/t. Dentro de este intervalo de grados de quemado, pueden utilizarse los valores $A_1 = 20$ TBq y $A_2 = 3 \times 10^{-3}$ TBq para el plutonio de reactores, teniendo en cuenta la acumulación de Am 241, hasta un período de cinco años después de la recuperación.

Es preciso señalar que estos valores pueden aplicarse solamente en el caso del plutonio separado del combustible gastado procedente de reactores térmicos, en que el combustible original comprenda uranio enriquecido hasta el 5 % en U 235 y el quemado esté en un intervalo que no sea inferior a 10 000 MW d/t y no sea superior a 40 000 MW d/t y en que la separación se haya efectuado menos de cinco años antes de haber finalizado la operación de transporte. También será necesario considerar por separado otros contaminantes del plutonio.

405.3. Solo se permite calcular la concentración de actividad del material exento si la mezcla es homogénea, ya que los modelos para determinar esas concentraciones de actividad se basan en el supuesto de que los isótopos están distribuidos de manera homogénea en todo el material. Las cuestiones relativas a la homogeneidad se examinan en los párrafos 409.1 y 409.10 a 409.15.

406.1. Para las mezclas de radionucleidos en que la identidad de los nucleidos sea conocida, pero no se conozcan en detalle sus respectivas actividades, se proporciona un método simplificado a los fines de determinar sus valores básicos.

Esto es particularmente útil en lo que respecta a las mezclas de productos de fisión, que contienen casi invariablemente una proporción de nucleidos transuránicos. En este caso, el grupo estaría simplemente entre los emisores alfa y los otros emisores y se emplearía el más restrictivo de los valores básicos respectivos de cada nucleido dentro de cada uno de los dos grupos. Para determinar los límites de actividad del contenido es necesario conocer la actividad alfa total y la actividad restante. Empleando este método en particular para la mezcla de productos de fisión, es posible tener en cuenta tanto el riesgo de los elementos transuránicos como el de los productos de fisión. Los riesgos relativos dependerán del origen de la mezcla (es decir, del origen del nucleido fisionable, del tiempo de irradiación, del tiempo de desintegración y posiblemente de los efectos del proceso químico).

406.2. En cuanto al uranio reprocesado, los valores A_2 pueden calcularse utilizando la ecuación para mezclas del párrafo 405 del Reglamento de Transporte, teniendo en cuenta las características físicas y químicas que probablemente se presenten en condiciones normales y de accidente. También quizás sea posible indicar que el valor A_2 es ilimitado demostrando que 10 mg de uranio tendrán menos actividad que la que da lugar a una dosis efectiva comprometida de 50 mSv para esa mezcla. Además, en la referencia [8] puede obtenerse información útil para calcular los valores A_2 en el caso del uranio reprocesado.

407.1. El cuadro 3 del Reglamento de Transporte proporciona datos por defecto para su uso a falta de datos conocidos. Los valores son los más bajos posibles dentro de los subgrupos alfa o beta-gamma. También se tienen en cuenta los valores A_1 de emisores de neutrones como Cf 252, Cf 254 y Cm 248.

407.2. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte el contenido radiactivo que se presentaba en el cuadro II de esa publicación fue clasificado en dos grupos: “Solo se conoce la presencia de nucleidos emisores beta o gamma” y “Se conoce la presencia de nucleidos emisores alfa o no se dispone de datos pertinentes”. En la edición del Reglamento de Transporte de 1996, el contenido radiactivo fue clasificado en tres grupos en función de los valores A_1 de los emisores neutrónicos: “Solo se conoce la presencia de nucleidos emisores beta o gamma”, “Solo se conoce la presencia de nucleidos emisores alfa” y “No se dispone de datos pertinentes”. Sin embargo, la segunda descripción no era precisa porque todos los emisores alfa emiten rayos gamma o rayos X después que emiten las partículas alfa. En la edición de 2005 del Reglamento de Transporte la segunda y la tercera descripciones fueron enmendadas para que dijeran “Se sabe que existen nucleidos emisores alfa, pero no emisores de neutrones” y “Se sabe que existen nucleidos emisores de neutrones o no se dispone de datos pertinentes”, respectivamente.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Materiales de baja actividad específica (BAE)

409.1. El preámbulo de la definición de BAE (véase el párr. 226.3) no incluye un texto relativo a la necesidad de que exista una distribución esencialmente uniforme de los radionucleidos en todo el material BAE. Sin embargo, se indica claramente que el material debería encontrarse de tal manera que pueda asignársele, de forma significativa, una actividad específica media. Considerando los materiales que realmente se transportan como BAE, se determinó que el grado de uniformidad de la distribución debería variar según la categoría de BAE. De esta manera se especifica para cada categoría de BAE un grado de uniformidad necesario (véase, por ejemplo, el párr. 409 c) i)). La expresión “distribuida por todo el material...” indica que la actividad no está concentrada en una pequeña parte del material, sino que existe una distribución de la actividad por todo el material o por partes de este, de forma que puede asignarse al material una actividad específica media (actividad por masa). La expresión “esencialmente distribuidos de modo uniforme” indica una distribución más uniforme de los radionucleidos a través del material que la expresión “distribuida por todo el material” referente a la actividad. Esta expresión es aplicable al material mezclado con un aglutinante sólido compacto (como el hormigón, el bitumen y la cerámica) para solidificarlo. Podría aplicarse a materiales como polvos o lodos que por sí mismos no reúnen los requisitos para que se les clasifique como BAE-III. En este caso, las condiciones controladas de la tecnología de mezclado deberían garantizar una distribución de actividad aproximadamente uniforme de los materiales BAE-III.

409.2. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte se incorporó la categoría BAE-I para designar los materiales de muy baja actividad específica. Estos materiales pueden transportarse sin embalar o en bultos industriales del Tipo 1 (Tipo BI-1), que están diseñados para cumplir los requisitos establecidos en el párrafo 623 del Reglamento de Transporte). Según el párrafo 409 a) i) del Reglamento de Transporte, los materiales BAE-I pueden consistir en concentrados de minerales distintos del uranio o el torio (por ejemplo, concentrado de mineral de radio) si esos materiales no cumplen las disposiciones de exclusión enunciadas en el párrafo 107 f) del Reglamento de Transporte. En la edición de 1996 del Reglamento de Transporte la categoría BAE-I fue revisada para tener en cuenta lo siguiente:

- a) la aclaración del alcance del Reglamento de Transporte en relación con minerales diferentes de los de uranio y torio, según el párrafo 107 f);

- b) los materiales fisibles en cantidades exceptuadas de los requisitos establecidos para los bultos que contengan materiales fisibles, según una de las disposiciones del párrafo 417, y
- c) la implantación de nuevos niveles de exención con arreglo al párrafo 236.

En consecuencia, la definición de BAE-I fue modificada a los efectos siguientes:

- a) incluir los minerales con radionucleidos naturales que no cumplan las disposiciones de exención enunciadas en el párrafo 107 f);
- b) excluir los materiales fisibles en cantidades no exceptuadas según el párrafo 417 (párr. 409 a) iii)), e
- c) incorporar los materiales radiactivos en los cuales la actividad está distribuida por todo el material en concentraciones hasta 30 veces el nivel de exención (párr. 409 a) iv)).

Se considera razonable que los materiales que contengan radionucleidos hasta 30 veces el nivel de exención puedan quedar exentos de algunas partes del Reglamento de Transporte y ser asociados con la categoría de materiales BAE-I. El factor de 30 ha sido seleccionado para tener en cuenta el procedimiento de redondeo empleado para deducir los niveles de exención de la publicación GSR Part 3 [5] y asegurar razonablemente que el transporte de tales materiales no dé lugar a dosis inaceptables.

409.3. La clasificación de los grupos de materiales BAE se estableció teniendo debidamente en cuenta el peligro radiológico que entrañan los materiales. Los materiales BAE-II o BAE-III pueden contener material fisible. Los materiales BAE-I solo pueden contener material fisible exceptuado conforme a una de las disposiciones de los apartados a) a f) del párrafo 417 del Reglamento de Transporte.

409.4. Los materiales previstos para ser transportados como materiales BAE-II podrían incluir desechos de las operaciones de reactores nucleares que no estén solidificados, como resinas de baja actividad y lodos de filtros, líquidos absorbidos y otros materiales similares de operaciones de reactores y materiales parecidos de otras operaciones del ciclo del combustible. Asimismo, los materiales BAE-II podrían incluir muchos elementos de equipo activado procedentes de la clausura de instalaciones nucleares.

409.5. Aunque algunos de los materiales que se consideran apropiados para incluirlos en la categoría BAE-III podrían considerarse como esencialmente distribuidos de modo uniforme (por ejemplo, los líquidos concentrados en una matriz de hormigón), otros materiales, como las resinas solidificadas, si bien

están distribuidos por toda la matriz, tienen un grado inferior de homogeneidad. En los párrafos 409.6 a 409.15 se proporciona orientación sobre el grado de uniformidad de la distribución de actividad que se debe alcanzar para cumplir los requisitos reglamentarios aplicables a los materiales de la categoría BAE-III.

409.6. Las disposiciones relativas a los materiales BAE-III tienen el objetivo principal de permitir determinados envíos de desechos radiactivos con una actividad específica media estimada superior a $10^{-4}A_2/g$, límite fijado para los materiales BAE-II. El límite más alto de actividad específica de $2 \times 10^{-3} A_2/g$ estipulado para los materiales BAE-III se justifica por lo siguiente:

- a) La restricción de que esos materiales sean sólidos en una forma no fácilmente dispersable y, por lo tanto, la exclusión explícita de polvos, así como de líquidos y soluciones.
- b) El requisito de utilizar bultos industriales del Tipo 3 (Tipo BI-3) (párr. 625 del Reglamento de Transporte) en las condiciones de uso no exclusivo, que es esencialmente el mismo nivel de los bultos del Tipo A para sólidos.

409.7. El límite de actividad específica para materiales BAE-II líquidos de $10^5A_2/g$, que es un factor de 10 veces más restrictivo que para sólidos, tiene en cuenta que la concentración del líquido puede incrementarse durante su transporte.

409.8. Un aglutinante sólido y compacto, como el hormigón o el bitumen, que se mezcla con el material BAE, no se considera como un material de blindaje externo. En este caso, el agente aglutinante puede disminuir la tasa de dosis en la superficie y puede tenerse en cuenta para determinar la actividad específica media

Sin embargo, si los materiales radiactivos están rodeados por un material de blindaje externo, que en sí mismo no es radiactivo, como ilustra la figura 2, ese material de blindaje externo no debería ser considerado en la determinación de la actividad específica de los materiales BAE.

409.9. Para sólidos BAE-II y materiales BAE-III no incorporados dentro de un agente aglutinante sólido y compacto, el Reglamento de Transporte estipula que la actividad esté distribuida por todo el material. El Reglamento no establece requisitos sobre cómo debe estar distribuida la actividad por todo el material (es decir, la actividad no necesita estar uniformemente distribuida). No obstante, es importante reconocer que el concepto de limitación de la actividad específica estimada puede dejar de ser significativo, si en un gran volumen, la actividad está confinada claramente a un porcentaje reducido de ese volumen.

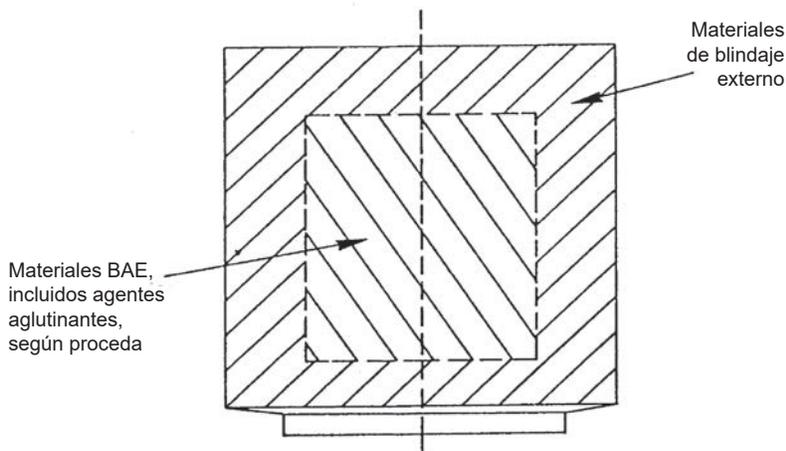


Fig. 2. Material BAE rodeado por un volumen cilíndrico de material de blindaje no radiactivo

409.10. El remitente debería asegurar que la actividad del material BAE esté distribuida de manera que se le pueda asignar una actividad específica media y que la mayor parte de la actividad no esté confinada a un pequeño porcentaje de ese volumen. Existen varios métodos que serían adecuados para este fin. La elección del método debería depender de los conocimientos sobre el material BAE y tener en cuenta el tratamiento previo del material.

409.11. En los materiales en que la actividad deba estar distribuida uniformemente (sólidos BAE-II y materiales BAE-III no incorporados en un aglutinante sólido y compacto para solidificarlos), un método sencillo para evaluar la actividad específica media consiste en dividir el volumen ocupado por el material BAE en partes definidas y seguidamente evaluar y comparar la actividad específica de cada una de esas partes. No deberían ser preocupantes las diferencias en un factor inferior a 10 de la actividad específica entre las distintas partes. Se debería presentar una justificación de que la asignación de las partes es adecuada y de que el material que se encuentra dentro de cada parte cumple las expectativas de que la actividad se encuentra “distribuida en todo el material”. Con todo, no es preciso comparar la actividad específica de cada una de estas partes siempre que la actividad específica media máxima en cualquiera de estas partes no exceda del límite de la actividad específica para los sólidos. Esta disposición también es aplicable al párrafo 409.15.

409.12. Hay que actuar con buen criterio al seleccionar el tamaño de las partes que se habrán de evaluar. Para volúmenes de material superiores a $0,2 \text{ m}^3$, se recomienda dividir el volumen en diez partes de aproximadamente el mismo tamaño por los siguientes motivos: en la mayoría de los casos se originará una posible emisión aérea de partículas respirables procedentes de materiales BAE-II o BAE-III que sufran un grave impacto comparable al del ensayo de caída de 9 m desde las partes del bulto en que se produzca el impacto. En consecuencia, la actividad específica media dentro del volumen parcial que esté sometido a las mayores fuerzas de impacto no debería superar en gran medida el límite de actividad específica fijado para los materiales BAE-II o BAE-III. De lo contrario, parece posible prever que, si se produce un grave impacto, la parte del material BAE que supere el límite de actividad específica permitido sea el origen de una emisión aérea. Tomando como base la experiencia adquirida en experimentos con caídas de 9 m de material BAE sobre un blanco indeformable, resulta razonable la hipótesis de que el tamaño del volumen crítico del cual se origina la mayor parte de la emisión aérea es aproximadamente el 10 % del total de los materiales BAE presentes en el bulto [9]. Las fuerzas de impacto local que actúan sobre el material BAE aumentan con la masa total del contenido del bulto. Por lo tanto, el volumen relativo a una emisión aérea es proporcional a la masa (el volumen) del contenido del bulto [6].

409.13. Según el criterio del remitente, en el caso de volúmenes de material de $0,2 \text{ m}^3$ o inferiores, este método puede sustituirse de forma razonable por otras evaluaciones que demuestren que se puede considerar que la actividad está “distribuida por todo el material” y que no existen concentraciones inaceptables de actividad en volúmenes pequeños de material, de tal manera que el concepto de limitar la actividad específica media estimada deje de ser significativo.

409.14. Para los materiales BAE-III formados por materiales radiactivos dentro de un agente aglutinante sólido y compacto se establece el requisito de que deben estar esencialmente distribuidos de manera uniforme en este agente. Como el requisito de que los materiales BAE-III deben estar “esencialmente distribuidos de modo uniforme” es cualitativo, es necesario establecer métodos de evaluación del cumplimiento de ese requisito.

409.15. El método que se explica a continuación es un ejemplo aplicable a los materiales BAE-III para determinar si están esencialmente distribuidos de modo uniforme en un agente aglutinante sólido y compacto. El método consiste en dividir el volumen del material BAE, incluido el agente aglutinante, en varias partes. Deberían seleccionarse por lo menos 10 partes, de tal forma que el volumen de cada una de ellas no sea mayor de $0,1 \text{ m}^3$. Después debería

determinarse la actividad específica de cada volumen (con mediciones, cálculos o una combinación de ambos). No deberían ser preocupantes las diferencias de actividad específica inferiores a un factor de tres entre las partes. Se debería justificar que la asignación de las partes es adecuada y que el material que se encuentra dentro de cada parte cumple las expectativas de que la actividad esté “esencialmente distribuida de modo uniforme”. El factor de tres de este procedimiento es más restrictivo que el factor de diez que se recomienda en el párrafo 409.11, puesto que se pretende que el requisito de que la actividad esté “esencialmente distribuida de modo uniforme” sea más restrictivo que el requisito de que esté “distribuida en todo el material”.

409.16. Como consecuencia de la definición de los materiales BAE, se han especificado más requisitos para lo siguiente:

- a) la cantidad de materiales BAE en un único bulto en función de la tasa de dosis externa del material sin blindaje (véase el párr. 517 del Reglamento de Transporte);
- b) la actividad total de materiales BAE en un único medio de transporte (véanse el párr. 522 y el cuadro 6 del Reglamento de Transporte).

Los requisitos a) y b) pueden ser mucho más restrictivos que los requisitos básicos para materiales BAE incluidos en el párrafo 409 del Reglamento de Transporte. Esto puede observarse en el siguiente ejemplo teórico: si se supone que un bidón de 200 L está lleno con un material sólido combustible con una actividad específica media estimada de $2 \times 10^{-3} A_2/g$, parecería que este material podría ser transportado como BAE-III. Sin embargo, por ejemplo, si la densidad del material fuera de 1 g/cm^3 , la actividad total en el bidón sería de $400A_2$ [$(2 \times 10^{-3} A_2/g) (1 \text{ g/cm}^3) (2 \times 10^5 \text{ cm}^3) = 400A_2$] y sería imposible su transporte como BAE-III, ya que el límite para medios de transporte es de $10A_2$ para navegación interior y de $100A_2$ para otras modalidades de transporte (véase el cuadro 6 del Reglamento de Transporte). (Véase el párr. 522.2).

409.17. Los objetos tanto activados como contaminados no pueden considerarse como OCS (véase el párr. 413.1). Sin embargo, tales objetos pueden calificarse como materiales BAE, puesto que un objeto que tiene actividad distribuida en todas sus partes y también una contaminación distribuida en sus superficies puede considerarse que cumple con el requisito de que la actividad esté distribuida por todo el material. Para calificar tales objetos como material BAE es necesario cerciorarse de que se cumplen los límites aplicables de actividad específica media estimada. Para determinar la actividad específica media deben considerarse todos los materiales radiactivos atribuidos al objeto (es decir, la actividad distribuida

y la actividad de la contaminación superficial). También deben satisfacerse los requisitos adicionales al material BAE, según proceda.

409.18. Los objetos pequeños que no sean en sí mismos radiactivos pero que estén contaminados en su superficie (OCS) podrían considerarse materiales BAE-II siempre que, debido a su tamaño y configuración dentro del embalaje, se pueda considerar que la actividad está “distribuida por todo el material” y que se les pueda asignar, de forma significativa, una actividad específica media estimada. Atendiendo a estos requisitos, la clasificación como BAE-II no se aplicaría a componentes como bombas contaminadas u otros dispositivos grandes contaminados. Los objetos OCS no pueden clasificarse como BAE-III para excluir la acumulación de niveles de actividad inaceptables resultantes de contaminaciones superficiales dentro del bulto.

409.19. La compactación de material no debería cambiar su clasificación. Para garantizarlo, al determinar la actividad específica media del material compactado no debería considerarse la masa del contenedor que haya quedado compactada con el material.

409.20. Véase también el apéndice I.

409.21. Si la actividad total del material BAE no rebasa los límites de actividad para bultos exceptuados que se señalan en la columna 4 del cuadro 4 del Reglamento de Transporte, el material BAE puede ser transportado como bulto exceptuado siempre que se cumplan los requisitos del párrafo 424 del Reglamento de Transporte y todos los requisitos y controles aplicables al transporte de bultos exceptuados (párrs. 515 y 516 del Reglamento de Transporte).

411.1. Véanse los párrafos 517.1 y 522.1.

Objeto contaminado en la superficie (OCS)

413.1. Los objetos OCS son, por definición, objetos que en sí mismos no son radiactivos, pero que tienen materiales radiactivos distribuidos en su superficie. Esta definición implica que los objetos que son radiactivos en sí mismos (por ejemplo, los objetos activados) y que también se contaminan, no pueden clasificarse como objetos OCS. Sin embargo, tales objetos pueden considerarse como materiales BAE, siempre que cumplan los requisitos para los materiales BAE especificados en el Reglamento de Transporte (véase también el párr. 409.17).

413.2. Si la actividad total de un OCS no supera los límites de actividad para los bultos exceptuados que se señalan en el cuadro 4 del Reglamento de Transporte, ese objeto puede ser transportado como bulto exceptuado a condición de que se cumplan los requisitos del párrafo 423 o del párrafo 424 del Reglamento de Transporte y todos los requisitos y controles aplicables para el transporte de bultos exceptuados (párrs. 515 y 516 del Reglamento de Transporte).

413.3. En lo que se refiere al nivel de contaminación, se hace una distinción entre los OCS-I y los OCS-II que define el tipo de embalaje que ha de utilizarse para transportar estos objetos. El Reglamento de Transporte proporciona suficiente flexibilidad para el envío de objetos OCS-I sin embalar o su envío en un bulto industrial (Tipo BI-1). El nivel superior de contaminación transitoria permitida en objetos clasificados como OCS-II exige el nivel superior de contaminación permitido por los bultos industriales del Tipo BI-2.

413.4. El modelo OCS-I utilizado como justificación para los límites de contaminación fija y transitoria se basa en la hipótesis siguiente. Los objetos dentro de la categoría de OCS son, entre otros, las partes de los reactores nucleares o de otro equipo del ciclo de combustible que han estado en contacto con el líquido refrigerante de los circuitos primario o secundario o con desechos derivados de los procesos, dando por resultado la contaminación de su superficie con mezclas de productos de fisión. Sobre la base de los niveles de contaminación permitidos para los emisores beta y gamma, un objeto con un área superficial de 10 m^2 habría podido recibir una contaminación fija de hasta 4 GBq y una contaminación transitoria de hasta $0,4 \text{ MBq}$. Para el transporte rutinario este objeto puede ser enviado sin embalar en la modalidad de uso exclusivo, pero es necesario someterlo a condiciones de seguridad (párr. 520 a) del Reglamento de Transporte) de tal manera que se garantice que no haya fuga de materiales radiactivos desde el medio de transporte. Se supone que un objeto OCS-I y otra carga pueden verse afectados en un accidente de forma tal que se raspe el 20 % de la superficie del objeto OCS-I y que se libere el 20 % de la contaminación fija de esa superficie raspada. Se considera además que se desprende toda la contaminación transitoria. La actividad total así emitida serían 160 MBq para la contaminación fija y $0,4 \text{ MBq}$ para la contaminación transitoria. Utilizando un valor A_2 de $0,02 \text{ TBq}$ para mezclas de productos de fisión emisores beta y gamma, la actividad emitida equivale a $8 \times 10^{-3} A_2$. Se estima que tal accidente solamente podría ocurrir en el exterior, de modo que, en consonancia con el supuesto básico del sistema Q formulado para los bultos del Tipo A (véase el apéndice I), se considera adecuada una incorporación de 10^{-4} de los radionucleidos emitidos para una persona en las proximidades del accidente. Ello daría lugar a una

incorporación total de $0,8 \times 10^{-6}A_2$. De esta forma, este modelo proporciona un nivel de seguridad equivalente al de los bultos del Tipo A.

413.5. El modelo para un objeto OCS-II es similar al establecido para un objeto OCS-I, aunque puede haber hasta 20 veces más contaminación fija y 100 veces más contaminación transitoria. Sin embargo, para el transporte de los objetos OCS-II se requiere un bulto industrial (del Tipo BI-2). La presencia de este tipo de bulto conllevará, en caso de producirse un accidente, una tasa de emisión similar a la de un bulto del Tipo A. Utilizando una tasa de fuga de 10^{-2} se produce una emisión total de radionucleidos emisores beta y gamma de 32 MBq debidos a la contaminación fija y de 0,4 MBq debidos a la contaminación transitoria, que equivalen a $2 \times 10^{-3}A_2$. Aplicando el mismo factor de incorporación que en el párrafo anterior, se llega a una incorporación de $0,2 \times 10^{-6}A_2$ y se logra así un nivel de seguridad equivalente al de los bultos del Tipo A.

413.6. Una superficie accesible es toda superficie que pueda frotarse fácilmente a mano empleando técnicas normalizadas de medición de la contaminación superficial. Cualquier otra superficie que se mantenga inaccesible debido a un elemento de diseño, barrera o cierre en las condiciones de transporte rutinarias es una superficie inaccesible. A modo de orientación, si una persona puede alcanzar con la mano un área de 300 cm^2 , esta se considera que es una superficie accesible. La expresión “con la mano” no tiene la intención de desalentar el uso de herramientas como los instrumentos de muestreo telescópico. Con la expresión “técnicas normalizadas de medición de la contaminación superficial” se pretende incluir métodos similares a los empleados para demostrar el cumplimiento de los límites de contaminación de los bultos que se señalan en el párrafo 508 del Reglamento de Transporte.

413.7. Una superficie accesible podría hacerse inaccesible para el transporte cerrándola o bloqueándola de forma segura, como en los siguientes ejemplos:

- a) tuberías de gran diámetro cuyos extremos pueden cerrarse con seguridad;
- b) cajas de herramientas u otras piezas del equipo de mantenimiento cerradas adecuadamente;
- c) cajas de guantes con los orificios de acceso bloqueados, e
- d) instrumentos contaminados u otro equipo contaminado dentro de un contenedor intermedio suficientemente sólido.

413.8. En el caso de los OCS-III, las superficies externas inaccesibles, como el espacio estrecho entre las tapas de acceso y el componente, se suelen

rellenar o cerrar con material de soldadura o masilla para prevenir la fuga de la contaminación durante el transporte, como se indica en la figura 3.

413.9. En los párrafos 508.2 y 508.7 a 508.12 se describen las técnicas de medición de la contaminación fija y transitoria de los bultos y medios de transporte. Estas técnicas son aplicables a los OCS. No obstante, para aplicar estas técnicas correctamente, el remitente debe conocer la composición de la contaminación.

413.10. Con respecto a objetos grandes generados a partir de la renovación o clausura de instalaciones nucleares, en los Estados Miembros se han llevado a cabo más de cien expediciones en virtud de arreglos especiales [10 a 21]. Estos objetos suelen ser muy voluminosos; por ejemplo, suelen medir 6 m de diámetro, 20 m de longitud y pesar 400 000 kg; además, no suelen resultar fáciles de transportar conforme a los requisitos establecidos para los OCS hasta la edición de 2012 del Reglamento de Transporte. Si bien era evidente que la mayoría de los objetos transportados contenían únicamente contaminación superficial, no era cierto que se pudieran cumplir los límites de los OCS para las áreas inaccesibles debido al depósito no uniforme de la contaminación; tampoco era cierto que se pudiesen medir fácilmente las áreas interiores sin acometer el desmantelamiento *in situ* del objeto. Estos objetos en general son importantes en cuanto a su diseño y construcción; por ejemplo, están diseñados y fabricados conforme a códigos pertinentes por la necesidad de utilizarlos como vasijas de presión. Si los objetos deben transportarse en bultos que satisfagan ensayos como los de apilamiento y los de caída libre, esto supondría afrontar enormes dificultades de ingeniería, costos prohibitivos o dificultades logísticas durante su

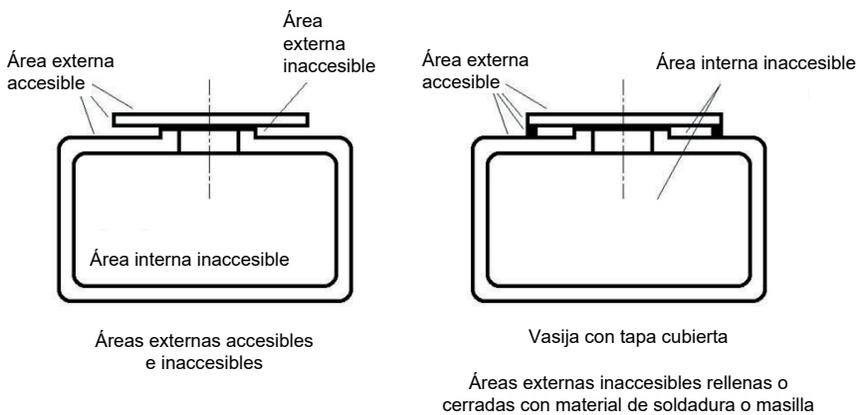


Fig. 3. Ejemplos de zonas externas accesibles e inaccesibles

transporte debido al tamaño y el peso de los componentes que se transportan. A medida que se adquiría mayor experiencia con este tipo de transporte, que ya es más habitual, se necesitaban requisitos reglamentarios específicos para posibilitar el traslado de grandes objetos sin la necesidad de contar con arreglos especiales. Partiendo de esta experiencia, para el transporte de grandes objetos como objetos con contaminación superficial, se ha elaborado un conjunto de requisitos reglamentarios (en una nueva categoría OCS-III), basados en el concepto del “bulto de rendimiento” y se ha incluido en la edición del Reglamento de Transporte de 2018.

413.11. En los OCS-III, aunque las aberturas normalmente están cerradas con soldadura, esas aberturas pueden sellarse (párr. 413 c) i) del Reglamento de Transporte) por cualquier método, siempre que esté justificado para prevenir la emisión del material radiactivo durante las condiciones de transporte rutinarias y los ensayos aplicables para las condiciones de transporte normales. (Véase el párr. 520 e) iv) del Reglamento de Transporte). Las aberturas deberían sellarse de forma que únicamente puedan abrirse mediante técnicas destructivas como mecanizado, aserrado, perforación o corte con soplete.

413.12. Aunque en el párrafo 413 c) ii) del Reglamento de Transporte no se da un valor umbral de sequedad, el drenaje de agua, el soplado y la ventilación de aire son procedimientos empleados para secar un objeto lo suficiente para fines de transporte. Para la disposición final quizás se requieran especificaciones de secado más estrictas.

413.13. Con respecto a los OCS-III, no existe ningún límite específico para los niveles de contaminación fija sobre las superficies externas puesto que, de manera semejante a los bultos, la radiación externa resultante estará combinada con la radiación penetrante del contenido y la tasa de dosis total se controla por otros requisitos específicos. Es posible que no pueda medirse la contaminación fija debido a la tasa de dosis que emana del objeto grande. No obstante, si se supone una contaminación fija considerable en las superficies externas, esto debería consignarse en el plan de transporte o en el programa de protección radiológica, respectivamente. En la mayor parte de los casos, la mayoría de la actividad del componente (cantidad A_2) se deberá a la contaminación superficial presente en las superficies interiores, más que en las superficies exteriores.

413.14. En los objetos OCS-I, OCS-II y OCS-III, la contaminación en la superficie inaccesible puede determinarse mediante estimaciones conservadoras o mediante un análisis por métodos que no sean mediciones directas de la contaminación.

413.15. En el sistema Q (véase el apéndice I), se contemplan cinco vías de exposición (es decir, dosis externas debida a fotones (Q_A), dosis externas por partículas beta (Q_B), dosis por inhalación (Q_C), dosis en piel y por ingestión debida a la transferencia de contaminación (Q_D) y dosis por inmersión (Q_E)). De estas vías, la dosis por inhalación (Q_C) se puede tomar como la principal vía de exposición en los OCS-III en caso de accidente, puesto que la mayor parte de la actividad que se dispersa procede de la contaminación en las superficies externas que puede desprenderse durante un accidente. Si un OCS-III se ve afectado por un accidente, la incorporación máxima de actividad para una persona en las proximidades no debería ser superior a la aceptada para los bultos del Tipo A (véase el apéndice VII).

413.16. El transporte de componentes activados, como las vasijas de reactores, se encuentra fuera del ámbito de los OCS-III.

414.1. Véanse los párrafos 517.1 y 522.1.

Materiales fisibles

417.1. El párrafo 417 contiene disposiciones en virtud de las cuales los materiales fisibles pueden quedar exceptuados de la clasificación como "FISIBLES". Esos materiales fisibles exceptuados deben adherirse a las especificaciones mencionadas en las disposiciones y a un control de transporte mínimo como el estipulado en el párrafo 570 del Reglamento de Transporte para garantizar la seguridad con respecto a la criticidad. En la referencia [22] se proporciona orientación detallada para la aplicación de estas disposiciones. Las disposiciones a) y b) del párrafo 417 siguen siendo las mismas que se establecen en las ediciones anteriores del Reglamento de Transporte. Las disposiciones c) a e) del párrafo 417 se mantienen como en la edición de 2012 del Reglamento de Transporte y establecen un límite más restrictivo sobre la masa que el permitido por bulto y remesa global (véase el párr. 570) en la edición de 2009 del Reglamento de Transporte. Los límites más restrictivos reflejan inquietudes acerca de posibles cuestiones de seguridad que podrían plantearse efectivamente con la acumulación de los bultos o remesas. Por ejemplo, la excepción histórica que permitía 5 g de nucleidos fisibles en un volumen de 10 L no incluía un requisito de que la masa no fisible dentro del volumen especificado contribuyera a garantizar la dilución de la masa. Por ejemplo, el transporte de 5 g de nucleidos fisibles dentro de un volumen de 10 L de polietileno podría plantear un peligro potencial para el transporte de gran volumen y el polietileno también podría perderse fácilmente en un incendio durante un posible accidente. Las excepciones actuales establecidas en el párrafo 417 c) a e) del Reglamento de

Transporte permiten el transporte de pequeñas cantidades de masa fisible por bulto y también limitan la masa de las remesas. Con todo, los valores de masa son aproximadamente un factor de 10 veces inferiores a los permitidos por la edición de 2009 del Reglamento de Transporte. Esta reducción importante de la masa se consideró que respondía positivamente a las preocupaciones con respecto a la acumulación potencial que podrían aplicar los remitentes en la práctica en caso de que no se aplicaran controles en el uso de un ISC. Lo dispuesto en el párrafo 417 f) del Reglamento de Transporte permite que un Estado Miembro certifique que un material fisible específico quede exceptuado de la clasificación como FISIBLE. Aun así, el certificado estará sujeto a su aprobación multilateral.

417.2. El remitente deberá garantizar que la masa de material fisible cargado en un bulto se ajuste a los límites de masa especificados en el párrafo 417 c), d) o e) del Reglamento de Transporte si se pretende que el bulto quede exceptuado de la clasificación como FISIBLE. Si se superan los límites de masa, el material podría transportarse (sin la aprobación de la autoridad competente) en virtud del párrafo 674 del Reglamento de Transporte, pero tendría que consignarse un valor de ISC en la etiqueta del bulto, que se transportaría con el número de las Naciones Unidas adecuado para los materiales fisibles.

417.3. El límite del 1 % de enriquecimiento en U 235 que figura en el párrafo 417 a) del Reglamento de Transporte es un valor redondeado ligeramente inferior al enriquecimiento mínimo en U 235 considerado como crítico para mezclas homogéneas infinitas de uranio y agua que se recoge en la referencia [23]. El enriquecimiento máximo no debería superar el 1 % por masa. La homogeneidad a que se alude en el párrafo 417 a) tiene por objetivo excluir la formación de un retículo de uranio ligeramente enriquecido en un medio moderador. Hay consenso en el sentido de que mezclas homogéneas y lodos son aquellos en que las partículas están distribuidas uniformemente en la mezcla y no tienen un diámetro mayor de 127 μm [24, 25]. En partículas mayores de 127 μm de ciertas mezclas se han observado efectos heterogéneos; por lo tanto, los transportistas de materiales como polvos con tamaños de gránulo que probablemente excedan de este valor deberían considerar si esta excepción resulta apropiada.

417.4. En el párrafo 417 b) del Reglamento de Transporte se establece el límite de excepción, que exige que el nitrato de uranilo en solución tenga un enriquecimiento máximo en U 235 del 2 % de la masa de uranio. Este límite es ligeramente inferior al valor de enriquecimiento mínimo crítico que se indica en la referencia [23]. Esta excepción depende del correcto embalaje del nitrato de uranilo, que resulta necesario debido a sus propiedades corrosivas. El criterio

fundamental que se tiene en cuenta es que este material debería estar protegido de efectos ambientales que modifiquen la relación nitrógeno/uranio (N/U) en condiciones de transporte normales.

417.5. El propósito del párrafo 417 c) del Reglamento de Transporte es establecer una excepción para la clasificación de cantidades limitadas de uranio enriquecido en U 235 hasta un máximo del 5 % en masa. El límite de masa por bulto seguirá permitiendo que se envíen muestras de UF_6 , atendiendo a la práctica habitual. Suponiendo un contenido de 10 g de UF_6 por tubo de muestra y 10 tubos por bulto, el valor de masa máximo por bulto sería 3,5 g, dando por sentado un enriquecimiento en masa del 5 % en U 235 o menos. En el párrafo 570 c) del Reglamento de Transporte se especifica un límite de 45 g por remesa para el transporte de estos bultos. Este límite de la remesa es aproximadamente 1/20 del valor de la masa que proporciona un margen adecuado de subcriticidad (véase el cuadro 13 del Reglamento de Transporte) y casi 1/10 del límite por remesa establecido en la edición de 2009 del Reglamento de Transporte. El límite de masa del bulto con arreglo a esta disposición corresponde a un valor del ISC de 1,0 si se aplica la fórmula del párrafo 674 a) del Reglamento de Transporte y a un valor del ISC de 0,4 si se aplica la fórmula del párrafo 674 b). No obstante, en una remesa solo se permitirían 13 bultos con 3,5 g como máximo.

417.6. En el párrafo 417 d) del Reglamento de Transporte se aplican los mismos conceptos para la seguridad que en el párrafo 417 c): un límite de masa muy reducido de 2 g por bulto y el requisito del párrafo 570 d), que limita la masa por remesa a 15 g. Este párrafo tiene la finalidad de posibilitar la expedición de pequeñas muestras de material fisible no irradiado o irradiado (por ejemplo, combustible gastado para fines de investigación o ensayo). La expedición de muestras ambientales (menos de 2 g) con masas desconocidas de material fisible es otro ejemplo de la necesidad de esta disposición. El valor de masa de 2 g por bulto se obtuvo para que coincidiera con la proporción relativa de los valores de masa consensuados que se utilizan como valores subcríticos de masa en el cuadro 13 del Reglamento de Transporte. Así pues, la proporción de 2 g que se indica en esta disposición con respecto a los 3,5 g mencionados en el párrafo 417 c) es aproximadamente la misma que la proporción de los valores correspondientes de masa de uranio consignados en el cuadro 13 del Reglamento de Transporte. Los límites de masa del bulto corresponden a los valores del ISC, que van de 0,4 (fórmula del párr. 674 b) para U 235) a 1,1 (fórmula del párr. 674 a) para U 235). Debido a las propiedades radiactivas del Pu 239, los valores de masa superiores a 0,5 g tendrían que ser transportados en bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M); por tanto, suponiendo 2 g por bulto, el valor superior del ISC correspondiente al párrafo 674 b) sería 0,7. En consecuencia, se

justifica permitir el mismo límite para todos los nucleidos fisibles sobre la base del requisito de que el embalaje sea de alta integridad si la masa de Pu que vaya a transportarse es superior a 0,5 g aproximadamente. Una vez más, el límite por remesa de 15 g impuesto al remitente en el párrafo 570 d) supondrá que solo se permitirían en una remesa siete bultos con 2 g como máximo por bulto.

417.7. El párrafo 417 e) del Reglamento de Transporte posibilita que se conceda a los remitentes una excepción para la expedición en uso exclusivo de hasta 45 g de nucleidos fisibles en un medio de transporte. El requisito del control del transporte (en uso exclusivo) se establece en el párrafo 570 e). Esta disposición puede utilizarse para el material embalado y sin embalar, como pequeños volúmenes de desechos. Esta es la única disposición del Reglamento de Transporte que permite el transporte de material fisible sin embalar. La inclusión del uso exclusivo limita considerablemente la aplicabilidad (sobre todo en el transporte aéreo), por lo que se requiere aplicar lo dispuesto en el párrafo 417 c) a d) en la mayoría de las expediciones de materiales que de otro modo podrían transportarse aplicando el párrafo 417 e).

417.8. El párrafo 417 del Reglamento de Transporte es un concepto nuevo introducido en la edición de 2012 del Reglamento de Transporte para que los Estados Miembros puedan aplicar una disposición mediante la cual los materiales fisibles definidos específicamente puedan quedar exceptuados de la clasificación como FISIBLES, siempre que la autoridad competente certifique que el material está exento de riesgos atendiendo a los requisitos del párrafo 606. Esta disposición es necesaria porque los procesos del ciclo del combustible nuclear que utilizan los Estados Miembros suelen diferenciarse suficientemente de la producción de una variedad de materiales fisibles de muy bajo riesgo. La serie de metodologías empleadas para procesar los desechos da origen a una diversidad de materiales fisibles de características muy diferentes pero normalmente con el mismo bajo nivel de riesgo de criticidad. La experiencia de las últimas dos décadas ha demostrado que no es posible elaborar especificaciones o requisitos generales en que pueda agruparse correctamente toda la serie de materiales fisibles de bajo riesgo detectadas. Sería imposible incorporar en el Reglamento de Transporte especificaciones para cada una de las numerosas excepciones conocidas. El envío de material exceptuado conforme al párrafo 417 f) por un Estado Miembro debe contar con la aprobación multilateral del transporte hacia un Estado o a través de su territorio. En los apartados b) y c) de la referencia [26] (véase el párr. 606.7) figura un ejemplo de excepción específica para los Estados Miembros.

418.1. La seguridad con respecto a la criticidad puede ser sensible a la cantidad, el tipo, la forma y la configuración de los materiales fisibles, de los

venenos neutrónicos fijos o de otros materiales no fisibles que estén incluidos en el contenido. Por consiguiente, el contenido de un bulto con materiales fisibles ha de ser el especificado para el diseño del bulto, bien directamente en el Reglamento de Transporte (véanse los párrs. 222, 417, 570, 674 y 675 del Reglamento de Transporte) o en los certificados de aprobación.

418.2. En lo referente a los diseños y materiales de bultos aprobados con arreglo al párrafo 606 del Reglamento de Transporte, debería tenerse especial cuidado en incluir en la descripción del contenido autorizado todo material (por ejemplo, receptáculos internos, materiales de embalaje, piezas de desplazamiento huecas) o impurezas significativas que (posible o intrínsecamente) puedan estar presentes en el bulto. Es importante que se cumpla con la cantidad de materiales fisibles especificada, ya que cualquier cambio podría causar un factor de multiplicación neutrónica más alto debido a la presencia de más material fisible o, en el caso de una menor cantidad de material fisible, podría permitir posiblemente una reactividad más alta causada por una alteración en la moderación óptima del agua (por ejemplo, en el certificado tal vez se deba exigir que se envíen intactos los conjuntos combustibles completos, sin retirar ninguna aguja). Incluir materiales fisibles u otros radionucleidos no autorizados en el bulto puede tener un efecto imprevisto en la seguridad con respecto a la criticidad (por ejemplo, sustituir U 235 por U 233 puede generar un factor de multiplicación más alto). De igual forma, cargar la misma cantidad de materiales fisibles en una distribución heterogénea u homogénea puede modificar notablemente el factor de multiplicación. En los sistemas de uranio poco enriquecido, una disposición heterogénea del material en forma de retículo da lugar a una reactividad más alta que una distribución homogénea de la misma cantidad de material.

Hexafluoruro de uranio

420.1. El límite de masa del hexafluoruro de uranio en un bulto cargado se especifica con objeto de prevenir un exceso de presión durante el llenado y el vaciado. Este límite debería basarse en la temperatura máxima de trabajo del cilindro para el hexafluoruro de uranio, el volumen interno mínimo certificado para el cilindro, una pureza mínima de hexafluoruro de uranio del 99,5 % y un margen de seguridad mínimo del 5 % de volumen libre cuando el hexafluoruro de uranio está en estado líquido a la temperatura máxima de trabajo [27]. En las referencias [28, 29] se incluyen especificaciones relativas al hexafluoruro de uranio comercial; estas imponen una pureza mínima de hexafluoruro de uranio del 99,5 %.

420.2. El requisito de que el hexafluoruro de uranio se presente para el transporte en forma sólida, con una presión interna del cilindro inferior a la presión atmosférica, se estableció como un método operacional seguro que brinda el máximo margen de seguridad posible en el transporte. Por lo general, los cilindros se llenan con hexafluoruro de uranio a presiones superiores a la presión atmosférica en condiciones gaseosas o líquidas. Hasta que se enfría y se solidifica el hexafluoruro de uranio, cualquier fallo del sistema de contención en el cilindro o del correspondiente sistema de llenado de la planta podría originar una emisión peligrosa del hexafluoruro de uranio. Con todo, puesto que el punto triple del hexafluoruro de uranio es 64 °C a la presión atmosférica normal de $1,013 \times 10^5$ Pa, si el hexafluoruro de uranio se presenta para el transporte en un estado térmico estacionario, en forma sólida, es improbable que durante las condiciones normales del transporte supere la temperatura del punto triple.

420.3. El cumplimiento del requisito de que el hexafluoruro de uranio se presente para el transporte en forma sólida, con una presión interna del cilindro inferior a la presión atmosférica, asegura que:

- a) La manipulación del cilindro antes y después del transporte, en condiciones de transporte normales, se desarrolle con el mayor margen de seguridad en relación con el comportamiento del bulto.
- b) La capacidad estructural del bulto sea máxima.
- c) El límite de contención del bulto funcione correctamente. El cumplimiento de este requisito impide que se presenten para su transporte cilindros que no se hayan enfriado correctamente después de la operación de llenado.

420.4. En la referencia [27] se especifican los criterios para establecer los límites de llenado y los límites específicos de llenado de los cilindros que contienen hexafluoruro de uranio, los más utilizados en el mundo. Los límites de llenado de cualquier otro cilindro que contenga hexafluoruro de uranio deberían establecerse aplicando estos criterios, y en lo que respecta a cualquier cilindro que requiera la aprobación de la autoridad competente, debería incluirse, en la documentación de seguridad que se someta a su aprobación, el análisis que establezca el límite de llenado y el valor del límite de llenado. Para un límite seguro de llenado debería tenerse en cuenta el volumen interno del hexafluoruro de uranio cuando esté caliente, en forma líquida, y, además, se debería prever un espacio vacío (es decir, el volumen de gas) sobre el líquido dentro del contenedor.

420.5. El hexafluoruro de uranio muestra una expansión considerable al pasar de fase sólida a líquida; se expande en un 47 % de sólido a 20 °C a líquido a 64 °C (desde $0,19 \text{ cm}^3/\text{g}$ hasta $0,28 \text{ cm}^3/\text{g}$). Además, el hexafluoruro

de uranio líquido se expande un 10 % más sobre la base del volumen sólido (desde $0,28 \text{ cm}^3/\text{g}$ en el punto triple hasta $0,3 \text{ cm}^3/\text{g}$) cuando se calienta de $64 \text{ }^\circ\text{C}$ a $113 \text{ }^\circ\text{C}$. Por consiguiente, es posible que se produzca un importante aumento adicional del volumen de hexafluoruro de uranio entre la temperatura mínima de llenado y las temperaturas más altas. Por tanto, el diseñador y el operador de la instalación deben actuar con sumo cuidado cuando se realice el llenado de los cilindros de hexafluoruro de uranio para que no se supere el límite seguro de llenado del cilindro. Esto es especialmente importante, ya que si no se tiene el suficiente cuidado, la cantidad de material que puede introducirse en un cilindro podría sobrepasar en mucho el límite seguro de llenado a la temperatura que normalmente se transfiere el hexafluoruro de uranio a los cilindros (es decir, a temperaturas de cerca de $71 \text{ }^\circ\text{C}$). Por ejemplo, un cilindro de 3964 L, con un límite de llenado de 12 261 kg, puede aceptar hasta 14 257 kg de hexafluoruro de uranio a $71 \text{ }^\circ\text{C}$. Cuando se calienta por encima de $71 \text{ }^\circ\text{C}$, el hexafluoruro de uranio líquido llenaría totalmente el cilindro y podría deformar hidráulicamente el cilindro y romperlo. Cantidades de hexafluoruro de uranio superiores a 14 257 kg romperían el cilindro si se calentara por encima de $113 \text{ }^\circ\text{C}$. La ruptura hidráulica es un fenómeno bien conocido y debería prevenirse cumpliendo los límites de llenado establecidos, que se basan en el volumen mínimo certificado del cilindro y en la densidad del hexafluoruro de uranio a $121 \text{ }^\circ\text{C}$ para todos los cilindros, o en la máxima temperatura de diseño del cilindro [30].

420.6. Antes de la expedición de un cilindro de hexafluoruro de uranio, el remitente debería verificar que su presión interna está por debajo de la presión atmosférica, midiéndola con una sonda de presión u otro dispositivo que indique convenientemente la presión. Ello está en consonancia con la norma ISO 7195 [27], que indica que para demostrar la idoneidad del cilindro para el transporte de hexafluoruro de uranio debería ejecutarse un ensayo de presión en frío por debajo de la presión atmosférica. Según la norma ISO 7125 [27], un cilindro de hexafluoruro de uranio no debería ser transportado a menos que se demuestre que la presión interna tiene un vacío parcial de $6,9 \times 10^4 \text{ Pa}$. En el procedimiento de uso del bulto debería especificarse la presión máxima permitida por debajo de la atmosférica, que se haya medido de esa manera y que sea aceptable para realizar la expedición, e incluirse los resultados de esta medición en la documentación apropiada. Este ensayo previo a la expedición también debería realizarse con sujeción a procedimientos aprobados del sistema de gestión.

420.7. El motivo de que se introdujera el número de las Naciones Unidas 3507 en el Reglamento de Transporte fue facilitar las expediciones de pequeñas

muestras de hexafluoruro de uranio. No estaba claro antes en qué condiciones de la clase 7 o la clase 8 debían realizarse las expediciones de estos bultos.

420.8. En los envíos de pequeñas cantidades de hexafluoruro de uranio inferiores a 0,1 kg, normalmente de muestras, se permiten embalajes exceptuados. El transporte de la pequeña cantidad de hexafluoruro de uranio debe estar en conformidad con lo dispuesto en el párrafo 419 c) del Reglamento de Transporte y en los requisitos establecidos en el párrafo 420.

CLASIFICACIÓN DE LOS BULTOS

Clasificación como bultos exceptuados

422.1. Los límites fijados para el contenido de materiales radiactivos de los bultos exceptuados son tales que el peligro de radiactividad asociado a una emisión total del material radiactivo es comparable al peligro que plantearía la fuga de parte del contenido de un bulto del Tipo A (véase el apéndice I).

422.2. El límite básico de actividad para el material sólido en forma no especial que puede transportarse en un bulto exceptuado es $10^{-3}A_2$. Este límite fue obtenido suponiendo que el 100 % del contenido radiactivo podría fugarse de un bulto exceptuado durante un accidente. La actividad máxima que escaparía en tal caso (es decir, $10^{-3}A_2$), es comparable con la fracción de contenido que se supone que puede fugarse de un bulto del Tipo A en los modelos dosimétricos empleados para determinar los valores A_2 (véase el apéndice I).

422.3. En los materiales sólidos en forma especial es muy escasa la probabilidad de fuga de cualquier material radiactivo dispersable. Por lo tanto, si la radiotoxicidad fuera el único riesgo que habría que tener en cuenta, podrían aceptarse límites mucho más altos de actividad para los materiales sólidos en forma especial presentes en bultos exceptuados. Sin embargo, la naturaleza de la forma especial no proporciona ninguna protección adicional contra la radiación externa. Por lo tanto, los límites para bultos exceptuados que contengan material en forma especial se basan más en A_1 que en A_2 . El límite básico seleccionado para los materiales sólidos en forma especial es $10^{-3}A_1$. Esto limita la tasa de dosis externa del material en forma especial sin blindaje a una milésima de la tasa utilizada para determinar los valores A_1 .

422.4. Para los materiales gaseosos los argumentos son semejantes a los utilizados para los sólidos y los límites básicos para bultos exceptuados con

materiales gaseosos son por tanto también de $10^{-3}A_2$ para el material en forma no especial y de $10^{-3}A_1$ para el material en forma especial. Cabe señalar que en el caso de gases elementales los límites por bulto son extremadamente pesimistas porque la derivación del valor A_2 como referencia incorpora en sí misma un supuesto de una dispersión del 100 % (véase el apéndice I).

422.5. El tritio en forma gaseosa se ha enumerado por separado porque el valor real A_2 para el tritio es mucho mayor de 40 TBq, que es el máximo valor que generalmente se aplica para los valores A_2 . El valor de $2 \times 10^{-2}A_2$ es conservador en comparación con otros gases, incluso teniendo en cuenta la conversión de tritio en agua tritiada.

422.6. En los líquidos se ha aplicado un factor de seguridad adicional de 10 porque se considera que hay una mayor probabilidad de derrame durante un accidente. El límite básico para bultos exceptuados con material líquido se fija por tanto en $10^{-4}A_2$.

422.7. Los bultos exceptuados no pueden clasificarse como FISIBLES. Si el bulto exceptuado contiene material fisible, este deberá cumplir con una de las disposiciones mencionadas en el párrafo 417 a) a f) del Reglamento de Transporte.

422.8. Para expediciones de menos de 0,1 kg de hexafluoruro de uranio, véanse también los párrafos 420.7 y 420.8 de la presente guía de seguridad y el párrafo 618 del Reglamento de Transporte.

423.1. Se permiten límites diferentes de los límites básicos cuando los materiales radiactivos están alojados dentro de un instrumento o forman parte de un instrumento u otro artículo fabricado con un grado adicional de protección contra la fuga de materiales en caso de accidente. En la mayoría de los casos ese grado de protección adicional se determina como un factor de 10, llegando así a límites para tales artículos que son 10 veces más altos que los límites básicos. El factor de 10 que se emplea para este caso, así como los utilizados en otras variaciones de los límites básicos, se han establecido basándose en la práctica.

423.2. En el caso de los gases, no hay ese grado de protección adicional, de modo que los límites para instrumentos y artículos fabricados que contienen fuentes gaseosas son los mismos que los límites para los bultos exceptuados en que el material gaseoso que contienen no está alojado en un instrumento o en un artículo.

423.3. El embalaje reduce la probabilidad de que se dañe el contenido y de que los materiales radiactivos en forma sólida o líquida se fuguen del bulto. Por consiguiente, los límites para bultos exceptuados con instrumentos y artículos fabricados que incorporen fuentes sólidas o líquidas se han fijado en 100 veces el límite individual por artículo o instrumento.

423.4. En los bultos con instrumentos o artículos que contengan fuentes gaseosas, el embalaje puede proporcionar cierta protección contra los daños, pero no reducirá perceptiblemente la fuga de ningún gas que pueda escaparse de él. Por lo tanto, para los bultos exceptuados que contengan instrumentos y artículos fabricados que incorporen fuentes gaseosas, los límites se han fijado solamente en 10 veces el límite individual por instrumento o artículo.

423.5. Lo dispuesto en el párrafo 423 b) del Reglamento de Transporte permite la excepción del marcado independiente de cada producto de consumo. En esa situación es preciso que el bulto lleve la marca “Radiactivo” en su superficie interna de modo que al abrir el bulto se vea fácilmente y con claridad la identificación del contenido radiactivo.

424.1. Véanse los párrafos 422.2 a 422.6.

426.1. Los artículos fabricados de uranio natural o empobrecido pueden clasificarse como materiales BAE-I y, por lo tanto, podrían transportarse en un bulto industrial. Con todo, pueden ser transportados en bultos exceptuados, siempre que los materiales se encuentren dentro de una envoltura inactiva, hecha de metal u otro material resistente. Se espera que esa envoltura prevenga la oxidación o la abrasión, absorba toda la radiación alfa y reduzca las tasas de dosis beta y el riesgo potencial de contaminación.

Requisitos suplementarios y controles para el transporte de embalajes vacíos

427.1. Los siguientes ejemplos describen otros posibles medios para la expedición cuando no sea aplicable el párrafo 427 del Reglamento de Transporte:

- a) Un embalaje vacío que no pueda cerrarse con seguridad debido a un daño u otros defectos mecánicos puede expedirse por otros medios que cumplan con las disposiciones del Reglamento de Transporte; por ejemplo, en virtud de las condiciones de un arreglo especial.
- b) Un embalaje vacío que contenga materiales radiactivos residuales o una contaminación interna que supere 100 veces los límites de contaminación

transitoria que se señalan en el párrafo 508 del Reglamento de Transporte debería expedirse solamente con la categoría de bulto que sea adecuada para la cantidad y la forma de la radiactividad residual o la contaminación.

427.2. La determinación de la actividad interna residual en el interior de un embalaje vacío puede ser una tarea difícil (véase el párr. 427 c) del Reglamento de Transporte). Además de los frotamientos directos (frotis), pueden utilizarse otros métodos o combinaciones de métodos, entre los que se incluyen:

- a) la medición en bruto de la actividad;
- b) la medición directa de los radionucleidos, y
- c) la contabilidad de los materiales, por ejemplo, por cálculos de “diferencia”, conociendo la actividad o la masa del contenido y la actividad o la masa extraídas al vaciar el bulto.

Sea cual fuere el método o combinación de métodos que se utilice, debería tenerse cuidado en prevenir la exposición excesiva e innecesaria del personal durante el proceso de medición. Debe prestarse atención especial a posibles altas tasas de dosis cuando se abra el sistema de contención de un embalaje vacío.

427.3. Durante el vaciado de los embalajes de hexafluoruro de uranio suelen acumularse restos de material residual. Estos restos no son generalmente de hexafluoruro de uranio puro, sino que consisten en otros materiales (impurezas) que no se subliman tan fácilmente como el hexafluoruro de uranio (por ejemplo, UO_2F_2 , descendientes del uranio, productos de fisión y elementos transuránicos). Al vaciar el bulto se deberían tomar medidas que aseguren que se cumplan los requisitos del párrafo 427 del Reglamento de Transporte si se está expidiendo como embalaje vacío y durante la recarga hay que cerciorarse de que las tasas de dosis locales debidas a los restos no sean excesivamente altas, que en los documentos de transporte se dé cuenta de esos restos y que la combinación del contenido de hexafluoruro de uranio y los restos satisfaga los requisitos aplicables al material. Puede ser necesaria una adecuada evaluación y limpieza antes de cada vaciado o relleno con objeto de satisfacer los requisitos reglamentarios. Para obtener más información al respecto, véanse las referencias [27 y 30] y el párrafo 546.5.

427.4. El propósito de las etiquetas es proveer información sobre el contenido actual de los bultos. Cualquier etiqueta referente al contenido anterior que no haya sido retirada podría dar una información incorrecta.

Clasificación de bultos del Tipo A

429.1. Véase el párrafo 402.1.

430.1. La fórmula que figura en el párrafo 430 del Reglamento de Transporte puede utilizarse para mezclas de radionucleidos y también para radionucleidos por separado que contenga un bulto único del Tipo A (véase el párr. I.79 de la presente guía de seguridad).

Clasificación de bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C

433.1. El límite de $3000A_2$ para material en forma no especial se estableció tomando en consideración el trabajo de análisis de riesgos que figura en la referencia [31] referente al comportamiento de bultos del Tipo B(U) en accidentes de transporte aéreo. Asimismo, es también la cantidad umbral a partir de la cual se requiere la aprobación de la expedición de bultos del Tipo B(M).

433.2. En cuanto al límite de contenido radiactivo de los materiales radiactivos en forma especial, del sistema Q se desprende que el valor de $3000A_1$ fue adoptado como límite para esos materiales en paralelo con el límite de contenido radiactivo de $3000A_2$. Sin embargo, para ciertos emisores alfa la relación entre A_1 y A_2 puede ser tan alta como 10^4 , lo que se traduciría en posibles cargas efectivas de materiales en forma no dispersable por bulto de $3 \times 10^7 A_2$. Esto es contraproducente, sobre todo si en un accidente muy grave los materiales radiactivos en forma especial se destruyeran parcialmente. La similitud entre el ensayo de impacto de los materiales radiactivos en forma especial y el ensayo de impacto de los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) supone que puede esperarse que los materiales radiactivos en forma especial posibiliten una emisión 100 veces más baja en comparación con un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M), lo que permite que el límite del contenido aumente en un factor de $100\ 000A_2$ a $300\ 000A_2$. En consecuencia, se adoptó el valor de $10^5 A_2$ como una estimación conservadora.

433.3. Los materiales radiactivos en forma no dispersable o sellados dentro de una cápsula metálica resistente presentan un peligro mínimo de contaminación, aunque todavía existe el peligro de radiación directa. En estudios se ha observado que algunos materiales radiactivos en forma especial, aprobados con arreglo a normas actuales, conservan su función de contención tras un accidente aéreo [31]. En consecuencia, la protección adicional que se obtiene mediante la definición del material radiactivo en forma especial es suficiente para transportar material

radiactivo en forma especial con una actividad de hasta $3000A_1$ o hasta 10^5A_2 por vía aérea en un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M).

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN IV

- [1] AMERSHAM INTERNATIONAL, Communication with the National Radiological Protection Board provided inventory data of packages aboard conveyances (1986).
- [2] FINLEY, N.C., McCLURE, J.D., REARDON, P.C., WANGLER, M., “An analysis of the consequences of accidents involving shipments of multiple Type A radioactive material packages”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89 (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).
- [3] GELDER, R., MAIRS, J.H., SHAW, K.B., “Radiological impact of transport accidents and incidents in the United Kingdom over a twenty year period”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 86 (Proc. Int. Symp. Davos, 1986), IAEA, Vienna (1987) 371–380.
- [4] MOHR, P.B., MOUNT, M.E., SCHWARTZ, M.E., “A highway accident involving radiopharmaceuticals near Brookhaven, Mississippi on December 3, 1983”, Rep. UCRL 53587 (NUREG/CR 4035), Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1985).
- [5] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.
- [6] COMISIÓN EUROPEA, *Principios y métodos para establecer concentraciones y cantidades (valores de exención) por debajo de los cuales la Directiva europea no exige notificación*, Protección radiológica n° 65, Luxemburgo, 1993.
- [7] FRANCOIS, P., et al., “The application of exemption values to the transport of radioactive materials”, IRPA 9 (Proc. Ninth IRPA Int. Congr. Vienna, 1996), Vol. 4, IRPA, Vienna (1996) 674.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Interim Guidance for the Safe Transport of Reprocessed Uranium, IAEA-TECDOC-750, IAEA, Vienna (1994).
- [9] NITSCHKE, F., et.al., “Review of the safety concept of LSA-II and LSA-III material requirements of the IAEA Transport Regulations SSR-6”, PATRAM 2016 (Proc. Int. Symp. Kobe, 2016), Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo (2016).
- [10] BECKER, D.L., BURGESS, D.M., LINDQUIST, M.R., “Shippingport reactor pressure vessel and neutron shield tank assembly probabilistic waterborne accident assessment”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 92 (Proc. Int. Symp. Yokohama, 1992), Science and Technology Agency, Tokyo (1992).

- [11] CLOSS, J.W, “Pathfinder Decommissioning: Reactor Vessel Packaging and Transportation”, PATRAM 92 (Proc. Int. Symp. Yokohama, 1992), Science and Technology Agency, Tokyo (1992).
- [12] POPE, R.B., et al., “Characterizing, for packaging and transport, large objects contaminated by radioactive material having a limited A_2 value”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 98 (Proc. Int. Symp. Paris, 1998), Institut de protection et de sûreté nucléaire, Paris (1998).
- [13] HILBERT, F., KUBEL, M., “Transport of two steam generators from the nuclear power station KWO to the interim storage site of EWN”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2007 (Proc. Int. Symp. Miami, 2007), Institute of Nuclear Materials Management, Deerfield, IL (2007).
- [14] DYBECK, P., BROMAN, U., “Transport of Core Components and Large Contaminated Objects in Sweden”, PATRAM 2007 (Proc. Int. Symp. Miami, 2007), Institute of Nuclear Materials Management, Deerfield, IL (2007).
- [15] SVAHN, B., ZIKA, H., WELLEMAN, E., NILSSON, T., “Experience from Transport of Large Objects in Sweden from an Authority’s Point of View”, PATRAM 2007 (Proc. Int. Symp. Miami, 2007), Institute of Nuclear Materials Management, Deerfield, IL (2007).
- [16] NITSCHKE, F., FASTEN, C., “Transport of large components in Germany: Some experiences and regulatory aspects”, Packaging and Transport of Radioactive Materials, PATRAM 2010 (Proc. Int. Symp. London, 2010), Department for Transport, UK (2010).
- [17] KOMAN, S., DROSTE, B., WILLE, F., “Transport of Large Nuclear Power Plant Components-Experiences in Mechanical Design Assessment”, PATRAM 2010 (Proc. Int. Symp. London, 2010), Department for Transport, UK (2010).
- [18] SCHIFFER, W., HILBERT, F., “Qualification of steam generators for shipment with respect to the requirements of TS-R-1”, PATRAM 2010 (Proc. Int. Symp. London, 2010), Department for Transport, UK (2010).
- [19] BOYLE, R.W., WILLIAMS, J.L., “Large component regulatory relief in the United States”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2004 (Proc. Int. Symp. Berlin, 2004), Ramtrans Publishing, Ashford, UK (2004).
- [20] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fraction for Nonreactor Nuclear Facilities, DOE-HDBK-3010-94, USDOE, Washington, DC (1994).
- [21] GRAY, I., “Development of an improved radiological basis and revised requirements for the transport of LSA/SCO materials”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2004 (Proc. Int. Symp. Berlin 2004), Ramtrans Publishing, Ashford, UK (2004).
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Revised Provisions for Transport of Fissile Material in the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material – 2012 Edition, IAEA-TECDOC-1768, IAEA, Vienna (2015).
- [23] PAXTON, H.C., PRUVOST, N.L., Critical Dimensions of Systems Containing U-235, Pu-239 and U-233, Rep. LA-10860-MS, Los Alamos Natl Lab., NM (1987).

- [24] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, Nuclear Criticality Control and Safety of Plutonium–Uranium Fuel Mixtures Outside Reactors, Rep. ANSI/ANS-8.12-1987; R1993; R2002 (R = Reaffirmed) American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2002).
- [25] LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, The Nuclear Criticality Safety Guide, Rep. LA-12808, Los Alamos Natl Lab., NM (1996).
- [26] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Exemption from Classification as Fissile Material, 10 CFR 71.15, US Government Printing Office, Washington, DC (2013).
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Nuclear energy – Packagings for the transport of uranium hexafluoride (UF₆), ISO 7195:2020, ISO, Geneva (2020).
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Uranium Hexafluoride for Enrichment, ASTM-C787-15, ASTM, Philadelphia, PA (2015).
- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Uranium Hexafluoride Enriched to Less than 5% ²³⁵U, ASTM-C996-15, ASTM, Philadelphia, PA (2015).
- [30] UNITED STATES ENRICHMENT CORPORATION, Reference USEC-651, USEC, Washington, DC (1998).
- [31] HUBERT, P., et al., Specification of Test Criteria and Probabilistic Approach: The Case of Plutonium Air Transport Probabilistic Safety Assessment and Risk Management, PSA 87, Verlag TÜV, Cologne (1987).

Sección V

REQUISITOS Y CONTROLES APLICABLES AL TRANSPORTE

REQUISITOS ANTES DE LA PRIMERA EXPEDICIÓN

501.1. El remitente de una expedición de materiales radiactivos debería garantizar que el embalaje se ha fabricado en cumplimiento de las especificaciones de diseño y el certificado de aprobación correspondiente (véase el párr. 547 del Reglamento de Transporte sobre la certificación o declaración de expedición que debe presentar el remitente).

501.2. Para garantizar el transporte seguro de los materiales radiactivos se han establecido en el Reglamento de Transporte requisitos generales relativos al sistema de gestión (párr. 306 del Reglamento de Transporte) y a la verificación del cumplimiento (párr. 307 del Reglamento de Transporte). También se han establecido requisitos de inspección específicos para verificar el cumplimiento, en el caso de las características de los embalajes que revisten especial importancia desde el punto de vista de la integridad de los bultos y de la seguridad radiológica, así como de la seguridad con respecto a la criticidad (véanse los párrs. 501 a 503 del Reglamento de Transporte). Estos requisitos se refieren a la realización de inspecciones tanto antes de la primera expedición como antes de cada expedición ulterior.

501.3. En la fase de diseño del bulto deberían prepararse documentos que definan cómo se deben cumplir plenamente los requisitos del Reglamento de Transporte para cada embalaje fabricado. Cada uno de los documentos que se requieran debería ser autorizado (rubricado) por las personas directamente responsables de cada etapa de fabricación. Deberían registrarse los resultados de la inspección de los componentes (dimensiones, materiales de construcción, tasas de fuga), aunque se encuentren dentro de las tolerancias de fabricación especificadas. Los documentos cumplimentados deberían archivar, de conformidad con los requisitos del sistema de gestión (véase el párr. 306 del Reglamento de Transporte).

501.4. En los sistemas de contención con una presión de diseño superior a 35 kPa, debería confirmarse que el sistema de contención es suficiente tal como está fabricado. Esta verificación puede realizarse, por ejemplo, mediante un ensayo. En los embalajes con válvulas de llenado o venteo, estos orificios pueden utilizarse para someter el sistema de contención a su presión de diseño.

Si el sistema de contención no está dotado de esas infiltraciones, el recipiente y su cierre pueden requerir ensayos por separado con dispositivos especiales. Durante estos ensayos debería evaluarse la integridad de los sellos mediante los procedimientos establecidos para la utilización normal del bulto.

501.5. Al realizar los ensayos e inspecciones de los embalajes tras la fabricación con el fin de evaluar la eficacia del blindaje de los bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M), y del Tipo C y de los que contienen materiales fisibles, los componentes del blindaje pueden comprobarse mediante un ensayo de irradiación del conjunto completo. No es preciso que la fuente de radiación para este ensayo sea el mismo material que se pretende transportar, pero deberían adoptarse precauciones para que las propiedades del blindaje queden debidamente evaluadas en relación con la energía, el espectro de energía y el tipo de radiación. Debería prestarse también especial atención a la homogeneidad de los materiales del embalaje y a la posibilidad de que se produzcan incrementos localizados de las tasas de dosis en las uniones. En las referencias [1, 2] y en los párrafos 659.16 y 659.17 se incluyen métodos de ensayo de la integridad del blindaje de un bulto contra la radiación.

501.6 La integridad de la contención debería evaluarse realizando los correspondientes ensayos de tasa de fugas (véanse los párrs. 659.1 a 659.12 y 659.21 a 659.24).

501.7. En la inspección de un embalaje para comprobar sus características de transferencia de calor debería realizarse una comprobación dimensional, además de prestarse especial atención a los orificios de ventilación, el coeficiente de emisión superficial, la capacidad de absorción y la continuidad de las trayectorias de conducción. Los ensayos de comprobación, que normalmente pueden ser necesarios solo para un determinado prototipo de bulto, pueden realizarse utilizando calentadores eléctricos en lugar de una fuente radiactiva.

501.8. Los componentes del embalaje que sean importantes desde el punto de vista de la seguridad con respecto a la criticidad deben ser inspeccionados o ensayados después de la fabricación y antes de la primera expedición. Con objeto de garantizar que los componentes del sistema del confinamiento del embalaje están fabricados y montados según el diseño, debería realizarse una inspección dimensional y material de los correspondientes componentes del embalaje, así como de sus soldaduras. En los ensayos se adoptarán con frecuencia medidas para garantizar la presencia y distribución adecuada de los venenos neutrónicos, según lo expuesto en el párrafo 501.9.

501.9. En los casos en que la seguridad con respecto a la criticidad dependa de la presencia de absorbentes neutrónicos, es preferible que el absorbente neutrónico sea una parte sólida e integrante del embalaje. A estos efectos no se incluyen las soluciones absorbentes o los absorbentes que son solubles en agua porque no puede asegurarse su presencia permanente. Con el procedimiento de confirmación mediante ensayos debe garantizarse que la presencia y la distribución del absorbente neutrónico dentro de los componentes de embalaje se ajusten a las hipótesis formuladas en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad. No siempre es suficiente garantizar simplemente la cantidad del material absorbente neutrónico porque la distribución de los absorbentes neutrónicos dentro de un componente del embalaje, o dentro del contenido del embalaje en sí mismo, puede tener un efecto importante en el factor de multiplicación neutrónica del sistema. Al verificar la concordancia con la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad deberían considerarse las incertidumbres asociadas a la técnica de confirmación.

501.10. Véase más información en las referencias [3 a 5].

REQUISITOS ANTES DE CADA EXPEDICIÓN

502.1. El remitente de un envío de materiales radiactivos debería asegurar que el contenido del bulto cumpla con las disposiciones aplicables del Reglamento de Transporte y el certificado de aprobación correspondiente (véase el párr. 547 del Reglamento de Transporte sobre la certificación o declaración que debe presentar el remitente).

502.2. Antes de que los embalajes se vayan a utilizar con materiales para los que no fueron diseñados, tendrá que realizarse otra evaluación del diseño de los bultos, confirmarse y documentarse el cumplimiento en relación con esos materiales y, según proceda, obtenerse la aprobación de la autoridad competente.

502.3. No siempre se dispone de una lista exhaustiva de radionucleidos del combustible gastado o los desechos. Ahora bien, el contenido deberá cumplir con el contenido evaluado para el diseño del bulto.

503.1. Antes de cada expedición el remitente debería asegurar que el bulto se ha preparado para su envío en cumplimiento de las disposiciones aplicables del Reglamento de Transporte y el certificado de aprobación correspondiente (véase también el párr. 547 del Reglamento de Transporte en relación con la certificación o declaración de expedición que debe presentar el remitente).

503.2. Además de los requisitos establecidos por el Reglamento de Transporte para ciertos bultos antes de su primera expedición (véase el párr. 501 del Reglamento de Transporte) y antes de cada expedición de cualquier bulto (véanse los párrs. 502 y 503 del Reglamento de Transporte), el remitente debería garantizar que solo se utilicen los dispositivos de elevación apropiados durante la expedición y verificar que se ha demostrado la estabilidad térmica y de la presión (véase el párr. 503 b)).

503.3. Los procedimientos de inspección y ensayo deberían elaborarse de manera que se asegure que se satisfagan los requisitos de embalaje. Este cumplimiento debería documentarse como parte del sistema de gestión (véase el párr. 306 del Reglamento de Transporte). Cuando los bultos que contengan materiales radiactivos se hayan almacenado durante períodos prolongados, deberían llevarse a cabo inspecciones adecuadas para verificar que cumplen las disposiciones aplicables del Reglamento de Transporte y el certificado de aprobación antes de la expedición. Estas inspecciones podrían formar parte de un programa destinado a supervisar periódicamente el comportamiento del embalaje durante su almacenamiento, que puede demorar de varios años a décadas. En la referencia [6] pueden encontrarse ejemplos de inspecciones antes del almacenamiento, durante el almacenamiento y antes de la expedición después del almacenamiento.

503.4. El certificado de aprobación del bulto es la prueba de que el diseño de un bulto determinado cumple con los requisitos reglamentarios y que el bulto puede utilizarse para el transporte. El remitente tiene la responsabilidad de asegurar que cada bulto cumpla con lo estipulado en el certificado de aprobación y con las disposiciones aplicables del Reglamento de Transporte. La persona directamente encargada de esta operación debería documentar y autorizar (con su firma) las comprobaciones realizadas para confirmar que el bulto cumple con las reglamentaciones aplicables y que está preparado para ser transportado. Deberían registrarse los resultados de estas comprobaciones (por ejemplo, tasas de fuga), aunque se encuentren dentro de sus tolerancias, y compararse con los resultados de ensayos anteriores, de modo que se pueda distinguir cualquier indicio de deterioro. Los documentos cumplimentados deberían archivar de conformidad con los requisitos del sistema de gestión (véase el párr. 306 del Reglamento de Transporte).

503.5. Los certificados de aprobación de los bultos que contienen materiales fisibles indican el contenido autorizado del bulto (véanse los párrs. 418 y 838 del Reglamento de Transporte). Antes de cada expedición debería verificarse que el contenido de materiales fisibles cumple con las características indicadas

en el listado del contenido autorizado. Deberían hacerse inspecciones o ensayos adecuados para comprobar la presencia, localización correcta o la concentración de los venenos neutrónicos u otros dispositivos de control de la criticidad que sean extraíbles y que estén específicamente permitidos por el certificado. No se consideran para este propósito las soluciones absorbentes o los absorbentes que son solubles en agua, ya que no puede garantizarse su presencia permanente. El procedimiento o los ensayos de confirmación deberían garantizar que la presencia, la localización correcta o la concentración del absorbente neutrónico o de los dispositivos de control dentro del bulto sean acordes con las consideradas en la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad. No siempre es suficiente verificar simplemente la cantidad del material de control porque la distribución dentro del bulto puede tener un efecto importante en la reactividad del sistema.

503.6. Deberían elaborarse y aplicarse procedimientos detallados para asegurar que el bulto cargado ha alcanzado las condiciones de estabilidad, para lo cual se medirá la temperatura y la presión durante un período definido. En el desarrollo de cualquier ensayo debería garantizarse que el método seleccionado proporcione la sensibilidad requerida y no degrade la integridad del bulto. La disconformidad con los requisitos de diseño aprobados debería quedar completamente documentada y ser comunicada a la autoridad competente que aprobó el diseño.

503.7. Para garantizar el cumplimiento del criterio de estanqueidad requerido, cada bulto del Tipo B(U), del Tipo B(M) y del Tipo C debería ser ensayado después que se cierre y antes del transporte. Algunas autoridades nacionales pueden permitir un procedimiento de verificación del conjunto, seguido por un ensayo de estanqueidad que sea menos riguroso, de manera que se ofrezca una confianza equivalente en cuanto al cumplimiento de las condiciones de diseño. Un ejemplo de un procedimiento de verificación del conjunto sería:

En primer lugar, inspeccionar o ensayar exhaustivamente el sistema de contención completo del embalaje vacío. Seguidamente puede cargarse el contenido radiactivo en el embalaje y solo los elementos de cierre que fueron abiertos durante la carga deben ser inspeccionados o ensayados como parte del procedimiento de verificación del conjunto.

Con respecto a los bultos cuya contención la proporcionen los materiales radiactivos en forma especial, el cumplimiento puede demostrarse mediante la posesión de un certificado, elaborado en el marco de un sistema de gestión, que demuestre la estanqueidad de la fuente correspondiente. Si se prevé aplicar este procedimiento, debería consultarse a la autoridad competente del país de que se trate.

503.8. Los requisitos de ensayo de estanqueidad de los bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M) y del Tipo C, incluidos los ensayos que se realicen, su frecuencia y sensibilidad, se basan en las tasas de fuga máximas permisibles y en las tasas de fuga normalizadas calculadas para el bulto, en las condiciones de transporte normales y de accidente, según se especifica en la norma ISO 12807 [5]. Para algunos bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C tal vez no sea necesario un ensayo de estanqueidad de muy alta sensibilidad antes de la salida de la expedición, lo que dependerá, por ejemplo, del material que contenga el bulto y de la tasa de fuga relativa permisible. Un ejemplo de ese tipo de material podría ser uno que excediera del límite de actividad específica para el material BAE-II, pero que no llegara a calificarse como BAE-III. Las características físicas de tal material podrían ser, entre otras, una concentración de actividad limitada y una forma física que reduzca la capacidad de dispersión del material. Los bultos que lleven ese material pueden requerir ensayos de estanqueidad previos a la expedición, pero estos ensayos pueden ser simples y directos, como ensayos cualitativos de gas y de burbuja de jabón o ensayos cuantitativos de descenso o incremento de la presión de gas, según lo expuesto en las referencias [4, 5].

503.9. En la medición especificada en el párrafo 677 b) del Reglamento de Transporte debería verificarse que el combustible nuclear irradiado esté dentro del ámbito de las condiciones que en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad se ha demostrado que cumplen los criterios expuestos en los párrafos 673 a 685 del Reglamento de Transporte. Normalmente las condiciones primordiales que se proponen para la evaluación de seguridad del combustible nuclear irradiado con un enriquecimiento conocido son el grado de quemado y las características de desintegración y, como tales, estos son los parámetros que deberían verificarse en la medición. La técnica de medición debería depender de la probabilidad de que se haga una carga incorrecta del combustible, así como del margen subcrítico disponible debido a la irradiación. Por ejemplo, a medida que aumente el número de elementos combustibles de diverso grado de irradiación almacenados en la piscina del reactor y se incremente el tiempo entre la descarga y la expedición, aumentará la probabilidad de una carga incorrecta. De igual forma, si se usa un grado de irradiación de 10 GW d/MTU en la evaluación de la criticidad, pero el certificado de diseño del bulto no permite la carga en el bulto de combustible de menos de 40 GW d/MTU, puede ser adecuada una verificación de la medición del grado de irradiación aplicando una técnica que tenga una gran incertidumbre. Sin embargo, si se utiliza un grado de irradiación de 35 GW d/MTU en la evaluación de la criticidad, la técnica de medición para verificar la irradiación debería ser mucho más fiable. Deberían especificarse claramente en el certificado de aprobación los criterios de medición que deberían

cumplirse para que un material irradiado pueda ser cargado o transportado. (Véase la ref. [7] para obtener información sobre procedimientos de medición en uso).

503.10. En el certificado de aprobación deberían determinarse los requisitos necesarios para el cierre de un bulto que contenga materiales fisibles teniendo en cuenta los supuestos considerados en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad en relación con el agua que pueda entrar en un solo bulto en aislamiento (véase el párr. 680 del Reglamento de Transporte). Deberían hacerse inspecciones o ensayos para comprobar que se han cumplido todas las medidas especiales para prevenir la entrada de agua.

TRANSPORTE DE OTRAS MERCANCÍAS

505.1. El propósito de este requisito es prevenir la contaminación radiactiva de otras mercancías. (Véanse los párrs. 513.1 a 513.4 y 514.1).

505.2. Para que los límites de contaminación estén en concordancia con el párrafo 508 del Reglamento de Transporte, estos deberían aplicarse cuando se promedien para un área de 300 cm² de cualquier parte de la superficie.

506.1. Si se permite que entren en contacto, las mercancías peligrosas pueden reaccionar entre sí. Esto podría ocurrir, por ejemplo, como resultado de la fuga de una sustancia corrosiva o de un accidente que ocasione una explosión. Para reducir al mínimo la posibilidad de que los bultos que contienen materiales radiactivos pierdan la integridad de la contención debido a la interacción del bulto con otras mercancías peligrosas, estos deberían mantenerse separados de otras cargas peligrosas durante su transporte o almacenamiento. El grado de separación requerido se establece generalmente por los diferentes Estados o las organizaciones de transporte competentes (por ejemplo, OMI, OACI).

506.2. En los documentos de reglamentación del transporte de las organizaciones internacionales del transporte [8 a 15] y en las disposiciones enunciadas en los documentos de reglamentación de los Estados se incluye información sobre requisitos específicos aplicables al almacenamiento, estiba y separación. Debido a que estas reglamentaciones y disposiciones se enmiendan con frecuencia, deberían consultarse las últimas ediciones para comprobar los requisitos más recientes.

OTRAS PROPIEDADES PELIGROSAS DEL CONTENIDO

507.1. El Reglamento de Transporte provee un nivel aceptable de control de los riesgos de radiación y de criticidad asociados al transporte de los materiales radiactivos. Con una excepción (el hexafluoruro de uranio, véase el párr. 631 del Reglamento de Transporte), el Reglamento de Transporte no abarca los peligros que pueden deberse a la forma físicoquímica en la cual se transportan los radionucleidos. En algunos casos, tales peligros secundarios pueden superar los radiológicos. Por lo tanto, el cumplimiento de las disposiciones del Reglamento de Transporte no libera a sus usuarios de la necesidad de considerar todas las otras características potencialmente peligrosas del contenido.

507.2. En la edición de 1996 del Reglamento de Transporte se incluyen por primera vez disposiciones sobre los requisitos de embalaje del hexafluoruro de uranio basados en el peligro químico así como en el peligro radiológico y el de criticidad. El hexafluoruro de uranio es la única materia para la cual se han considerado tales peligros secundarios en la formulación de las disposiciones del Reglamento de Transporte (véase el párr. 631 del Reglamento de Transporte).

507.3. En las Recomendaciones de las Naciones Unidas [16] se clasifican todos los materiales radiactivos en la clase 7. En el caso de los materiales radiactivos presentes en bultos exceptuados, toman precedencia las otras propiedades peligrosas. En las Recomendaciones de las Naciones Unidas [16] se estipulan ensayos de resistencia de los embalajes de todas las mercancías peligrosas y se clasifican como sigue:

Clase 1 — Explosivos.

Clase 2 — Gases.

Clase 3 — Líquidos inflamables.

Clase 4 — Sólidos inflamables; sustancias que pueden experimentar combustión espontánea; sustancias que, en contacto con agua, desprenden gases inflamables.

Clase 5 — Sustancias comburentes y peróxidos orgánicos.

Clase 6 — Sustancias tóxicas y sustancias infecciosas.

Clase 7 — Material radiactivo.

Clase 8 — Sustancias corrosivas.

Clase 9 — Sustancias y objetos peligrosos varios, incluidas las sustancias peligrosas para el medio ambiente.

507.4. Además de cumplir con los requisitos del Reglamento del Transporte por sus propiedades radiactivas, las remesas radiactivas deben ajustarse a los requisitos especificados por las organizaciones internacionales de transporte competentes y las disposiciones aplicables adoptadas por los Estados para cualesquiera otras características peligrosas. Esto incluye, por ejemplo, los requisitos sobre el etiquetado y sobre la información que se deberá consignar en los documentos de transporte, y puede también incluir otros requisitos sobre el diseño del bulto y las aprobaciones de las autoridades correspondientes.

507.5. Cuando los requisitos de embalaje especificados para un peligro secundario por las organizaciones internacionales de normalización competentes sean más estrictos que los indicados en el Reglamento de Transporte para el peligro radiológico, serán los requisitos para el peligro secundario los que se establezcan como criterio de referencia [16].

507.6. Los bultos pueden incluirse en el campo de aplicación de los códigos sobre vasijas de presión de los Estados Miembros interesados cuando los materiales radiactivos se transporten bajo presión o cuando pueda crearse presión interna durante el transporte, o cuando los bultos se presuricen durante su llenado o descarga.

507.7. En las Recomendaciones de las Naciones Unidas [16] se estipula la ejecución de ensayos de resistencia en los embalajes de mercancías con características peligrosas diferentes de los peligros debidos a características radiactivas y fisibles.

507.8. Las etiquetas adicionales que advierten de peligros secundarios deberían fijarse según lo que especifiquen las reglamentaciones nacionales e internacionales de transporte.

507.9. Las reglamentaciones promulgadas por las organizaciones internacionales de transporte, así como por cada Estado Miembro, se enmiendan con frecuencia, por lo que deberían consultarse sus ediciones en vigor a fin de

cerciorarse de las disposiciones complementarias que son aplicables con respecto a los peligros secundarios.

REQUISITOS Y CONTROLES RELATIVOS A LA CONTAMINACIÓN Y A LOS BULTOS QUE PRESENTEN FUGAS

508.1. En el Reglamento de Transporte se establecen límites para la contaminación transitoria en las superficies de los bultos y los medios de transporte en condiciones de transporte rutinarias (véase el párr. 106 del Reglamento de Transporte). Los límites para las superficies de los bultos se derivan de un modelo radiológico elaborado en la referencia [17] para la edición de 1961 del Reglamento de Transporte. En resumen, las vías de exposición consideradas en ese modelo eran la irradiación beta externa de la piel, la ingestión y la inhalación del material en suspensión. El examen se limitaba a los radionucleidos más peligrosos utilizados habitualmente, a saber, el Pu 239 y el Ra 226, entre los emisores alfa, y el Sr 90/Y 90 entre los emisores beta. Estos límites derivados se corresponden con los valores que eran normalmente aceptados para las zonas de trabajo de laboratorios e instalaciones y que, por tanto, eran conservadores en el contexto de los bultos de transporte, en relación con los cuales se esperaba que los tiempos de exposición y de manipulación de los trabajadores fueran mucho menores que los de los trabajadores de laboratorios o de instalaciones en funcionamiento. Desde que se adoptó ese modelo, y aunque ha habido cambios en los parámetros de protección radiológica, no se han modificado los límites de contaminación en el transporte.

Dando seguimiento a la cuestión de la contaminación mencionada en el párrafo 309.1, se elaboró un modelo básico para evaluar las dosis anuales en los trabajadores y el público debidas a la contaminación transitoria de los bultos [18].

Una de las conclusiones de la referencia [18] indica que los límites de contaminación mencionados en el párrafo 508 del Reglamento de Transporte son de carácter conservador, sobre todo en lo que respecta a las expediciones de bultos de combustible nuclear irradiado. No obstante, se tomó la decisión de mantener los límites conservadores establecidos para la contaminación transitoria en la superficie externa de los bultos.

508.2. En el caso de bultos contaminados con un emisor alfa, la vía de exposición que generalmente determina un límite derivado para la contaminación es la inhalación del material en resuspensión procedente de las superficies de los bultos. El valor del factor aplicable de resuspensión (en Bq/cm^3 por Bq/cm^2)

está sujeto a grandes incertidumbres, aunque la investigación sobre el asunto fue revisada en un documento de referencia [19]. La amplia gama de valores divulgados sobrepasa el valor de $5 \times 10^{-5}/m$, recomendado por el OIEA para uso general [20], que tiene en cuenta la probabilidad de que solo pueda estar en forma respirable una fracción de la actividad en resuspensión. En la mayoría de los casos el nivel de contaminación transitoria es medido indirectamente frotando un área conocida con un papel de filtro o una bola de lana de algodón seca o de otro material semejante. Es habitual suponer que la actividad en el frotis representa solamente el 10 % de la contaminación transitoria total presente en la superficie. La fracción de actividad arrastrada en el frotis incluirá la actividad que más fácilmente puede llegar a quedar en resuspensión. La actividad restante en la superficie representa la contaminación que es menos susceptible de quedar en resuspensión. Se considera adecuado que aplicando un factor de resuspensión del orden de $10^{-5}/m$ o un tiempo de exposición anual de 1000 h en una atmósfera que contenga contaminación en resuspensión procedente de la superficie de bultos contaminados con Pu 239 en $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ y utilizando un factor de resuspensión de $10^{-5}/m$, la dosis efectiva comprometida será de unos 2 mSv. En el caso de que la contaminación fuera con Ra 226, la dosis efectiva comprometida sería del orden de 0,1 mSv. Para la mayoría de los emisores beta-gamma la vía de exposición que determinaría el límite derivado es la exposición de las células basales de la piel. En las recomendaciones de la ICRP 2007 [21] se recomienda 7 mg/cm^2 como la profundidad nominal de las células basales, pero se prolonga el intervalo de profundidad de 2 a 10 mg/cm^2 . Varios estudios [22 a 24] proporcionan factores de conversión de tasa de dosis a una profundidad nominal de 7 mg/cm^2 , o para el intervalo de 5 a 10 mg/cm^2 . La piel contaminada con Sr 90/Y 90 en 4 Bq/cm^2 durante 8 h por día laborable daría lugar a una dosis equivalente en piel de cerca de 20 mSv anuales, que debería compararse con el límite anual de 500 mSv establecido en la publicación GSR Part 3 [25]. Esto supone un factor de transferencia entre las superficies del bulto y la piel igual a 1.

508.3. En la práctica, la contaminación que aparece fija puede llegar a ser transitoria como resultado de los efectos atmosféricos, la manipulación, etc. En la mayoría de los casos, cuando los bultos pequeños se contaminan levemente en las superficies externas, la contaminación es casi enteramente eliminable o transitoria, lo que debería tenerse en cuenta en los métodos de medición. Sin embargo, esto no sucede por fuerza en algunas situaciones, como por ejemplo, en el caso de cofres de combustible que pudieran haber estado sumergidos en el agua contaminada de la piscina mientras se cargaban con el combustible irradiado. Contaminantes tales como el Cs 137 pueden adherirse fuertemente a las superficies de acero o penetrar en ellas. La contaminación puede quedar ocluida en los poros, fisuras y grietas, particularmente en las proximidades de los sistemas

de sellado de la tapa. El posterior desgaste por la acción atmosférica, la exposición a la lluvia o incluso la exposición a condiciones ambientales de humedad en el aire pueden provocar que alguna contaminación fija se desprenda o llegue a ser transitoria. Es necesario que antes de la expedición se tenga la precaución de utilizar métodos de descontaminación adecuados con el fin de reducir el nivel de contaminación de tal forma que no se espere que durante el transporte se traspasen los límites de contaminación transitoria. Hay que reconocer que en algunas ocasiones pueden superarse los límites de contaminación transitoria al final del trayecto. Sin embargo, esta situación no representa generalmente ningún peligro importante dadas las hipótesis pesimistas y conservadoras utilizadas para calcular los límites derivados para la contaminación transitoria. En este tipo de situaciones el destinatario debería informar al remitente para que este último determine las causas y reduzca al mínimo tales incidencias en el futuro.

508.4. En todos los casos los niveles de contaminación en las superficies externas de los bultos deberían mantenerse tan bajos como pueda razonablemente alcanzarse. La manera más eficaz para asegurarlo es evitar que las superficies se contaminen. Para alcanzar este objetivo los métodos de carga, descarga y manipulación deberían mantenerse en un proceso de revisión continua. En el caso particular de los cofres de combustible antes mencionados, el tiempo de inmersión en la piscina debería reducirse al mínimo y deberían concebirse técnicas eficaces para su descontaminación. Las áreas de sellado deberían limpiarse, siempre que sea posible, con chorros a alta presión y debería tenerse especial cuidado en reducir al mínimo la presencia de agua contaminada entre el cuerpo y la tapa del cofre. Para prevenir la contaminación de las superficies del cofre puede utilizarse una “funda” con objeto de evitar que entre en contacto con el agua contaminada de la piscina. Si esto no fuera posible, el uso de pinturas que luego puedan ser decapadas, una pulverización previa con agua limpia y el inicio de la descontaminación cuanto antes pueden reducir considerablemente la contaminación. Debería prestarse atención en particular a la eliminación de la contaminación de las juntas y las áreas de sellado. Asimismo debería evitarse ensuciar la superficie, siempre que sea posible. La limpieza de una superficie sucia quita tanto la suciedad como desgasta la capa subyacente, sobre todo si esta es relativamente blanda, por ejemplo, pintura o plástico. De esta forma, la suciedad puede contribuir a la contaminación transitoria, bien porque su arrastre en sí mismo acarrea contaminación o bien porque al limpiar la que se halla en la superficie se genera la contaminación de la capa subyacente. Las pinturas y los plásticos expuestos a la intemperie se degradan por la luz del sol. Entre otros efectos, la luz ultravioleta oxida la superficie de la pintura o del plástico, aumentando así la capacidad de intercambio catiónico. Esto hace que las

superficies expuestas a la intemperie sean más susceptibles de contaminarse por algunos contaminantes solubles.

508.5. Debería tenerse presente que, si todos los bultos se encuentran contaminados cerca de los límites, la manipulación rutinaria y el almacenamiento de los bultos en los almacenes en tránsito, en las terminales de los aeropuertos y en las estaciones de clasificación ferroviarias podrían originar una acumulación de la contaminación en las zonas de trabajo. Para que tal acumulación no se produzca, deberían hacerse mediciones de la contaminación en las zonas donde se manipulan normalmente los bultos. Asimismo es recomendable que de vez en cuando se verifique la ausencia de contaminación en los guantes u otros artículos de la ropa del personal que manipula habitualmente los bultos.

508.6. En el Reglamento de Transporte no se establece ningún límite específico para los niveles de contaminación fija en los bultos, puesto que la radiación externa resultante de ella estará combinada con la radiación del propio contenido y la tasa de dosis total de los bultos se controla por otros requisitos específicos. Sin embargo, para los medios de transporte se establecen límites de contaminación fija (véase el párr. 513 del Reglamento de Transporte) con el fin de reducir al mínimo el riesgo de que pueda llegar a ser transitoria como resultado de la abrasión, el desgaste por la acción atmosférica, etc.

508.7. En algunos casos puede hacerse una medición de la contaminación mediante la lectura directa de los monitores de contaminación. Tal medición incluirá tanto la contaminación fija como la transitoria. Esto solo podrá realizarse en los lugares donde no interfiera el nivel de radiación de fondo de la instalación en que se haga la medición o la tasa de dosis del contenido del bulto. En la mayoría de los casos el nivel de la contaminación transitoria tendrá que medirse indirectamente, frotando un área conocida con un elemento de frotis y midiendo la actividad resultante recogida en ese elemento en un área no afectada por la radiación procedente de otras fuentes.

508.8. Los límites derivados para la contaminación transitoria se aplican al nivel medio en un área de 300 cm² o al bulto total si su área superficial total es menor de 300 cm². El nivel de contaminación transitoria puede determinarse frotando un área de 300 cm² a mano con un papel de filtro, una bola de lana de algodón seca u otro material similar. El número de muestras de frotis que se tomen sobre un bulto más grande debería ser representativo de la superficie total y deberían elegirse muestras de las áreas que se sabe o se espera que estén más contaminadas que el resto de la superficie. Para las exploraciones ordinarias en un bulto muy grande, como un cofre de combustible irradiado, por lo general se selecciona un

gran número de posiciones fijas en general que ayuden a determinar pautas y tendencias. Debería tenerse la precaución de que en cada toma de muestra no se frote siempre el mismo punto, pues esto dejaría grandes áreas sin comprobar y se tendería a reducir los niveles de contaminación en las áreas que se verifiquen.

508.9. La actividad de la muestra del frotis puede medirse con un monitor de contaminación portátil o en un contador fijo estándar. Hay que tener cuidado al convertir la tasa de recuento medida en actividad superficial, pues hay un gran número de factores que afectarán al resultado final, como la eficiencia del contador, la eficiencia geométrica, la calibración del contador y la fracción de contaminación arrastrada de la superficie al material utilizado en el frotis.

508.10. Para evitar una subestimación, la energía beta de la fuente de calibración usada en un contador no debería ser mayor que la energía beta del contaminante que se mide. La fracción de contaminación arrastrada por el frotis puede variar mucho en la práctica y dependerá del tipo de superficie, la naturaleza del contaminante, la presión aplicada al frotar, el área de contacto del material utilizado para el frotis, la técnica de frotamiento (por ejemplo, olvidar partes del área de 300 cm² de superficie o frotarlas dos veces) y la exactitud con que el operador estime el área de 300 cm². Normalmente se supone que la fracción arrastrada es del 10 %. En general este cálculo se considera conservador (es decir, que supone sobreestimar el nivel de contaminación). Se pueden utilizar otras fracciones, pero solo si se han determinado experimentalmente.

508.11. Para aplicar las disposiciones enunciadas en el párrafo 508 del Reglamento de Transporte, es necesario conocer la composición radioisotópica de la contaminación superficial. (Véase la ref. [18]).

508.12. Los usuarios deberían elaborar técnicas específicas de medición de la contaminación según sus circunstancias particulares. Tales técnicas comprenden el uso de materiales para frotis y de los instrumentos de medición adecuados. Los instrumentos y los detectores seleccionados deberían reconocer los radionucleidos que probablemente vayan a medirse. Se deberá tener especial cuidado al seleccionar los instrumentos de dependencia energética adecuada cuando estén presentes emisores beta o alfa de baja energía. Cuando se estime que es factible encontrar emisores beta de baja energía o emisores alfa, debería tenerse especial cuidado en seleccionar los instrumentos en función del intervalo de energías que se espera medir. Asimismo debería tenerse en cuenta que el tamaño del material de frotis y el área sensible del detector son factores importantes para determinar la eficiencia total.

508.13. Para que las muestras se obtengan de manera homogénea, los operadores deberían recibir una capacitación adecuada. A este respecto puede ser importante realizar estudios comparativos entre distintos operadores. Cabe señalar las dificultades que se encontrarán cuando diferentes organizaciones utilicen técnicas que no sean completamente compatibles, sobre todo en circunstancias en que no sea práctico mantener los niveles de contaminación transitoria en valores cercanos a cero.

509.1. Véanse los párrafos 508.1 a 508.13.

510.1. El primer propósito de la inspección que lleve a cabo una persona cualificada es evaluar si ha habido o podría haber fuga o pérdida de la integridad del blindaje y garantizar que el bulto sea seguro y que se encuentre dentro de los límites establecidos en el Reglamento de Transporte, o si no es así, evaluar el grado del daño o de la fuga y sus consecuencias radiológicas. En raras ocasiones puede ser necesario ampliar los reconocimientos e investigaciones a lo largo de la ruta recorrida, en los medios de transporte y en las instalaciones de manipulación para definir y limpiar cualquier zona contaminada. En las investigaciones quizás sea necesario incluir la evaluación de la dosis externa y de la posible incorporación de materiales radiactivos por los trabajadores del transporte y los miembros del público.

510.2. Los vehículos que contengan bultos dañados que parezcan tener fugas, o estar abollados o con fisuras, deberían ser detenidos y aislados hasta que sean declarados seguros por personal cualificado.

513.1. Los medios de transporte se pueden contaminar durante el acarreo de los materiales radiactivos debido a la contaminación transitoria de los bultos. Si el medio de transporte se ha contaminado por encima de los niveles especificados en el párrafo 513 del Reglamento de Transporte, debería ser descontaminado hasta que la contaminación se encuentre por debajo de estos niveles y sea lo más baja posible (véase el párr. 508 del Reglamento de Transporte). Esta disposición no se aplica a las superficies internas de un medio de transporte, a condición de que el citado medio de transporte continúe dedicado al transporte de materiales radiactivos u objetos contaminados en la superficie en las condiciones de uso exclusivo (véase el párr. 514.1).

513.2. También se especifican límites para la contaminación fija con objeto de reducir al mínimo el riesgo de que pueda llegar a ser transitoria como resultado de la abrasión, el desgaste por la acción atmosférica, etc.

513.3. Si la contaminación transitoria en un medio de transporte excede de los límites especificados en el párrafo 508 del Reglamento de Transporte, este debería ser descontaminado y, después de finalizar el proceso de descontaminación, se debería hacer una medición de la contaminación fija. La tasa de dosis debida a la contaminación fija en las superficies puede medirse situando cerca de la superficie del medio de transporte un instrumento portátil con el intervalo de medición adecuado. Estas mediciones solamente deberían hacerse antes de que se cargue el medio de transporte.

513.4. Cuando los bultos que tengan niveles relativamente altos de contaminación fija se manipulen habitualmente por los mismos trabajadores del transporte, sería preciso considerar no solo la radiación penetrante, sino también la radiación no penetrante procedente de esa contaminación. La dosis efectiva recibida por los trabajadores a causa de la radiación penetrante puede ser suficientemente baja para que no sea necesaria una vigilancia individual. Si se conoce que los niveles de contaminación fija pueden ser altos, será prudente establecer un límite de operación que prevenga una exposición no deseada en las manos de los trabajadores.

513.5. Para la medición de las tasas de dosis superficiales, véanse los párrafos 220A.1 a 220A.7.

514.1. Aunque suele ser una buena práctica descontaminar lo más rápidamente posible los contenedores o los medios de transporte, de manera que puedan ser utilizados para transportar otras sustancias, hay situaciones, por ejemplo, el transporte de minerales de uranio o de torio, en que los medios de transporte se dedican fundamentalmente al transporte de materiales radiactivos, incluidos materiales radiactivos sin embalar, y que se mantienen continuamente contaminados. En los casos en que la práctica habitual sea emplear determinados medios de transporte de forma exclusiva para estos materiales, se hace una excepción con respecto a la necesidad de descontaminar rápidamente estos medios de transporte o contenedores, según proceda, siempre que permanezcan dedicados a estos usos. La descontaminación de las superficies internas después de cada uso podría provocar una exposición innecesaria de los trabajadores. Por otra parte, las superficies externas que están continuamente expuestas a la intemperie, y que por lo general son mucho más fáciles de descontaminar, deberían ser descontaminadas por debajo de los límites aplicables después de cada uso.

514.2. Cuando un contenedor o medio transporte se utiliza para transportar bultos de materiales radiactivos, los requisitos de los párrafos 509 y 513 del Reglamento de Transporte se aplican totalmente para evitar la contaminación

de los bultos por la contaminación de la superficie interna del contenedor o medio de transporte.

REQUISITOS Y CONTROLES PARA EL TRANSPORTE DE BULTOS EXCEPTUADOS

515.1. Bultos exceptuados son aquellos cuyo contenido radiactivo permitido se restringe a niveles tan bajos que los peligros potenciales son insignificantes y, por lo tanto, no se requieren algunas de las estrictas disposiciones de diseño aplicables a otros tipos de bultos. Según el contenido del bulto exceptuado, se deberán cumplir otros requisitos no específicos de los bultos exceptuados (véase el párr. 515 del Reglamento de Transporte). Por ejemplo, un bulto exceptuado con materiales fisibles debe cumplir otros requisitos como los que se especifican en el párrafo 417 a) a f) del Reglamento de Transporte.

516.1. El requisito de que la tasa de dosis superficial de un bulto exceptuado no exceda de $5 \mu\text{Sv/h}$ fue establecido para asegurar que el material fotográfico sensible no sea dañado y que cualquier dosis de radiación a los miembros del público sea insignificante.

516.2. Generalmente se considera que las exposiciones a la radiación inferiores a $0,15 \text{ mSv}$ no dan lugar a un velado inaceptable de la película fotográfica sin revelar. Un bulto que contenga tal película tendría que permanecer más de 20 h en contacto con un bulto exceptuado que tenga en contacto una tasa de dosis máxima de $5 \mu\text{Sv/h}$ durante más de 20 h para recibir una dosis de radiación superior a $0,1 \text{ mSv}$ (véanse los párrs. 562.11 a 562.13).

516.3. Aplicando la misma argumentación, no es necesaria una separación especial de los bultos exceptuados de las personas. Cualquier dosis de radiación a los miembros del público será insignificante, incluso si tales bultos se llevan dentro del compartimento de pasajeros de un vehículo.

516.4. Para medir la tasa de dosis debería utilizarse un instrumento apropiado (es decir, debería ser sensible y estar calibrado para el tipo de radiación que se pretende medir). En la mayoría de los casos solo tiene que considerarse la radiación penetrante (rayos gamma y neutrones). Para establecer la tasa de dosis superficial de un bulto, normalmente basta tomar la lectura mostrada en el instrumento cuando este se coloca contra la superficie del bulto. Siempre que sea posible, los instrumentos que se utilicen deberían ser pequeños en comparación con el tamaño del bulto. En vista de las dimensiones generalmente pequeñas de

los bultos exceptuados, son más adecuados para este propósito los instrumentos con una pequeña cámara de detección (tubo Geiger-Müller, contador de centelleo o cámara de ionización). El instrumento debería ser fiable, estar en buenas condiciones, adecuadamente mantenido y calibrado.

516.5. Al determinar la tasa de dosis máxima deberían tenerse en cuenta los posibles fenómenos de amplificación como el desplazamiento interno del contenido o, en el caso de los bultos que contienen líquidos, el cambio de estado del contenido, incluidas la separación o la precipitación de los radionucleidos. Esos fenómenos deben tenerse en cuenta aplicando un factor de corrección a la tasa de dosis máxima medida en la superficie externa del bulto o utilizando un valor máximo en su lugar. Este factor de corrección o valor máximo debería consignarse en las instrucciones del bulto. En cualquier caso, debería realizarse una medición de la tasa de dosis antes de la expedición y determinarse la tasa de dosis máxima potencial tomando en consideración esos factores.

REQUISITOS Y CONTROLES PARA EL TRANSPORTE DE MATERIALES DE BAJA ACTIVIDAD ESPECÍFICA Y DE OBJETOS CONTAMINADOS EN LA SUPERFICIE EN BULTOS INDUSTRIALES O SIN EMBALAR

517.1. Las concentraciones incluidas en las definiciones de materiales BAE y OCS en el Reglamento de Transporte eran tales que, si el embalaje se perdía, el contenido podría producir tasas de dosis por encima de las estimadas como aceptables para los bultos del Tipo A en las condiciones de accidente. Como no se requiere que los bultos industriales usados para transportar materiales BAE y OCS soporten accidentes de transporte, en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte se incluyó una disposición para limitar el contenido del bulto a la cantidad que limitaría a 10 mSv/h la tasa de dosis externa a una distancia de 3 m del material u objeto sin blindaje. No es previsible que cambios geométricos de los materiales BAE u OCS, como resultado de un accidente, provoquen un aumento significativo de esta tasa de dosis externa. Esto limita esencialmente las consecuencias de un accidente asociadas a materiales BAE y OCS al mismo nivel asociado a los bultos del Tipo A, donde el valor A_1 se basa en el contenido sin blindaje de un bulto del Tipo A que produce tasas de dosis de 100 mSv/h a una distancia de 1 m.

517.2. En el caso de desechos radiactivos sólidos distribuidos esencialmente de modo uniforme en una matriz de hormigón situada dentro de un embalaje con una gruesa pared de hormigón, esta pared de hormigón proporciona blindaje;

en consecuencia, los requisitos del párrafo 517 del Reglamento de Transporte se aplican a la tasa de dosis en ausencia de esta pared de hormigón. Sin embargo, la tasa de dosis a 3 m de la matriz de hormigón sin blindaje puede determinarse por medición directa en el exterior de la pared gruesa del embalaje de hormigón y corregirse posteriormente para tener en cuenta el efecto de blindaje de la pared de hormigón. Este método también puede utilizarse con otros tipos de embalajes.

520.1. Según los párrafos 413 a) iii) y 520 c) del Reglamento de Transporte, se permite que los OCS-I tengan contaminación transitoria en sus superficies inaccesibles por encima de los valores especificados en el párrafo 413 a) i). Los artículos que vayan a transportarse como tuberías procedentes de la clausura de una instalación, deberían prepararse para el transporte sin embalar de manera que se garantice que no haya emisión de materiales radiactivos en el medio de transporte. Esto puede hacerse, por ejemplo, colocando tapas o tapones en ambos extremos de las tuberías (véase el párr. 413.7).

520.2. El concepto básico que permite el transporte de OCS sin embalar se basa en que, aunque los objetos no estén embalados, es más probable que cumplan los requisitos aplicables a los bultos del Tipo BI cuando la envoltura exterior (es decir, la armazón) se considera embalaje. Además de permitirse que los bultos del Tipo BI se transporten sin embalar, quizás deban excluirse algunos requisitos aplicables a estos bultos, siempre que se demuestre que se toman medidas de seguridad compensatorias con estrictos controles operacionales que aseguren el mismo nivel de seguridad.

520.3. Es preciso aplicar un plan de transporte escrito que rija el transporte de OCS-III. El plan de transporte debería contener líneas de autoridad, responsabilidades, requisitos, precauciones, requisitos previos, instrucciones, restricciones del personal, medidas de respuesta a emergencias, un programa de protección radiológica que incluya el trasbordo de medios de transporte y la secuencia de sucesos relacionados con el transporte.

520.4. Como parte del plan de transporte de OCS-III, debería prestarse especial atención al programa de protección radiológica, ya que el transporte del objeto como OCS-III se llevaría a cabo de distinta manera que el transporte rutinario de bultos y podrían participar en él trabajadores no familiarizados con el transporte de materiales radiactivos. Por tanto, deberían tenerse en cuenta todas las fases y actividades del transporte y todos los trabajadores del transporte que intervengan y los miembros del público. Las tasas de dosis provenientes del objeto, el transporte y los métodos de manipulación —incluidas, para cada actividad, la

duración y la distancia de los trabajadores del objeto— deberían examinarse cuidadosamente y las dosis a los trabajadores y el público deberían optimizarse.

520.5. El plan de transporte debería tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- a) No hay ningún límite explícito para la tasa de dosis en la superficie externa (con todo, hay un límite de 10 mSv/h a 3 m del objeto y de 2 mSv/h en la superficie externa del vehículo). Por tanto, debido al tamaño de estos objetos y su lento desplazamiento en comparación con la mayoría de los bultos, el plan de transporte debería contener precauciones especiales para garantizar la protección de los trabajadores y el público, incluso durante las fases de carga y descarga, si procede, y el control de acceso al objeto.
- b) No es obligatorio etiquetar un OCS-III. Por tanto, el plan de transporte debería contener disposiciones que garanticen que los trabajadores sean informados de la tasa de dosis en las proximidades del objeto, de modo que puedan tomar medidas para ayudar a optimizar su propia exposición. El plan de transporte también debería contener disposiciones para informar al público en conformidad con el programa de protección radiológica.
- c) Los requisitos suplementarios para la carga, la estiba, el transporte, la manipulación o la descarga del OCS-III.

520.6. Con respecto a los OCS-III, debería aplicarse el requisito del ensayo de caída libre mencionado en el párrafo 722 del Reglamento de Transporte al OSC-III preparado para el transporte, incluidas las piezas fijadas permanentemente al componente, como los cierres y el blindaje, sin la ayuda de dispositivos o sistemas de sujeción.

520.7. Si las condiciones del plan de transporte previenen efectivamente la caída o colisión del OCS-III en determinadas orientaciones durante el transporte, como por ejemplo, en la manipulación, estas orientaciones podrían obviarse al evaluar el daño máximo. La demostración del cumplimiento puede efectuarse de conformidad con los métodos mencionados en el párrafo 701 del Reglamento de Transporte.

520.8. El OCS-III, incluso todas las aberturas y grietas selladas, así como el blindaje adicional, deberían poder soportar los efectos de cualquier aceleración, vibración o resonancia vibracional que pueda producirse en condiciones de transporte rutinarias. Su finalidad es el cumplimiento de lo establecido en el párrafo 613 del Reglamento de Transporte en las condiciones de transporte rutinarias.

521.1. Cuanto mayores sean los riesgos potenciales de los materiales BAE y los OCS, mayor debería ser la integridad de los bultos. En la evaluación de los peligros potenciales realizada en el Reglamento de Transporte se ha tenido en cuenta la forma física de los materiales BAE.

521.2. Véase el párrafo 226.1.

522.1. Para los materiales BAE y OCS se han especificado límites de actividad por medios de transporte teniendo en cuenta los mayores peligros que presentan los líquidos, los gases y los sólidos combustibles, así como los posibles niveles de contaminación en caso de accidente.

522.2. En el cuadro 6 del Reglamento de Transporte se entiende por “sólidos combustibles” todos los materiales de los tipos BAE-II y BAE-III en forma sólida que sean capaces de mantener la combustión por sí mismos o en un incendio.

522.3. En lo que atañe a los OCS-III, la evaluación de la seguridad antes de la salida de la expedición debería demostrar que la incorporación máxima de material radiactivo de una persona en las proximidades de un accidente no sería superior a la aceptada para los bultos del Tipo A (véase el apéndice VII).

522.4. Está permitido que los OCS-III excedan del límite de $100A_2$ en un medio de transporte que no sea una embarcación de transporte por aguas interiores, o que excedan del límite de $10A_2$ para una bodega o compartimento de una embarcación de transporte por aguas interiores, siempre que en el plan de transporte se indiquen las precauciones que habrán de tomarse durante el transporte para obtener un nivel global de seguridad al menos equivalente al que se conseguiría si se hubieran aplicado los límites.

- a) En las embarcaciones de transporte por aguas interiores existe un riesgo de acumulación de actividad en el caso de un hundimiento, ya que en esas aguas no hay fuertes corrientes ni probables actividades humanas cerca de las vías navegables. El límite de actividad total por bodega o compartimento tiene en cuenta este riesgo. El plan de transporte podría incluir disposiciones como las siguientes:
 - i) precauciones en la embarcación para reducir al mínimo el riesgo de hundimiento;
 - ii) la designación de una organización capaz de extraer los OCS-III del agua en el caso de un hundimiento, y

- iii) características específicas de los OCS-III que aseguran que en el caso de una sumersión razonablemente prolongada, la emisión de actividad en el agua se reduzca al mínimo.
- b) En los medios de transporte distintos de las embarcaciones para el transporte por aguas interiores, existe un riesgo de acumulación de actividad si se produce un accidente en un espacio confinado (por ejemplo, en un túnel). El límite de actividad total tiene en cuenta este riesgo. El plan de transporte podría incluir disposiciones como las siguientes:
 - i) controles o características que reduzcan al mínimo el riesgo de un accidente;
 - ii) restricciones de ruta que eviten espacios confinados, y
 - iii) características específicas de los OCS-III que aseguren que en el caso de un accidente en un espacio confinado, se reduzca al mínimo la emisión de actividad en el aire.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TRANSPORTE (IT)

523.1. El IT es un indicador de la tasa de dosis en las proximidades de un bulto, un sobreenvaso, una cisterna, un contenedor, un medio de transporte, un BAE-I sin embalar, un OCS-I sin embalar y un OCS-III sin embalar y se utiliza para establecer medidas de protección radiológica durante el transporte.

- a) Si la tasa de dosis medida comprende más de un tipo de radiación, el IT debería basarse en la suma de todas las tasas de dosis de cada tipo de radiación.
- b) El IT para cargas de minerales de uranio o torio y de sus concentrados puede determinarse sin medir las tasas de dosis. Como tasa de dosis máxima en cualquier punto a 1 m de la superficie externa de tales cargas puede tomarse el nivel especificado en el párrafo 523 a) del Reglamento de Transporte. El factor de multiplicación de 100 (párr. 523 a) y el factor adicional de multiplicación para el área de la sección eficaz más grande de la carga (párr. 523 b) y el cuadro 7 del Reglamento de Transporte) también se considerarán cuando sean aplicables para determinar el IT de tales cargas.

523.2. En las cargas de materiales radiactivos en cisternas, contenedores, y materiales BAE-I sin embalar, OCS-I y OCS-III con un área transversal grande, cuando el contenido no pueda considerarse razonablemente como una fuente puntual, las tasas de dosis en el exterior de la carga no disminuyen con la distancia, tal como indicaría la ley de la inversa del cuadrado. Puesto que la ley de la inversa del cuadrado constituía la base para el cálculo de las distancias

de separación, se añadió un mecanismo para cargas de grandes dimensiones que compensara el hecho de que las tasas de dosis a distancias mayores de 1 m de la carga fueran superiores a las que indicara la ley de la inversa del cuadrado. El requisito del párrafo 523 b) del Reglamento de Transporte, que a su vez impone los factores de multiplicación en el cuadro 7 del Reglamento de Transporte, proporciona el mecanismo para que el IT asignado se corresponda con las tasas de dosis existentes a mayores distancias, para las circunstancias que lo justifiquen. Los factores se aproximan a los que son adecuados para tratar las cargas como fuentes planas extensas o cilindros tridimensionales [26] más que como fuentes puntuales, aunque los perfiles reales de radiación son más complejos debido a las influencias del autoblandaje desigual, la distribución de la fuente y la radiación dispersa. Como la distribución de la tasa de dosis alrededor de un bulto que proporciona suficiente blindaje alrededor de su contenido radiactivo en cumplimiento de los límites de IT (véase el párr. 527 del Reglamento de Transporte) es más bien similar a la obtenida empleando un modelo de fuente puntual, no se precisa aplicar ningún factor de multiplicación a los bultos.

523.3. El IT debería determinarse midiendo a una distancia de 1 m todas las superficies de un bulto, incluso la tapa y el fondo. El valor más alto que se encuentre es el que determina el IT. De igual forma, el IT para una cisterna, un contenedor y para los materiales BAE-I y OCS-I sin embalar se determina midiendo a 1 m de sus superficies, pero para poder definir el IT debería aplicarse un factor de multiplicación en proporción con el tamaño de la carga. Se tomará normalmente como tamaño de la carga el área de la sección eficaz máxima de la cisterna, el contenedor o el medio de transporte, aunque, cuando se conozca, su área real máxima puede utilizarse, a condición de que no cambie durante el transporte.

523.4. Cuando haya partes salientes en la superficie externa, estas deberían pasarse por alto al determinar la distancia de 1 m, excepto para bultos con aletas, en que la medición debe hacerse a 1 m de distancia de la envoltura exterior del bulto.

523.5. El IT de un bulto debería determinarse en función de las tasas de dosis medidas, considerando el bulto de manera aislada.

523.6. La tasa de dosis máxima debería determinarse teniendo en cuenta fenómenos de amplificación potencialmente importantes como el desplazamiento del contenido radiactivo o, en el caso de bultos que contienen líquidos, el cambio de estado del contenido, incluso la separación o precipitación de los radionucleidos. Estos fenómenos deben tenerse en cuenta aplicando un factor

de corrección a la tasa de dosis máxima medida a 1 m de la superficie externa del bulto o empleando un valor máximo. Este factor de corrección o valor máximo debería consignarse en las instrucciones del bulto. En todo caso, debería realizarse una medición de la tasa de dosis antes de la expedición, y determinarse la tasa de dosis máxima potencial teniendo en cuenta esos factores.

524.1. La suma de los IT de los sobreenvases rígidos, contenedores y medios de transporte denota un criterio conservador, ya que se prevé que la suma de los IT de los bultos que estos contienen sea más alta que el IT obtenido por la medición de la tasa de dosis máxima a 1 m de la superficie externa del sobreenvase, contenedor o medio de transporte a causa de los efectos de blindaje y la distancia adicional con la que se efectúa la medición.

524A.1. En el caso de los sobreenvases no rígidos, el IT solo puede determinarse por la suma de los IT de todos los bultos que contienen. Esto es necesario porque las dimensiones del sobreenvase no son fijas y las mediciones de la tasa de dosis en diferentes momentos puede originar distintos resultados.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SEGURIDAD CON RESPECTO A LA CRITICIDAD CORRESPONDIENTE A REMESAS, CONTENEDORES Y SOBREENVASES

525.1. Todos los bultos que contienen materiales fisibles, salvo los exceptuados por el párrafo 417 del Reglamento de Transporte, reciben sus correspondientes ISC, cuyo valor debería consignarse en una etiqueta como la de la figura 5 del Reglamento de Transporte. El remitente debería tener cuidado en confirmar que el ISC para cada remesa es idéntico a la suma de los valores de ISC indicados en las etiquetas de los bultos.

LÍMITES DE ÍNDICE DE TRANSPORTE, DEL ÍNDICE DE SEGURIDAD CON RESPECTO A LA CRITICIDAD Y DE LAS TASAS DE DOSIS CORRESPONDIENTES A BULTOS Y SOBREENVASES

526.1. Con objeto de cumplir con los requisitos generales para el control de la criticidad nuclear y la protección radiológica, se fijan límites máximos para el IT, el ISC y la tasa de dosis superficial externa de los bultos y sobreenvases (véanse los párrs. 527 y 528 del Reglamento de Transporte). En el transporte en la modalidad de uso exclusivo estos límites pueden superarse debido a que existirán controles operacionales adicionales (véanse los párrs. 221.1 a 221.6).

527.1. La tasa de dosis máxima debería determinarse teniendo en cuenta fenómenos de amplificación potencialmente importantes como el desplazamiento del contenido radiactivo o, en los bultos que contengan líquidos, el cambio de estado del contenido, incluso la separación o precipitación de los radionucleidos. Estos fenómenos deben tenerse en cuenta aplicando un factor de corrección a la tasa de dosis máxima medida en la superficie externa del bulto o utilizando un valor máximo. Este factor de corrección o valor máximo debería consignarse en las instrucciones del bulto. En todo caso, debería realizarse una medición de la tasa de dosis antes de la expedición y determinarse la tasa de dosis máxima potencial teniendo en cuenta esos factores. Véase también el párrafo 526.1.

527.2. En los cilindros de hexafluoruro de uranio que se han vaciado no se conoce precisamente la cantidad, ubicación y composición isotópica del material radiactivo remanente. Para demostrar el cumplimiento del requisito del párrafo 617 del Reglamento de Transporte y, tomando como base la hipótesis más desfavorable con respecto a la cantidad, la ubicación y la composición isotópica del material radiactivo remanente (de conformidad con el párr. 617, (el “contenido radiactivo máximo” del diseño del bulto constituido por el cilindro y el material radiactivo remanente) un cálculo podrá determinar un valor conservador para el lapso de tiempo posterior al vaciado del cilindro, tras lo cual la tasa de dosis alrededor del bulto cumplirá con el Reglamento de Transporte. En una expedición determinada (es decir, ubicación real y composición del material radiactivo remanente), podrá permitirse una expedición anterior en función de un análisis de las mediciones de tasa de dosis de transportes similares anteriores y en el momento que se efectúe la remesa haciendo mediciones de tasa de dosis que demuestren el cumplimiento de lo establecido en el Reglamento de Transporte.

528.1. Véase el párrafo 527.1.

528.2. Aunque se permite que un bulto o sobreenvase tenga un nivel de radiación externo de hasta 10 mSv/h, en ciertos casos pueden ser más limitativos los requisitos para el límite máximo de dosis de 2 mSv/h en la superficie del medio de transporte o de 0,1 mSv/h en cualquier punto a 2 m de la superficie del medio de transporte (véase el párr. 573 del Reglamento de Transporte). Véase también el párrafo 220A.2 en relación con la acumulación de nucleidos descendientes durante el transporte.

528.3. Véase el párrafo 527.2.

CATEGORÍAS

529.1. Todos los bultos, sobreenvases y contenedores, con excepción de los que consisten únicamente en bultos exceptuados, deben ser clasificados por categorías. Este es un requisito necesario previo al etiquetado y rotulado.

529.2. Los bultos, sobreenvases y contenedores, con excepción de los que consisten únicamente en bultos exceptuados, deben recibir una de las categorías I-BLANCA, II-AMARILLA o III-AMARILLA como ayuda para su manipulación y estiba. En ciertos casos el IT del bulto o la tasa de dosis en la superficie puede superar el que se admitiría normalmente para bultos, sobreenvases o contenedores incluidos en la categoría más alta (es decir, III-AMARILLA). En tales casos el Reglamento de Transporte dispone que la remesa sea transportada en las condiciones de uso exclusivo.

529.3. Los límites inherentes de la tasa de dosis que figuran en la definición de las categorías se han deducido considerando los procedimientos de manipulación y carga de los bultos, los tiempos de exposición de los trabajadores del transporte y los tiempos de exposición de las películas fotográficas. Estos límites de la tasa de dosis se dedujeron como se indica a continuación [27]:

- a) Tasa de exposición de 0,005 mSv/h en la superficie: Este límite en la superficie no se dedujo a base del examen de los efectos de las radiaciones en las personas, sino del efecto más limitativo en las películas fotográficas sin revelar. La evaluación realizada en 1947 del efecto de las radiaciones en las películas sensibles a los rayos X demostró que comenzaría el velado con una exposición de 0,15 mSv y se estableció un límite en la edición de 1961 del Reglamento de Transporte de 0,1 mSv vinculado a un tiempo de exposición nominal máximo de 24 h. En las ediciones posteriores del Reglamento de Transporte (1964, 1967, 1973 y 1973 (enmendada)), se redondeó el período de 24 h a 20 h y la tasa de dosis límite de 0,005 mSv/h se tomó como un valor redondeado a la baja para proporcionar así protección a las películas fotográficas sin revelar durante dichos períodos de transporte. Esta tasa de dosis se aplicó como un límite en la superficie para los bultos de la categoría I-BLANCA, lo que garantizaría una probabilidad mínima de deterioro de las películas fotográficas debido a las radiaciones o dosis inaceptables para el personal del transporte sin necesidad de requisitos de separación.
- b) Tasa de exposición de 0,1 mSv/h a 1 m: Con el fin de limitar la dosis de radiación para las películas y las personas, la dosis de 0,1 mSv a que se refiere el anterior apartado a) se combinó con la tasa de exposición a 1 m del bulto y un tiempo de exposición de 1 h para obtener el límite de 10 veces

el IT de las ediciones de 1964, 1967 y 1973 del Reglamento de Transporte. Esta limitación se basaba en la suposición de un tiempo de tránsito de 24 h y en una distancia convencional de separación de 4,5 m (15 pies) entre bultos que contuvieran radio, que utilizó la US Railway Express Company en 1947. Dicha limitación daría lugar a una dosis de aproximadamente 0,1 mSv a 4,5 m en 24 h.

- c) Tasa de exposición de 2 mSv/h en la superficie: Se aplicó un límite independiente de 2 mSv/h en la superficie, además del límite expuesto en el anterior apartado b) sobre la base de que un trabajador del transporte que acarrease dichos bultos durante 30 minutos diarios, manteniéndolos cerca del cuerpo, recibiría una dosis que no excedería de la dosis entonces permisible de 1 mSv en las 8 h de una jornada laboral. Aunque tales dosis ya no serían aceptables, la idoneidad de los límites actuales de la tasa de dosis, desde el punto de vista de la seguridad radiológica, se ha confirmado mediante varias verificaciones y mediciones por las que se ha determinado la exposición a la radiación de los trabajadores del transporte [28 a 31] y mediante una evaluación realizada por el OIEA en 1985 [32].

Con todo, se reconoce que las tasas de dosis permitidas alrededor de los bultos y de los medios de transporte no aseguran por sí mismas dosis aceptablemente bajas, por lo que el Reglamento de Transporte también estipula el establecimiento de programa de protección radiológica (párr. 302 del Reglamento de Transporte) y la evaluación periódica de las dosis de radiación en las personas debidas al transporte de materiales radiactivos (párr. 308 del Reglamento de Transporte).

529.4. La categoría de un bulto debería determinarse en función de las tasas de radiación medidas, considerando el bulto de manera aislada.

529.5. El medio de transporte que lleve grandes contenedores en uso exclusivo no debe ajustarse por sí mismo a la modalidad de uso exclusivo, siempre que el acceso al contenedor de gran volumen esté sujeto a un estricto control del remitente o el destinatario.

MARCADO, ETIQUETADO Y ROTULADO

530.1. La aplicación de la edición de 1996 del Reglamento de Transporte podría tener por consecuencia la fijación de etiquetas y marcas múltiples por razones de divergencia entre las aprobaciones expedidas por las diversas autoridades competentes. Casos conocidos son: Tipo B(U) frente a Tipo B(M); diseño de bulto aprobado frente a uno de arreglo especial; y Tipo A, fisible frente a

Tipo BI-1, fisible. Para evitar la necesidad de modificar las marcas y etiquetas en los pasos fronterizos debería utilizarse solo un número de las Naciones Unidas, determinado de conformidad con el párrafo 530 del Reglamento de Transporte.

Marcado

531.1. Para seguir teniendo la posibilidad de identificar al destinatario o al remitente de un bulto cuyo control normal se haya perdido (por ejemplo, perdido en tránsito o ubicado incorrectamente), es preciso colocar en el exterior del embalaje una marca de identificación. Esta marca puede consistir en el nombre o la dirección del remitente o del destinatario, o puede ser un número que identifique una guía de carga o documento de transporte que contenga esa información. Cada sobreenvase debería estar marcado de ese modo a menos que las marcas en todos los bultos interiores estén claramente visibles dentro del sobreenvase.

531.2. Véanse los párrafos 533.2 a 533.6 para obtener información general sobre el cumplimiento del requisito de que la marca sea legible y duradera.

532.1. El número de las Naciones Unidas marcado en el bulto e indicado en los documentos es una información importante en el caso de incidentes y accidentes. El número de las Naciones Unidas correspondiente al certificado de aprobación expedido por la autoridad competente del país de origen del diseño suministra la información sobre el tipo de bulto necesaria para la gestión de una emergencia.

532.2. Los números de las Naciones Unidas utilizados para los materiales radiactivos también se emplean para asociar los requisitos de la publicación *Schedules of Provisions of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° SSG-33 (Rev. 1) edición de 2018)* [33]. Esto ha resultado útil para determinar los requisitos específicamente aplicables a cada tipo de bulto o material. Los números de las Naciones Unidas también pueden utilizarse en la verificación del cumplimiento, las comprobaciones y los controles de la ejecución, la obtención de datos y otros propósitos estadísticos, si la autoridad competente lo considera conveniente.

532.3. Los números de las Naciones Unidas 2977 y 2978 deberían utilizarse en lugar de los números de expedición de los materiales BAE para ayudar al grupo de respuesta a emergencias a hacer frente a los peligros específicos que plantea el hexafluoruro de uranio en un accidente relacionado con un incendio de grandes proporciones (es decir, que presenta más peligros graves que uno en cualquier otro material BAE) [34]. También se considera que, cuando ocurre un accidente asociado al transporte de hexafluoruro de uranio en condiciones

de arreglo especial, es mejor que se informe rápidamente a los grupos de respuesta a emergencias de que el accidente ha estado relacionado con el hexafluoruro de uranio.

532.4. Véanse los párrafos 533.2 a 533.6 para obtener información general sobre el cumplimiento del requisito de que la marca sea legible y duradera.

533.1. Los bultos que excedan de 50 kg de masa bruta pueden ser manipulados por medios mecánicos, más que por medios manuales, y requieren la correspondiente marca relativa a su masa bruta para indicar la posible necesidad de manipulación mecánica, así como la observancia de los límites de carga sobre el suelo y sobre el vehículo. Sin embargo, en la práctica, incluso los bultos que tienen una masa bruta de hasta 50 kg no deberían manipularse habitualmente de modo manual. Antes de que se comience a manipular manualmente los bultos de manera regular, debería disponerse de un procedimiento que asegure que las consecuencias radiológicas sean del grado más bajo que pueda razonablemente alcanzarse (véase el párr. 302 del Reglamento de Transporte). Siempre que sea posible, deberían emplearse medios mecánicos. Para que sea útil a este respecto, la marca debe ser legible y duradera.

533.2. Las marcas en los bultos deberían estar impresas claramente, tener suficiente tamaño y fijarse en lugares adecuados para que sean legibles, teniendo presente los medios de manipulación que probablemente se utilizarán. Como mínimo, se considera conveniente una altura de los caracteres de 12,5 mm para los bultos de poco peso (es decir, hasta algunos cientos de kilogramos), en que probablemente se utilicen medios mecánicos de contacto próximo, por ejemplo, montacargas de horquilla elevadora. Los bultos más pesados requerirán métodos de manipulación “a distancia” y el tamaño de los caracteres debería aumentarse en consecuencia para que los operadores puedan leer las marcas a determinada distancia. Un tamaño de 65 mm se considera suficiente para los bultos más grandes del intervalo de decenas a cientos de toneladas. Para garantizar la legibilidad, antes del marcado debería aplicarse un fondo de contraste si el acabado externo del bulto no proporcionara ya el suficiente contraste. Serían adecuados caracteres negros en un fondo blanco. Cuando los bultos tengan superficies externas irregulares (por ejemplo, aletas o corrugaciones) o superficies inadecuadas para la aplicación directa de las marcas, podría ser necesario utilizar un tablero o una placa plana para colocar esas marcas y mejorar la legibilidad.

533.3. Las marcas deberían ser duraderas, en el sentido de que sean por lo menos resistentes a los rigores del transporte normal, incluso a los efectos de la exposición a la intemperie y de la abrasión, sin pérdida de legibilidad importante.

Cabe señalar que es necesario consultar las reglamentaciones nacionales y de transporte modal, que pueden incluir requisitos más estrictos. Por ejemplo, el código IMDG [8] estipula que todas las marcas permanentes (así como las etiquetas), sigan siendo reconocibles en los bultos tras una inmersión en el mar de por lo menos tres meses. Cuando se coloquen las marcas sobre un tablero o una placa, este elemento debería sujetarse con firmeza al bulto en una forma que esté en consonancia con la norma de integridad del propio bulto.

533.4. Los medios de marcado dependerán de la naturaleza de la superficie externa del propio embalaje y podrán ser (por orden de durabilidad) desde una etiqueta impresa (para el nombre del destinatario o del remitente, el número de las Naciones Unidas y el nombre correcto de expedición y la masa bruta), una estampación ligera con tinta o pintura indelebles (método apropiado para embalajes de cartón o de madera), pasando por el marcado al fuego (para embalajes de madera), el pintado con productos a base de esmalte o resina (adecuado para muchas superficies, particularmente metálicas) hasta marcas profundamente grabadas en relieve, embutidas o moldeadas para embalajes exteriores metálicos.

533.5. Siempre deberían consultarse las reglamentaciones nacionales y de transporte modal apropiadas para complementar la información genérica de los párrafos 533.2 a 533.4, puesto que pueden existir importantes variaciones para determinados requisitos.

533.6. En la planificación de los programas de inspección y mantenimiento que se requieren para los embalajes se deberían incluir disposiciones para la inspección de todas las marcas permanentes y la reparación de cualquier daño o defecto. La experiencia que se obtenga de este tipo de inspecciones indicará si en la práctica se ha alcanzado la durabilidad.

534.1. En la edición de 1996 del Reglamento de Transporte se establece el requisito de identificar los bultos industriales con una marca. El diseño de la marca es compatible con otras marcas similares en las que se incluye la palabra “Tipo” junto con la descripción apropiada del bulto industrial (por ejemplo, BI-2). El diseño de la marca evita también el riesgo de confusión cuando, en otros reglamentos de transporte, la abreviatura IP utilizada en inglés para los bultos industriales (BI) sea utilizada con un propósito diferente. Por ejemplo, en las instrucciones Técnicas de la OACI [12] se utiliza “IP” para referirse al embalaje interno; así, “IP.3” representa una de las diez clases particulares de embalaje interno.

534.2. Véanse los párrafos 533.2 a 533.6 para obtener información general sobre el cumplimiento del requisito de que la marca sea legible y duradera.

535.1. Todos los diseños de bultos del Tipo B(U), del Tipo B(M), del Tipo C y de bultos que contienen materiales fisibles requieren la aprobación de la autoridad competente. Las marcas en tales bultos tienen por objeto establecer un vínculo entre un bulto determinado y la aprobación del diseño correspondiente de la autoridad nacional competente (mediante la marca de identificación), así como informar sobre la clase de aprobación de diseño de la autoridad competente. Además, la marca del bulto proporciona al observador informado una valiosa información en caso de accidente.

535.2. Es preciso consignar un número de serie en la marca, ya que el sistema de gestión operacional y las actividades de mantenimiento están orientados a cada uno de los embalajes y a la correspondiente necesidad de realizar y de verificar estas actividades en cada bulto por separado. El número de serie es también necesario para las actividades de verificación del cumplimiento por parte de la autoridad competente y para la aplicación de lo dispuesto en los párrafos 819 y 820 del Reglamento de Transporte.

535.3. En los párrafos 533.2 a 533.6 se incluye información general sobre la legibilidad, la durabilidad y la inspección y el mantenimiento de las marcas. Sin embargo, siempre que sea posible, las marcas de identificación de la autoridad competente, el número de serie y la marca del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C deberían ser resistentes para que no se hagan ilegibles o sean borradas o retiradas incluso en condiciones de accidente. Puede ser conveniente colocar esas marcas en la superficie externa del bulto junto al símbolo del trébol. Por ejemplo, puede utilizarse una placa metálica para combinar estas marcas.

535.4. Un diseño de bulto aprobado puede ser aquel en que puedan utilizarse diversos componentes internos con un solo componente exterior o los componentes internos del embalaje puedan ser permutables entre más de un componente exterior. En estos casos, cada componente exterior, con un único número de serie, identificará el embalaje como un conjunto de componentes que satisface los requisitos del párrafo 535 b) del Reglamento de Transporte, a condición de que el conjunto de los componentes esté en conformidad con el diseño aprobado por las autoridades competentes. En tales casos, el sistema de gestión establecido por el remitente debería asegurar la identificación y el uso correctos de estos componentes.

536.1. El marcado de un bulto del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C con un símbolo del trébol resistente a los efectos del fuego y el agua tiene la finalidad

de asegurar que después de un accidente muy grave pueda seguir determinándose de manera inequívoca que estos tipos de bultos llevan materiales radiactivos en su interior.

536A.1. En algunos casos, la marca del tipo de bulto podría no ser compatible con el número de las Naciones Unidas que aparece en el bulto porque el número de las Naciones Unidas ha sido modificado en función del contenido del bulto. En incidentes durante el transporte esa incoherencia puede resultar confusa para los primeros actuantes. Por tanto, debería eliminarse o taparse cualquier marca no relacionada con el número de las Naciones Unidas.

537.1. Los materiales BAE-I y OCS-I pueden transportarse sin embalar con arreglo a las especificaciones enunciadas en el párrafo 520 del Reglamento de Transporte. En una de las condiciones especificadas se indica la necesidad de garantizar que no haya pérdida de contenido durante las condiciones de transporte rutinarias. Para satisfacer este requisito, según las características del material, puede ser conveniente envolver el material o tomar medidas similares. Envolverlo también puede ser ventajoso desde un punto de vista práctico pues, por ejemplo, así puede ponerse una etiqueta con la información de interés para el destinatario o el remitente. En situaciones en que es deseable indicar claramente que la remesa lleva materiales radiactivos, el Reglamento de Transporte permite explícitamente que esa indicación sea colocada en la envoltura o el receptáculo. Es importante observar que en el Reglamento de Transporte no se estipula este tipo de marcado; no obstante, se ofrece esta opción para aplicarla cuando se considere útil.

Etiquetado

538.1. Es preciso que los trabajadores del transporte tengan conocimiento del contenido de los bultos cuando los sobreenvases, cisternas y contenedores transporten materiales radiactivos y que sepan que existen peligros radiológicos y peligros relacionados con la criticidad. Las etiquetas proporcionan esa información por medio del símbolo del trébol, el color y la categoría (I-BLANCA, II-AMARILLA o III-AMARILLA), y la etiqueta de fisible. Mediante estas etiquetas es posible determinar a) los peligros radiológicos o los peligros de criticidad asociados al contenido radiactivo de la unidad y b) los requisitos de almacenamiento y estiba que pueden ser aplicables a los bultos, sobreenvases, cisternas o contenedores.

538.2. Las etiquetas de materiales radiactivos forman parte de un conjunto de etiquetas utilizadas internacionalmente para identificar las diferentes clases de mercancías peligrosas. Este sistema de etiquetas ha sido establecido para hacer fácilmente reconocibles las mercancías peligrosas desde la distancia por medio de

símbolos. El símbolo específico elegido para identificar los bultos, sobreenvases, cisternas y contenedores con materiales radiactivos es el trébol (véase al párr. 536 y la fig. 1 del Reglamento de Transporte).

538.3. El contenido de un bulto, sobreenvase, cisterna o contenedor podría ser peligroso, además de por sus características radiactivas, por otras propiedades, como por ejemplo, por ser corrosivo o inflamable. En estos casos deben aplicarse las reglamentaciones referentes a ese peligro adicional. Esto significa que, además de la etiqueta de materiales radiactivos, se deben colocar en el bulto, sobreenvase, cisterna o contenedor otras etiquetas inherentes al peligro adicional.

539.1. En las cisternas o los contenedores, debido a que existe la posibilidad de que el envase pueda ser ocultado por otros contenedores y cisternas, las etiquetas deben ser puestas en los cuatro lados para asegurar la visibilidad de una etiqueta sin que sea necesario buscarla y para reducir al mínimo la posibilidad de que sea tapada por otras unidades de carga. En los contenedores de costado abierto las etiquetas deben fijarse en el lado de la plataforma o el poste esquinero, o en cualquier otra superficie en que las etiquetas sean claramente visibles.

Etiquetado del contenido radiactivo

540.1. Además de indicar las características radiactivas del contenido, las etiquetas también llevan una información más específica con respecto al contenido (es decir, el nombre del nucleido o de los nucleidos más restrictivos en el caso de una mezcla de radionucleidos, y la actividad). Si el contenido es fisible, puede emplearse la masa total de nucleidos fisibles en unidades de gramos, o sus múltiplos, en lugar de la actividad. Esta información es importante en un incidente o un accidente, ya que la información sobre el contenido puede ser necesaria para evaluar el peligro. La información más específica relativa al contenido no se requiere para el material BAE-I por el bajo riesgo de irradiación asociado al material de este tipo.

540.2. Las etiquetas amarillas también indican el IT del bulto, sobreenvase, cisterna y contenedor. La información del IT es esencial para las labores de almacenamiento y estiba, ya que se utiliza para controlar la acumulación y garantizar la separación adecuada de las unidades de carga. En el Reglamento de Transporte se establecen límites para la suma total de IT en los contenedores y medios de transporte en uso no exclusivo (véase el cuadro 10 del Reglamento de Transporte).

540.3. Para definir una mezcla de los radionucleidos más restrictivos en una etiqueta, deberían considerarse no solo los valores más bajos A_1 o A_2 , sino también las cantidades relativas de radionucleidos presentes. Por ejemplo, una

manera de definir el radionucleido más restrictivo es determinando para los diferentes radionucleidos el valor de:

$$f_i/A_i \quad (5.1)$$

donde

f_i es la actividad del radionucleido i ;

A_i es el valor A_1 o A_2 para el radionucleido i , según sea aplicable.

El valor más alto representará el radionucleido más restrictivo.

Etiquetado para la seguridad con respecto a la criticidad

541.1. El ISC es un valor que se utiliza para el control necesario de la acumulación de bultos a los fines de la seguridad con respecto a la criticidad, como se establece en los párrafos 568 y 569 del Reglamento de Transporte. El control se ejerce limitando la suma de los ISC a los valores especificados en el cuadro 11 del Reglamento de Transporte.

541.2. En los bultos que contengan materiales fisibles deberían aparecer etiquetas que lleven el ISC, según lo estipulado en el párrafo 538 del Reglamento de Transporte. La etiqueta del ISC es adicional a las etiquetas de la categoría (categorías I-BLANCA, II-AMARILLA y III-AMARILLA), porque su objetivo es suministrar información sobre el ISC, mientras que las etiquetas de la categoría proporcionan información sobre el IT y el contenido. La etiqueta del ISC, por sí misma, también especifica que el bulto contiene materiales fisibles.

541.3. Al igual que el IT, el ISC brinda información fundamental para el almacenamiento y la estiba en el sentido de que se utiliza para controlar la acumulación y garantizar la separación correcta de las unidades de carga que contienen material fisible. El Reglamento de Transporte establece límites para la suma total de ISC en los contenedores y medios de transporte (véase el cuadro 11 del Reglamento de Transporte).

542.1. Véanse los párrafos 541.1 a 541.3.

Rotulado

543.1. Los rótulos que se utilizan en los contenedores y las cisternas de grandes dimensiones (y también en los vehículos de transporte por carretera y ferrocarril (véase el párr. 571 del Reglamento de Transporte), se diseñan de una manera similar a las etiquetas del bulto (aunque no llevan información detallada del IT, el contenido y la actividad) para indicar claramente los peligros de las mercancías peligrosas. Los rótulos deben colocarse en los cuatro lados de los contenedores y las cisternas para garantizar su fácil reconocimiento desde todas las direcciones. Las dimensiones del rótulo tienen por finalidad facilitar su lectura, incluso a cierta distancia. Para evitar un número excesivo de rótulos y de etiquetas solo puede utilizarse una etiqueta de mayores dimensiones en contenedores y cisternas cuando esta etiqueta ampliada desempeñe también la función de un rótulo.

543.2. En los contenedores de costado abierto las etiquetas deben fijarse en el lado de la plataforma o el poste esquinero, o en cualquier otra superficie en que las etiquetas sean claramente visibles.

544.1. La indicación del número de las Naciones Unidas puede suministrar información sobre el tipo de materiales radiactivos transportado, incluso si es o no fisible, e información sobre el tipo de bulto. Esta información es importante también en el caso de incidentes o de accidentes que tengan como consecuencia la fuga de materiales radiactivos, ya que ayuda a los responsables de la respuesta a emergencias a determinar las medidas de respuesta apropiadas (véase el párr. 401.1).

OBLIGACIONES DEL REMITENTE

545.1. El remitente debería adoptar medidas apropiadas en consonancia con su sistema de gestión para que se pueda demostrar el cumplimiento de los requisitos del Reglamento de Transporte. Esto no significa que el propio remitente tenga que llevar a cabo medidas como el rotulado del vehículo.

Detalles de la remesa

546.1. La lista de información facilitada por el remitente en cumplimiento de las disposiciones del párrafo 546 del Reglamento de Transporte está concebida para informar al remitente y al destinatario, así como a otras partes interesadas, de la índole exacta de una remesa para que puedan tomarse todas las medidas apropiadas. Al suministrar esta información el remitente también debe recordar

los requisitos reglamentarios aplicables a la remesa durante su preparación para el transporte y despacho (véase el párr. 532.1).

546.2. En el cuadro 1 del Reglamento de Transporte se incluye una lista de los nombres correctos de expedición y de los correspondientes números de las Naciones Unidas.

546.3. El remitente debe poner atención en el requisito específico del párrafo 546 k) del Reglamento de Transporte relativo a las remesas de bultos en un sobreenvase, contenedor o medio de transporte. Cada bulto o conjunto de bultos debe llevar la adecuada documentación para el destinatario de que se trate. Esto es importante desde el punto de vista de la declaración del remitente. Nadie con excepción del remitente puede hacer esta declaración y, por tanto, es preciso que este prepare los documentos adecuados para todas las partes que componen una remesa mixta de modo que puedan continuar su trayecto después de haber sido extraídas del sobreenvase, contenedor o medio de transporte.

546.4. Debería tenerse precaución en seleccionar el nombre correcto de expedición en función del cuadro 1 del Reglamento de Transporte. Las partes de un asiento que no se destacan en letras mayúsculas no se consideran parte del nombre correcto de expedición. Cuando el nombre de expedición contenga las conjunciones “o” o “u” solamente debería ser utilizada una de las variantes posibles. Los siguientes ejemplos ilustran cómo seleccionar el nombre correcto de expedición del asiento correspondiente a los números de las Naciones Unidas 2909, 2915 y 3332:

Para los MATERIALES RADIATIVOS, BULTOS EXCEPTUADOS UN 2909 — ARTÍCULOS MANUFACTURADOS DE URANIO NATURAL o URANIO NATURAL EMPOBRECIDO o TORIO NATURAL, el nombre correcto de expedición es la descripción que sea aplicable de entre las siguientes:

UN 2909 MATERIALES RADIATIVOS, BULTOS
EXCEPTUADOS — ARTÍCULOS MANUFACTURADOS
DE URANIO NATURAL;

UN 2909 MATERIALES RADIATIVOS, BULTOS
EXCEPTUADOS — ARTÍCULOS MANUFACTURADOS
DE URANIO EMPOBRECIDO;

UN 2909 MATERIALES RADIATIVOS, BULTOS
EXCEPTUADOS — ARTÍCULOS MANUFACTURADOS
DE TORIO NATURAL.

Para los MATERIALES RADIATIVOS UN 2915, BULTOS DEL TIPO A no en forma especial, no fisibles o fisibles exceptuados, el nombre correcto de expedición es el siguiente:

UN 2915 MATERIALES RADIATIVOS, BULTOS DEL TIPO A.

Para los MATERIALES RADIATIVOS UN 3332, BULTOS DEL TIPO A, EN FORMA ESPECIAL, no fisibles o fisibles exceptuados, el nombre correcto de expedición es el siguiente:

UN 3332 MATERIALES RADIATIVOS, BULTOS DEL TIPO A, EN
FORMA ESPECIAL.

Como se observa en el ejemplo relativo al número UN 3332, la característica añadida (en este caso, “FORMA ESPECIAL”) es parte del nombre correcto de expedición, y las palabras en minúsculas “no fisibles o fisibles exceptuados” no forman parte del nombre correcto de expedición.

546.5. Otro ejemplo de interpretación y uso del concepto del número de las Naciones Unidas se relaciona con los embalajes vacíos que han contenido materiales radiactivos (es decir, el número UN 2908). Si hay residuos o restos en el embalaje, por ejemplo, en los bultos de hexafluoruro de uranio, el embalaje no se debería llamar “embalaje vacío” sino que debería ser enviado como bulto (es decir, no como un embalaje). La cantidad remanente determinaría la categoría del bulto (véase el párr. 427.3).

546.6. Es necesario que la actividad máxima del contenido durante el transporte se encuentre especificada en los correspondientes documentos de transporte (párr. 546 g) del Reglamento de Transporte). En algunos casos la actividad puede incrementarse como resultado de la acumulación de los radionucleidos descendientes durante el transporte. En tales situaciones debería aplicarse la apropiada corrección para determinar la actividad máxima.

546.7. En el párrafo 540.3 puede encontrarse información sobre la identificación de los nucleidos más restrictivos. Pueden incluirse en descripciones generales adecuadas, cuando proceda, combustible nuclear irradiado (o gastado) o tipos de desechos radiactivos especificados.

546.8. Para los materiales BAE-II y BAE-III y para los OCS-I y los OCS-II es necesario indicar la actividad total como un múltiplo de A_2 . Para los OCS-I y OCS-II la actividad debería calcularse considerando el nivel de contaminación superficial y la extensión del área superficial contaminada. Cuando el nucleido no pueda ser identificado, debería utilizarse para el cálculo de la actividad total el valor más bajo de A_2 de entre los posibles nucleidos alfa y los posibles nucleidos beta-gamma.

Información para los transportistas

554.1. En relación con la carga, la estiba, el transporte, la manipulación y la descarga de OCS-III, véase el párrafo 520.4.

Posesión de certificados e instrucciones

561.1. De igual manera que el remitente debe tener en su poder una copia del certificado de aprobación del bulto, también debe cerciorarse de que posee las instrucciones necesarias para cerrar y preparar correctamente el bulto para el transporte. En algunos países puede ser necesario que el remitente se registre como usuario de ese certificado ante la correspondiente autoridad competente.

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO EN TRÁNSITO

Separación durante el transporte y el almacenamiento en tránsito

562.1. Entre los controles operacionales aplicados en el transporte de materiales radiactivos se puede incluir el uso de las distancias de separación. Estas suelen presentarse en función del IT total, junto con alguna dependencia cronológica. Los cuadros se preparan generalmente a nivel mundial o nacional (un ejemplo son las Instrucciones Técnicas de la OACI [12]) que incluyen los efectos de las operaciones de muchos remitentes, expedidores y transportistas en el trabajador más expuesto o en una persona representativa del público.

562.2. Según lo que se conoce sobre los parámetros utilizados para elaborar los cuadros de separación, al inicio se elegía una fracción del límite de dosis en cada caso (para los trabajadores y los miembros del público) y se empleaba lo que se consideraba un modelo realista para deducir las distancias de separación de cada modalidad de transporte. Con la producción de datos más realistas [35 a 37], se ha hecho evidente que los modelos empleados son muy conservadores. Por ello, a medida que se han reducido los límites de dosis, se ha demostrado

que los modelos y los criterios de dosis siguen proporcionando una separación adecuada [38]. Comparando todos los aspectos de la práctica (no simplemente la separación) con las restricciones de dosis apropiadas para el transporte (en su conjunto, y no solo para una operación de transporte), se ha estimado que el uso de los cuadros actuales brinda un nivel adecuado de seguridad.

562.3. Durante la preparación de la edición de 1996 del Reglamento de Transporte se llevó a cabo un examen. El modelo y los criterios de dosis empleados para establecer las distancias de separación fueron examinados a la luz de las nuevas ideas asociadas a las restricciones de dosis que se amplían en la referencia [39] (cuya metodología se utiliza en la publicación *Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSG-9)* [40]. Se consideró apropiada una restricción de dosis de 0,7 mSv para la exposición de un grupo crítico del público a la radiación directa debida a prácticas como el transporte de materiales radiactivos. Esta restricción se consideró aplicable a las operaciones mundiales de transporte en general más que a las operaciones de un remitente en particular. En el curso de una serie de tres reuniones técnicas se realizó una ingente labor de recopilación y evaluación de información sobre exposiciones evaluadas entre los miembros del público. La evaluación de esta información demostró que las exposiciones recibidas por los miembros del público a causa de estas operaciones estaban muy por debajo del criterio de dosis utilizado en los modelos y de la restricción de dosis apropiada [37]. Se llegó a la conclusión en estos estudios de que los cuadros de separación existentes y las demás disposiciones del Reglamento de Transporte en conjunto prevén un nivel apropiado de seguridad radiológica y son compatibles con restricciones de dosis apropiadas.

562.4. La utilización de distancias de separación no elimina en sí la necesidad de establecer un programa de protección radiológica y aplicar las medidas que se habrán de emplear en el programa, ni garantiza una optimización apropiada del transporte de materiales radiactivos.

562.5. Los criterios de dosis de 5 mSv en un año para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y de 1 mSv en un año para los miembros del público (véase el párr. 562 a) y b) del Reglamento de Transporte) se han utilizado para calcular los cuadros de separación aplicables a las operaciones generales de transporte (es decir, operaciones que incluyen las actividades de todas las prácticas de transporte). En algunos casos quizás sea conveniente que los remitentes o los transportistas elaboren cuadros de separación aplicables a determinadas expediciones o campañas de transporte. En esos cálculos deberían definirse bien las características para que el modelo sea, por tanto, más realista.

En estos casos los criterios de dosis conexos relativos a la exposición del público deben revisarse a la baja de manera considerable (como puede hacerse también en relación con los trabajadores) para tener en cuenta la posibilidad de exposición a otras operaciones de transporte (u otras fuentes de exposición de los trabajadores).

562.6. Hay muchos aspectos y condiciones específicos de la modalidad de transporte que deberían tenerse en cuenta en los modelos empleados para calcular las distancias de separación. Por ejemplo, debería considerarse cómo la relación entre los IT acumulados en un lugar y las tasas de dosis en zonas ocupadas se ve afectada por el blindaje y la distancia y cómo los tiempos de exposición de los trabajadores y los miembros del público dependen de la frecuencia y duración de su viaje junto con los materiales radiactivos. Estas distancias pueden establecerse recurriendo a cuestionarios, encuestas y mediciones. En algunas circunstancias la exposición durante un breve tiempo cerca de bultos, por ejemplo, durante inspecciones o trabajos de mantenimiento en viajes marítimos, puede ser más importante que tiempos de exposición más prolongados a tasas de dosis más bajas en zonas más regularmente ocupadas. En el apéndice III figura un ejemplo del uso de un modelo para determinar la separación mínima y las distancias de espaciamiento para aeronaves de pasajeros y carga.

562.7. Tales cálculos están basados inevitablemente en hipótesis que en circunstancias particulares pueden diferir de los parámetros reales. Los modelos deberían ser fiables y conservadores. Más importante que la base sobre la que se calcularon estas distancias es que el uso de las distancias de separación resultantes redunde en dosis aceptablemente bajas. Sin embargo, como las pautas de transporte están sujetas a cambios, las dosis deberían mantenerse bajo examen.

562.8. No deberían subestimarse las virtudes de la simplicidad. Es más fácil y probable que se cumplan requisitos claros y sencillos que complejos o más rigurosos. Un buen ejemplo es el cuadro simplificado de separación del código IMDG [8], que proporciona distancias prácticas de separación para diferentes tipos de embarcaciones y la conversión por los operadores de las distancias de separación incluidas en las Instrucciones Técnicas de la OACI [12] en límites de IT por bodega de carga.

562.9. Al calcular las distancias de separación para las zonas de almacenamiento en tránsito se debería considerar tanto el IT de los bultos como el período de máxima ocupación. Si existe alguna duda con respecto a la eficacia de la distancia, podría hacerse una comprobación midiendo las tasas de dosis reales.

562.10. Si se transportan juntas diferentes clases de mercancías peligrosas, existe la posibilidad de que el contenido de los bultos que tengan fugas pueda afectar a la carga contigua; por ejemplo, una fuga de material corrosivo podría reducir la eficacia del sistema de contención de un bulto de materiales radiactivos. Así, en algunos casos ha sido necesario restringir las clases de mercancías peligrosas que pueden transportarse cerca de otras clases. A veces simplemente puede declararse las clases de mercancías peligrosas que deben ser separadas de otras. Para proporcionar un procedimiento completo y de fácil comprensión de la separación necesaria, se ha considerado útil presentar esta información en forma de un cuadro sencillo. En el cuadro 2 se incluye como ejemplo el cuadro de separación incluido en la parte 7 del código IMDG [8].

562.11. Aunque no se trata de una cuestión de protección radiológica, una evaluación del efecto de la radiación en películas rápidas de rayos X en 1947 [41] determinó que estas pueden mostrar un ligero velado después que se revelan al quedar expuestas a dosis superiores a 0,15 mSv de radiación gamma. Esto podría interferir en el uso correcto de la película y propiciar una interpretación incorrecta del diagnóstico. Otros tipos de película también son susceptibles al efecto de velado, aunque las dosis requeridas son mucho más altas. Dado que sería imposible implantar procedimientos de separación que varíen con el tipo de película, las disposiciones del Reglamento de Transporte están concebidas para restringir la exposición de las películas sin revelar de todos los tipos a un nivel no superior a 0,1 mSv durante cualquier trayecto desde el remitente hasta el destinatario.

562.12. Los distintos tiempos de duración relacionados con el transporte marítimo (en función de días o semanas) y el transporte aéreo o terrestre (en función de horas o días) se traducen en la necesidad de utilizar diferentes cuadros de distancias de separación, de modo que la exposición total de la película durante el tránsito sea la misma para cada modalidad. En la distribución y el uso final de la película fotográfica puede intervenir más de una modalidad de transporte y más de una expedición. Así, cuando se establezcan cuadros de distancias de separación para una modalidad de transporte específica, solo debería asignarse a esa modalidad una fracción del límite previsto en el párrafo 562 del Reglamento de Transporte. En el transporte por carretera un conductor puede asegurar una separación suficiente de la película fotográfica transportada en otros vehículos dejando un espacio definido de al menos 2 m alrededor del vehículo al aparcarlo.

562.13. Puesto que los sacos de correo a menudo contienen películas fotográficas sin revelar que no se definen como tales, es prudente proteger estos sacos de la misma manera que se hace con la película fotográfica sin revelar.

CUADRO 2. EJEMPLO DE SEPARACIÓN ENTRE DIFERENTES CLASES
 (tomado del Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG), referencia [8])

Clase	1.1	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
	1.1	*	*	4	2	2	4	4	4	4	4	4	2	4	2	4	X
	1.2																
	1.5																
Explosivos	1.3	*	*	4	2	2	4	3	3	4	4	4	2	4	2	2	X
	1.6																
Explosivos	1.4	*	*	2	1	1	2	2	2	2	2	2	X	4	2	2	X
Gases inflamables	2.1	4	4	2	X	X	2	1	2	X	2	2	X	4	2	1	X
Gases no tóxicos, ni inflamables	2.2	2	2	1	X	X	1	X	1	X	X	1	X	2	1	X	X
Gases tóxicos	2.3	2	2	1	X	X	2	X	2	X	X	2	X	2	1	X	X
Líquidos inflamables	3	4	4	2	2	1	2	X	X	2	1	2	X	3	2	X	X

CUADRO 2. EJEMPLO DE SEPARACIÓN ENTRE DIFERENTES CLASES
(tomado del *Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG), referencia [8]*) (cont.)

Clase	1.1	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
	1.1	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
	1.2	1.6															
	1.5																
Sólidos inflamables (incluidas las sustancias que reaccionan espontáneamente y sustancias afines y explosivos insensibilizados)	4.1	4	3	2	1	X	X	X	1	X	1	2	X	3	2	1	X
Sustancias que pueden experimentar combustión espontánea	4.2	4	3	2	2	1	2	1	X	1	2	2	1	3	2	1	X
Sustancias que en contacto con agua desprenden gases inflamables	4.3	4	4	2	X	X	X	1	X	1	X	2	X	2	2	1	X
Sustancias (agentes) comburentes	5.1	4	4	2	2	X	X	2	1	2	X	2	1	3	1	2	X
Peróxidos orgánicos	5.2	4	4	2	2	1	2	2	2	2	2	X	1	3	2	2	X
Sustancias tóxicas	6.1	2	2	X	X	X	X	X	1	X	1	1	X	1	X	X	X
Sustancias infecciosas	6.2	4	4	4	4	2	2	3	3	2	3	3	1	X	3	3	X

CUADRO 2. EJEMPLO DE SEPARACIÓN ENTRE DIFERENTES CLASES
(tomado del Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG), referencia [8]) (cont.)

Clase	1.1	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
	1.1	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
	1.2	1.6															
	1.5																
Materiales radiactivos	7	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	X	3	X	2	X
Sustancias corrosivas	8	4	2	2	1	X	X	1	1	1	2	2	X	3	2	X	X
Sustancias y artículos peligrosos diversos	9	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Las cifras y los símbolos que aparecen en el cuadro están definidos en el capítulo 7 de la referencia [8]:

- 1 — “A distancia de”.
 - 2 — “Separado de”.
 - 3 — “Separado por todo un compartimento o toda una bodega”.
 - 4 — “Separado longitudinalmente por todo un compartimento intermedio o toda una bodega”.
 - X — La separación, cuando proceda, se muestra en la lista de mercancías peligrosas de la referencia [8].
- * — Véase la sección 7.2.7.2 de la referencia [8].

Estiba durante el transporte y el almacenamiento en tránsito

564.1. En el contexto del Reglamento de Transporte, “estiba” significa la ubicación dentro o sobre un medio de transporte de un bulto que contiene materiales radiactivos con respecto a otra carga (radiactiva y no radiactiva). En relación con la estiba de remesas, “sujeción” significa el uso de material de estiba, abrazaderas, inmovilizadores o tensores apropiados para inmovilizar el bulto, previniendo así el desplazamiento dentro o sobre un medio de transporte durante el transporte rutinario. Cuando un contenedor se utilice para facilitar el transporte de bultos con materiales radiactivos embalados o para actuar como sobreenvase, se deberían adoptar medidas para inmovilizar los bultos dentro del contenedor. Cuando se esté cargando o transportando el contenedor, con objeto de prevenir daños a los bultos deberían utilizarse métodos de sujeción, por ejemplo, colocar eslingas o echar redes de carga por encima o bien aplicar la compartimentación. Cuando se utilice un contenedor u otro envase de grandes dimensiones a modo de embalaje, debería inmovilizarse el contenido dentro del contenedor para prevenir que este se deteriore y se ponga en peligro el sistema de contención o la integridad del blindaje bajo las tensiones estáticas y dinámicas resultantes de la manipulación y las condiciones rutinarias del transporte.

564.2. Es preciso sujetar los bultos dentro o sobre los medios de transporte por diversas razones. Debido al movimiento del medio de transporte durante su recorrido, los bultos pequeños pueden ser lanzados o caer dentro o sobre el medio de transporte y llegar a dañarse si no se sujetan. Los bultos también se pueden caer del medio de transporte, dando por resultado su pérdida o daño. Los bultos pesados pueden cambiar de posición dentro o sobre un medio de transporte si no son amarrados correctamente, lo que podría hacer inestable el medio de transporte y causar un accidente. Los bultos también deberían inmovilizarse para evitar su desplazamiento y así asegurar que no se incremente la tasa de dosis de radiación al conductor o a la tripulación en el exterior del medio de transporte.

564.3. Véase el apéndice IV para obtener información adicional sobre métodos de sujeción.

565.1. Algunos bultos con materiales radiactivos del Tipo B(U), del Tipo B(M) y del Tipo C pueden emitir calor. Este fenómeno se produce como resultado de la absorción de la energía de las radiaciones en los componentes del bulto y de su conversión en energía térmica, que se transmite a la superficie de los bultos y desde ella al medio ambiente. En tales casos, se incorpora al bulto un mecanismo de disipación térmica de tal manera que se alcance una condición segura y normal. Por ejemplo, en el Co 60 se producen aproximadamente 15 W por 40 TBq. Puesto

que la mayoría de esa energía se absorbe en el blindaje del bulto, la carga de calor total puede ser del orden de miles de vatios. El problema puede agravarse si hay varios bultos similares en la expedición. Además de prestarse debida atención a los materiales próximos a los bultos, debería asegurarse que la circulación de aire no quede excesivamente restringida en los compartimentos que contengan los bultos con objeto de no causar un aumento significativo de la temperatura ambiente del área próxima a estos. Los transportistas deberían tener la precaución de no reducir la capacidad de disipación de calor de los bultos cubriéndolos o estibándolos muy juntos o cerca de otra carga que pueda actuar como aislamiento térmico. Cuando los bultos que contienen materiales radiactivos emitan un calor importante, el remitente debe suministrar al transportista instrucciones para su adecuada estiba (véase el párr. 554 del Reglamento de Transporte).

565.2. Según diversos estudios realizados, si la tasa de generación de calor dentro de un bulto es pequeña (correspondiente a un flujo superficial de calor de menos de 15 W/m^2), el calor puede disiparse por conducción solamente y la temperatura no superará los $50 \text{ }^\circ\text{C}$, aun cuando el bulto esté rodeado totalmente por carga a granel. Los espacios de aire entre los bultos permiten que se produzca la suficiente disipación del calor por convección natural del aire.

566.1. Hay dos razones fundamentales para limitar la acumulación de bultos en grupos o en medios de transporte y contenedores. Cuando los bultos estén situados muy próximos entre sí deben aplicarse controles para lo siguiente:

- a) Prevenir tasas de dosis superiores a las admisibles como resultado del efecto acumulativo de las diferentes tasas de dosis de cada uno de los bultos independientes. Para remesas no transportadas en la modalidad de uso exclusivo, esto se consigue limitando el IT. La tasa de dosis máxima teórica a 2 m de la superficie de un vehículo que lleva un IT de 50 se calculaba históricamente como $0,125 \text{ mSv/h}$ y se consideraba equivalente a $0,1 \text{ mSv/h}$, ya que era poco probable que se alcanzara el valor máximo. La experiencia ha confirmado la fiabilidad de estos valores.
- b) Prevenir la criticidad nuclear limitando la interacción neutrónica entre bultos que contengan materiales fisibles. Esto quedará asegurado limitando la suma del ISC a 50 en cualquier grupo de bultos (100 en la modalidad de uso exclusivo) y el distanciamiento de 6 m entre grupos de bultos.

566.2. Para el transporte de un contenedor puede haber más de un asiento aplicable en el cuadro 10 o el cuadro 11 del Reglamento de Transporte. Por ejemplo, para un contenedor de gran tamaño transportado en una embarcación marítima no hay límite de IT o ISC en lo que respecta a la embarcación, mientras

que hay una limitación de IT y de ISC para cualquier bodega, compartimento o zona delimitada de la cubierta. Es importante también observar que varios de los requisitos incluidos en las notas son aplicables a algunas expediciones. Estas notas son requisitos y no solo información.

566.3. Cuando una remesa se transporta en la modalidad de uso exclusivo, no hay ningún límite de IT a bordo de un solo medio de transporte. Tampoco hay ningún límite de IT en las remesas de materiales BAE-I.

567.1. Toda remesa con un ISC mayor de 50 también debe ser transportada en la modalidad de uso exclusivo (véase el párr. 526.1). La disposición de la carga utilizada como hipótesis en la evaluación de criticidad de los párrafos 684 y 685 del Reglamento de Transporte consiste en una disposición de bultos idénticos. En la referencia [42] se presenta un estudio sobre la disposición teórica de embalajes que mezclan diferentes diseños de bultos dentro del conjunto e indica la posibilidad de que el factor de multiplicación neutrónica aumente en comparación con una disposición de bultos idénticos. Aunque tales disposiciones son improbables en la práctica, debería tenerse cuidado al establecer la disposición de carga para los transportes donde el ISC exceda de 50. También debería prestarse atención a la necesidad de garantizar que al mezclar bultos de distintos diseños estos se dispongan de modo que se mantenga una configuración segura [43]. Cuando el ISC de un transporte exceda de 50 también se debe obtener una aprobación para la expedición (véase el párr. 825 del Reglamento de Transporte).

Requisitos complementarios relativos al transporte y el almacenamiento en tránsito de materiales fisibles

568.1. Para controlar la criticidad nuclear es necesario cumplir el requisito de mantener una separación de 6 m. Cuando dos zonas de almacenamiento estén separadas por una pared, suelo o límite similar, los bultos, sobreenvases y contenedores situados en el lado contrario del límite físico de separación tendrán que almacenarse también a 6 m de separación.

569.1. Véase el párrafo 568.1.

570.1. En el párrafo 570 a) y b) del Reglamento de Transporte se prohíbe la mezcla de bultos en la misma remesa sobre la base de distintas disposiciones o aprobaciones debido a que no se ha demostrado la seguridad de la mezcla en condiciones de accidente de transporte. Si el solicitante desea mezclar bultos exceptuados en virtud de un certificado previsto en el párrafo 417 f) del Reglamento de Transporte con bultos exceptuados con arreglo a otro

certificado previsto en el párrafo 417 f) en la misma remesa, en el certificado de aprobación debe demostrarse y especificarse la seguridad de la mezcla en condiciones de accidente.

570.2. La base de un límite de 45 g por remesa que se establece en el párrafo 570 c) y e) del Reglamento de Transporte se especifica en el párrafo 417.5. El límite de 15 g por remesa no se fijó por motivos técnicos o de seguridad, sino por cuestiones prácticas (es decir, para disponer del mismo límite que uno ya establecido en otra esfera, por ejemplo, en protección radiológica [44]).

Requisitos complementarios relativos al transporte por ferrocarril y por carretera

571.1. Véanse los párrafos 543.1 y 544.1.

572.1. Véase el párrafo 544.1.

573.1. La tasa de dosis máxima debería determinarse teniendo en cuenta fenómenos amplificadores importantes como el desplazamiento interno del contenido o, en los bultos que contienen líquidos, la separación y la precipitación de los radionucleidos. Estos fenómenos deben tenerse en cuenta aplicando un factor de corrección a la tasa de dosis máxima medida en la superficie externa del bulto o sobreenvase, y en la superficie y a 2 m del vehículo o empleando en su lugar un valor máximo. Este factor de corrección o valor máximo debería consignarse en las instrucciones de uso del bulto. En cualquier caso, debería realizarse una medición de tasa de dosis antes de la expedición, y la tasa de dosis máxima potencial debería determinarse tomando en consideración cualquiera de esos factores. Véanse los párrafos 221.1 a 221.6 sobre el uso exclusivo.

573.2. En la mayoría de los casos la tasa de dosis en cualquier punto de la superficie externa de un bulto se limita a 2 mSv/h. Los bultos y sobreenvases que se transporten en la modalidad de uso exclusivo por carretera y por ferrocarril pueden exceder de 2 mSv/h si se restringe el acceso a las áreas cerradas del vehículo. La restricción de acceso a estas áreas se puede conseguir utilizando un vehículo cerrado que pueda ser bloqueado mediante una llave o colocando el bulto en una jaula que quede cerrada con llave y atornillada. En algunos casos, la parte superior abierta de un vehículo con paredes laterales puede cubrirse con una lona impermeabilizada, pero generalmente este tipo de cerramiento no se consideraría suficiente para prevenir el acceso.

573.3. Durante el trayecto no debería accederse al área cerrada de vehículo. Si el vehículo va a pasar tiempo en las instalaciones del transportista, debería quedar estacionado en una zona donde esté controlado el acceso y donde no sea probable que permanezca público en general en sus proximidades durante un período prolongado. Si es preciso realizar labores de mantenimiento en el vehículo durante un período dilatado, el remitente o el destinatario deberían tomar las correspondientes medidas de protección radiológica, por ejemplo, proporcionando blindajes adicionales y vigilancia radiológica.

573.4. Es indispensable sujetar los bultos o sobreenvases para prevenir su desplazamiento durante el transporte, lo cual podría hacer que se superaran los límites de la tasa de dosis o aumentara la dosis del conductor del vehículo. Para el transporte por carretera los bultos o sobreenvases deberían sujetarse de modo que resistan las fuerzas resultantes de la aceleración, el frenado y los giros previstos en las condiciones de transporte normales. Para el transporte por ferrocarril también deberían sujetarse los bultos a fin de prevenir su desplazamiento durante los cambios de carril. (Véanse los párrs. 564.1 a 564.3.).

573.5. Al establecer la tasa de dosis para un medio de transporte puede tenerse en cuenta el blindaje adicional dentro del medio de transporte. Con todo, la integridad del blindaje debería mantenerse durante el transporte rutinario; de lo contrario, tal vez no se mantenga el límite de tasa de dosis del medio de transporte.

573.6. Si bien en el párrafo 573 a) iii) del Reglamento de Transporte se estipula que en el transporte de remesas en las condiciones de uso exclusivo no debe haber operaciones de carga y descarga que permitan ampliar el límite de la tasa de dosis a 10 mSv/h en ningún punto de la superficie externa de un bulto o sobreenvase, esto no impide que un transportista que consolide las remesas para más de un lugar asuma la función y la responsabilidad del remitente en relación con una remesa combinada y sea así designado a los efectos del transporte ulterior en la modalidad de uso exclusivo.

573.7. Para los OCS-III se aplica el párrafo 573 b) y c) del Reglamento de Transporte. La tasa de dosis en la superficie del OCS-III se limita a lo especificado en el párrafo 517 del Reglamento de Transporte. En el caso de un OCS-III con una tasa de dosis en la superficie mayor de 2 mSv/h, en el plan de transporte deberían especificarse las precauciones necesarias para prevenir el acceso de personas no autorizadas cuando la tasa de dosis sea mayor de 2 mSv/h, asegurar el objeto, limitar el riesgo durante la carga o descarga y tomar las demás precauciones que sean apropiadas.

574.1. Las restricciones referentes a las personas a quienes pueda permitirse que estén presentes en los vehículos que llevan bultos radiactivos con tasas de dosis importantes tienen por objeto prevenir exposiciones innecesarias o incontroladas de las personas.

574.2. El término “ayudante” debería interpretarse, con sujeción a los requisitos del párrafo 303 del Reglamento de Transporte, como cualquier trabajador cuya ocupación en el vehículo tenga relación con el propio vehículo o con la remesa radiactiva. En este término no podría incluirse, por ejemplo, a ningún miembro del público o pasajero si su único propósito en relación con el vehículo fuera el de viajar. Sin embargo, sí podría incluirse a un inspector o monitor de protección radiológica en el curso de sus funciones.

574.3. Los vehículos deberían ser cargados de manera que la tasa de dosis en los lugares ocupados se reduzca al mínimo. Esto se puede conseguir situando los bultos con tasas de dosis más altas lo más lejos posible de la zona ocupada y colocando los bultos pesados, con tasas de dosis bajas, más cerca de los lugares ocupados. Durante la carga y descarga deberían reducirse al mínimo los tiempos de manipulación directa y emplearse dispositivos de manipulación como redes o plataformas para aumentar la distancia entre el bulto y el cuerpo. Debería impedirse que el personal permanezca innecesariamente en las zonas donde existan tasas de dosis importantes.

Requisitos complementarios relativos al transporte en embarcaciones

575.1. Cada modalidad de transporte tiene sus propias características. En el caso del transporte marítimo la posibilidad de tiempos de viaje de semanas o meses y la necesidad de una inspección ordinaria continua durante el viaje pueden provocar exposiciones significativas durante el transporte de materiales radiactivos. El mero hecho de tener el uso exclusivo de una bodega, de un compartimento o de un área definida de la cubierta, en particular esto último, no se consideraba que pudiera proporcionar suficiente protección de los bultos con alta tasa de dosis. Por lo tanto, se establecieron dos restricciones más para los bultos que tuvieran una tasa de dosis en la superficie mayor de 2 mSv/h: i) estar dentro (o sobre) un vehículo o ii) ser transportados en virtud de un arreglo especial. Es por ello que el acceso y los niveles de radiación se controlan mediante las disposiciones del párrafo 573 del Reglamento de Transporte para los vehículos, o mediante controles aplicables a las circunstancias en particular establecidos por la autoridad competente de conformidad con lo dispuesto en el arreglo especial.

575.2. El transporte marítimo de cualquier bulto que tenga una tasa de dosis en la superficie que exceda de 2 mSv/h debe realizarse en las condiciones estipuladas en un arreglo especial, a menos que el bulto se transporte dentro o sobre un vehículo en la modalidad de uso exclusivo y de conformidad con las condiciones del párrafo 574 del Reglamento de Transporte. Sin embargo, en este último caso puede ser conveniente, a los efectos de la protección radiológica, que el capitán de la embarcación o la correspondiente autoridad competente asigne una zona específica para ese vehículo. Esto estaría especialmente indicado para el transporte de vehículos a bordo de transbordadores, entre ellos, los de carga rodada. Se puede obtener información adicional en el código IMDG [8].

576.1. Los simples controles sobre la acumulación de bultos para limitar la exposición a la radiación (párr. 566 del Reglamento de Transporte) quizás no sean apropiados para embarcaciones dedicadas al transporte de materiales radiactivos. Como la propia embarcación en sí misma puede transportar remesas de más de un remitente, no se podría considerar que estuviera en la modalidad de uso exclusivo y, por tanto, podrían ser innecesariamente restrictivos los requisitos de los cuadros 10 y 11 del Reglamento de Transporte.

576.2. Las embarcaciones utilizadas exclusivamente para el transporte marítimo de materiales radiactivos se han adaptado o se han dedicado específicamente para ese fin. El programa de protección radiológica requerido debería basarse en disposiciones de estiba previamente planificadas, específicas para la embarcación en cuestión y para el número y la naturaleza de los bultos que se van a acarrear. En el programa de protección radiológica debería tenerse en cuenta la naturaleza y la intensidad de la radiación que probablemente emitirán los bultos; también deberían tenerse en cuenta factores de ocupación basados en la duración máxima prevista del viaje. Esta información debería utilizarse para definir los lugares de estiba en relación con los espacios de trabajo regularmente ocupados y los alojamientos con objeto de garantizar la adecuada protección radiológica de las personas. La autoridad competente, normalmente la autoridad competente del Estado de la bandera de la embarcación, puede especificar el número máximo de bultos permitidos, su identificación y contenido, las disposiciones exactas de estiba que hay que observar y las tasas de dosis máximas de radiación permitidas en lugares clave. El programa de protección radiológica normalmente exigiría una monitorización adecuada durante la estiba y después que esta terminara, según fuera necesario, para asegurar que no se superen las dosis o las tasas de dosis especificadas. A solicitud de la autoridad competente, deberían proporcionarse los detalles de los resultados de tales inspecciones, incluida cualquier comprobación de la contaminación de los bultos y de los espacios de carga.

576.3. Para los bultos que contengan materiales fisibles, el programa también debería tener en cuenta la necesidad de un apropiado control de la criticidad nuclear.

576.4. Aunque no formen parte directamente del programa de protección radiológica, deberían considerarse las limitaciones en la estiba asociadas a la emisión de calor de cada bulto. Con este objetivo, se deberían definir los medios para la evacuación del calor, naturales y mecánicos y, si fuera necesario, deberían especificarse las emisiones de calor de cada uno de los bultos.

576.5. Los registros de las mediciones efectuadas durante cada viaje deberían facilitarse a la autoridad competente que los solicitara. Con este método se asegura que el programa de protección radiológica, así como cualquier otro control, han funcionado adecuadamente.

576.6. Por “personas especializadas en el transporte de materiales radiactivos” debería entenderse las personas que poseen conocimientos especiales adecuados para la manipulación de materiales radiactivos.

576.7. Es conveniente que los remitentes y transportistas de combustible nuclear irradiado, plutonio o desechos radiactivos de alta actividad que deseen transportar estos materiales por mar tengan en cuenta el Código para la Seguridad del Transporte de Combustible Nuclear Irradiado, Plutonio y Desechos de Alta Actividad en Bultos a Bordo de los Buques (Código CNI) [9]. Este código clasifica las embarcaciones que llevan estos materiales en una de tres clases, según la actividad total de los materiales radiactivos que pueden ser transportados, y define los requisitos para cada clase en relación con la estabilidad en caso de daño, la protección contra incendios, el control de la temperatura de los espacios de carga, los aspectos estructurales, los medios de sujeción de la carga, el suministro eléctrico, el equipo de protección radiológica y los planes de gestión, capacitación y emergencia a bordo.

Requisitos complementarios relativos al transporte por vía aérea

577.1. Estos requisitos están relacionados con la presencia de pasajeros en una aeronave, no con su capacidad para transportar pasajeros. En relación con el párrafo 203 del Reglamento de Transporte, una aeronave equipada para transportar pasajeros, pero que no esté transportando a ningún pasajero en un vuelo, puede cumplir con la definición de una aeronave de carga y puede utilizarse para el transporte de bultos del Tipo B (M) y de remesas en la modalidad de uso exclusivo.

578.1. Las condiciones especiales del transporte aéreo podrían originar un incremento del peligro en el caso de bultos de los tipos descritos en el párrafo 578 del Reglamento de Transporte. A las altitudes de crucero de la aeronave puede producirse una reducción considerable de la presión atmosférica. Esto se compensa parcialmente mediante sistemas de presurización, aunque esos sistemas nunca deben ser considerados fiables en un 100 % .

578.2. Si se permitiera el venteo, el peligro aumentaría considerablemente con la reducción de la presión exterior, por lo que sería difícil diseñar un sistema por el que pudiera realizarse un venteo en condiciones de seguridad. Asimismo, sería difícil garantizar la refrigeración auxiliar y otros controles operacionales dentro de una aeronave en condiciones normales y de accidente.

578.3. Todo material pirofórico líquido plantea un riesgo especial en una aeronave en vuelo y por ello se aplican limitaciones rigurosas a esta clase de materiales. Cuando un material radiactivo tiene como peligro secundario la piroforicidad y también está en forma líquida, hay mayor probabilidad de que ocurra un derrame y, por lo tanto, está absolutamente prohibido transportar tal tipo de sustancias por vía aérea.

579.1. En la carga y manipulación de bultos o sobreenvases que tengan una tasa de dosis en la superficie mayor de 2 mSv/h es necesario poner mayor cuidado. El requisito de que tales remesas se transporten en virtud de arreglos especiales garantiza la intervención de la autoridad competente y permite especificar medidas de precaución especiales para la manipulación durante la carga, en vuelo o en cualquier punto intermedio de trasbordo.

579.2. La autorización en virtud de arreglos especiales debería incluir aspectos relativos a la manipulación, la carga y las disposiciones durante el vuelo para controlar las dosis de radiación de la tripulación, el personal de ayuda en tierra y otras personas que se vean incidentalmente expuestas. Esto puede hacer necesaria la redacción de instrucciones especiales para los miembros de la tripulación, la notificación a las personas apropiadas, como el personal de la terminal de destino y los puntos intermedios, y la consideración especial del traslado a otras modalidades de transporte.

Requisitos complementarios relativos al transporte por correo

580.1. En el transporte por correo debería prestarse una especial atención a las reglamentaciones postales nacionales para garantizar que estas expediciones sean aceptables para las autoridades postales nacionales.

580.2. En los movimientos por correo los niveles de actividad permitidos son solamente la décima parte de los niveles permitidos en los bultos exceptuados para otras modalidades de transporte, por las siguientes razones:

- a) Existe la posibilidad de contaminar un gran número de cartas y otros elementos en el correo que posteriormente serían distribuidos, aumentando así el número de personas expuestas a la contaminación.
- b) Esta reducción de la actividad permitida daría por resultado la consiguiente reducción de la tasa de dosis máxima de una fuente que haya perdido su blindaje, resultado que se considera convenientemente conservador en el ámbito postal en comparación con otras modalidades de transporte.
- c) Un solo saco de correo puede contener una gran cantidad de este tipo de bultos.

581.1. Cuando se expida una autorización para el uso de los servicios postales a una organización, esta debería designar a una persona adecuadamente formada como responsable de estos envíos para garantizar que se cumplan los procedimientos correctos y las limitaciones establecidas.

FORMALIDADES ADUANERAS

582.1. El hecho de que una remesa contenga materiales radiactivos no constituye por sí mismo una razón para excluir tal remesa de las operaciones normales de aduanas. Sin embargo, debido a los peligros radiológicos asociados a la inspección del contenido de un bulto de materiales radiactivos, la inspección del contenido de tales bultos debería realizarse en condiciones de protección radiológica adecuadas. Debería estar presente una persona con suficientes conocimientos sobre la manipulación de materiales radiactivos, que sea capaz de formular dictámenes correctos en materia de protección radiológica para garantizar que la inspección se lleve a cabo sin exposiciones indebidas a las radiaciones, tanto del personal de aduanas como de terceros.

582.2. La seguridad del transporte depende en gran medida de las características de seguridad incorporadas en los bultos. Por ello ninguna operación aduanera debería disminuir la seguridad inherente del bulto, dado que posteriormente será expedido hacia su destino. Una vez más debería estar presente una persona cualificada que ayude a garantizar la idoneidad de los bultos para continuar su transporte. En este contexto, se entenderá “persona cualificada” una persona versada en la aplicación de los requisitos reglamentarios sobre transporte, así

como en la preparación de bultos que contengan materiales radiactivos para su ulterior transporte.

582.3. Para la inspección de bultos de materiales radiactivos por parte de los funcionarios de aduanas se considerarán los siguientes aspectos:

- a) Las formalidades del despacho deberían realizarse lo más rápidamente posible para eliminar retrasos en el despacho de aduanas que puedan disminuir la utilidad de materiales radiactivos valiosos.
- b) Cualquier inspección interna necesaria de los bultos debería realizarse en lugares con instalaciones adecuadas, en que personas calificadas puedan poner en práctica los medios de protección radiológica correspondientes.

582.4. Los funcionarios de aduanas deberían tener presente que algunos bultos se utilizan más de una vez y por ello pueden mostrar algún deterioro de la superficie externa y también manchas y pequeños desperfectos causados por las condiciones de transporte normales. Esto no significa que el bulto no pueda cumplir sus funciones de seguridad. Si hay alguna duda y si se observa que un bulto ha sufrido deterioro, el funcionario de aduanas debería suministrar de inmediato la información necesaria a una persona calificada y cumplir las instrucciones que le imparta esa persona. No debería permitirse a ninguna persona permanecer cerca del bulto (una distancia de separación de 3 m generalmente sería suficiente) o que lo toque, a menos que sea absolutamente indispensable. Si es necesaria su manipulación, debería utilizarse una adecuada protección para evitar el contacto directo con el bulto. Después de su manipulación es recomendable lavarse las manos.

582.5. Cuando sea necesario, los bultos deberían situarse para su almacenamiento temporal en un lugar aislado con acceso controlado. Durante ese almacenamiento, la distancia de separación entre los bultos y las personas debería ser tan grande como fuera posible. Deberían fijarse señales de advertencia alrededor de los bultos y del almacén. Debería obtenerse mayor información del remitente, el destinatario o la autoridad competente.

REMESAS QUE NO PUEDAN ENTREGARSE

583.1. Para su separación, véanse los párrafos 562.1 a 562.13 y 568.1.

CONSERVACIÓN Y DISPONIBILIDAD DE LOS DOCUMENTOS DE TRANSPORTE POR PARTE DE LOS TRANSPORTISTAS

584.1. En la edición de 2012 del Reglamento de Transporte se incorporaron los párrafos 584 a 588 de la parte 7, capítulo 1, párrafo 1.2 de las Instrucciones Técnicas de la OACI [12]. Estas disposiciones se han establecido para los Estados que no han aplicado reglamentos sobre el transporte modal a sus reglamentos nacionales pero que han utilizado el Reglamento de Transporte como su reglamentación nacional para el transporte seguro de materiales radiactivos.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN V

- [1] UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY, Shielding Integrity Testing of Radioactive Material Transport Packaging: Gamma Shielding, Rep. AEC/P 1056, Part 1, UKAEA, Harwell, UK (1977).
- [2] UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY, Testing the Integrity of Packaging Radiation Shielding by Scanning with Radiation Source and Detector, Rep. AESS 6067, UKAEA, Risley, UK (1977).
- [3] BRITISH STANDARDS INSTITUTE, Guide to the Design, Testing and Use of Packaging for the Safe Transport of Radioactive Materials, BS 3895:1976, GR 9, BSI, London (1976).
- [4] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, American National Standard for Leakage Tests on Packages for Shipment of Radioactive Material, ANSI N14.5-2014, ANSI, New York (2014).
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Safe Transport of Radioactive Material — Leakage Testing on Packages, ISO 12807:2018(E), ISO, Geneva (2018).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology for a Safety Case for a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel, IAEA-TECDOC-1938, IAEA, Vienna (2020).
- [7] ZACHAR, M., PRETESACQUE, P., Burnup credit in spent fuel transport to COGEMA La Hague reprocessing plant, Int. J. Radioact. Mater. Transp. **5** 2–4 (1994) 273–278.
- [8] ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG)*, edición de 2020, OMI, Londres, 2020.
- [9] ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Código Internacional para la Seguridad del Transporte de Combustible Nuclear Irradiado, Plutonio y Desechos de Alta Actividad en Bultos a Bordo de los Buques (Código CNI)*, Resolución MSC.178(79), OMI, Londres, 2004.
- [10] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, COMITÉ DE TRANSPORTES INTERIORES, *Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)*, edición de 2021, CEPE, Nueva York y Ginebra, 2020.

- [11] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, COMITÉ DE TRANSPORTES INTERIORES, *Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Vías Navegables Interiores (ADN)*, edición de 2021, CEPE, Ginebra, 2020.
- [12] ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, *Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea*, edición 2021-2022, OACI, Montreal, 2020.
- [13] INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION FOR INTERNATIONAL CARRIAGE BY RAIL (OTIF), *Regulations Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)*, 2021 Edition, OTIF, Berne (2020).
- [14] ASOCIACIÓN DE TRANSPORTE AÉREO INTERNACIONAL, *Reglamentación sobre Mercancías Peligrosas*, 63ª edición, IATA, Montreal, 2022.
- [15] UNIÓN POSTAL UNIVERSAL, *Convenio Postal Universal de Río de Janeiro*, UPU, Berna, 1979.
- [16] NACIONES UNIDAS, *Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas: Reglamentación Modelo*, Vigésimosegunda edición revisada, ST/SG/AC.10/1/Rev. 22, 2 vols, Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra, 2021.
- [17] FAIRBAIRN, A., “The derivation of maximum permissible levels of radioactive surface contamination of transport containers and vehicles”, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials — Notes on Certain Aspects of the Regulations*, Safety Series No. 7, IAEA, Vienna (1961).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiological Aspects of Non-fixed Contamination of Packages and Conveyances*, IAEA-TECDOC-1449, IAEA, Vienna (2005).
- [19] WRIXON, A.D., LINSLEY, G.S., BINNS, K.C., WHITE, D.F., *Derived Limits for Surface Contamination*, Harwell, Rep. NRPB-DL2, HMSO, London (1979).
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Monitoring of Radioactive Contamination on Surfaces*, Technical Reports Series No. 120, IAEA, Vienna (1970).
- [21] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, *Recomendaciones de 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, ICRP, Publicación 103, Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.
- [22] FAW, R.E., *Absorbed doses to skin from radionuclide sources on the body surface*, *Health Phys.* **63** (1992) 443–448.
- [23] TRAUB, R.J., REECE, W.D., SCHERPELZ, R.I., SIGALLA, L.A., *Dose Calculations for Contamination of the Skin Using the Computer Code VARSKIN*, Rep. PNL-5610, Battelle Pacific Northwest Labs, Richland, WA (1987).
- [24] KOCHER, D.C., ECKERMAN, K.F., *Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface*, *Health Phys.* **53** (1987) 135–141.

- [25] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.
- [26] LAUTERBACH, U., “Radiation level for low specific activity materials in compact stacks”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 80* (Proc. Int. Symp. Berlin, 1980), Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980).
- [27] FAIRBAIRN, A., The development of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, *At. Energy Rev.* **11** 4 (1973) 843.
- [28] GELDER, R., Radiation Exposure from the Normal Transport of Radioactive Materials within the United Kingdom, Rep. NRPB-M255, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (1991).
- [29] HAMARD, J., et al., “Estimation of the individual and collective doses received by workers and the public during the transport of radioactive materials in France between 1981 and 1990”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 92* (Proc. Int. Symp. Yokohama City, 1992), Science and Technology Agency, Tokyo (1992).
- [30] KEMPE, T.F., GRODIN, L., “Radiological impact on the public of transportation for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89* (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).
- [31] GELDER, R., Radiological Impact of the Normal Transport of Radioactive Materials by Air, Rep. NRPB M219, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (1990).
- [32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessment of the Radiological Impact of the Transport of Radioactive Materials, IAEA-TECDOC-398, IAEA, Vienna (1986).
- [33] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Schedules of Provisions of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition), IAEA Safety Standards Series No. SSG-33 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2021).
- [34] DOARE, O., DIESCHBOURG, K., HUET, C., SERT, G., “UF6 release calculations and radiological and environmental impacts of a UF6 container subject to a long duration fire”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2001* (Proc. Int. Symp. Chicago, 2001), Department of Energy, Washington, DC (2001).
- [35] WILSON, C.K., The air transport of radioactive materials, *Radiat. Prot. Dosim.* **48** (1993) 129–133.
- [36] WILSON, C.K., SHAW, K.B., GELDER, R., “Radiation doses arising from the sea transport of radioactive materials”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89* (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).

- [37] WAMER JONES, S.M., SHAW, K.B., HUGHES, J.S., Survey into the Radiological Impact of the Normal Transport of Radioactive Material by Air — Final Report, Rep. NR PB-W39, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (2003).
- [38] GELDER, R., SCHWARZ, G., SHAW, K., LANGE, F., “Segregation of packages during transport”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 98 (Proc. Int. Symp. Paris, 1998), Vol. 3, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Paris (1998).
- [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Establishment of Source Related Dose Constraints for Members of the Public: Interim Report for Comment, IAEA-TECDOC-664, IAEA, Vienna (1992).
- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, IAEA Safety Standards Series No. GSG-9, IAEA, Vienna (2018).
- [41] MIHALCZO, J.T., et al., “Feasibility of subcriticality and NDA measurements for spent fuel by frequency analysis techniques with ^{252}Cf ”, Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies (Proc. Int. Top. Mtg College Station, PA, 1996), Vol. 2, American Nuclear Society, La Grange Park, IL (1996) 883–891.
- [42] MENNERDAHL, D., “Mixing of package designs: Nuclear criticality safety”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 86 (Proc. Int. Symp. Davos, 1986), IAEA, Vienna (1987) 167–175.
- [43] BOUDIN, X., et al., “Rule relating to the mixing of planar arrays of fissile units”, Physics and Methods in Criticality Safety (Proc. Top. Mtg Nashville, TN), American Nuclear Society, La Grange Park, IL (1993) 102-111.
- [44] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre la protección física de los materiales y las instalaciones nucleares* (INFCIRC/225/Rev. 5), *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*, Nº 13, OIEA, Viena, 2012.

Sección VI

REQUISITOS RELATIVOS A LOS MATERIALES RADIATIVOS Y A LOS EMBALAJES Y BULTOS

REQUISITOS RELATIVOS A LOS MATERIALES RADIATIVOS

Requisitos relativos a los materiales radiactivos en forma especial

602.1. Los materiales radiactivos en forma especial deben ser de dimensiones razonables para permitir su fácil recuperación o localización tras un incidente o pérdida; de ahí la restricción en cuanto a su dimensión mínima. La cifra de 5 mm es arbitraria pero es práctica y razonable, teniendo presente el tipo de materiales que normalmente son clasificados como materiales radiactivos en forma especial.

603.1. El Reglamento de Transporte trata de asegurar que un bulto que contenga materiales radiactivos en forma especial no libere o disperse su contenido radiactivo durante un accidente muy grave (debido a la fuga desde la cápsula sellada o a la dispersión o lixiviación de los propios materiales radiactivos), aun cuando el embalaje pueda ser destruido (véase el apéndice I). Esto minimiza los posibles daños por inhalación o ingestión, o debidos a la contaminación con los materiales radiactivos. Por esta razón los materiales radiactivos en forma especial han de ser capaces de soportar estrictos ensayos mecánicos y térmicos, análogos a los aplicados a los bultos del Tipo B(U) sin la pérdida o dispersión indebida de materiales radiactivos durante su vida útil.

603.2. El solicitante debería demostrar que la solubilidad del material sometido al ensayo de lixiviación es igual o mayor que la de los materiales radiactivos que realmente se transportarán. Si en el ensayo se utilizara un material con menor contenido radiactivo, los resultados del ensayo deberían ser extrapolados y en ese caso debería demostrarse la validez de esa extrapolación. El solicitante no debería suponer que, solo por el hecho de que el material sea inerte, superará el ensayo de lixiviación sin estar encapsulado. Por ejemplo, pastillas no encapsuladas de Ir 192 no han superado el ensayo de lixiviación [1]. Los valores de lixiviación deberían ser incrementados a escala hasta valores que representen la actividad total y la forma en que será transportado. En la sección 3.4 de la norma ISO 2919 [2], se define una fuente sellada como lixiviable si la cantidad de material emitida es mayor de 0,1 mg/g en 100 ml de agua en reposo mantenida a 50 °C durante 4 h; las condiciones de ensayo deberían ser las que figuran en la sección 5.1.1 de la norma ISO 9978:2020 [3]. Para el material contenido en una cápsula sellada

pueden utilizarse técnicas adecuadas de evaluación por fugas volumétricas, como los métodos de burbujas en vacío o los de fugas de helio. En este caso todos los parámetros de ensayo que influyan en la sensibilidad deben ser minuciosamente especificados y tenidos en cuenta en la valoración de la pérdida de material radiactivo de los materiales radiactivos en forma especial.

603.3. El Reglamento de Transporte da la opción de realizar otros ensayos para la evaluación de las fugas en las cápsulas selladas. Cuando, por acuerdo con la autoridad competente, los ensayos de un diseño de cápsula no se realicen con contenido radiactivo, la evaluación de las fugas puede hacerse mediante un método por fugas volumétricas. Una tasa de $10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ si se trata de un contenido sólido no lixiviable y una tasa de $10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los sólidos lixiviables, los líquidos y los gases, se consideraría en la mayoría de los casos equivalente al límite de pérdida de actividad previsto de 2 kBq en el párrafo 603 del Reglamento de Transporte [3]. Los métodos de ensayo por fugas volumétricas se consideran adecuados para detectar fugas en fuentes selladas; en el cuadro 3 de la presente guía de seguridad se enumeran dichos ensayos junto con su sensibilidad.

603.4. Cuando se utilice como sustituto un material que no sea radiactivo, la medición de la fuga de material tiene que referirse al límite de 2 kBq especificado en el párrafo 603 c) del Reglamento de Transporte.

CUADRO 3. COMPARACIÓN DE LOS CUATRO MÉTODOS DE ENSAYO POR FUGAS VOLUMÉTRICAS RECOMENDADOS POR ASTON Y OTROS [4]

Método de ensayo por fuga	Sensibilidad ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Volumen mínimo libre en la cápsula (mm^3)
Burbuja en vacío		
i) glicol o alcohol isopropílico	10^{-6}	10
ii) agua	10^{-5}	40
Presurización de burbuja con alcohol isopropílico	10^{-8}	10
Burbuja de nitrógeno líquido	10^{-8}	2
Presurización de helio	10^{-8}	10

604.1. Cuando una cápsula sellada constituya parte de los materiales radiactivos en forma especial, debería asegurarse que no sea posible la apertura de la cápsula durante su manipulación normal o durante su descarga. De lo contrario, podría ocurrir que los materiales radiactivos se manipulasen o transportasen sin la cápsula protectora.

604.2. En general, se supone que las fuentes selladas que pueden abrirse únicamente con técnicas destructivas son las que han sido soldadas. Estas solo pueden abrirse por métodos como mecanizado, aserrado, perforación o corte con soplete. No serían aceptables las que puedan abrirse sin destruir la cápsula, como por ejemplo, las provistas de tapas roscadas o tapones.

Requisitos relativos a los materiales radiactivos de baja dispersión

605.1. Al limitar a 10 mSv/h la tasa de dosis externa a 3 m del material de baja dispersión sin blindaje se asegura que la posible dosis externa sea acorde con las consecuencias potenciales de los accidentes muy graves que afectan a los bultos industriales (véase el párr. 517 del Reglamento de Transporte).

605.2. Las partículas con un diámetro aerodinámico equivalente¹ de hasta aproximadamente 10 µm son respirables y pueden alcanzar regiones profundas de los pulmones, en que pueden ser prolongados los tiempos de eliminación. Las partículas de entre 10 µm y 100 µm de diámetro aerodinámico equivalente son poco preocupantes en cuanto a la vía de inhalación, pero una vez que se depositan pueden contribuir a otras vías de exposición. Las partículas mayores de 100 µm de diámetro aerodinámico equivalente se depositan muy rápidamente. Si bien esto podría originar una contaminación localizada en la inmediata proximidad de un accidente, no representaría un mecanismo significativo de exposición interna.

605.3. En lo referente al material radiactivo de baja dispersión, la emisión en el aire de materiales radiactivos en forma de gas o partículas se limita a 100A₂ cuando el contenido de un bulto (que sea transportado en un diseño de bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) que contenga el material de baja dispersión) se somete a los ensayos mecánico y térmico. Este límite de 100A₂ se refiere a todos los tamaños de partículas de hasta 100 µm de diámetro aerodinámico equivalente. Las emisiones en el aire pueden provocar, a través de diversas vías, la exposición

¹ El diámetro aerodinámico equivalente (conocido también como diámetro aerodinámico) de una partícula en suspensión es el diámetro que una esfera de densidad unitaria debería tener para conseguir la misma velocidad terminal al asentarse en el aire como partícula de interés.

radiológica de personas situadas en la dirección del viento con respecto al lugar donde haya ocurrido un accidente aéreo. Lo primero que hay que tener en cuenta es la incorporación inmediata de materiales radiactivos por inhalación. Otras vías son mucho menos importantes porque su contribución solo es pertinente para largos tiempos de permanencia, durante los que pueden adoptarse medidas reparadoras para limitar la exposición. Para la vía de inhalación predominarán las partículas por debajo de unos 10 μm de diámetro aerodinámico equivalente, ya que son respirables. No obstante, en relación con el límite de $100A_2$ se ha elegido cautelosamente un límite superior de hasta 100 μm . De esta manera es lógico asegurar que después del depósito no se recibirán dosis de radiación inaceptables ni por inhalación ni por otras vías de exposición.

605.4. Cuando el material de baja dispersión se somete al ensayo de impacto a alta velocidad (véase el párr. 737 del Reglamento de Transporte) puede generarse material en forma de partículas, pero solo puede esperarse que esté dentro del intervalo de tamaños respirables, por debajo de 10 μm , una pequeña fracción (menos del 10 %) de las que sean de hasta 100 μm . Por tanto, se espera que la emisión de partículas respirables de material de baja dispersión sea inferior a $10A_2$, si se cumple el límite de $100A_2$ especificado en el párrafo 605 b) del Reglamento de Transporte para las partículas de hasta 100 μm . Se ha demostrado que con una distancia de referencia de unos 100 m y un amplio margen de condiciones de dispersión atmosférica esto llevaría a una dosis efectiva inferior a 50 mSv.

605.5. Para el espécimen sometido al ensayo de impacto deberían tenerse en cuenta las interacciones físicas entre la estructura de la fuente y determinados componentes de materiales que formen parte del material radiactivo de baja dispersión. Estas interacciones pueden provocar cambios considerables en la forma del material radiactivo de baja dispersión. Por ejemplo, después del ensayo de impacto a alta velocidad, una sola pastilla de combustible quizás no produzca la misma cantidad de material dispersable que esa misma pastilla incorporada junto a otras dentro de una barra de combustible. Es importante que el espécimen que se somete a ensayo sea representativo del material radiactivo de baja dispersión que será transportado.

605.6. En el ensayo térmico reforzado (véase el párr. 736 del Reglamento de Transporte) podría liberarse una actividad de $100A_2$ de materiales radiactivos de baja dispersión en forma gaseosa o de partículas, que serán en su mayoría pequeñas ($<10 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico equivalente) porque los procesos térmicos como la combustión generalmente producen pequeñas partículas. Durante el ensayo térmico reforzado debería prestarse atención a posibles cambios químicos de los materiales que podrían llevar a la formación de aerosoles, por

ejemplo, reacciones químicas inducidas por los productos de combustión. En un incendio tras un accidente aéreo la tendencia a ascender de los gases calientes podría generar concentraciones en el aire a nivel del suelo y dosis efectivas potenciales por inhalación, que también se mantendrían por debajo de 50 mSv en un gran número de condiciones de dispersión atmosférica.

605.7. El límite de lixiviación de los materiales radiactivos se aplica al material radiactivo de baja dispersión para eliminar la posibilidad de disolución y migración de los materiales radiactivos, lo que causaría una contaminación considerable de la tierra y de las vías de agua, aun cuando el material radiactivo de baja dispersión llegara a salir por completo del embalaje en un accidente muy grave. El límite de $100A_2$ para la lixiviación es el mismo que el que fue definido para la emisión del material al aire a causa del fuego o de un impacto a gran velocidad.

605.8. En el ensayo de lixiviación el espécimen debería ser una muestra representativa del material radiactivo de baja dispersión que se ha sometido al ensayo térmico reforzado y al de impacto a alta velocidad. En el caso de que en cada uno de esos ensayos se utilizara un espécimen diferente, se someterían dos muestras al ensayo de lixiviación. Por ejemplo, en el ensayo de impacto el material puede romperse o separarse en diversas formas sólidas, incluso como polvo depositado. Estas formas constituyen el material radiactivo de baja dispersión que debería someterse al ensayo de lixiviación.

605.9. Es importante en especial que puedan reproducirse las mediciones de la emisión en el aire y el material lixiviado.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS MATERIALES EXCEPTUADOS DE LA CLASIFICACIÓN COMO FISIBLES

606.1. El párrafo 805 del Reglamento de Transporte permite que los interesados soliciten la aprobación multilateral para que un material fisible especificado se trate como subcrítico sin tener en cuenta el control de la acumulación ni otros controles durante la expedición y sin la necesidad de un embalaje específico. En teoría, estos materiales fisibles serán subcríticos en cantidades infinitas (es decir, $k_{\infty} < 1$). Cuando se aplica en virtud del párrafo 417 f) del Reglamento de Transporte, este método es compatible con las disposiciones establecidas en el párrafo 417 a) y b). El solicitante debería cerciorarse de que el material fisible especificado está (o será) debidamente caracterizado. Será necesario preparar un análisis de seguridad (véase el párr. 805) con una justificación detallada

que indique que el material seguirá siendo subcrítico en condiciones rutinarias, normales y de accidente, como se especifica en el Reglamento de Transporte. En la justificación se haría referencia a los cálculos, el muestreo (por ejemplo, de corrientes de desechos), el ensayo de muestras de materiales, los registros (por ejemplo, inventarios de materiales fisibles) y se expondría una argumentación razonada, si procediese. De ser posible, los requisitos establecidos en el párrafo 606 b) del Reglamento de Transporte deberían cumplirse solo en el caso del material fisible “desnudo” sin tener en cuenta las características del tipo de embalaje en que el material fisible será transportado.

606.2. Ejemplos de casos que pueden considerarse apropiados son aquellos en que k_{∞} del material es de carácter subcrítico apropiado o en que la masa o el volumen de materiales necesarios para provocar un peligro de criticidad es demasiado grande para que sea motivo de preocupación.

Se garantizará la seguridad porque los nucleidos fisibles se distribuyen entre cantidades importantes de material no fisible.

Debería demostrarse que la modificación de la distribución de los nucleidos fisibles (por ejemplo, proporción fisibles-no fisibles) que razonablemente podría producirse en condiciones de transporte rutinarias, normales y de accidente no pondrá en peligro la seguridad con respecto a la criticidad.

Se deberían tener en cuenta las contingencias que se mencionan en el párrafo 673 a) del Reglamento de Transporte al evaluar la seguridad del material, en particular la adición de agua desde una fuente externa.

El transporte de material deberá estar normalmente seguro en el intervalo de temperaturas especificado en el párrafo 679 del Reglamento de Transporte. De lo contrario, deberían imponerse controles para limitar el transporte a temperaturas ambiente especificadas.

Está previsto que los bultos que contengan material exceptuado en virtud de las disposiciones del párrafo 417 f) del Reglamento de Transporte sean seguros sin el control de la acumulación y esto debe cumplirse demostrando que k_{∞} del material es menor que 1. De otro modo, debería argumentarse que, aunque $k_{\infty f}$ fuera igual o mayor que 1, no podría producirse concebiblemente la cantidad de material necesaria para obtener un k_{eff} poco seguro durante el transporte. Esto se ajusta a lo expuesto en el párrafo 686 del Reglamento de Transporte, que permite que N sea “efectivamente igual a infinito” y no que se requiera que este valor sea verdaderamente infinito.

En caso de que la naturaleza radiactiva del material requiera el uso de determinado tipo de bulto mínimo (por ejemplo, Tipo A, Tipo B(U) o Tipo B(M)), esto se podrá tener en cuenta. Otra posibilidad sería especificar la necesidad de utilizar determinado tipo de bulto (pero no de diseño). Solamente podrán invocarse los requisitos de embalaje mencionados en la sección VI del Reglamento de Transporte para el tipo de bulto utilizado. Si es necesario considerar las características concretas de un bulto o diseño específico, la excepción del material no será apropiada y debería presentarse una solicitud de aprobación del diseño de un bulto para materiales fisibles. Para la aprobación del diseño del bulto se debe especificar de manera pormenorizada el embalaje, a diferencia de lo que se expone en este párrafo. Esta es la diferencia fundamental entre los dos tipos de aprobación.

606.3. El análisis de seguridad que justifique la solicitud para la aprobación multilateral de que un material fisible especificado quede exceptuado de la clasificación como fisible debería incluir lo siguiente:

- a) la especificación de los nucleidos fisibles y los materiales no fisibles;
- b) la distribución de los nucleidos fisibles entre los materiales no fisibles (por ejemplo, homogeneidad y uniformidad), y
- c) el modo en que las disposiciones enunciadas en los apartados a) y b) pueden cambiar en condiciones rutinarias, normales y de accidente (por ejemplo, forma física, inflamabilidad, solubilidad, separabilidad) y los requisitos ulteriores sobre la estabilidad (por ejemplo, solidez, no inflamabilidad, no solubilidad, no separabilidad) del material no fisible.

606.4. Con respecto a lo expuesto en el párrafo 606 b) del Reglamento de Transporte, las referencias a “bulto” en los párrafos 684 b) y 685 b) del Reglamento de Transporte deberían interpretarse como los materiales fisibles que van unidos a los embalajes necesarios para garantizar la seguridad radiológica en condiciones normales y de accidente [5].

606.5. Un ejemplo sencillo de materiales que deberían cumplir las disposiciones enunciadas en el párrafo 606 son las pastillas y barras de combustible absorbentes consumibles en que al menos el 2 % en masa de Gd_2O_3 se mezcla con óxidos de uranio poco enriquecido y luego se prensa y sinteriza antes de la expedición.

606.6. Un ejemplo de material que no debería considerarse que cumple lo establecido en el párrafo 606 es el hexafluoruro de uranio enriquecido, ya que su seguridad con respecto a la criticidad depende de su control de moderación. No debería recurrirse a la argumentación de que también es necesaria la contención

para prevenir peligros químicos y radiológicos a fin de reducir la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad a los usos secos del hexafluoruro de uranio.

606.7. Se puede encontrar un ejemplo en la referencia [6] que permite excepciones para los materiales que contienen:

- a) 2000 g de materiales no fisibles por cada gramo de nucleidos fisibles siempre que se cumpla una especificación de la homogeneidad del material;
- b) 200 g de materiales no fisibles por cada gramo de nucleidos fisibles más un límite por bulto de 15 g de nucleidos fisibles.

Al principio se consideró la posibilidad de incluir estas disposiciones en el Reglamento de Transporte. Sin embargo, no pudo llegarse a un consenso en cuanto al lenguaje preciso que debería emplearse para especificar la distribución de los materiales fisibles entre los materiales no fisibles.

En la referencia [7] se presentó una justificación de la seguridad en relación con estas excepciones. Los remitentes pueden invocar excepciones similares [8] en cada uno de los Estados Miembros con sujeción a la aprobación multilateral de los materiales de conformidad con lo establecido en el párrafo 606 del Reglamento de Transporte. En el análisis de la seguridad para justificar la solicitud de la aprobación multilateral debería incluirse lo siguiente:

- a) la misma información que se indica en el párrafo 606.3;
- b) si la justificación de la seguridad mencionada en la referencia [7] es suficiente o si se hace necesaria una nueva evaluación para demostrar a la autoridad competente de que la excepción proporcionará un margen adecuado de seguridad.

606.8. Tal vez sea posible tener en cuenta el volumen o masa limitados de materiales fisibles presentes en un bulto siempre que ese volumen o masa sea mucho menor que la cantidad requerida para la criticidad, lo cual es compatible con disposiciones como las enunciadas en el párrafo 417 b), que figuran en el Reglamento de Transporte desde hace mucho tiempo. La subcriticidad de una cantidad ilimitada de solución de nitrato de uranio se aplica al caso de la cristalización total del nitrato de uranio, pero no si es posible su transformación química en formas de óxido. Se ha considerado demasiado improbable, aunque teóricamente posible, una secuencia que entrañe la transformación de un volumen muy importante de solución procedente de una sola cisterna en una combustión de 30 minutos, su mezcla posterior con agua y su acumulación en una configuración crítica. Se entiende que debe haber un volumen mínimo para

prevenir esta situación. También los volúmenes muy pequeños por bulto pueden considerarse subcríticos en la práctica si los materiales presentes en muchos miles de bultos deben transformarse, mezclarse con agua y acumularse en una configuración crítica. Para establecer una nueva disposición podría prohibirse concretamente un intervalo de volúmenes o masas de nucleidos fisibles. Se puede recurrir a argumentaciones razonadas similares para apoyar la aprobación de un material diferente. La aprobación multilateral garantiza una seguridad adecuada.

606.9. El efecto del embalaje puede tenerse en cuenta si su presencia puede garantizarse. Por ejemplo, el transporte de materiales fisibles con $k_{\infty} < 1$, pero que contengan más de varios gramos de plutonio por bulto requeriría un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) por razones de seguridad radiológica. Sería permisible tomar en consideración en la evaluación de este material el comportamiento general de los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) en condiciones normales y de accidente.

606.10. Un motivo concreto para añadir esta disposición al Reglamento de Transporte fue la posibilidad de tener en cuenta las condiciones locales de un país, región o tipo de instalación. Por ejemplo, cuando se conoce bien el origen de una corriente de desechos, los requisitos de verificación pueden adaptarse a esa aplicación en particular y pueden considerarse las propiedades conocidas de los materiales fisibles reales y de otros materiales.

REQUISITOS GENERALES RELATIVOS A TODOS LOS EMBALAJES Y BULTOS

607.1. En el diseño de un bulto con respecto a la manera en que se sujeta (retiene) dentro o sobre el medio de transporte solo se consideran las condiciones de transporte rutinarias (véase el párr. 613 del Reglamento de Transporte).

607.2. Como ayuda adicional en relación con los métodos para sujetar los bultos dentro o sobre el medio de transporte pueden consultarse los párrafos 564.1 y 564.2 y el apéndice IV.

608.1. En la selección de los materiales de los sistemas de izado se debería tener cuidado con los materiales que no respondan ante el intervalo de cargas previsto en la manipulación normal. Si se produce una sobrecarga no debería verse afectada la seguridad del bulto. Además, deberían considerarse los efectos del desgaste. Se considera una buena práctica someter a ensayo los puntos de

elevación antes de que el embalaje entre en servicio y luego controlar los puntos de elevación durante el mantenimiento.

608.2. En el diseño de los puntos de enganche de los bultos que se icen muchas veces durante su vida útil debería tenerse en cuenta su comportamiento ante la fatiga para evitar fisuras que provoquen daños. Cuando se dé por sentado el fallo por fatiga, en el diseño debería considerarse la posibilidad de detectar esas fisuras mediante ensayos no destructivos e incluirse la realización de ensayos apropiados en el programa de mantenimiento del bulto.

608.3. Los factores de aceleración por carga en las grúas utilizadas para el izado (denominados generalmente “factores de tiro” por el personal encargado de su manipulación) deberían relacionarse con las características de elevación previstas para las grúas que se espera utilizar en estas actividades. Además de estos factores de aceleración por carga, los diseñadores también deberían aplicar a los parámetros de respuesta estructural factores de seguridad del diseño aceptables [9 a 11] a fin de asegurar que no haya deformaciones plásticas en ninguna parte del bulto durante su levantamiento con las grúas.

608.4. Debería prestarse especial atención a los dispositivos de elevación utilizados en las instalaciones nucleares. Además de los daños en el propio bulto, la caída de bultos grandes y pesados en zonas vulnerables podría producir la emisión de materiales radiactivos desde otras fuentes de la instalación o un incidente de criticidad u otro suceso que pudiera afectar a la seguridad de la instalación. Para estos puntos de enganche pueden ser necesarios márgenes de seguridad aún superiores a los utilizados en las prácticas normales de ingeniería [9 a 11].

609.1. La finalidad de este requisito es prevenir la utilización inadvertida de elementos de los bultos que no estén adecuadamente diseñados para las operaciones de manipulación.

610.1. Se establece este requisito porque las partes que sobresalen en el exterior de un embalaje son vulnerables a impactos durante la manipulación y otras operaciones de transporte. Dichos impactos pueden ocasionar tensiones elevadas en la estructura del embalaje y provocar daños en el sistema de contención.

610.2. En relación con el diseño y el acabado del embalaje, lo primero que debería tenerse en cuenta sería que no se viera menoscabada la eficacia de cualquier otro elemento necesario para dar cumplimiento a otros requisitos del Reglamento de Transporte. Por ejemplo, los dispositivos previstos para

la manipulación, operación y estiba seguras deberían diseñarse de modo que, aunque cumplan sus funciones esenciales de conformidad con las disposiciones del Reglamento de Transporte, se reduzcan al mínimo los salientes y las posibles dificultades para la descontaminación.

610.3. Los costos también son un factor que es legítimo considerar para determinar qué es posible hacer. Las medidas encaminadas a cumplir con el párrafo 610 del Reglamento de Transporte no deben suponer gastos indebidos o que no sean razonables. Por ejemplo, la elección de los materiales y de los métodos de fabricación de determinado embalaje debería regirse por buenas prácticas de ingeniería, generalmente aceptadas para ese tipo de embalaje, siempre teniendo debidamente en cuenta las disposiciones del párrafo 610, sin que sea preciso recurrir a medidas excesivamente costosas.

610.4. Una superficie externa con un acabado liso y poco poroso ayuda a la descontaminación y es ya en sí misma menos susceptible a la absorción de contaminantes y a su ulterior lixiviación (“descaptación”) que una superficie rugosa.

610.5. Cuando no sea posible diseñar un bulto para que pueda ser descontaminado fácilmente, deberían incluirse otras medidas (“procesos de limpieza”) para prevenir la contaminación como parte de la justificación de la seguridad del diseño del bulto. Tal vez estas medidas deban ser aprobadas por la autoridad competente y tenidas en cuenta en las instrucciones operacionales para el diseño del bulto. Deberían considerarse también medidas apropiadas del sistema de gestión.

611.1. Se impone este requisito porque la acumulación y retención de agua (de lluvia o u otras fuentes) en el exterior del bulto puede menoscabar su integridad a causa de la oxidación o del empapado continuo. Además, el líquido retenido puede lixiviar cualquier contaminación superficial que exista y difundirla al medio ambiente. Finalmente, podría interpretarse por error que el agua que escurriera desde la superficie del bulto, como el agua de lluvia, fuera una fuga del bulto.

611.2. Para el cumplimiento del párrafo 611 del Reglamento de Transporte deberían aplicarse criterios análogos a los mencionados en los párrafos 610.2 a 610.4.

612.1. La finalidad de este requisito es prevenir acciones como la colocación de herramientas de manipulación, de equipo auxiliar o de piezas de repuesto

sobre el bulto o cerca de él, de modo que puedan menoscabarse las funciones previstas de los componentes del embalaje en condiciones de transporte normales o en caso de accidente.

613.1. Los componentes de un embalaje, como los relacionados con el sistema de contención, los dispositivos de elevación y los sistemas de sujeción, pueden llegar a desajustarse debido a la aceleración, vibración o resonancia vibratoria. En el diseño del bulto debería prestarse atención a la necesidad de asegurar que cualquier tuerca, tornillo u otros dispositivos de sujeción permanezcan firmes en las condiciones de transporte rutinarias.

613.2. En los contenedores utilizados para los bultos industriales destinados al transporte de contenido pesado es indispensable diseñar el contenedor y el embalaje o el sistema de amarre del contenido dentro del contenedor para que soporten las aceleraciones que se presentan en las condiciones de transporte rutinarias. El objetivo es prevenir que el contenedor sufra daños causados por el desplazamiento de los bultos que contenga y evitar que se ponga en peligro su contención o la integridad del blindaje del bulto industrial.

613A.1. Los componentes del embalaje y el contenido del bulto están sometidos a mecanismos de degradación y procesos de envejecimiento que dependen del componente y el propio contenido y sus condiciones operacionales. Por tanto, en el diseño de un bulto deberían tenerse en cuenta los mecanismos de envejecimiento en proporción con el uso previsto del bulto y sus condiciones operacionales, como se especifica en los párrafos 613A.2 a 613A.6. El diseñador de un bulto debería evaluar los posibles fenómenos de degradación con el tiempo, como corrosión, abrasión, fatiga, propagación de grietas, cambios de la composición del material o propiedades mecánicas debidos a cargas térmicas o radiación, la generación de gases de descomposición y el efecto de estos fenómenos en las funciones de seguridad.

613A.2. En relación con los embalajes empleados una sola vez para un transporte único y que no está prevista su expedición después del almacenamiento, puede bastar la inspección previa a su utilización. Entre este tipo de bultos se pueden incluir bultos exceptuados, del Tipo BI-1, del Tipo BI-2, del Tipo BI-3 y del Tipo A (por ejemplo, cajas de cartón, bidones). Si esos bultos van a expedirse después de su almacenamiento, debería considerarse el párrafo 613A.4.

613A.3. En el caso de los embalajes previstos para un uso repetido, los efectos de los mecanismos de envejecimiento en el bulto deberían evaluarse durante la fase de diseño para la demostración del cumplimiento del Reglamento de Transporte.

Atendiendo a esta evaluación debería elaborarse un programa de inspección y mantenimiento. El programa debería estructurarse de modo que se confirme que sean válidos los supuestos utilizados en la demostración del cumplimiento del bulto (por ejemplo, espesor de pared del sistema de contención, estanqueidad, eficacia de los absorbentes de neutrones) durante la vida útil del embalaje. En la referencia [12] figura un ejemplo de un procedimiento para preparar un programa de gestión del envejecimiento de bultos del Tipo B(U).

613A.4. En el diseño de los bultos cuya expedición se ha previsto después del almacenamiento, es importante tener en cuenta los mecanismos de envejecimiento debido al periodo prolongado que habría entre la carga y el final de la expedición después del almacenamiento, las condiciones de almacenamiento (aun cuando el Reglamento de Transporte no se aplique al almacenamiento del bulto) y las dificultades en la inspección (para detectar efectos de envejecimiento) y el mantenimiento de los bultos con material radiactivo. Asimismo, deberían reconocerse factores como los nuevos conocimientos técnicos, los cambios de diseño de los bultos, los nuevos requisitos del Reglamento de Transporte aplicables al diseño de los bultos o la nueva tecnología destinada a la identificación y evaluación de los efectos del envejecimiento.

613A.5. Con respecto al diseño del bulto, el examen del efecto del envejecimiento en el bulto mencionado en el párrafo 613A.1 debería sustentarse en un programa de gestión del envejecimiento. Este programa debería tener en cuenta los efectos del envejecimiento, incluidos la prevención, la mitigación, la vigilancia de las condiciones y la supervisión del comportamiento (véase la ref. [13]) para justificar las consideraciones de diseño en los mecanismos de envejecimiento. Este programa también debería incluir un programa de análisis de deficiencias (véanse los párrs. 809.3 y 809.4) que tenga en cuenta los cambios en materia de conocimientos técnicos, el estado del diseño del bulto y los requisitos del Reglamento de Transporte. En particular, el programa de gestión del envejecimiento también debería tener en cuenta la duración y las condiciones de almacenamiento especificadas por el diseñador, así como todas las actividades de vigilancia, inspección y mantenimiento previstas durante el almacenamiento y después del almacenamiento antes de la expedición. Deberían elaborarse un programa de gestión del envejecimiento y un programa de análisis de deficiencias para todos los diseños de bultos cuya expedición esté prevista después del almacenamiento. Para los diseños del Tipo B(U), del Tipo B(M) y del Tipo C estos programas deben incluirse en la solicitud de aprobación de los bultos que serán expedidos después de su almacenamiento (véanse los párrs. 809 f) y k) del Reglamento de Transporte). Los resultados del programa

de gestión del envejecimiento y el programa de análisis de deficiencias deberían tenerse en cuenta al prepararse el plan de inspección previo al transporte.

613A.6. Para los cilindros de UF₆ sometidos a mantenimiento e inspección de conformidad con la norma ISO 7195 [14] o ANSI N14.1 [15] no se requiere una evaluación adicional de su posible degradación o mecanismo de envejecimiento.

614.1. En lo que concierne a la compatibilidad química del contenido radiactivo con los materiales del embalaje y entre los diferentes materiales de los componentes del embalaje, deberían tenerse en cuenta efectos como la corrosión, la fragilización, el envejecimiento acelerado y la disolución de elastómeros y materiales elásticos, la contaminación con sustancias disueltas, el inicio de la polimerización, la pirólisis con producción de gases y las alteraciones de naturaleza química.

614.2. En el análisis de la compatibilidad se deberían considerar los materiales que puedan quedar abandonados tras la fabricación, la limpieza o el mantenimiento del embalaje, como agentes limpiadores, grasas y aceites, y también restos del contenido previo del bulto.

614.3. En el análisis de la compatibilidad física debería tenerse en cuenta la dilatación térmica de los materiales y del contenido radiactivo dentro del intervalo de temperaturas de interés con el fin de abarcar los cambios de dimensiones, la dureza y el estado físico de los materiales y del contenido radiactivo.

614.4. Un aspecto de la compatibilidad física es el espacio vacío que debe haber en el caso de un contenido líquido para evitar el fallo hidráulico a consecuencia de las diferentes tasas de dilatación del contenido y de sus sistemas de contención dentro del intervalo de temperaturas admisible. El volumen libre que permita suficiente espacio vacío puede determinarse considerando lo establecido en las reglamentaciones de transporte para otras mercancías peligrosas con propiedades similares.

615.1. Las cerraduras constituyen probablemente uno de los mejores métodos para prevenir la manipulación no autorizada de las válvulas; pueden utilizarse para enclavar directamente la válvula cerrada o bien emplearse en una tapa o cubierta que prevenga el acceso a la válvula. Aunque es posible emplear sellos para indicar que la válvula no se ha utilizado, no puede confiarse en ellos para prevenir la manipulación no autorizada.

616.1. Un intervalo de presión ambiente de 60 a 101 kPa y una temperatura ambiente de -40 °C a 38 °C se consideran generalmente aceptables para el transporte de superficie. Para expediciones por vía terrestre de bultos exceptuados, bultos industriales de los Tipos BI-1, BI-2 y BI-3, y bultos del Tipo B(M) que se efectúen solo dentro de un país o solo entre determinados países, pueden suponerse otras condiciones de temperatura y presión ambiente siempre que puedan justificarse y que se establezcan controles adecuados para limitar el uso de los bultos dentro de esos países.

617.1. El párrafo 617 del Reglamento de Transporte tiene la finalidad de demostrar por cálculo u otros métodos que el bulto está correctamente diseñado para transportar el contenido máximo permitido sin superar los límites de las tasas de dosis especificados en el Reglamento de Transporte.

617.2. Véase el párrafo 527.2.

REQUISITOS COMPLEMENTARIOS RELATIVOS A LOS BULTOS TRANSPORTADOS POR VÍA AÉREA

619.1. Las restricciones relativas a la temperatura en la superficie son necesarias para proteger las mercancías adyacentes de posibles daños y a las personas que manipulen los bultos durante su carga y descarga. Este requisito es especialmente restrictivo para el transporte aéreo, dada la dificultad de disponer de suficiente espacio libre alrededor de los bultos. Por tal razón, el párrafo 619 se aplica siempre a la modalidad de transporte aéreo, mientras que en otras pueden aplicarse límites menos restrictivos de temperatura en la superficie si el transporte se realiza en las condiciones de uso exclusivo (véanse los párrs. 654 y 655 del Reglamento de Transporte y los párrs. 654.1 a 654.3 y 655.1 a 655.3). Si en condiciones extremas (véase el párr. 620 del Reglamento de Transporte) la temperatura ambiente durante el transporte excede de 38 °C, el límite de temperatura en la superficie accesible ya no será aplicable.

619.2. Podrán tenerse en cuenta las barreras o pantallas utilizadas para proteger a las personas sin la necesidad de que sean sometidas a ningún ensayo.

620.1. El intervalo de temperatura ambiente de -40 °C a 55 °C abarca los valores extremos que podrían encontrarse en el transporte aéreo y es el que estipula la OACI [16] para los embalajes de mercancías peligrosas, distintas de las “mercancías peligrosas en cantidades exceptuadas”, que estén destinados al transporte aéreo.

620.2. Al diseñar la contención debería considerarse el efecto de temperaturas ambiente extremas en las temperaturas resultantes en la superficie, el contenido, las tensiones térmicas y las variaciones de presión, de manera que se asegure la contención de los materiales radiactivos.

621.1. Esta es una disposición semejante a la que estipula la OACI [16] para el transporte aéreo de bultos que contengan determinados materiales peligrosos en forma líquida. En la edición de 1996 del Reglamento de Transporte el requisito de que el bulto soportara una presión diferencial de 95 kPa sin pérdida o dispersión del contenido radiactivo se amplió para abarcar todas las formas en que puedan presentarse los materiales radiactivos.

621.2. Durante el vuelo se producirán reducciones de presión debidas a la altitud (véase el párr. 578.1). La presión diferencial que se produce a una altitud elevada debería tenerse en cuenta en el diseño del embalaje. La presión diferencial de 95 kPa más la PNTM (véanse los párrs. 229.1 a 229.4) es la presión diferencial que el diseñador del bulto ha de tener en cuenta, sin pérdida ni dispersión del contenido radiactivo del sistema de contención. Para esta especificación del diseño se ha considerado una despresurización de la aeronave a la altitud máxima de un vuelo de aviación civil junto con cualquier presión que ya haya dentro del bulto y con un margen de seguridad. En el caso del material sólido, para cumplir con lo dispuesto en el párrafo 621 del Reglamento de Transporte pueden utilizarse otros medios que la resistencia a la presión para demostrar el cumplimiento. Si puede demostrarse que no hay pérdida ni dispersión del contenido radiactivo del sistema de contención cuando el bulto queda expuesto a la presión diferencial prevista durante el vuelo, el diseño del bulto puede considerarse que satisface el requisito aun cuando no se mantenga la presión interna. La información siguiente sobre variaciones de presión debería considerarse al evaluar la presión diferencial:

- a) En condiciones normales de vuelo, la reducción de presión en la cabina y los compartimentos de carga de una aeronave presurizada puede llegar a 150 Pa/s (2500 pies/min) durante el ascenso y el aumento de presión puede llegar a 90 Pa/s (1500 pies/min) durante el descenso de la aeronave.
- b) Las aeronaves que transportan solo carga pueden diseñarse y operarse para que el compartimento de carga no se presurice durante el vuelo: para estos tipos de aeronaves, la tasa normal de cambio de presión que experimenta la carga es la tasa real asociada con el ascenso y el descenso de la aeronave.
- c) En condiciones normales de vuelo, la presión en la cabina y los compartimentos de carga de una aeronave puede descender de la presión atmosférica a nivel del mar (unos 100 kPa) a 75 kPa en una aeronave presurizada y a 25 kPa en una aeronave no presurizada.

- d) En una emergencia la presión en la cabina y los compartimentos de carga de una aeronave presurizada puede caer bruscamente a la presión que exista fuera de la aeronave (descompresión rápida): en estas condiciones de emergencia en vuelo se considera que la presión de la cabina y el compartimento de carga pueden descender linealmente de una altitud equivalente normal mínima de 6000 pies (es decir, una presión normal máxima de 81 kPa en vuelo de crucero) a una presión ambiente estándar de 15 kPa a una altitud de 45 000 pies en una duración de 1 segundo.

621.3. Si dentro de la definición de la PNTM la frase “condiciones de temperatura y de irradiación solar correspondientes a las condiciones ambientales” se interpreta que incluye el factor de las condiciones específicas del transporte aéreo (párr. 620 del Reglamento de Transporte), la PNTM proporciona una base adecuada para especificar este requisito. Si se utiliza el intervalo de temperaturas que figura en el párrafo 620 (-40 °C a 55 °C), se toma en cuenta el autocalentamiento del contenido del bulto y se considera nula la aportación de irradiación solar, ya que el bulto se encuentra dentro de una aeronave y, por tanto, la PNTM es compatible con el enfoque de la OACI.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS INDUSTRIALES

Requisitos aplicables a bultos industriales del Tipo 1 (Tipo BI-1)

623.1. Según los diferentes niveles de riesgo radiológico de los materiales BAE y OCS, los tres tipos de bultos industriales tienen diferentes funciones de seguridad. Mientras que los bultos del Tipo BI-1 simplemente retienen su contenido radiactivo en las condiciones de transporte rutinarias, los bultos de los Tipos BI-2 y BI-3 brindan protección contra la pérdida o dispersión de su contenido y el aumento de la tasa de dosis (véase el párr. 624.4) en las condiciones de transporte normales que, por definición (véase el párr. 106 del Reglamento de Transporte) incluyen pequeños percances, en la medida en que los requisitos de ensayo representan esas condiciones. Además, los bultos del Tipo BI-3 proporcionan la misma integridad en el bulto que la alcanzada en un bulto del Tipo A destinado al transporte de sólidos.

623.2. Ni en los requisitos de diseño estipulados en el Reglamento de Transporte para un bulto industrial, ni en los definidos para el grupo III de embalajes de las Naciones Unidas, se consideran como bultos las vasijas de presión. Según las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17], solo las que tienen un volumen inferior a 450 L (si contienen líquidos), e inferior a 1000 L (si contienen gases),

pueden considerarse bultos. Las vasijas de presión de volúmenes mayores se definen como cisternas, para las que los párrafos 627 y 628 del Reglamento de Transporte definen niveles de seguridad comparables. Si las vasijas de presión son utilizadas como bultos industriales, deberían considerarse los principios de diseño recogidos en los códigos de vasijas de presión pertinentes en la selección de los materiales, las normas de diseño y los métodos de cálculo y en el sistema de gestión para la fabricación y el uso del bulto (por ejemplo, la realización de ensayos de presión por inspectores independientes). Por lo general se prevé que el espesor relativamente mayor de la pared de las vasijas de presión proporcione seguridad ante las presiones internas (condiciones de servicio y presiones de ensayo). Una presión de diseño mayor que la necesaria para abarcar condiciones de servicio correspondientes a la presión de vapor en el límite superior de temperatura puede suministrar un margen de seguridad ante percances o incluso accidentes, ya que requerirá un mayor espesor de pared. En este caso quizás no sea necesario comprobar la seguridad mediante los ensayos de caída y apilamiento, sino que podría bastar con el ensayo de presión. No obstante, es preciso cerciorarse de la seguridad de los elementos auxiliares de servicio (válvulas, etc.) con respecto a las cargas mecánicas; por ejemplo, mediante el uso de estructuras complementarias de protección.

623.3. Las vasijas de presión con volúmenes inferiores a 450 L de contenido líquido y 1000 L de contenido gaseoso, y diseñadas para una presión de 265 kPa (véase el párr. 627 b) del Reglamento de Transporte) pueden brindar un nivel adecuado de seguridad y, por tanto, tal vez no sea preciso someterlas a los ensayos correspondientes al Tipo BI. Se entiende que todas las precauciones especificadas en los códigos pertinentes para el empleo de vasijas de presión se considerarían y aplicarían, según proceda.

623.4. Un ejemplo de esta aplicación es el de las vasijas de presión utilizadas para el transporte de hexafluoruro de uranio. Estos cilindros están diseñados para una presión muy superior a la que se genera en condiciones de transporte y de servicio normales. Por tanto, quedan inherentemente protegidos contra las cargas mecánicas.

623.5. El requisito de que exista un espacio vacío (véase el párr. 649 del Reglamento de Transporte) no se establece para los bultos industriales. Ahora bien, en el caso de contenidos líquidos (o de contenidos sólidos que puedan pasar a líquidos si ocurre calentamiento), como el hexafluoruro de uranio, se debería prever suficiente espacio vacío, como se indica en el párrafo 649, para prevenir la rotura de la contención. Dicha rotura se puede producir cuando es insuficiente

el espacio vacío, sobre todo como resultado de la dilatación del contenido con los cambios de temperatura.

Requisitos relativos a los bultos industriales del Tipo 2 (Tipo BI-2)

624.1. Véase el párrafo 623.1.

624.2. La posibilidad de emisión del contenido de los bultos del Tipo BI-2 exige que se tenga en cuenta una capacidad de contención del bulto en condiciones de transporte normales. Para demostrar que no se produce pérdida o dispersión del contenido es factible cierta simplificación, considerando el carácter prácticamente inmóvil del contenido de algunos materiales BAE y OCS y su actividad específica y contaminación superficial limitadas. (Véanse los párrs. 648.2 a 648.5.)

624.3. Para un bulto del Tipo BI-2 previsto para el transporte de un líquido, véanse los párrafos 623.2 a 623.5. Para un bulto del Tipo BI-2 previsto para transportar un gas, véanse los párrafos 623.2 a 623.4. Para un bulto del Tipo BI-2 utilizado para transportar material BAE-III, véase el párrafo 409.6.

624.4. El límite del 20 % de aumento de la tasa de dosis en condiciones de transporte normales es un requisito de diseño para verificar la idoneidad del diseño del blindaje. El cumplimiento de este requisito podría demostrarse mediante el análisis del blindaje, la simulación de la deformación del bulto y, según corresponda, el desplazamiento del contenido radiactivo y el cambio de estado del contenido, incluidas la separación o la precipitación de los radionucleidos debidas a las condiciones de transporte normales. En el diseño del bulto y en la preparación del bulto para su expedición debería considerarse el aumento de la tasa de dosis debido a un cambio del estado del contenido o el desplazamiento del contenido en condiciones de transporte rutinarias. (Véanse los párrs. 527.1 y 573.1). Por consiguiente, en la demostración del aumento de la tasa de dosis en condiciones de transporte normales puede excluirse un aumento de la tasa de dosis debido a estas causas.

Requisitos relativos a los bultos industriales del Tipo 3 (Tipo BI-3)

625.1. Véase el párrafo 623.1.

625.2. En relación con la emisión del contenido de los bultos del Tipo BI-3, se impone el mismo requisito de contención que para los bultos del Tipo A para sólidos, teniendo en cuenta los mayores valores de actividad específica que se pueden transportar en los bultos del Tipo BI-3 y la ausencia de controles

operacionales en un transporte que no se hace en la modalidad de uso exclusivo. En el caso de los materiales BAE en estado líquido debería preverse suficiente espacio vacío para evitar el fallo hidráulico del sistema de contención. Estos requisitos son acordes con el enfoque graduado del Reglamento de Transporte (véanse los párrs. 648.2 a 648.5).

625.3. Para un bulto del Tipo BI-3 previsto para el transporte de un líquido, véanse los párrafos 623.2 a 623.5. Para un bulto del Tipo BI-3 previsto para transportar un gas, véanse los párrafos 623.2 a 623.4. Para un bulto del tipo BI-3 utilizado para transportar un material BAE-III, véase el párrafo 409.6.

Requisitos alternativos aplicables a los bultos industriales del Tipo 2 (Tipo BI-2) y del Tipo 3 (Tipo BI-3)

626.1. Se permite el uso alternativo de embalajes de las Naciones Unidas porque en las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17] se establecen requisitos generales de diseño que son comparables y ensayos de resistencia que se ha estimado que brindan el mismo nivel de seguridad. Mientras que la estanqueidad es también un criterio de aceptación en los ensayos de las Recomendaciones de las Naciones Unidas, no ocurre lo mismo con los requisitos relativos al blindaje estipulados en el Reglamento de Transporte, a los que debería prestarse especial atención cuando se utilicen embalajes de las Naciones Unidas.

626.2. Como los grupos de embalajes I y II de las Naciones Unidas requieren los mismos criterios de ensayo que los bultos del Tipo BI-2, o incluso más estrictos, todos los grupos de embalajes I y II de las Naciones Unidas cumplirán automáticamente los requisitos de ensayo de los del Tipo BI-2, salvo en lo que se indica en el párrafo 626.3. En consecuencia, los embalajes marcados con la X o la Y, según el sistema de las Naciones Unidas, son potencialmente adecuados para el transporte de los materiales BAE y OCS que requieran un bulto del Tipo BI-2 sin un blindaje específico. Para estos bultos debería haber una correspondencia entre el contenido que se transportará y el comprobado en los ensayos de las Naciones Unidas, teniendo en cuenta cuestiones como la densidad relativa máxima, la masa bruta, la presión total máxima, la presión de vapor y la forma en que se presente el contenido.

626.3. Los embalajes de las Naciones Unidas de los grupos de embalajes I y II (es decir, los que cumplen las especificaciones recogidas en el capítulo 6.1 de las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17]) pueden emplearse como bultos del Tipo BI-2 siempre que no se produzca una pérdida o dispersión del contenido durante los ensayos definidos por las Naciones Unidas o después

de ellos. No obstante, debería tenerse en cuenta que la norma de las Naciones Unidas permite una ligera descarga a través del cierre en el momento del impacto siempre que después no ocurra ninguna otra fuga. Esta descarga no cumpliría con el requisito de que no haya pérdida o dispersión del contenido. Además, el contenido previsto debería ser compatible con el permitido para el correspondiente embalaje y no debería ser necesario un blindaje específico. Las restricciones aplicables podrán determinarse a base del marcado de las Naciones Unidas que tiene que aparecer en los embalajes hechos según las especificaciones de las Naciones Unidas.

626.4. Véanse en el párrafo 648.4 ejemplos de métodos que pueden emplearse para verificar el cumplimiento de lo establecido en el párrafo 626 c) i) del Reglamento de Transporte.

627.1. Se ha comprobado que las cisternas portátiles diseñadas para el transporte de mercancías peligrosas, de conformidad con las reglamentaciones internacionales y nacionales, son seguras durante su manipulación y transporte e incluso, en algunos casos, en condiciones de accidente muy grave.

627.2. Los criterios generales de diseño para las cisternas portátiles, en cuanto a su manipulación, apilamiento y transporte seguros, se pueden cumplir si el equipo estructural (armazón) se ha diseñado según la norma ISO 1496-3 [18]. Esta norma establece el uso de un marco estructural en que la cisterna se sujete de manera que toda fuerza estática debida a la manipulación, la estiba y el transporte no produzca esfuerzos indebidos en su pared.

627.3. Las fuerzas dinámicas en las condiciones de transporte rutinarias se analizan en el apéndice IV.

627.4. Se considera que las cisternas portátiles diseñadas según la norma ISO 1496-3 [18] para los materiales radiactivos son, como mínimo, equivalentes a las diseñadas con arreglo a las normas establecidas en el capítulo 6.7 sobre el transporte multimodal de cisternas de las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17].

627.5. Se considerará cumplimentado el requisito de retención del blindaje si el material de blindaje permanece en su posición tras los ensayos, no muestra fisuras significativas y no se produce un incremento superior al 20 % en la tasa de dosis, lo que se evaluará mediante cálculos o mediciones en las condiciones citadas en el párrafo 627 c) del Reglamento de Transporte. En las cisternas portátiles que dispongan de un armazón ISO, pueden considerarse las superficies

del armazón como base para hacer los cálculos o mediciones de la tasa de dosis. (Véase el párr. 624.4.)

628.1. Para explicar la equivalencia entre las normas establecidas en el párrafo 627 (capítulo 6.7 de las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17]) para cisternas portátiles, se debería hacer referencia al Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR) [19] y al Reglamento relativo al Transporte Internacional por Ferrocarril de Mercancías Peligrosas (RID) [20], en que se han establecido las mismas normas en un correspondiente capítulo 6.7, pero en que las normas equivalentes para camiones cisterna, vagones cisterna y contenedores cisterna se han introducido en un capítulo 6.8 independiente, en que se especifica un nivel de seguridad equivalente aceptable.

629.1. Los contenedores diseñados y ensayados según la norma ISO 1496-1 [21] y aprobados de conformidad con el Convenio CSC [22] se han probado utilizando millones de unidades para asegurar la manipulación y el transporte seguros en condiciones de transporte rutinarias. Hay que señalar, empero, que la norma ISO 1496-1 tiene que ver con cuestiones asociadas al diseño y ensayo de los contenedores, mientras que el Convenio CSC se ocupa fundamentalmente de garantizar que los contenedores sean seguros para el transporte, se mantengan debidamente y sean adecuados para su expedición internacional por todas las modalidades de transporte de superficie. Los ensayos previstos en el Convenio CSC no son equivalentes a los establecidos en la norma ISO 1496-1.

629.2. Los contenedores diseñados y ensayados según la norma ISO 1496-1 [21] se ciñen al transporte de sólidos, ya que no se consideran adecuados para el transporte de líquidos libres o sin embalar o dentro de embalajes no cualificados. Debería prestarse especial atención a los detalles relacionados con la fabricación del contenedor, de manera que se asegure el cumplimiento de los requisitos de contención del Reglamento de Transporte. Por ejemplo, es más fácil comprobar fugas en las juntas soldadas si estas son visibles. Solo podrán usarse contenedores cerrados para demostrar que se cumple el requisito de contención de los bultos del Tipo BI-2 y del Tipo BI-3, que exige que no se produzca la pérdida o dispersión del contenido radiactivo y para demostrarlo será necesario efectuar mediciones durante los ensayos y después que hayan terminado.

629.3. Debe demostrarse que los contenedores retienen su contenido a pesar de las aceleraciones que se producen en las condiciones de transporte rutinarias, ya que los ensayos de la norma ISO para los contenedores no incluyen ensayos

dinámicos. En la práctica esto quizás requiera la demostración de la contención en las etapas siguientes, teniendo en cuenta el contenido que vaya a transportarse:

- a) ensayo de prototipos según la norma ISO 1496-1 [21] (antes de aplicar las cargas de ensayo, cuando el contenedor está estáticamente cargado y cuando las cargas de ensayo han sido retiradas);
- b) producción de cada unidad;
- c) mantenimiento, y
- d) reparación.

629.4. Debe asegurarse que los sistemas de enganche que se empleen para sujetar los objetos dentro del contenedor podrán soportar las cargas típicas de las condiciones de transporte rutinarias. (Véase el apéndice IV).

629.5. Los párrafos 624.1 a 624.4 pueden servir como guía para prevenir la pérdida o dispersión del contenido y el aumento de las tasas de dosis máximas en la superficie.

630.1. Los recipientes intermedios para graneles que se aprueben de conformidad con lo establecido en el capítulo 6.5 de las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17] se consideran equivalentes a los bultos diseñados y ensayados según los requisitos definidos para los del Tipo BI-2 y del Tipo BI-3, salvo en lo referente a los requisitos de blindaje. El uso alternativo de recipientes intermedios para graneles se restringe a los que están fabricados en metal solamente porque estos se ajustan más a los requisitos definidos para los bultos del Tipo BI-2 y del Tipo BI-3. No se ha podido determinar la necesidad de otros tipos de diseño, ya que no parece que sean apropiados para el transporte de materiales radiactivos.

630.2. Con excepción de los requisitos sobre blindaje, puede demostrarse que los recipientes intermedios para graneles cumplen los requisitos de diseño y de ensayo de resistencia de los bultos del Tipo BI-2 y del Tipo BI-3 cuando se ajustan a lo establecido en el capítulo 6.5 de las Recomendaciones de las Naciones Unidas [17], con el requisito adicional, respecto de los recipientes intermedios para graneles con más de 0,45 m³ de capacidad, de un ensayo de caída con la orientación que provoque el mayor daño (y no solo sobre la base). Estas recomendaciones incluyen requisitos relativos al diseño y los ensayos de resistencia similares, así como a la aprobación del diseño por parte de la autoridad competente.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS QUE CONTENGAN HEXAFLUORURO DE URANIO

631.1. El hexafluoruro de uranio es un material radiactivo que tiene un peligro químico significativo. No obstante, en las Recomendaciones de las Naciones Unidas se estipula que prevalezca la naturaleza radiactiva de la sustancia y que el peligro químico sea considerado secundario respecto del radiactivo [17]. Según el grado de enriquecimiento y la cantidad de uranio fisible, el hexafluoruro de uranio podría ser transportado, desde el punto de vista radiológico, en bultos industriales exceptuados y en bultos del Tipo A, del Tipo B(U) o del Tipo B(M). Sin embargo, muchos de los requisitos para el hexafluoruro de uranio impuestos en la norma ISO 7195 [14] y los incluidos en el Reglamento de Transporte no se refieren a los peligros radiológicos y de criticidad que plantea el hexafluoruro de uranio, sino a las propiedades físicas y también al peligro de toxicidad química del material cuando es emitido en la atmósfera y reacciona con el agua o el vapor de agua. Además, como estos embalajes se encuentran presurizados durante las operaciones de carga y descarga, tienen que cumplir con las reglamentaciones aplicables a las vasijas de presión, aunque no vayan a estar presurizados en las condiciones de transporte normales. Los requisitos especificados en los párrafos 631 a 634 del Reglamento de Transporte se centran en este asunto y no en los peligros radiológicos o de criticidad. Los otros requisitos aplicables del Reglamento de Transporte relativos a los peligros radiológicos y de criticidad del hexafluoruro de uranio cuando es embalado y transportado se establecen en otros apartados del Reglamento de Transporte, y su cumplimiento es fundamental para conseguir la necesaria seguridad durante las operaciones de manipulación y transporte.

631.2. Antes de la primera publicación de la norma ISO 7195 [14] en 1993, la norma nacional de los Estados Unidos, ANSI N14.1 [15], era la utilizada para los cilindros de hexafluoruro de uranio en toda la industria. La norma ISO 7195 fue publicada como alternativa internacional de la norma ANSI N14.1, sin intención de elaborar o establecer disposiciones nuevas o complementarias. Puede considerarse que los cilindros de hexafluoruro de uranio fabricados, ensayados y conservados con arreglo a la norma ANSI N14.1 [15] están en conformidad con la norma ISO 7195 [14] a efectos de dar cumplimiento a lo dispuesto en el Reglamento de Transporte.

632.1. El nivel de exención de 0,1 kg representa un nivel de seguridad suficiente contra la explosión de pequeños cilindros de hexafluoruro de uranio sin revestimiento [23]. El nivel de 0,1 kg está muy por debajo del límite de masa de 10 kg, según se recoge en las referencias [24, 25] sobre los peligros químicos.

632.2. Los criterios de aceptación estipulados en el párrafo 632 a) a c) del Reglamento de Transporte varían según el tipo de ambiente al que se vea expuesto el bulto. En el ensayo de presión específico para los embalajes que contendrán hexafluoruro de uranio (párr. 718 del Reglamento de Transporte), el criterio de aceptación de que no se produzcan fugas ni tensiones inaceptables podría satisfacerse mediante un ensayo hidrostático del cilindro, en que las fugas podrían ser detectadas observando la pérdida de agua que se produzca desde este. No se incluyen en el ensayo de presión la válvula y el resto del equipo que sea necesario para el servicio (ISO 7195 [14]).

632.3. La superación del ensayo de caída libre (párr. 722 del Reglamento de Transporte) puede comprobarse realizando un ensayo de fuga de gas acorde con el procedimiento, la presión y la sensibilidad especificados en la norma ISO 7195 para el ensayo de fuga de la válvula [14].

632.4. En el ensayo térmico (párr. 728 del Reglamento de Transporte) los criterios de aceptación que han de cumplirse durante el ensayo o después se basan en la necesidad de prevenir la rotura de la pared del cilindro. Sería inaceptable la rotura o un fallo importante de las paredes del cilindro de hexafluoruro de uranio, si bien con la aprobación de la autoridad competente podrían aceptarse fugas de poca importancia a través o alrededor de una válvula o de otra penetración hecha en la pared del cilindro.

632.5. Debido a los problemas ambientales, de salud y de seguridad inherentes, tal vez sea difícil, si no imposible, realizar ensayos de embalajes que contengan hexafluoruro de uranio para demostrar el cumplimiento de los requisitos del párrafo 632 del Reglamento de Transporte. Por ello, para la demostración del cumplimiento quizás se deba depender del uso de sustitutos del hexafluoruro de uranio en los ensayos y hacer referencia a demostraciones anteriores que hayan sido satisfactorias, ensayos de laboratorio, cálculos y argumentaciones razonadas, como se indica en el párrafo 701 del Reglamento de Transporte.

632.6. Para demostrar que los bultos con hexafluoruro de uranio cumplen los requisitos del párrafo 632 c) del Reglamento de Transporte, el diseñador debería tener en cuenta la influencia de los parámetros que pueden alterar las condiciones termofísicas transitorias del hexafluoruro de uranio o del embalaje que podrían presentarse durante el ensayo térmico. El diseñador debería considerar al menos lo siguiente:

- a) Las orientaciones más lesivas para el bulto: el cambio en la orientación del bulto podría producir una distribución diferente de las tres fases físicas del

hexafluoruro de uranio (sólida, líquida y gaseosa) dentro del bulto y podría llevar a distintas condiciones de presión interna [26, 27].

- b) El intervalo completo de los grados de llenado permitidos: la presión dentro del cilindro podría depender, según una función compleja, del grado en que sea llenado. Por ejemplo, para grados de llenado muy pequeños, el hexafluoruro de uranio sólido podría fundirse y evaporarse más rápidamente, acelerando de este modo el incremento de presión dentro del bulto [28].
- c) Las propiedades reales de los materiales estructurales a altas temperaturas: por ejemplo, a temperaturas por encima de 500 °C se produce una importante reducción de la resistencia a la tracción de la mayoría de los aceros [29].
- d) La presencia de defectos metalúrgicos en el material de la estructura podría causar la rotura del bulto. Esto dependería de la magnitud del defecto. La magnitud máxima del defecto en el modelo debería deducirse de los análisis de diseño, del proceso de fabricación y de los criterios de aceptación de la inspección.

El adelgazamiento de la pared del cilindro o de otros componentes del embalaje debido a la corrosión podría mermar su resistencia. El diseñador debería especificar un espesor de pared mínimo que sea aceptable y deberían elaborarse y aplicarse métodos para determinar el espesor de pared, tanto para los cilindros llenos como para los vacíos que se mantengan en servicio [30, 31].

632.7. Los ensayos especificados en el párrafo 632 b) y c) del Reglamento de Transporte pueden llevarse a cabo en bultos independientes.

633.1. Esta disposición se incluye porque es improbable que se pueda contar con un dispositivo de alivio de presión lo suficientemente fiable para garantizar el nivel de emisión deseado y el cierre posterior una vez que la presión se reduzca a los niveles aceptables.

634.1. Los bultos diseñados para contener 0,1 kg o más de hexafluoruro de uranio que no estén concebidos para soportar el ensayo de presión de 2,76 Mpa, pero que lo estén para soportar un ensayo de presión de al menos 1,38 MPa, pueden ser utilizados con sujeción a la aprobación de la autoridad competente. Esto se establece para que los diseños de bultos antiguos que pueda demostrarse que son seguros ante la autoridad competente puedan emplearse a reserva de una aprobación multilateral. El diseñador del bulto debería preparar el estudio de seguridad que justifique esta certificación.

634.2. Se ha considerado que los bultos muy grandes con hexafluoruro de uranio que estén diseñados para contener 9000 kg o más del citado contenido

y que no se transporten dentro de sobreenvasos de protección térmica, disponen posiblemente de suficiente masa térmica para mantenerse expuestos al ensayo del párrafo 728 del Reglamento de Transporte sin que se produzca la rotura del sistema de contención. Estos bultos pueden ser certificados multilateralmente para el transporte a reserva de la aprobación de la autoridad competente, por lo que su diseñador debería preparar la justificación de la seguridad para fundamentar esta certificación.

634.3. En la figura 4 se incluye una representación gráfica del diseño del bulto y los requisitos de aprobación con respecto al hexafluoruro de uranio. En todos los casos son aplicables a los demás requisitos relativos a las propiedades radiactivas y fisibles del contenido del bulto.

634.4. Véase también el párrafo 632.5.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS DEL TIPO A

636.1. La dimensión mínima de 10 cm se ha adoptado por varias razones. Un bulto muy pequeño podría perderse u ocultarse en un bolsillo. Conforme a la práctica internacional en el transporte, las etiquetas del bulto tienen que ser de 10 cm cuadrados. Para poder colocar de manera adecuada estas etiquetas las dimensiones de los bultos deberán ser de al menos 10 cm.

637.1. El requisito de que el bulto disponga de un sello se establece tanto para disuadir de su apertura como para que el receptor del bulto sepa si durante el transporte se ha retirado o no el contenido, o si se ha forzado o no el embalaje interno. Mientras el sello permanezca intacto, el receptor podrá estar seguro de que el contenido es el definido en el etiquetado; si el sello ha sido dañado, el receptor quedará advertido de que debe tenerse una especial precaución en la manipulación y, en particular, en la apertura del bulto.

637.2. El tipo y la masa del bulto condicionarán de manera fundamental el tipo de sello o sello de seguridad que ha de utilizarse, pero los diseñadores deberían garantizar que el tipo de sello elegido sea aquel por el que este dispositivo no sufra menoscabo durante la manipulación normal del bulto en el transporte.

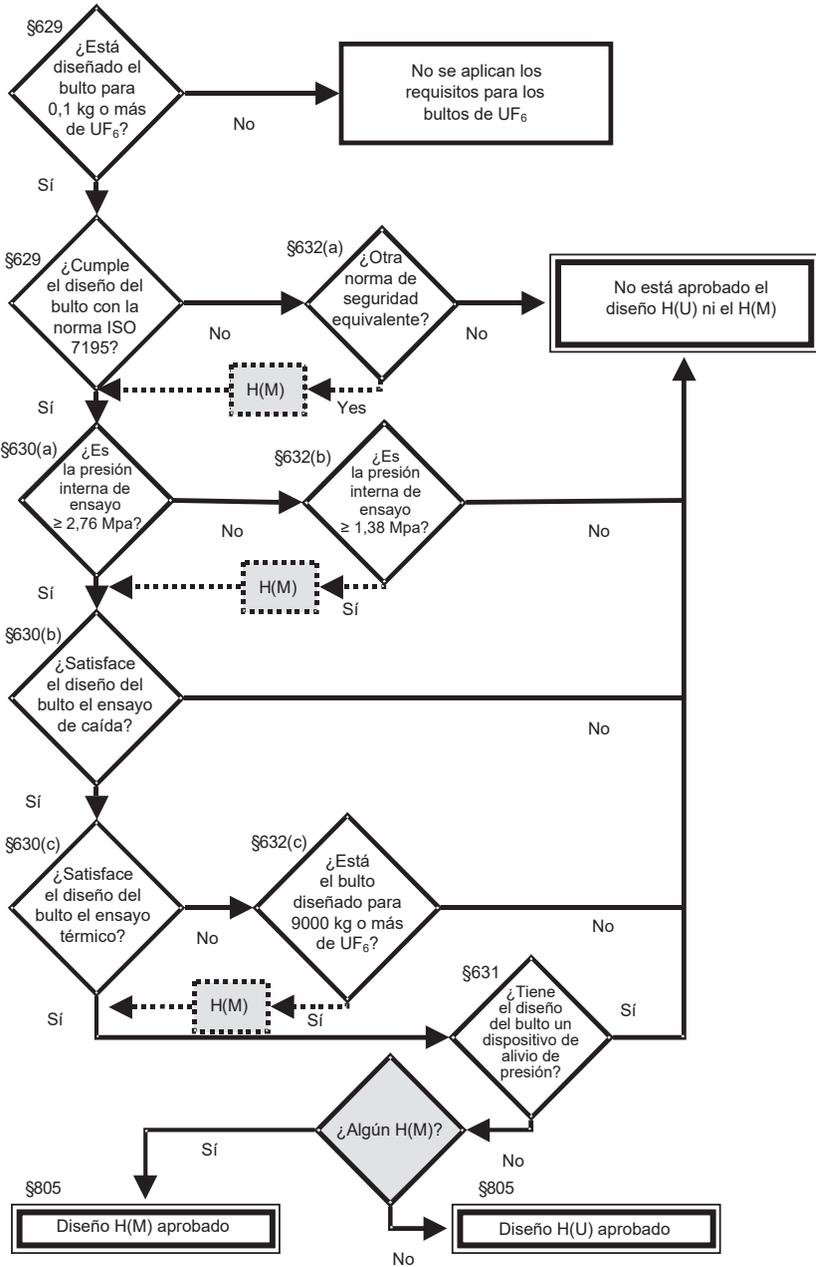


Fig. 4. Representación gráfica del diseño del bulto y los requisitos de aprobación con respecto al hexafluoruro de uranio

637.3. Aunque hay muchos métodos de precintado o sellado, los siguientes son típicos de los bultos de materiales radiactivos:

- a) Cuando los embalajes sean cajas de cartón puede utilizarse cinta engomada o autoadhesiva que no pueda volver a utilizarse para precintar el bulto (el embalaje exterior o la cinta se destruirían en caso de apertura).
- b) Para el cierre de recipientes de plomo y acero, bidones y pequeñas cajas pueden utilizarse sellos metálicos que se fijan por presión. Los sellos se fijan por presión en el extremo de una banda o cable de cierre y se marcan con una identificación en relieve. El método que se utilice para enclavar el cierre debería ser, en sí mismo, independiente del sello de seguridad.
- c) Pueden utilizarse candados en las cajas de madera y también en bultos de acero o de plomo. Puede incorporarse al diseño de las cajas o de los embalajes un dispositivo como una barra perforada de modo que, cuando el candado se introduzca a través de los orificios perforados, quede impedido el acceso al bulto.

638.1. Con excepción de las cisternas o de los bultos utilizados como contenedores, la sujeción de los bultos que tengan una masa relativa considerable respecto de la masa del medio de transporte se llevará a cabo, generalmente, empleando un equipo estándar, adecuado para retener esas grandes masas. Dado que el sistema de sujeción no debe menoscabar las funciones del bulto, en las condiciones normales de carga y en las de accidente quizás sea necesario diseñar la fijación del sistema de sujeción del bulto de manera que esta sea lo primero que falle (lo que se conoce como “enlace débil”). Esto se puede conseguir, por ejemplo, diseñando el punto de enganche de modo que admita solo un determinado tamaño máximo de pasador de grillete, o que se mantenga gracias a pasadores que se cortarían o a tornillos que se romperían ante un determinado esfuerzo.

638.2. Los puntos de elevación pueden utilizarse también como dispositivos de sujeción, pero en tal caso deberían diseñarse específicamente para desempeñar ambas funciones. Los puntos de elevación y los dispositivos de sujeción deberían ser marcados claramente para indicar su finalidad, a menos que estén diseñados de tal modo que sea imposible su utilización alternativa, por ejemplo, un sistema de sujeción de tipo gancho no se puede utilizar normalmente para operaciones de izado.

638.3. También deben tomarse en consideración las posibles roturas direccionales de los sistemas de sujeción, de modo que además de que se proteja a los trabajadores del transporte ante impactos frontales, el bulto quede protegido contra cargas laterales excesivas ante impactos laterales [32].

Véanse en el apéndice IV más detalles sobre el diseño de los bultos y de sus sistemas de sujeción.

639.1. Los componentes de un bulto del Tipo A deberían diseñarse para temperaturas comprendidas entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, que se corresponden con la posible temperatura ambiente dentro de un vehículo o de otro recinto, o con la temperatura del bulto cuando está expuesto a la irradiación solar directa. Este intervalo abarca las condiciones en que es probable que se encuentre en el transporte rutinario y durante el almacenamiento en tránsito. Si existe la posibilidad de que haya un intervalo de temperaturas más amplio durante el transporte o la manipulación, o si hay una generación interna de calor significativa, ello debería tenerse en cuenta en el diseño. Algunas de las cuestiones que quizás sea necesario considerar son:

- a) dilatación y contracción de componentes relacionados con las funciones estructurales o de sellado;
- b) descomposición o cambios de estado de los materiales de componentes en condiciones extremas;
- c) propiedades de tensión y ductilidad, y resistencia del bulto, y
- d) diseño del blindaje.

640.1. Existen muchas normas nacionales e internacionales (véanse, por ejemplo, las refs. [3, 14, 18, 21, 33 a 36]), que abarcan un espectro muy amplio de influencias de diseño y técnicas de fabricación, tales como códigos de vasijas de presión, normas sobre soldaduras o normas sobre controles de estanqueidad, que pueden utilizarse en el diseño, fabricación y ensayo de los bultos. Siempre que sea posible, los diseñadores y fabricantes deberían seguir esas normas establecidas para promover y demostrar un adecuado control del conjunto del diseño y de la fabricación de los bultos. El uso de tales normas también supondrá que los procesos de diseño y fabricación serán mejor entendidos por todas las personas que intervengan en las diversas fases del transporte, en ocasiones de diferentes lugares y Estados Miembros; y lo que es más importante, es mucho menos probable que la integridad del bulto se vea comprometida.

640.2. Cuando se proponga el uso de nuevas técnicas de diseño, fabricación o ensayo y no exista una norma apropiada, tal vez el diseñador necesite analizar las propuestas con la autoridad competente para obtener su aceptación. El diseñador, la autoridad competente u otras organizaciones responsables deberían considerar la posibilidad de elaborar una norma aceptable para cualquier nuevo concepto de diseño, de técnica de fabricación o ensayo, o de material que vaya a ser utilizado.

641.1. Ejemplos de dispositivos y medios de cierre de seguridad que pueden ser adecuados:

- a) costuras soldadas;
- b) dispositivos roscados;
- c) tapas de rosca a presión;
- d) cierres fijados a presión;
- e) laminado;
- f) forjado en frío;
- g) material termocontraído, y
- h) pegamentos o cintas adhesivas.

Otros métodos también podrían ser adecuados en función del diseño del bulto.

642.1. Cuando el sistema de contención esté constituido en parte por materiales radiactivos en forma especial, debería tomarse en consideración el comportamiento apropiado de los materiales radiactivos en forma especial en las condiciones de transporte rutinarias, normales y de accidente aplicables.

644.1. Algunos materiales pueden reaccionar química o radiolíticamente con algunas de las sustancias destinadas a ser transportadas en bultos del Tipo A. Quizás sea necesario realizar ensayos para determinar la idoneidad de los materiales y asegurar que el sistema de contención no sea susceptible de deteriorarse a causa de las propias reacciones, ni de dañarse por un incremento de presión derivado de esas reacciones.

645.1. Este requisito tiene el objetivo de prevenir un fallo del embalaje causado por una presión diferencial excesiva en un bulto que se haya llenado a nivel del mar (o menos) y que después se transporte por vía terrestre hasta una mayor altitud y corresponde a las variaciones de presión atmosférica resultantes de los movimientos de superficie hasta altitudes de 4000 m. Si el bulto se cerrara al nivel del mar o menos y se transportara por tierra hasta esa altitud, tendría que ser capaz de soportar la sobrepresión resultante de ese cambio de altitud, así como cualquier sobrepresión que pudiera generar su contenido.

645.2. Véanse los párrafos 648.2 a 648.5 para obtener orientaciones sobre el requisito relativo a la retención del contenido radiactivo.

646.1. Para prevenir la contaminación debida a la fuga del contenido a través de las válvulas, el Reglamento de Transporte establece un requisito sobre la existencia de un dispositivo o receptáculo secundario para esas válvulas. Según

el modelo de bulto concreto, será adecuado un tipo de dispositivo o receptáculo que ayude a evitar una operación no autorizada de la válvula (véase el párr. 615 del Reglamento de Transporte).

646.2. Ejemplos de cierres que pueden ser adecuados:

- a) tapas huecas para válvulas roscadas provistas de juntas;
- b) bridas ciegas para válvulas embridadas provistas de juntas, y
- c) tapas o receptáculos para válvulas, provistos de juntas, diseñados específicamente para retener cualquier fuga.

Según el diseño del bulto pueden ser apropiados otros métodos.

647.1. El requisito del párrafo 647 del Reglamento de Transporte se establece primordialmente para asegurar que el blindaje contra la radiación se mantenga constantemente alrededor de las sustancias radiactivas a fin de minimizar cualquier incremento de las tasas de dosis en la superficie del bulto. Cuando el blindaje contra la radiación constituya una unidad separada, el dispositivo de fijación positiva impedirá la separación del sistema de contención, salvo que se haga intencionadamente.

647.2. Ejemplos de sistemas que pueden ser adecuados:

- a) dispositivos de enclavamiento accionados mediante bisagras en las tapas;
- b) bastidores atornillados, soldados o provistos de candados alrededor del blindaje contra la radiación, y
- c) tapones roscados de blindaje.

Según el diseño del bulto pueden ser apropiados otros métodos.

648.1. Los límites definidos para el contenido de los bultos del Tipo A limitan intrínsecamente el peligro radiológico. En el párrafo 648 del Reglamento de Transporte se establecen otros requisitos para el diseño de bultos con el fin de garantizar la seguridad en las condiciones de transporte normales.

648.2. Nunca se ha llegado a definir en el Reglamento de Transporte, de manera cuantitativa, una tasa máxima de fuga permitida para el transporte de los bultos del Tipo A en condiciones normales, aunque siempre se ha requerido desde el punto de vista sentido práctico.

648.3. En la práctica es difícil recomendar un solo método de ensayo que pueda abarcar satisfactoriamente la amplia gama de embalajes y contenidos que existen. Puede utilizarse un enfoque cualitativo, en función del embalaje de que se trate y de su contenido radiactivo. Al aplicar el método de ensayo preferido, la presión diferencial máxima utilizada debería ser la derivada del contenido y de las condiciones ambientales previstas. La finalidad de los párrafos 621, 624 a), 648 a) y 651 del Reglamento de Transporte es garantizar que, en condiciones de transporte normales, el contenido radiactivo del bulto no pueda escapar en cantidades que puedan crear un peligro radiológico o de contaminación.

648.4. Para contenidos sólidos, granulares y líquidos, un modo de satisfacer el requisito de que se impida toda pérdida o dispersión sería comprobar el bulto (que contenga material inactivo de control) tras un ensayo de vacío u otros ensayos adecuados para determinar visualmente si se ha producido un escape. Para los líquidos se puede utilizar como indicador un material absorbente. Seguidamente, una cuidadosa inspección visual del bulto puede confirmar si se ha mantenido su integridad y no se han producido fugas. Otro método que puede ser adecuado en algún caso sería pesar el bulto antes y después del ensayo de vacío y así comprobar si han ocurrido fugas.

648.5. Probablemente no sea satisfactoria la comprobación visual de contenidos gaseosos, por lo que puede utilizarse un método de detección por succión o presurización con un gas que sea fácilmente identificable (o con un líquido volátil que origine un gas). También en este caso una minuciosa inspección visual del embalaje puede confirmar que se ha mantenido su integridad y que no existen vías de escape. Otro método de detección sería un simple ensayo de burbujas.

648.6. Véase el párrafo 624.4 para obtener asesoramiento sobre el aumento de las tasas de dosis máximas en la superficie.

649.1. El espacio vacío es el espacio lleno de gas en el bulto que sirve para dar cabida a la dilatación del contenido líquido del bulto debida a cambios en las condiciones ambientales y de transporte. Un espacio vacío suficiente permitirá que el sistema de contención no se someta a una excesiva presión causada por la dilatación de sistemas que solo contienen líquidos que, en general, se consideran incompresibles.

649.2. Al establecer las especificaciones sobre el requisito de mantener un espacio vacío, tal vez sea necesario tener en cuenta los valores extremos de temperatura previstos para los materiales del bulto, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (véase el párr. 639 del Reglamento de Transporte). A la temperatura más baja se

pueden producir aumentos de presión debidos a la dilatación del material a las temperaturas de transición en que su estado cambia de líquido a sólido. A la temperatura más alta, pueden producirse aumentos de presión como resultado de la dilatación o de la evaporación de un contenido líquido. También deben adoptarse medidas para asegurar que no se defina un espacio vacío excesivo que pueda originar oscilaciones dinámicas inaceptables dentro del bulto durante el transporte. Además, durante las operaciones de llenado de grandes cantidades de líquido, pueden producirse oscilaciones de nivel o chapoteos, aspecto que quizás los diseñadores deban tener en cuenta para determinados modelos de bultos.

650.1. El usuario de un bulto del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C podría querer utilizarlo para transportar menos cantidad de líquido que la correspondiente a A_2 y designar este bulto en los documentos de expedición como un bulto del Tipo A. Esto libera de algunos requisitos administrativos al remitente y al transportista sin que se degrade la seguridad, ya que el bulto tiene mayor integridad que un bulto del Tipo A estándar. En este caso no se requiere cumplir la disposición de añadir material absorbente o un componente secundario de contención exterior.

651.1. Los motivos para realizar ensayos adicionales de bultos del Tipo A para gases comprimidos o no comprimidos son similares a los expuestos en relación con los bultos del Tipo A para líquidos. Sin embargo, como el fallo del sistema de contención, al igual que en el caso de los gases, siempre daría lugar a la emisión del 100 % del contenido, se requiere el ensayo adicional para reducir la probabilidad de fallo de la contención en un accidente de una determinada gravedad y de esta manera conseguir un nivel de riesgo comparable al de un bulto del Tipo A concebido para transportar sólidos dispersables.

651.2. La excepción de cumplir el requisito del párrafo 651 del Reglamento de Transporte en relación con los bultos que contengan tritio o gases nobles se basa en los modelos dosimétricos para estos materiales (el sistema Q, véase la explicación en el apéndice I).

651.3. Véase el párrafo 648.5 para obtener orientación relativa al requisito de prevenir la pérdida o dispersión de un contenido radiactivo gaseoso.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS DEL TIPO B(U)

652.1. El concepto de un bulto del Tipo B(U) radica en que este es capaz de soportar la mayoría de las condiciones de los accidentes muy graves en el

transporte sin que se produzca una pérdida de la contención o un incremento de la tasa de dosis externa en una magnitud que ponga en peligro al público en general o a quienes participen en las operaciones de salvamento o rehabilitación. El bulto debería poder ser recuperado de manera segura (véanse los párrs. 509 y 510 del Reglamento de Transporte), aunque no necesariamente se podría volver a utilizar.

653.1. Aunque el requisito del párrafo 639 del Reglamento de Transporte, referido a los bultos del Tipo A, trata de abarcar la mayoría de las condiciones que pueden provocar un fallo del embalaje, por cuestiones específicas de diseño se precisa tener en cuenta otros aspectos en relación con las temperaturas que han de soportar los componentes de los embalajes de los bultos del Tipo B(U). Esto se debe en general a que los bultos del Tipo B(U) pueden estar concebidos para contenidos que generen cantidades significativas de calor y las temperaturas que tendrían que soportar los componentes en ese diseño pueden rebasar el requisito de 70 °C definido para los bultos del Tipo A. El motivo de que se especifique una temperatura ambiente de 38 °C para su consideración en el diseño es asegurar que el diseñador tome debidamente en cuenta las temperaturas que tendrán que soportar los componentes y el efecto de ellas en la geometría, el blindaje, la eficiencia, la corrosión y la temperatura en la superficie del bulto. Además, la disposición de que el bulto pueda permanecer abandonado durante el período de una semana, con una temperatura ambiente de 38 °C bajo irradiación solar, trata de asegurar que el bulto alcance o se aproxime a las condiciones de equilibrio y que en esa situación sea capaz de soportar las condiciones de transporte normales, lo que se demuestra al someterlo a los ensayos definidos en los párrafos 719 a 724 del Reglamento de Transporte, sin pérdida de contención o reducción del blindaje contra la radiación.

653.2. En la evaluación en las condiciones de temperatura ambiente se debe tener en cuenta el calor generado por el contenido, que puede ser tal que la temperatura máxima de algunos componentes del bulto pueda superar considerablemente los 70 °C requeridos para un diseño de bulto del Tipo A.

653.3. Véanse también los párrafos 639.1, 655.1, 655.2, 657.1 a 657.9 y 666.1 a 666.3 y el apéndice V.

653.4. Para determinar las temperaturas internas y externas del bulto en condiciones normales pueden realizarse ensayos prácticos en que se utilicen calentadores eléctricos para simular la fuente de calor causada por la desintegración radiactiva del contenido. De esa manera la fuente de calor se puede controlar y medir. Esos ensayos deberían realizarse en un ambiente térmico uniforme y estable (por ejemplo, con una temperatura ambiente

prácticamente constante, sin movimiento de aire y con aportaciones mínimas de calor de fuentes externas como la irradiación solar). El bulto y su fuente de calor deberían mantenerse bajo ensayo durante el tiempo suficiente para que pueda alcanzarse la estabilidad de las temperaturas de interés. La temperatura ambiente de ensayo y la fuente interna de calor deberían medirse y utilizarse para ir ajustando proporcionalmente todas las temperaturas que se midan en el bulto a las que corresponderían a una temperatura ambiente de 38 °C.

653.5. En los ensayos que se realicen en ambientes no controlados (por ejemplo, al aire libre), las variaciones ambientales (por ejemplo, las diurnas) pueden hacer imposible conseguir temperaturas constantes y estables. En tales casos, deberían medirse las temperaturas periódicas cuasi estables (tanto las temperaturas ambiente como las del bulto), lo que permitirá efectuar correlaciones entre la temperatura ambiente y la temperatura media en el bulto. Estos resultados, junto con los datos de la fuente interna de calor, pueden emplearse para pronosticar temperaturas del bulto correspondientes a una temperatura ambiente estable de 38 °C.

653.6. En algunos casos las normas nacionales o la especificación técnica del contenido de los bultos definen la temperatura máxima permisible; estos límites de temperatura del contenido deberían respetarse.

654.1. Las temperaturas de la superficie de los bultos que contengan materiales radiactivos que generen calor se elevarán por encima de la temperatura ambiente. Por ello es necesario definir restricciones de la temperatura de la superficie de los bultos y así proteger contra posibles daños las mercancías próximas y a las personas que vayan a manipular los bultos durante su carga y descarga.

654.2. Con un límite de temperatura en la superficie de 50 °C a la temperatura ambiente máxima de 38 °C, el resto de las mercancías no sufrirá un sobrecalentamiento y nadie se quemará al manipular o tocar la superficie de los bultos. Se permite una temperatura mayor en la modalidad de uso exclusivo (salvo para el transporte aéreo) (véase el párr. 655 del Reglamento de Transporte y los párrs. 655.1 a 655.3).

654.3. En relación con la temperatura en las superficies accesibles, la irradiación solar no precisa ser considerada, de manera que solo se tendrá en cuenta la carga térmica interna. Esta simplificación se justifica por el hecho de que el bulto, con o sin calor interno, experimentaría un aumento de temperatura en la superficie semejante al que sufriría si estuviera expuesto al sol.

655.1. El límite de 85 °C de temperatura en la superficie para bultos del Tipo B(U) en la modalidad de uso exclusivo, que permite controlar suficientemente un posible deterioro de las mercancías que se encuentren en su proximidad, se requiere para prevenir los daños que podrían sufrir las personas por un contacto fortuito con los bultos. Las barreras o pantallas que se mencionan en el párrafo 655 del Reglamento de Transporte no se consideran parte del diseño del bulto y, por tanto, se excluyen de cualquiera de los ensayos asociados al diseño del bulto.

655.2. La expresión “superficie fácilmente accesible” no es una descripción precisa, pero en este manual se interpreta como la superficie que podría tocar de manera casual una persona que no esté asociada con la operación de transporte. Por ejemplo, aunque el uso de una escalera de mano podría hacer accesible las superficies, esto no sería motivo para considerarlas como superficies fácilmente accesibles. Asimismo, no se considerarían fácilmente accesibles las superficies situadas entre aletas que estén muy juntas. Si las aletas estuvieran muy espaciadas, más o menos a la anchura de la mano de una persona o algo más, entonces la superficie entre ellas sí se podría considerar como fácilmente accesible.

655.3. Las barreras o pantallas pueden utilizarse como protección contra las temperaturas más elevadas en la superficie y mantenerse en la categoría de aprobación del bulto del Tipo B(U). Un ejemplo sería un bulto con aletas muy próximas, provisto de muñones de elevación, que para ser utilizado tengan que recortarse algunas aletas en la zona inmediata a dichos muñones, de manera que el cuerpo principal del bulto aparezca como una superficie accesible. Para conseguir la protección se podría emplear una barrera, como una pantalla de metal expandida o un recinto cerrado que impida eficazmente el acceso o contacto de las personas con el bulto durante las operaciones de transporte rutinarias. Tales barreras serían consideradas entonces como superficies accesibles y por ello estarían sometidas al límite de temperatura aplicable. El empleo de barreras o pantallas no debería menoscabar la capacidad del bulto para satisfacer los requisitos de transferencia de calor, ni reducir su seguridad.

656.1. Véase el párrafo 666.1.

657.1. Un bulto puede sufrir calentamiento durante el transporte debido a la irradiación solar. Como resultado de este calentamiento se incrementará la temperatura del bulto. Para evitar dificultades al tratar de considerar muchas variables de forma precisa, se han acordado a escala internacional los valores de irradiación solar (véase el cuadro 12 del Reglamento de Transporte). Los valores de irradiación solar se especifican como flujos uniformes de calor durante 12 h,

seguidos de 12 h de irradiación solar nula. Se supone que los bultos están en un espacio abierto; por tanto, no se consideran ni sombras ni reflexiones procedentes de estructuras adyacentes. El cuadro 12 del Reglamento de Transporte muestra un valor máximo de irradiación solar para una superficie horizontal colocada boca arriba y un valor nulo para una superficie horizontal colocada boca abajo que no recibe irradiación solar. Se supone que una superficie vertical solo es calentada durante la mitad del día y con la mitad de eficiencia; por ello, el valor para la irradiación solar de una superficie vertical recogido en el cuadro representa un cuarto del valor máximo definido para las superficies horizontales colocadas boca arriba. Las ubicaciones en superficies curvas varían entre la orientación horizontal y vertical y se asigna con prudencia la mitad del valor máximo para las superficies horizontales colocadas boca arriba. La utilización de estos valores acordados asegura la uniformidad en cualquier evaluación de seguridad y suministra una base de cálculo común.

657.2. Los datos de irradiación solar recogidos en el cuadro 12 del Reglamento de Transporte son flujos uniformes de calor. Se refieren a los niveles alcanzados a las 12 h (diurnas) seguidas de 12 h sin irradiación solar (nocturnas). La función cíclica que representa la irradiación solar debería aplicarse hasta que las temperaturas de análisis alcancen un comportamiento periódico estable.

657.3. Un método simple, aunque conservador, para evaluar los efectos de la irradiación solar es aplicar un flujo uniforme y continuo de calor para los valores mencionados en el cuadro 12 del Reglamento de Transporte. Esto evita la necesidad de realizar análisis de transitorios térmicos y solo se precisa un simple análisis en estado estable.

657.4. Para obtener un modelo más preciso se puede utilizar una función sinusoidal que represente la variación del flujo de calor con respecto al tiempo durante las horas diurnas para superficies planas o curvas. Se requiere que la carga de calor integrada (total) en una superficie, entre la salida y la puesta del sol, sea igual al valor de calor total correspondiente a los valores del cuadro a las 12 h (por ejemplo, multiplicando el valor del cuadro por 12 h para obtener la carga total de calor en W/m^2). En este modelo el flujo de calor será cero entre la puesta y la salida del sol. El modelo cíclico de irradiación solar debería aplicarse hasta que las temperaturas de interés alcancen las condiciones de comportamiento periódico estable.

657.5. En la figura 5 se presenta una sección eficaz horizontal de un bulto con superficies planas. Los valores del cuadro 12 se aplican de la manera siguiente:

- a) Para cualquier superficie plana horizontal colocada boca abajo (que no pueda recibir irradiación solar) (caso 1), se aplica el valor nulo del cuadro 12 del Reglamento de Transporte.
- b) Para cualquier superficie plana horizontal colocada boca arriba (caso 2), se aplica el valor horizontal de 800 W/m^2 del cuadro 12 del Reglamento de Transporte.
- c) Para cualquier superficie plana vertical (es decir, dentro de los 15° de la vertical) (caso 3) y para cualquier superficie plana inclinada hacia abajo (caso 4), se aplica el valor de 200 W/m^2 del cuadro 12 del Reglamento de Transporte.
- d) Para cualquier superficie plana inclinada hacia arriba (caso 5, todas las demás superficies), se aplica el valor de 400 W/m^2 del cuadro 12.

657.6. En la figura 6 se presenta una sección eficaz vertical de un bulto con superficies curvas y superficies verticales planas. Los valores del cuadro 12 del Reglamento de Transporte se aplican de la manera siguiente:

- a) Para cualquier superficie plana vertical (caso 3, es decir, dentro de los 15° de la vertical), se aplica el valor de 200 W/m^2 de las superficies planas transportadas verticalmente del cuadro 12 del Reglamento de Transporte.
- b) Para cualesquiera superficies curvas colocadas boca abajo (caso 4), se aplica el valor de 200 W/m^2 de otras superficies colocadas boca abajo del cuadro 12 del Reglamento de Transporte.
- c) Para cualesquiera superficies curvas colocadas boca arriba (caso 5, todas las demás superficies), se aplica el valor de 400 W/m^2 del cuadro 12 del Reglamento de Transporte.

657.7. En la evaluación térmica pueden tenerse en cuenta los componentes del bulto que reduzcan la irradiación solar en cualquiera de las superficies (es decir, que proporcionen sombra solar a la superficie del bulto). La reducción de la irradiación solar por esos componentes no debería considerarse en el análisis térmico si su eficacia se reduce al someter el bulto a los ensayos de condiciones de transporte normales.

657.8. La transferencia de calor depende de la capacidad de emisión y de absorción de calor en la superficie y, por tanto, pueden tenerse en cuenta las variaciones de estas propiedades. Estas propiedades de la superficie dependen de la longitud de onda. Mientras que la irradiación solar entraña alta temperatura

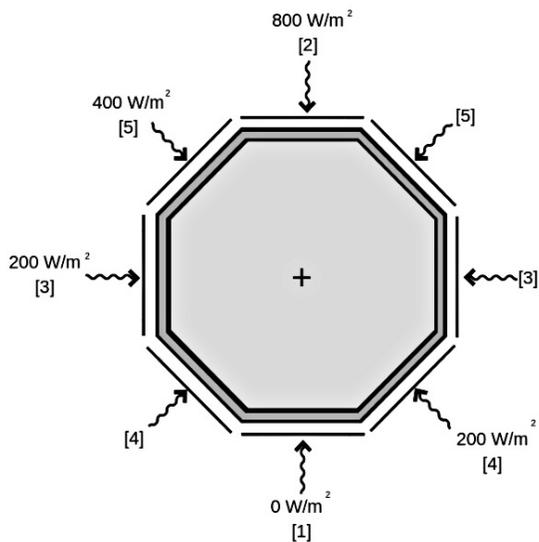


Fig. 5. Sección eficaz horizontal de un bulto con superficies planas (los números [1] a [5] indican los casos que se presentan en el cuadro 12 del Reglamento de Transporte).

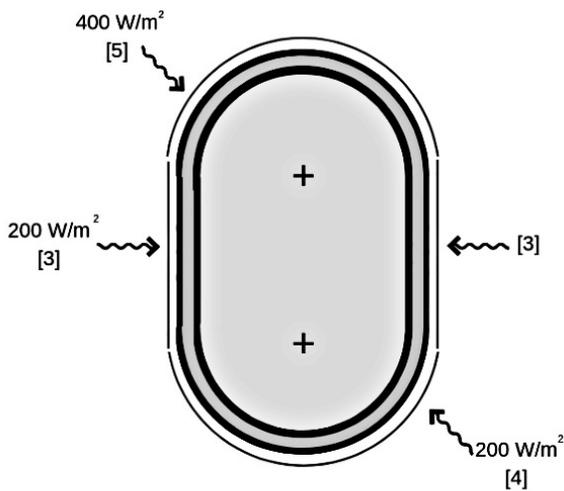


Fig. 6. Sección eficaz vertical de un bulto con superficies curvas (los números [3] a [5] indican los casos que se presentan en el cuadro 12 del Reglamento de Transporte).

y radiación de baja longitud de onda, la emitida desde la superficie del bulto se corresponde con una temperatura relativamente baja y una radiación de mayor longitud de onda. En muchos casos la capacidad de absorción será más baja que la de emisión; por ello, si se utiliza el valor más alto en ambos, se tendrá mayor margen de seguridad cuando el objetivo sea la disipación del calor. En otros casos, pueden aprovecharse las diferencias que de manera natural se producen en estas propiedades o bien puede tratarse la superficie con el fin de aprovechar esas diferencias y así reducir el efecto de la irradiación solar. Cuando las diferencias en las propiedades de la superficie se utilicen como medio de protección térmica para reducir los efectos de la irradiación solar, debería demostrarse que el sistema de protección térmica funciona adecuadamente y que se mantiene intacto en las condiciones de transporte normales. Se dispone de varias fuentes de datos publicados en que se indican las propiedades específicas de los materiales a determinados intervalos de temperatura que proporcionan valores realistas con respecto a la capacidad de emisión y absorción, por ejemplo, la referencia [37].

657.9. La evaluación de la temperatura del bulto puede realizarse mediante análisis o ensayos. Si se utilizan los ensayos, deberían realizarse con modelos a escala real. Si la fuente de radiación no es la luz solar, deberían tenerse en cuenta las diferencias entre la longitud de onda solar y la de la fuente que se utilice. El ensayo debería continuar hasta que se consiga el equilibrio térmico (o el estado estable constante o el estado estable periódico, según la fuente). Cuando sea necesario, deberían hacerse correcciones de la temperatura ambiente y el calor interno.

658.1. En general, las cubiertas que se utilizan para dar protección térmica se clasifican en dos grupos: las que experimentan un cambio químico debido al calor (por ejemplo, ablativos e intumescentes) y las que suministran una barrera de aislamiento fija (incluidos los materiales cerámicos).

658.2. Ambos grupos son susceptibles de sufrir daño mecánico. Los materiales de tipo ablativo e intumesciente son blandos y pueden dañarse al rozar contra superficies ásperas (como el hormigón o la grava) o por el movimiento de objetos duros contra ellos. Por el contrario, los materiales cerámicos son muy duros, pero normalmente son frágiles e incapaces de absorber los golpes sin que se produzca su fisuración o fractura.

658.3. Entre los incidentes usuales que no se simulan en los ensayos establecidos en los párrafos 722 a 727 del Reglamento de Transporte y que pueden causar daño a los materiales de protección térmica se incluyen: el movimiento del bulto con respecto a las superficies del vehículo con las que contacta durante el

transporte; su deslizamiento por una carretera con una superficie de grava; su deslizamiento sobre una vía de tren dañada o contra el borde de un componente metálico; su levantamiento o descenso golpeando contra la cabeza de tornillos o contra estructuras o equipo contiguo; el impacto contra otros bultos (aunque no contengan materiales radiactivos) durante su estiba o transporte. Los bultos que se someten a un ensayo de caída libre simple no sufren en su superficie daños semejantes a los debidos a la acción de rodamiento y deslizamiento que normalmente se asocia al accidente de un vehículo, y los bultos que se someten al ensayo térmico posterior pueden tener una cubierta que podría dañarse en las condiciones de accidente real.

658.4. El daño a la cubierta de protección térmica podría reducir la eficacia de la cubierta o, al menos, de parte de la superficie. El diseñador del bulto debería analizar los efectos de este tipo de daños.

658.5. También es preciso tener en cuenta los efectos del envejecimiento y de las condiciones ambientales en los materiales de protección térmica. Las propiedades de algunos materiales pueden cambiar con el transcurso del tiempo y con la temperatura, la humedad u otras condiciones.

658.6. Una cubierta puede protegerse añadiéndole materiales que favorezcan el deslizamiento o parachoques que prevengan el deslizamiento o el rozamiento contra los materiales. Una cubierta externa duradera de metal o un sobreenvase pueden ofrecer una buena protección, aunque también alterar el comportamiento térmico del bulto. También la superficie externa del bulto puede diseñarse de manera que pueda aplicarse protección térmica dentro de las cavidades del bulto.

658.7. Con la aprobación de la autoridad competente, podrán realizarse ensayos térmicos con daños arbitrarios a los materiales de protección térmica del bulto para demostrar la eficacia de la protección térmica aun cuando estos materiales queden dañados, en los que se podrá comprobar que los resultados de los daños serán conservadores.

659.1. En la edición de 1967 del Reglamento de Transporte se estableció por primera vez el concepto de la especificación de criterios de contención para bultos con grandes fuentes radiactivas en función de la pérdida de actividad con respecto a condiciones de ensayo especificadas.

659.2. El límite máximo de $10^{-6}A_2$ por hora en la tasa de emisión para bultos del Tipo B(U), tras sufrir los ensayos destinados a demostrar su capacidad para soportar las condiciones de transporte normales, se definió en un principio

considerando las condiciones más desfavorables que se podrían esperar. Se interpretó que esto se correspondía con la exposición de un trabajador a la fuga de materiales radiactivos desde un bulto transportado por carretera dentro de un vehículo cerrado. El principio de diseño consagrado en el Reglamento de Transporte establece que debería impedirse la fuga radiactiva desde un bulto del Tipo B(U). Sin embargo, como no puede garantizarse la contención absoluta, el propósito de las tasas máximas de “fuga de actividad” es permitir la especificación de procedimientos de ensayo apropiados y prácticos, que estén asociados a criterios aceptables de protección radiológica. El modelo utilizado en el cálculo de la tasa de emisión de $10^{-6}A_2$ por hora, así como las disposiciones especiales en el caso del Kr 85, se analiza en el apéndice I.

659.3. En el texto revisado de la edición de 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte se estipulaba, en relación con un determinado radionucleido en el bulto, que la tasa de dosis a 1 m de la superficie del bulto del Tipo B(U) no debía exceder de 100 veces el valor registrado antes de los ensayos relativos a las condiciones de accidente. Este requisito suponía, en el caso de bultos diseñados para transportar otros radionucleidos, una restricción poco realista en el diseño. Por ello, desde la edición de 1985 del Reglamento de Transporte se estableció una tasa de dosis máxima de 10 mSv/h, independientemente del radionucleido.

659.4. Los límites de emisión desde los bultos del Tipo B(U) no superiores a $10A_2$ para el Kr 85 y no superiores a A_2 para todos los demás radionucleidos, en el período de una semana, tras ser sometidos los bultos a los ensayos de condiciones de transporte de accidente representan una simplificación respecto de las disposiciones de la edición de 1973 del Reglamento de Transporte. Este cambio se introdujo al reconocer que el límite para el bulto del Tipo B(U) parecía ser excesivamente restrictivo, en comparación con los criterios de seguridad aplicados habitualmente en los emplazamientos de los reactores de potencia [38, 39], en especial para los casos de accidente muy grave que se prevé que sucedan con muy poca frecuencia. En otras referencias [40] se analizan en detalle las consecuencias radiológicas de una emisión de A_2 desde un bulto del Tipo B(U) en las condiciones de accidente. Teniendo en cuenta que los accidentes de la gravedad que se simulan en los ensayos de los bultos del Tipo B(U) provocarían condiciones en las cuales todas las personas que se encontraran en la inmediata cercanía de los bultos dañados serían rápidamente evacuadas o actuarían bajo el control y supervisión del personal experto en protección radiológica, será improbable que la exposición incidental de personas presentes cerca de la zona del accidente exceda de los límites anuales de dosis o de incorporación establecidos para los trabajadores en la publicación N° GSR 3 [41]. La disposición en particular para el Kr 85, único radionucleido que, como gas

noble tiene importancia práctica en las expediciones de combustible nuclear irradiado, se deriva de un análisis específico de las consecuencias dosimétricas de la exposición a una nube radiactiva, para lo que no es adecuado el uso de los modelos utilizados en el cálculo de los valores A_2 para los radionucleidos no gaseosos [42] (véase también el párr. I.74 de la presente guía de seguridad).

659.5. Los límites de emisión que figuran en el párrafo 659 del Reglamento de Transporte tienen la ventaja de indicar el resultado deseado de la contención en función del parámetro de interés primario: el peligro potencial del radionucleido concreto presente en el bulto. La desventaja del método es que la medición directa es generalmente, sobre todo si se requiere aplicarla para cada uno de los radionucleidos, en la forma física y química que se espera que tengan tras los ensayos mecánico, térmico y de inmersión. Es más factible aplicar métodos reconocidos de ensayo de fugas como los ensayos de fugas de gas (véase la norma ANSI N14.5 [35] y la norma ISO 12807 [36]). En general los ensayos de fugas miden el flujo de material que atraviesa una barrera de contención. El flujo puede contener un material trazador como un gas, líquido, polvo o el contenido real o simulado. Por tanto, debería definirse un procedimiento que correlacionara el flujo que se mida con la fuga de materiales radiactivos que se esperaría en las condiciones de referencia. Esta fuga de materiales radiactivos podrá compararse entonces con la tasa máxima de fuga de materiales radiactivos que permite el Reglamento de Transporte. Si el material trazador es un gas, se puede determinar la tasa de fuga como una tasa de flujo en unidades de masa. Si el trazador es un líquido, se puede determinar bien la tasa de fuga como tasa de flujo volumétrico o bien la fuga total expresada en unidades de volumen. Si el trazador es un polvo, se puede evaluar la fuga total expresada en unidades de masa. Finalmente, si el material trazador es radiactivo, la fuga se puede calcular expresándola en unidades de actividad. Las tasas de flujo volumétrico para líquidos y las tasas de fuga en unidades de masa para gases pueden calcularse empleando ecuaciones conocidas. Si se calcula la fuga de polvo suponiendo que este se comporta como un líquido o un aerosol, el resultado será muy conservador.

659.6. El método de cálculo básico para correlacionar el flujo medido con la fuga de material radiactivo exige el conocimiento de dos parámetros: la concentración radiactiva del contenido del bulto y su tasa de fuga volumétrica. El producto de estos dos parámetros debería ser menor que la tasa de fuga máxima permitida, expresada como una fracción de A_2 por unidad de tiempo.

659.7. Para bultos que contengan materiales radiactivos en forma líquida o gaseosa, habrá que determinar la concentración de radiactividad para convertir Bq/h (tasa de fuga de actividad) en m^3/s (tasa de fuga volumétrica) en

condiciones de transporte equivalentes. Cuando el contenido incluya mezclas de radionucleidos (R1, R2, R3, Rn, etc.) la “regla de la unidad” que se establece en el párrafo 405 del Reglamento de Transporte se utilizaría como sigue:

$$\frac{\text{Emisión potencial de R1}}{\text{Emisión permitida de R1}} + \frac{\text{Emisión potencial de R2}}{\text{Emisión permitida de R2}} + \frac{\text{Emisión potencial de Rn}}{\text{Emisión permitida de Rn}} \leq 1 \quad (6.1)$$

659.8. Teniendo en cuenta lo anterior, y suponiendo tasas de fuga uniformes en los intervalos de tiempo que se consideren, es preciso que la actividad del gas o el líquido en el bulto y la tasa de fuga volumétrica cumplan las siguientes condiciones:

Para las condiciones del párrafo 659 a) del Reglamento de Transporte:

$$\sum_i \frac{C_{(Ri)}}{A_{2(Ri)}} \leq \frac{10^{-6}}{3600L} = \frac{2,78 \times 10^{-10}}{L} \quad (6.2)$$

Para las condiciones del párrafo 659 b) ii) del Reglamento de Transporte:

$$\sum_i \frac{C_{(Ri)}}{A_{2(Ri)}} \leq \frac{1}{7 \times 24 \times 3600L} = \frac{1,65 \times 10^{-6}}{L} \quad (6.3)$$

donde

$C_{(Ri)}$ es la concentración de cada radionucleido en TBq/m³ de líquido o gas en las condiciones normales de presión y temperatura (PTN);

$A_{2(Ri)}$ es el límite especificado en el cuadro 2 del Reglamento de Transporte en TBq para ese nucleido;

L es la tasa de fuga permitida en m³/s de líquido o de gas en las condiciones PTN.

C también se puede calcular como sigue:

$$C = GS \quad (6.4)$$

donde

G es la concentración del radionucleido en kg/m^3 de líquido o de gas en las condiciones PTN;

S es la actividad específica del nucleido en TBq/kg del nucleido puro (véase el apéndice II).

o

$$C = FgS \quad (6.5)$$

donde

F es la fracción del radionucleido presente en un elemento (porcentaje/100);

G es la concentración del elemento en kg/m^3 de líquido o de gas en las condiciones PTN.

659.9. Hay que tener en cuenta que la emisión de actividad que se permite después de los ensayos de condiciones de transporte normales viene expresada en A_2 (TBq/h) y después de los ensayos de condiciones de accidente en A_2 (TBq/semana). Es improbable que tras un accidente se produzca una fuga con una tasa uniforme. El valor que interesa es la fuga total en una semana y no la tasa registrada en cualquier momento durante la semana (es decir, el bulto puede presentar una fuga a una tasa alta por un breve período tras estar expuesto a las condiciones del accidente y después no liberar prácticamente nada durante el resto de la semana mientras la emisión total no exceda de A_2 por semana).

659.10. La fuga permitida de líquido radiactivo o gas que se calcule puede ser transformada en una fuga de gas de ensayo equivalente en condiciones de referencia, teniendo en cuenta la presión, la temperatura y la viscosidad mediante las ecuaciones que representan las condiciones de flujo laminar o molecular, de lo que se dan ejemplos en la norma ANSI N14.5 [35] o la norma ISO 12807 [36]. Para los casos en que una alta presión diferencial puede provocar una alta velocidad permitida del gas, debería tenerse en cuenta que el flujo turbulento puede ser el factor más limitante. En el cálculo debería considerarse la presión ambiente reducida de 60 kPa con arreglo al párrafo 645 del Reglamento de Transporte.

659.11. La fuga de gas que se calcule con el método antes citado puede ser de cerca de $1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ a menos de $10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, en función de los valores A_2 de los radionucleidos y de su concentración en el bulto. Generalmente en la práctica, para determinar que un bulto es estanco el ensayo no precisa ser más sensible de $10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ para una diferencia de presión de $1 \times 10^5 \text{ Pa}$. Cuando la tasa de fuga permitida que se estime sea mayor de $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, se recomienda definir el valor de $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ como límite porque en la práctica se alcanza fácilmente.

659.12. El sistema de contención del diseño del bulto debería definirse explícitamente, incluido el límite de contención del sistema. La definición del sistema de contención figura en el párrafo 213 del Reglamento de Transporte y se ofrece información complementaria en los párrafos 213.1 a 213.3. En el límite de contención deberían considerarse elementos como los orificios de venteo y desagüe y las infiltraciones que podrían presentar una vía de fuga desde el sistema de contención. En el caso de los sistemas de bultos que tienen sellos dobles o concéntricos, el sello del sistema de contención debería definirse. En los ensayos de fugas de bultos deberían comprobarse todos los sellos del sistema de contención (es decir, de cierre principal, venteo y desagüe). El sistema de contención debería estar compuesto por elementos técnicos cuyo diseño esté definido en los planos de los bultos. Los componentes del sistema de contención que se utilicen para cumplir los requisitos del párrafo 659 del Reglamento de Transporte deberían incluirse en los ensayos físicos o las evaluaciones técnicas de los bultos para determinar las condiciones de transporte normales y las condiciones de accidente, según proceda. La manipulación de artículos como bolsas, cajas y botes empleados únicamente como contenedores de productos o para facilitar la manipulación del material radiactivo debería tenerse en cuenta para posibles situaciones en que se produzcan impactos negativos en el comportamiento del bulto, incluso de carácter estructural y térmico.

659.13. Cuando se diseñe un bulto para el transporte de materiales sólidos en forma de partículas, al establecer las condiciones del gas de ensayo pueden usarse datos obtenidos de ensayos sobre el paso de sólidos a través de vías de fuga discretas o de sistemas de sellado. Esto normalmente dará lugar a una tasa de fuga volumétrica permitida más alta que si se diera por sentado que el material en forma de partículas se comporta como un líquido o un aerosol. En la práctica no se esperaría que incluso las partículas de polvo de tamaño más pequeño se fuguen a través de un sello que se ha ensayado con helio a valores más restrictivos que $10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ con una diferencia de presión de $1 \times 10^5 \text{ Pa}$.

659.14. En el diseño de un bulto se definen las tasas de dosis máximas tanto en su superficie (párrs. 527 y 528 del Reglamento de Transporte) como a 1 m

de ella (como se deduce en los párrs. 523 y 526 del Reglamento de Transporte). No obstante, después de realizar los ensayos que representan las condiciones de accidente se permite un incremento de la tasa de dosis, siempre que no se supere el límite de 10 mSv/h a 1 m de la superficie cuando el bulto se carga con su actividad máxima permitida.

659.15. Cuando un diseño de bulto del Tipo B(U) requiere un blindaje, este puede consistir en diversos materiales, de los cuales algunos pueden perderse durante los ensayos de condiciones de accidente. Esto es aceptable siempre que el contenido radiactivo permanezca en el bulto y que se mantenga suficiente blindaje para asegurar que el nivel de radiación a 1 m de la “nueva” superficie externa del bulto (después de los ensayos) no supere 10 mSv/h.

659.16. Tras los ensayos se puede demostrar por diferentes medios el cumplimiento del criterio de aceptación de no más de 10 mSv/h a 1 metro de la superficie externa del bulto del Tipo B(U): mediante cálculos, ensayos en modelos, partes o componentes del bulto, ensayos en prototipos o bien combinando esos métodos. Al verificar el cumplimiento del requisito debería prestarse atención a posibles incrementos localizados de las tasas de dosis a través de fisuras o brechas, que podrían existir por un defecto de diseño o fabricación o aparecer durante los ensayos como consecuencia de los esfuerzos mecánicos o térmicos, sobre todo en los sistemas de desagüe o de venteo y en las tapas.

659.17. Cuando la verificación del cumplimiento se base en el ensayo con un modelo de bulto a escala real, la evaluación de la pérdida de blindaje se puede hacer introduciendo dentro del espécimen una fuente radiactiva que sea apropiada y seguidamente realizando mediciones en la superficie externa con un detector adecuado, por ejemplo, dosímetros fotográficos, sondas Geiger-Müller o sondas de centelleo. Para blindajes de gran espesor normalmente se utilizan sondas de centelleo, por ejemplo, de yoduro de sodio activado con talio, de pequeño diámetro (cerca de 50 mm), pues esto permite el uso de fuentes de baja actividad, normalmente de Co 60, y porque su alta sensibilidad y su pequeño diámetro efectivo permite una detección fácil y eficaz de los incrementos de tasa de dosis localizados. Si las mediciones se hacen cerca de la superficie del embalaje, deben adoptarse precauciones para realizar una medición adecuada de la tasa de dosis (véanse los párrs. 220A.5 y 220A.6). Después será necesario llevar a cabo cálculos para ajustar la tasa de dosis medida a 1 m de la superficie extrema del bulto. Por último, salvo que en el ensayo se utilice el contenido radiactivo para el que el bulto está diseñado, será preciso realizar otros cálculos para ajustar los valores medidos a los que habría existido si se hubiera utilizado el contenido definido para el diseño.

659.18. Debe tenerse especial cuidado con el uso del plomo como blindaje. El plomo tiene una baja temperatura de fusión y un alto coeficiente de dilatación y, en consecuencia, debería ser protegido de los efectos del ensayo térmico. Si estuviera contenido dentro de una cubierta de acero relativamente fina, esta podría agrietarse en el ensayo de impacto y el plomo escaparía del bulto si llegara a fundirse en el incendio. También, debido a su alto coeficiente de dilatación, el plomo podría reventar la cubierta en el ensayo térmico y perderse. En ambos casos la tasa de dosis podría ser excesiva tras el ensayo térmico. Para superar los problemas de dilatación, puede disponerse de zonas vacías que permitan la dilatación del plomo, pero debería tenerse en cuenta que cuando el plomo se enfríe existirá un hueco cuya posición será difícil de pronosticar. A este problema se añade el hecho de que la fusión del plomo no tiene por qué ser necesariamente uniforme debido a las zonas no uniformes en la estructura del embalaje y en el ambiente del fuego. En esta situación, la dilatación localizada podría producir la rotura de la cubierta y la posterior pérdida del plomo, reduciéndose así la capacidad de blindaje del bulto.

659.19. Véase el párrafo 624.4.

659.20. En las referencias [43 a 47] pueden encontrarse otras orientaciones relativas a las comprobaciones de la integridad del blindaje contra la radiación.

659.21. Los bultos diseñados para el transporte de combustible irradiado plantean un problema específico, ya que la actividad está concentrada en productos de fisión dentro de agujas de combustible que han sido selladas antes de la irradiación. En general, se esperaría que las agujas que estuvieran intactas al cargarse el bulto mantuvieran su actividad en las condiciones de transporte normales.

659.22. En las condiciones de accidente durante el transporte, las agujas de combustible irradiado podrían romperse con la posterior emisión radiactiva dentro del sistema de contención del bulto. Por tanto, para poder evaluar la estanqueidad del bulto será preciso disponer de datos sobre el inventario de productos de fisión, la tasa de posibles fallos del envainado de la aguja y sobre el mecanismo de transferencia de la actividad de la aguja dañada al interior del sistema de contención.

659.23. Los procedimientos citados para la evaluación de la estanqueidad de los bultos se aplican generalmente en dos casos:

- a) Cuando el bulto se ha diseñado para una función específica, el contenido radiactivo está claramente definido y el nivel de estanqueidad se puede establecer en la fase de diseño.
- b) Cuando se precisa utilizar un bulto ya existente con un nivel de estanqueidad ya conocido, para un propósito distinto de aquel para el que fue diseñado, hay que determinar el contenido máximo permitido de materiales radiactivos.

659.24. En el caso de una mezcla de radionucleidos que se fuguen desde un bulto del Tipo B(U), se puede calcular un valor efectivo A_2 mediante el procedimiento recogido en el párrafo 405 del Reglamento de Transporte, utilizando las actividades fraccionarias de los radionucleidos componentes, f_i , que en la forma física de la mezcla podrían realmente fugarse a través de los sistemas de sellado. No se trata forzosamente de la fracción dentro del bulto en sí mismo, ya que parte del contenido podría encontrarse en trozos sólidos demasiado grandes para pasar a través de los huecos de los sellos. En general, para la fuga de líquidos y gases, las fracciones se refieren a los radionucleidos gaseosos o que estén disueltos. No obstante, es necesario tener en cuenta el material sólido finamente dividido que se encuentre en suspensión.

659.25. Si el bulto tuviera sellos de elastómeros, la permeación de los gases o vapores podría originar tasas de fuga relativamente altas. La permeación es el paso de un líquido o de un gas a través de una barrera sólida (que no tiene vías directas de fuga) mediante un proceso de absorción-difusión. En los materiales radiactivos gaseosos (por ejemplo, los gases de fisión), la tasa de fuga por penetración se calcula mediante la presión parcial del gas y no mediante la presión en el sistema de contención. Se puede considerar también la tendencia de los elastómeros a absorber los gases.

659.26. Cabe señalar que en algunos bultos grandes las fugas muy reducidas de materiales radiactivos durante largos períodos pueden causar la contaminación de la superficie externa. Ante tal situación quizás sea necesario reducir el nivel de fuga en condiciones de transporte normales (párr. 659 a) del Reglamento de Transporte) para que no se supere el límite de contaminación superficial (párrs. 508 y 509 de Reglamento de Transporte).

660.1. A lo largo de los años se han llevado a cabo diversos análisis de riesgos para el transporte de materiales radiactivos por vía marítima, entre ellos los que se documentan en la bibliografía [48, 49]. En estos estudios se considera

la posibilidad del hundimiento en diversos lugares de una embarcación que transporte bultos con materiales radiactivos; los supuestos de accidente incluyen una colisión seguida del hundimiento o bien una colisión seguida de un incendio y después el hundimiento.

660.2. Se ha concluido en general, que la mayoría de las situaciones originarían un daño insignificante al medio ambiente y una exposición mínima a la radiación de las personas si los bultos no se recuperasen tras el accidente. Sin embargo, en el caso de que un gran bulto de combustible irradiado (o de varios bultos) se perdiera en la plataforma continental, podría producirse a largo plazo una exposición de las personas a través de la cadena alimentaria oceánica. Se ha visto que el impacto radiológico debido a la pérdida de bultos de combustible irradiado a grandes profundidades o de otros bultos con materiales radiactivos, a cualquier profundidad, sería inferior a esos valores en varios órdenes de magnitud. En estudios posteriores recogidos en la referencia [50] se ha analizado el impacto radiológico debido a la pérdida de otros materiales radiactivos cuyo transporte en grandes cantidades por vía marítima se ha venido incrementando, como es el caso del plutonio y los desechos de alta actividad. Sobre la base de estos estudios, en la edición de 1996 del Reglamento de Transporte se ha ampliado el campo de aplicación del requisito relativo al ensayo reforzado de inmersión en agua para abarcar cualquier material radiactivo transportado en grandes cantidades y no solo el combustible nuclear irradiado.

660.3. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte se incluyó el requisito de efectuar un ensayo de inmersión en agua a 200 m de profundidad para los bultos de combustible irradiado que contuvieran más de 37 PBq de actividad. A partir de la edición de 1996, el umbral que define “gran cantidad” se ha modificado por un múltiplo de A_2 , criterio que se considera más apropiado para abarcar todos los materiales radiactivos, ya que se basa en la consideración de la exposición de las personas a la radiación, tanto externa como interna, a causa de un accidente. La profundidad de 200 m se corresponde aproximadamente con la plataforma continental y con las profundidades en que los estudios mencionados en el párrafo 660.2 indicaban que las repercusiones radiológicas podrían ser importantes. La recuperación de un bulto a esta profundidad sería posible y con frecuencia conveniente. Aunque, según demuestran los análisis de riesgos, sería aceptable el impacto de la emisión de radiactividad que cabría prever en el medio ambiente, se impuso el requisito del párrafo 660 del Reglamento de Transporte porque la recuperación del bulto después del accidente sería más fácil si no se rompiera su sistema de contención y, por lo tanto, que no hubiera fuga del contenido sólido del bulto. En consecuencia, no se aplican en este caso los

límites específicos relativos a la tasa de emisión impuestos para otras condiciones de ensayo (véase el párr. 659 del Reglamento de Transporte).

660.4. En muchos diseños de bultos del Tipo B(U), el cumplimiento de lo estipulado en otras secciones del Reglamento de Transporte coadyuvará a que su sistema de contención quede completamente intacto en una inmersión en agua a 200 m de profundidad.

660.5. En los casos en que sufra menoscabo la eficacia de la contención, es posible que se produzcan fugas dentro del bulto y posteriormente hacia el exterior.

660.6. Si hay deterioro en la contención, debería asegurarse que solo se liberen los materiales radiactivos que estén disueltos. La retención en el bulto de los materiales radiactivos sólidos reduce los problemas para su recuperación.

660.7. Una inmersión prolongada podría producir la degradación de todo el sistema de contención, por lo que el requisito formulado en el párrafo 660 del Reglamento de Transporte debería considerarse aplicable, de manera conservadora, solo para períodos de inmersión de cerca de un año, durante los cuales debería llevarse a cabo fácilmente la recuperación.

661.1. El aumento de la complejidad del diseño del bulto y cualquier otra incertidumbre y posible falta de fiabilidad asociada al uso de filtros y de sistemas mecánicos de refrigeración para dar cumplimiento a lo establecido en los párrafos 653 y 659 del Reglamento de Transporte no están en consonancia con el concepto en que se sustenta la designación de un bulto del Tipo B(U) (aprobación unilateral de la autoridad competente). El método de diseño más sencillo, que no precisa filtros ni sistemas de refrigeración, goza de mucha mayor aceptación. Esto no excluye el uso de sistemas de refrigeración en las vasijas.

663.1. Una vez que queden cerrados los bultos puede ocurrir un incremento de la presión interna. Existen diversos procesos que pueden contribuir a ese incremento, entre ellos, la exposición de los bultos a una elevada temperatura ambiente, su exposición al calor del sol (es decir, a la irradiación solar), el calor producido por la desintegración radiactiva del contenido, las reacciones químicas del contenido, la radiolisis en el caso de modelos llenos de agua o bien las combinaciones de esos procesos. Se denomina presión normal de trabajo máxima (PNTM) el máximo valor de presión que puede preverse que produzca la suma de todos estos posibles contribuyentes al aumento de la presión en condiciones normales de trabajo (véanse los párrs. 229.1 a 229.4).

663.2. Dicha presión podría afectar negativamente al comportamiento del bulto y, en consecuencia, es preciso tenerla en cuenta en la evaluación del cumplimiento de los requisitos para condiciones normales de trabajo.

663.3. Análogamente, en la evaluación de la capacidad para soportar las condiciones de accidente (párrs. 726 a 729 del Reglamento de Transporte), la existencia de una presión previa podría representar condiciones más desfavorables respecto de las que tiene que demostrarse el comportamiento satisfactorio de los bultos; en consecuencia, es preciso tener en cuenta la PNTM al definir las condiciones previas al ensayo (véanse los párrs. 229.1 a 229.4). Si es justificable, se pueden emplear presiones diferentes de la PNTM, siempre que los resultados que se obtengan sean corregidos teniendo en cuenta el valor de la PNTM.

663.4. En general, los bultos del Tipo B(U) no son vasijas de presión y no encajan fácilmente en los diversos códigos y reglamentos aplicables a esas vasijas. La evaluación relativa a los ensayos establecidos para comprobar la capacidad de un bulto del Tipo B(U) para resistir, tanto las condiciones de transporte normales como las de accidente, ha de realizarse en las condiciones de PNTM. En las condiciones de transporte normales los elementos fundamentales de diseño que hay que considerar son el suministro del blindaje adecuado y la restricción de la fuga de radiactividad bajo presiones internas bastante moderadas. La situación de accidente representa un único incidente extremo, tras el que no se espera la reutilización del bulto objetivo del diseño. Este incidente extremo se caracteriza por ciclos de esfuerzos elevados de corta duración durante los ensayos mecánicos a la temperatura normal de trabajo, seguidos por un único ciclo de esfuerzos de larga duración inducido por las temperaturas y las presiones generadas durante el ensayo térmico. Ninguno de estos ciclos de esfuerzo se ajustan a la clásica pauta de carga de las vasijas de presión, cuyos diseños tienen en cuenta procesos de degradación dependientes del tiempo, tales como la fluencia, la fatiga, el crecimiento de las fisuras y la corrosión. Por esta razón no se ha incluido en el Reglamento de Transporte una referencia específica a los niveles de esfuerzo admisibles. En vez de ello, se han restringido las tensiones en el sistema de contención a valores que no afectarán a su capacidad para satisfacer los requisitos aplicables. Aunque a la larga podrían cobrar importancia otros criterios, es precisamente para retener los materiales radiactivos por lo que el sistema de contención existe. Antes de que se produzca una fractura es probable que los sistemas de contención tengan fugas, en particular en los embalajes reutilizables que dispongan de juntas selladas mecánicamente. Por tanto, debería determinarse el grado en que las tensiones en los diferentes componentes distorsionan el sistema de contención y menoscaban la integridad de su sellado. Es preciso evaluar la reducción de la compresión en los sistemas de sellado, que puede ser causada,

por ejemplo, por la dilatación de los pernos y por deterioros locales debidos a impactos y a las rotaciones de las caras de los sellos durante transitorios térmicos. Una técnica para esta evaluación consiste en pronosticar las distorsiones debidas al impacto directamente mediante los ensayos de caída con modelos a escala que sean representativos y combinarlas con las que se producirían durante el ensayo térmico utilizando un código informático reconocido y validado. A continuación pueden determinarse los efectos de la distorsión total en la integridad del sellado mediante experimentos sobre juntas de sellado que sean representativas y cuyas compresiones de sellado hayan sido reducidas de manera adecuada.

663.5. La PNTM debería calcularse con arreglo a la definición que figura en el párrafo 229 del Reglamento de Transporte.

663.6. Se recomienda que en condiciones de transporte normales las tensiones en el sistema de contención a la PNTM se encuentren en el intervalo elástico. Las tensiones en condiciones de accidente durante el transporte no deberían exceder de las que produjeran tasas de fuga superiores a las que figuran en el párrafo 659 b) del Reglamento de Transporte, ni aumentar la tasa de dosis externa más allá de lo estipulado en el párrafo 659.

663.7. Cuando se utilice el análisis para evaluar el comportamiento de un bulto, debería emplearse la PNTM como una condición límite para calcular el efecto de los ensayos que se realicen con el fin de demostrar que el bulto soporta las condiciones de transporte normales y como una condición inicial para calcular el efecto de los ensayos que demuestran la capacidad para soportar las condiciones de accidente durante el transporte.

664.1. Para que los bultos del Tipo B(U) sean aceptables para su aprobación unilateral, la PNTM no deberá superar una presión manométrica de 700 kPa.

665.1. Se debería prestar especial atención a la interacción entre los materiales radiactivos de baja dispersión y el embalaje, en las condiciones de transporte normales y de accidente. Esta interacción no debería dañar el encapsulamiento, el envainado u otra matriz ni causar la fragmentación del material hasta tal grado que pudieran cambiar las características especificadas en los requisitos del párrafo 605 del Reglamento de Transporte.

666.1. La temperatura inferior es importante a causa de los aumentos de presión que pueden producir los materiales que se expanden al congelarse (por ejemplo, el agua), a causa de la posible fractura frágil de muchos metales a bajas temperaturas (entre ellos, algunos aceros) y por la posible pérdida de

resiliencia de los materiales de sellado. De entre esos efectos, solo la fractura frágil puede producir daños irreversibles. Algunos elastómeros que tienen un buen comportamiento a altas temperaturas (por ejemplo, fluorocarbonos como los compuestos de Viton) pierden su resiliencia a temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ o inferiores. Esto puede acarrear la formación de pequeños huecos, de algunas micras de ancho, debido a la expansión térmica diferencial entre los componentes metálicos y el elastómero. Este efecto es completamente reversible. Además, la congelación de cualquier contenido de humedad y las caídas de la presión interna a bajas temperaturas podrían impedir las fugas desde la contención. Por ello puede ser aceptable en ciertos casos la utilización de estos sellos elastoméricos (véanse las refs. [51, 52]). El límite inferior de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el límite superior de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ son valores límite razonables para la temperatura ambiente que podría haber durante la mayor parte del año durante el transporte de materiales radiactivos en la mayoría de las regiones geográficas. No obstante, hay que reconocer que en ciertas zonas del mundo (regiones septentrionales y meridionales extremas en su período invernal y regiones desérticas secas en su período estival) es posible que haya temperaturas inferiores a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y superiores a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, como promedio por región y época del año, se espera que las temperaturas fuera del intervalo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocurran solo durante una pequeña fracción de tiempo.

666.2. Véanse en el apéndice V las directrices para el diseño seguro de los bultos de transporte contra la fractura frágil.

666.3. Al evaluar el diseño de un bulto con respecto a su comportamiento a baja temperatura, debería pasarse por alto el calentamiento que produzca el contenido radiactivo (el cual impediría que la temperatura de los componentes del bulto descendiera hasta el valor límite mínimo de temperatura ambiente de diseño de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esto permitirá evaluar la respuesta del bulto (incluido el comportamiento del material estructural y del material de sellado) en el límite inferior de temperatura en las condiciones de manipulación, transporte y almacenamiento en tránsito. Por otra parte, al evaluar el diseño de un bulto para determinar su comportamiento frente a la alta temperatura, debería considerarse simultáneamente el efecto del calentamiento máximo posible debido al contenido radiactivo, así como la irradiación solar y el límite máximo de temperatura ambiente de diseño de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS DEL TIPO B(M)

667.1. Se pretende que los requisitos para los bultos del tipo B(M), en cuanto a su diseño y utilización, provean un nivel de seguridad equivalente al de los bultos del Tipo B(U).

667.2. Con el acuerdo de las correspondientes autoridades competentes, son aceptables en ciertas ocasiones desviaciones de los requisitos recogidos en los párrafos 639, 655 a 657 y 660 a 666 del Reglamento de Transporte. Un ejemplo sería una reducción de los valores del intervalo de temperaturas ambiente y de los de irradiación solar adoptados con fines de diseño cuando no se consideren aplicables los requisitos relativos a los bultos del Tipo B(U) (párrs. 639, 655 a 657 y 666), o la consideración del efecto del calentamiento del contenido radiactivo.

668.1. En cuanto al contenido de algunos bultos, la presión tiende a incrementarse como resultado de los mecanismos descritos en el párrafo 663.1, y si no es aliviada podría causar a la larga la rotura del bulto o reducir su vida útil por fatiga. Para evitarlo, las disposiciones del párrafo 668 del Reglamento de Transporte permiten que en el diseño del bulto se prevea el venteo intermitente. En el Reglamento de Transporte se estipula que estos bultos con venteo sean transportados como bultos del Tipo B(M).

668.2. Con el fin de lograr una seguridad equivalente a la que se obtendría con los bultos del Tipo B(U), el diseño puede incluir requisitos que especifiquen que solo pueden ventearse materiales gaseosos, que pueden utilizarse filtros u otros sistemas de contención alternativos o que el venteo solo puede realizarse bajo la dirección de un experto cualificado en protección radiológica.

668.3. Se permite el venteo intermitente para posibilitar que un bulto alivie un exceso de presión que, en condiciones de transporte normales (véanse los párrs. 719 a 724 del Reglamento de Transporte) o cuando el bulto se somete al ensayo térmico (véase el párr. 728 del Reglamento de Transporte), pueda provocar que no se cumplan las disposiciones del Reglamento de Transporte. No obstante, cuando no se apliquen controles operacionales, la emisión radiactiva en condiciones normales y de accidente queda limitada con arreglo a lo establecido en el párrafo 659 del Reglamento de Transporte.

668.4. Dado que no existe ningún límite reglamentario especificado para la emisión de actividad en el venteo intermitente cuando se utilizan controles operacionales, debería demostrarse a la autoridad competente, utilizando un modelo que represente con la mayor exactitud posible las condiciones reales

de venteo del bulto, que los trabajadores del transporte y los miembros del público no resultarán expuestos a dosis superiores a los límites establecidos en las reglamentaciones nacionales. Para garantizar la adecuada protección de los trabajadores del transporte y los miembros del público, cuando la operación de venteo intermitente tenga lugar bajo el control de una persona cualificada en protección radiológica, la emisión puede variarse por recomendación suya, teniendo en cuenta las mediciones realizadas durante la operación.

668.5. Al considerar las exposiciones debidas al venteo intermitente habrá que tener en cuenta, como mínimo, los factores siguientes:

- a) la exposición debida a la fuga normal de actividad y a la radiación externa procedente del bulto;
- b) la ubicación y orientación del orificio de venteo con respecto al lugar de trabajo del operador y las proximidades de los demás trabajadores y miembros del público;
- c) los factores de ocupación de los trabajadores y de los miembros del público;
- d) la naturaleza física y química del material que se vendea, por ejemplo, si es gaseoso (halógenos, gases inertes), en forma de partículas, soluble o insoluble, y
- e) otras dosis en que han incurrido los trabajadores y el público.

668.6. Al evaluar la idoneidad de la operación de venteo intermitente debería tenerse en cuenta el posible detrimento de la retención y disposición final de los materiales radiactivos emitidos, en vez de permitir que se dispersen.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS DEL TIPO C

669.1. De manera análoga al bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M), el concepto del bulto del Tipo C radica en su capacidad para soportar condiciones de un accidente muy grave en el transporte aéreo sin que ocurra una pérdida de la contención o un incremento de la tasa de dosis externa hasta el punto en que se ponga en peligro a los miembros del público o a quienes participen en las operaciones de salvamento o limpieza. El bulto podría ser recuperado sin riesgos, aunque no necesariamente quedaría en condiciones de ser utilizado de nuevo.

669.2. Los límites de contenido para los bultos del Tipo C que se especifican en los certificados de aprobación tienen en cuenta los requisitos de ensayo para los bultos del Tipo C, los cuales reflejan las enormes fuerzas que podrían encontrarse en un accidente muy grave de transporte aéreo. También se requiere

que la naturaleza física y química del contenido sea compatible con el sistema de contención (párr. 614 del Reglamento de Transporte).

670.1. Una de las situaciones que podrían presentarse tras el accidente es el enterramiento del bulto. Los bultos afectados en un choque a alta velocidad podrían quedar cubiertos de escombros o quedar enterrados en el suelo. Si los bultos con contenido que genere calor quedan enterrados, podría aumentar la temperatura del bulto y su presión interna.

670.2. La demostración del cumplimiento de los requisitos especificados en el párrafo 670 del Reglamento de Transporte para condiciones de enterramiento debería hacerse mediante cálculos conservadores o códigos informáticos validados. En la evaluación de las condiciones de un bulto enterrado debería tenerse en cuenta tanto la integridad del blindaje como del sistema de contención, según los requisitos especificados en el párrafo 659 b) del Reglamento de Transporte. En el párrafo 670 del Reglamento de Transporte se especifica el requisito de que el aislamiento térmico se considere intacto, por lo que se debería prestar especial atención a la capacidad de disipación del calor y al cambio de la presión interna en las condiciones de enterramiento.

671.1. El bulto del Tipo C para el transporte aéreo tiene niveles de protección similares a los de un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) ante un accidente muy grave en otras modalidades de transporte. Para conseguir ese objetivo, en los ensayos de los bultos del Tipo B y el Tipo C se establecen los mismos requisitos sobre el aumento de la tasa de dosis externa y la pérdida de contenido en condiciones de accidente.

671.2. Véanse los párrafos 659.1 a 659.26 para obtener mayores aclaraciones sobre los requisitos relativos a la tasa de dosis y los límites de emisión de material que se aplican también a los bultos del Tipo C.

672.1. Puesto que un bulto del Tipo C podría llegar a sumergirse en un lago, mar interior o en la plataforma continental, donde sería posible su recuperación, se requiere el ensayo reforzado de inmersión para todos los bultos del Tipo C, independientemente de la actividad total que contengan.

672.2. En un accidente aéreo sobre una masa de agua un bulto podría permanecer sumergido hasta que fuera recuperado. Según la profundidad del hundimiento, el bulto podría estar sometido a grandes presiones hidrostáticas. Una cuestión a la que hay que prestar atención primordial es la posible ruptura

del sistema de contención. Además, debe considerarse la recuperación del bulto antes de que se produzca una corrosión importante.

672.3. La profundidad de 200 m requerida equivale aproximadamente a la máxima profundidad de la plataforma continental. La recuperación de un bulto desde esta profundidad sería posible y conveniente. El criterio de aceptación para el ensayo de inmersión consiste en que no se produzca la ruptura del sistema de contención. Se pueden obtener más orientaciones en los párrafos 660.2, 660.3 y 660.5 a 660.7.

672.4. Puesto que el mar representa una superficie de impacto más blanda que la tierra, es suficiente que el ensayo de inmersión se realice de manera independiente; es decir, no es preciso que se realice consecutivamente a los otros ensayos.

REQUISITOS RELATIVOS A LOS BULTOS QUE CONTENGAN MATERIALES FISIBLES

673.1. Los requisitos para los bultos que contengan materiales fisibles son requisitos adicionales que se imponen para asegurar que estos bultos mantengan la subcriticidad en condiciones de transporte normales y de accidente. También deberán cumplirse todos los demás requisitos del Reglamento de Transporte que les sean aplicables. El procedimiento para llevar a cabo el control de la criticidad en el transporte se establece en la sección V del Reglamento de Transporte. Este control se basa en los requisitos y las especificaciones del diseño que figuran en la sección VI, en los certificados de aprobación conformes a lo estipulado en la sección VIII, así como en la clasificación con arreglo a la sección IV del Reglamento de Transporte.

673.2. Los bultos que contengan materiales fisibles deben ser diseñados y transportados de manera que se evite un accidente de criticidad. Se alcanza la criticidad cuando las reacciones de fisión en cadena llegan a automantenerse debido al equilibrio entre la producción de neutrones y la pérdida de ellos por su absorción en el sistema o por su fuga de este. El diseño del bulto supone considerar muchos parámetros que influyen en la interacción neutrónica (véase el apéndice VI). En la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad hay que considerar todos estos parámetros y asegurar que el sistema permanezca subcrítico, tanto en condiciones de transporte normales como de accidente. Las evaluaciones deberían realizarse por personas cualificadas y con experiencia

en los aspectos físicos de la seguridad con respecto a la criticidad (véase el apéndice VI).

673.3. Las contingencias examinadas en el párrafo 673 a) del Reglamento de Transporte son las que normalmente pueden tener importancia y deberían ser consideradas cuidadosamente en las evaluaciones de la seguridad con respecto a la criticidad. Sin embargo, según el diseño del bulto y las condiciones especiales previstas en el transporte o manipulación, quizás sea necesario considerar otras contingencias a fin de mantener la subcriticidad en todas las condiciones verosímiles de transporte. Por ejemplo, si los resultados de los ensayos muestran que se han desplazado los materiales fisibles o los absorbentes de neutrones en el bulto, los límites de las incertidumbres alrededor de ese desplazamiento deberían considerarse en los análisis de seguridad con respecto a la criticidad. Debería tenerse presente que el prototipo que se utilice en los ensayos puede variar en ciertos detalles, en el método de fabricación y en la calidad de fabricación con respecto a los modelos de producción. Tal vez sea necesario conocer las dimensiones del prototipo tal como sería fabricado para analizar el efecto de las tolerancias en los ensayos. Es preciso tener en cuenta las diferencias entre los modelos ensayados y los modelos de producción. El objetivo es obtener la máxima multiplicación neutrónica que sea verosímil, y confirmar que la subcriticidad queda asegurada para estas condiciones.

673.4. El agua influye de diferentes maneras en la seguridad con respecto a la criticidad. Cuando se añade a los materiales fisibles o se extrae de estos, la moderación neutrónica resultante puede reducir considerablemente la cantidad de materiales fisibles necesaria para alcanzar la criticidad. Como reflector de neutrones, el agua puede incrementar o reducir el factor de multiplicación de neutrones. Capas gruesas (~30 cm) de agua de densidad nominal, situadas entre los bultos, pueden reducir la interacción neutrónica en un conjunto hasta un valor insignificante [53, 54]. En la evaluación de la criticidad deberían tenerse en cuenta los cambios en la geometría o las condiciones del bulto que podrían hacer que el agua se comporte más como moderador, como reflector, o como absorbente. Deberían considerarse todas las formas del agua, incluso la nieve, el hielo, el vapor o el agua en forma pulverizada. A veces estas formas de baja densidad (sobre todo si se considera el agua intersticial entre los bultos) producen una multiplicación neutrónica más alta que la que se observa con el agua en su densidad nominal (véase el apéndice VI). El requisito relativo a las formas de agua de baja densidad que deben considerarse no exige que tenga que darse cuenta de ellas si la hipótesis no es verosímil. Por ejemplo, la inundación selectiva de un bulto de elementos combustibles podría ser verosímil o no, según el diseño específico.

673.5. Además de verificar la infiltración o la fuga de agua, hay que tener en cuenta si es posible que haya quedado agua en la cavidad interna; por ejemplo, después de las operaciones de drenaje y secado, en las agujas rotas y en los colectores de agua. Además, durante las operaciones de secado debería prevenirse posibles errores humanos mediante verificaciones independientes y garantizarse la eficiencia del secado.

673.6. En ocasiones los absorbentes de neutrones se emplean en los embalajes o en el contenido para reducir el efecto de la moderación y la contribución a la multiplicación neutrónica resultante de la interacción entre los bultos (véase el párr. 501.8). Los materiales absorbentes de neutrones que se usan normalmente para controlar la criticidad son más eficaces cuando existe un moderador de neutrones que reduce su energía. La pérdida de eficacia de los absorbentes de neutrones, por ejemplo, por corrosión y redistribución o, como en los contenidos en forma de polvo, por depósito, puede tener un marcado efecto en el factor de multiplicación neutrónica.

673.7. El párrafo 673 a) iii) y iv) del Reglamento de Transporte se refiere a contingencias debidas a cambios dimensionales o al desplazamiento del contenido durante el transporte. Para establecer un margen de subcriticidad deben tenerse en cuenta posibles reordenaciones del embalaje o su contenido, incluidas las debidas a los ensayos en condiciones normales o de accidente. El evaluador debe prestar atención a los cambios de las dimensiones del bulto en los ensayos para analizar el efecto de estos cambios en la multiplicación neutrónica. La pérdida de materiales fisibles desde el conjunto de bultos considerado en el párrafo 685 del Reglamento de Transporte debe limitarse a una cantidad subcrítica. Esta cantidad subcrítica debería ser compatible con el tipo de contenido, con una moderación y una reflexión óptimas por agua de 20 cm de densidad nominal, a menos que ya esté presente en el bulto un moderador más eficiente. La reducción de espacios entre los bultos, que sería factible a causa de posibles daños durante el transporte, afectará directamente a la interacción neutrónica entre los bultos y por ello precisa ser objeto de examen. Debería considerarse el efecto en la reactividad de las tolerancias en las dimensiones y en la composición de los materiales. No siempre es obvio si las dimensiones o composiciones en particular deberían maximizarse o minimizarse o cómo podrían en conjunto afectar al factor de multiplicación neutrónica. Quizás se deban efectuar muchos cálculos para determinar el factor máximo de multiplicación neutrónica del sistema o considerar un margen suficiente para tener en cuenta estas contingencias.

673.8. Será preciso analizar los efectos de los cambios de temperatura (párr. 673 a) vi) del Reglamento de Transporte) en la estabilidad del material fisible o en

las propiedades relacionadas con la interacción neutrónica. Por ejemplo, los sistemas con uranio, en los que predominan los neutrones de muy baja energía (térmicos) sufren un incremento de la multiplicación neutrónica a medida que disminuye la temperatura. Los cambios de temperatura pueden influir también en la integridad del bulto. Las temperaturas que deberían tenerse en cuenta incluyen las consideradas en los requisitos sobre condiciones ambientales especificados en el párrafo 679 del Reglamento de Transporte y en los ensayos (párrs. 728 o 736 del Reglamento de Transporte, según proceda).

674.1. En el párrafo 674 del Reglamento de Transporte se establecen criterios en virtud de los cuales se pueden transportar materiales fisibles utilizando un diseño de bulto que no tenga que ser certificado por una autoridad competente para contener esas sustancias. Si la masa de nucleidos fisibles se limita a las cantidades especificadas y el bulto cumple los criterios de comportamiento señalados en el párrafo 674 a) b) o c), el bulto no presentará riesgos para el transporte a reserva de que se controle la acumulación mediante el ISC. Estas disposiciones se incorporaron en la edición de 2012 del Reglamento de Transporte y en la referencia [55] se presentan sus antecedentes técnicos y orientaciones pormenorizadas para su aplicación. En la evaluación de la seguridad realizada por varios Estados Miembros [56] se supuso que los materiales fisibles que cumplan con los límites de masa especificados en el párrafo 674 d) al cargarse en bultos que cumplan el requisito del párrafo 674 a), b) o c) también cumplirían con los requisitos de los párrafos 676 a 686 del Reglamento de Transporte, incluso en caso de una pérdida completa del embalaje en condiciones de accidente. La evaluación de la seguridad demostró que la subcriticidad se garantizaría con el mismo margen de seguridad previsto en los bultos de materiales fisibles certificados por las autoridades competentes. Aunque en ella no se especifica el embalaje que se debería utilizar (por ejemplo, del Tipo BI, del Tipo A, del Tipo B(U) o del Tipo B(M)), existen, sin embargo, requisitos de embalaje que deben ser confirmados antes de la expedición.

674.2. Los valores del ISC deducidos conforme al párrafo 674 se utilizan exactamente del mismo modo que los ISC deducidos para los diseños de bultos de materiales fisibles aprobados por las autoridades competentes. Una expedición puede constar de cualquier serie de bultos controlados mediante el ISC, independientemente de cómo se hayan deducido los ISC, solamente con sujeción a los límites de la suma de ISC señalados en el párrafo 566 c) del Reglamento de Transporte. Cada bulto se clasificará utilizando el número de las Naciones Unidas unido a la palabra “FISIBLE” y el nombre de expedición correcto basado en el cuadro 1 del Reglamento de Transporte que sea apropiado a sus propiedades radiactivas (BAE, OCS, Tipo A, Tipo B(U), Tipo B(M)). No se

consideró necesario introducir otras clasificaciones de materiales FISIBLES para los bultos que cumplieran con lo estipulado en el párrafo 674 porque el número de las Naciones Unidas y la palabra “FISIBLE”, junto con la etiqueta del ISC, indican el peligro radiactivo y la necesidad de controlar la acumulación.

674.3. Los cálculos del ISC que figuran en el párrafo 674 del Reglamento de Transporte son idénticos a los del párrafo 686 del Reglamento de Transporte pero se expresan en una forma que indica claramente la relación entre el ISC del bulto y la masa de materiales fisibles del bulto como fracción de los límites seguros de masa subcrítica (Z) del cuadro 13 del Reglamento de Transporte. Los materiales fisibles pueden transportarse en cualquier bulto adecuado para sus propiedades radiactivas sin que sea necesario obtener la aprobación de la autoridad competente en relación con los aspectos fisibles. Con todo, sería necesaria una aprobación en razón de sus propiedades radiactivas. El control de la acumulación se logra recurriendo al ISC calculado para cada bulto mediante las fórmulas señaladas en el párrafo 674, que se basan en los nucleidos fisibles presentes, su masa y el tamaño e integridad del bulto, como se establece en el párrafo 674 a) a c). El ISC total que puede ser transportado es el mismo que el utilizado para los bultos que cumplen con los diseños de bultos aprobados por la autoridad competente.

674.4. Los límites de masa y las especificaciones para los moderadores de baja absorción neutrónica como el berilio, el deuterio y el grafito o el carbono se establecen con objeto de asegurar que sean mínimos sus efectos en la multiplicación neutrónica [55, 56]. Estos límites fijados para los bultos deben respetarse durante la carga del bulto. El término “material” utilizado en la frase “1 g en cualquier cantidad de 1000 g de material” que figura en el párrafo 674 d) del Reglamento de Transporte pretendía referirse al material mineral contenido en materiales de relleno como el hormigón, la roca o la arena de los bultos de desechos, pero sobre la base de los modelos de análisis incluidos en la referencia [57, 58], también abarca todos los materiales presentes en una remesa, incluidos los embalajes y el contenido radiactivo. El berilio incorporado en aleaciones de cobre de hasta el 4 % de peso también tiene un efecto mínimo en la multiplicación neutrónica [59].

674.5. Los valores del cuadro 13 del Reglamento de Transporte son valores de masa subcrítica y fueron seleccionados para que constituyeran aproximadamente el 85 % de los valores de masa crítica calculados, suponiendo una moderación óptima de los materiales fisibles y 20 cm de reflexión de agua. Los valores del cuadro 13 del Reglamento de Transporte se aceptaron como valores de masa consensuados por expertos en criticidad de los Estados Miembros [55, 56].

674.6. El párrafo 674 a) del Reglamento de Transporte no requiere el uso de un bulto que retenga su contenido en condiciones de transporte normales y, en consecuencia, el conjunto “2N” en condiciones de accidente se ve limitado por el conjunto “5N” en condiciones de transporte normales. Por tanto, la seguridad se garantiza limitando la masa total de nucleidos fisibles en cualquier grupo de bultos que tenga un ISC total de 50 a $1/5$ de masa subcrítica a fin de proveer las mismas normas de seguridad que las aplicables a los bultos que cumplen con los diseños de bultos aprobados por la autoridad competente.

674.7. El párrafo 674 b) del Reglamento de Transporte requiere que un bulto retenga su contenido en condiciones de transporte normales. En él se limita la masa total de nucleidos fisibles de un grupo de bultos que tenga un ISC total de 50 a $1/2$ de una masa subcrítica acordada para lograr un margen adecuado de subcriticidad. El uso de $1/2$ de masa subcrítica garantizará la seguridad en condiciones de accidente en el sentido de que dos de esos grupos de bultos será subcrítico, requisito análogo al establecido en el párrafo 685 de que “2N” bultos sean subcríticos después de un accidente. Para garantizar la seguridad de cinco grupos de bultos en condiciones de transporte normales, como se estipula en el párrafo 684, es preciso limitar la masa de nucleidos fisibles en cualquier bulto y especificar un tamaño de bulto mínimo que se retendrá después de los ensayos en condiciones de transporte normales. El cálculo de los valores del cuadro 13 [56] demostró que si la masa de los bultos se limita imponiendo un ISC máximo de 10 para cualquier bulto, se requerirá entonces una dimensión mínima de bulto de 30 cm para garantizar la subcriticidad.

674.8. El párrafo 674 c) del Reglamento de Transporte abarca situaciones en que no se aplica o no puede garantizarse el criterio de la dimensión mínima del bulto de 30 cm en condiciones de transporte normales que estipula el párrafo 674 b). El límite de 15 g para un solo bulto se elige deliberadamente para que sea el mismo que se prevé en el párrafo 417 a) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte a fin de facilitar la transición de las disposiciones anteriores, donde la excepción de 15 g para los materiales fisibles se complementó con un límite por remesa. El párrafo 674 c) no permite grados de enriquecimiento más bajos y deben utilizarse los parámetros fijados en el cuadro 13 del Reglamento de Transporte para el uranio enriquecido al 100 %, independientemente de su enriquecimiento real. Si es necesario dar crédito a grados de enriquecimiento más bajos, debería obtenerse fácilmente una aprobación del diseño del bulto conforme a los párrafos 684 y 685 atendiendo a los mismos principios establecidos en las disposiciones del párrafo 674.

674.9. La falta de un requisito para la aprobación multilateral a que se hace referencia en el párrafo 674 del Reglamento de Transporte supone que las especificaciones y requisitos estarán sujetos a la autoevaluación del remitente. En lo que respecta al párrafo 674 b) y c), esto incluye la verificación de que, después de los ensayos para condiciones normales, cada bulto retiene su contenido fisible y conserva la dimensión externa mínima necesaria. Esta autoevaluación exige la vigilancia en la selección y carga del bulto, en consonancia con un sistema de gestión adecuado.

En comparación con las disposiciones anteriores para el transporte de materiales fisibles sin la aprobación de la autoridad competente del diseño de bulto, las disposiciones del párrafo 674 sustituyen el límite por remesa que debe cumplir el remitente con la fijación de un límite por medio del transporte controlado mediante el ISC (precisamente un límite para un grupo de bultos) indicado en las etiquetas de los bultos. Esto responde a las preocupaciones sobre la carga en un medio de transporte de varias remesas de bultos que superen la masa crítica mínima en ese medio de transporte.

Además, en el párrafo 674 del Reglamento de Transporte se limita la masa total de nucleidos fisibles en un bulto en comparación con las disposiciones del párrafo 417 a) ii) y iii) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte, en que solo el límite del medio de transporte limitaba la masa de nucleidos fisibles por bulto. Se llegó a la conclusión de que la aplicación de un límite del ISC de cualquier bulto ejercía más control que el que requerían las disposiciones del párrafo 417 a) i) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte.

Además, la clasificación como FISIBLE no permite el uso de bultos exceptuados, aumentando así el control durante el transporte.

Las nuevas disposiciones tienen una sólida base técnica (que abre posibilidades para un futuro desarrollo) en que todas las características necesarias para la seguridad se establecen inequívocamente en el Reglamento de Transporte. Las propiedades de cada bulto (contención y dimensiones externas mínimas en condiciones normales) se daban por sentadas anteriormente pero no se exigían. Sí se exigía el control de la acumulación de los bultos en una remesa, pero el método se dejaba a su aplicación subjetiva, que puede haber sido diferente para cada remesa. El control de la acumulación de múltiples remesas no se exigía en absoluto, aunque se suponía que existía. Es importante reconocer que la autoevaluación deficiente de los bultos transportados al aplicar lo dispuesto en el párrafo 674 no puede dar origen de manera convincente a la criticidad. La base técnica de esto puede encontrarse en la referencia [58].

Los requisitos sobre el control de la acumulación en relación con el ISC permiten transportar mayores cantidades de materiales fisibles en condiciones de uso exclusivo y con sujeción a la aprobación multilateral de la expedición (ya que la suma de los ISC de los bultos en un único contenedor o en un único medio de transporte excedería de 50; véase el párr. 825 c) del Reglamento de Transporte). En este caso, existe la opción de que las autoridades competentes sometan a un examen detenido las especificaciones empleadas en la aplicación del párrafo 674 del Reglamento de Transporte.

674.10. Las disposiciones del párrafo 674 del Reglamento de Transporte se utilizan para permitir el transporte de materiales fisibles sin tener que obtener la aprobación de la autoridad competente para un diseño de bulto específico. Cualquier forma de material fisible puede transportarse en virtud del párrafo 674; lo único que se requiere es conocer la masa de los nucleidos fisibles presentes en el bulto. A continuación se dan dos ejemplos en que podría aplicarse lo dispuesto en el párrafo 674:

i) Bultos expedidos anteriormente en virtud del párrafo 417 a) i) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte

Este ejemplo comprende el transporte de pequeñas cantidades de materiales fisibles “puros”, como pastillas de combustible de uranio enriquecido limpio. Este tipo de material no puede quedar exceptuado de la clasificación como fisible con arreglo al párrafo 417 a) o b), ni nunca sería posible obtener una excepción en virtud del párrafo 417 f), ya que no hay una cantidad suficiente de materiales no fisibles para mantener la subcriticidad si no se controla la acumulación (véase el párr. 606 del Reglamento de Transporte). Conforme al párrafo 417 c) o d), las cantidades muy pequeñas podrían quedar exceptuadas de la clasificación como materiales fisibles. Con todo, si no se cumplen estas condiciones, este material debe clasificarse como fisible y expedirse cumpliendo los límites sobre la masa de material por bulto o el número de bultos que pueden ser transportados.

Antes ese tipo de material se podía haber expedido como fisible exceptuado aplicando el antiguo límite por bulto de 15 g y el límite por remesa mencionado en el párrafo 417 a) i) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte. Esta excepción incluida en el párrafo 417 a) i) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte se ha retirado por razones de seguridad y el párrafo 674 del Reglamento de Transporte proporcionará un método para el transporte de este material sin necesidad de obtener la aprobación de la autoridad competente.

La masa de nucleidos fisibles de cada bulto se utilizaría para calcular su ISC. El bulto se transportará provisto de una etiqueta con un número apropiado de las Naciones Unidas y la palabra FISIBLE y otra etiqueta con el ISC, a reserva de los límites sobre el ISC total consignado en el cuadro 11 del Reglamento de Transporte.

El apartado específico del párrafo 674 del Reglamento de Transporte que se utilice dependerá del tipo de bulto, como se indica a continuación:

- a) Si el bulto es del Tipo BI-2 o de una categoría superior y el remitente puede demostrar una dimensión externa mínima de 30 cm en condiciones de transporte normales, el ISC puede calcularse utilizando las disposiciones del párrafo 674 b). Para el uranio enriquecido al 5 %, el ISC máximo permitido de 10 implica un límite por cada bulto de 85 g de U 235. Los límites del ISC incluidos en el cuadro 11 del Reglamento de Transporte dan por sentado que en total podrían transportarse 425 g de U 235 en un medio de transporte (es decir, en un grupo de bultos que tenga en total un ISC de 50) o bien podrían transportarse en el medio de transporte 850 g de U 235 en la modalidad de uso exclusivo con un ISC total de 100. Esto contrasta con el antiguo límite por bulto de 15 g y el límite por remesa de 290 g (o de 400 g si la moderación por agua solo puede suponerse).
- b) Si el remitente no puede demostrar la contención en condiciones de transporte normales, debe aplicar lo dispuesto en el párrafo 674 a), lo que dará por resultado mayores ISC que los definidos en el párrafo 674 b). Esto sucedería si un bulto del Tipo BI-2 hubiera sido aprobado en virtud de los ensayos alternativos previstos en el párrafo 626 y el remitente no pudiera demostrar la contención en condiciones de transporte normales (o decidiera no hacerlo). Para el uranio enriquecido al 5 % el ISC máximo de 10 da un límite de masa por bulto de 34 g de U 235 y un límite por medio de transporte de 170 g de U 235, o de 340 g en la modalidad de uso exclusivo en el medio de transporte con un ISC total de 100.
- c) Si puede demostrarse que el bulto retiene su contenido en condiciones normales de transporte pero no mantiene una dimensión mínima de 30 cm, se utilizarían las disposiciones del párrafo 674 c) con el límite explícito de masa por bulto de 15 g de U 235, con sujeción a una dimensión mínima del bulto externo de 10 cm. En el caso del uranio enriquecido al 5 %, el límite del medio de transporte es de 225 g de U 235, o de 450 g en condiciones de uso exclusivo con un ISC total de 100 en el medio de transporte.

Los límites de masa de los bultos en este ejemplo son iguales o superiores al antiguo límite de excepción de 15 g independientemente de cuál sea el apartado

del párrafo 674 del Reglamento de Transporte que se utilice. Esto es importante en lo que se refiere a los bultos que ya han sido cargados con arreglo a la antigua excepción de 15 g, ya que pueden expedirse sin reembalaje. La masa de materiales fisibles que puede transportarse en un medio de transporte se reduce en algunos casos. No obstante, hay consenso en que no resulta seguro permitir la mitad de masa crítica por remesa sin controlar el número de remesas de un medio de transporte, como posibilitaba la antigua excepción de 15 g. Hay que señalar que, si se recurre al uso exclusivo, se podrá transportar el doble de la masa de nucleidos fisibles en un medio de transporte (cuadro 11 del Reglamento de Transporte), con sujeción a la aprobación multilateral de la expedición (ya que la suma de los ISC de los bultos en un solo contenedor o en un solo medio de transporte excedería de 50 (véase el párr. 825 c) del Reglamento de Transporte).

Los materiales BAE-I se transportaban habitualmente en bultos BI-1 en consonancia con las antiguas excepciones relacionadas con los materiales fisibles. Sin embargo, debe señalarse que las disposiciones del párrafo 674 del Reglamento de Transporte no pueden aplicarse para estos materiales, ya que las expediciones se clasifican como FISIBLES y el transporte de materiales fisibles BAE-I no está permitido.

Si el enriquecimiento de uranio fuera del 1,5 % o menos, los límites por bulto y por medio de transporte serían mucho más altos que en este ejemplo.

Para el enriquecimiento de uranio superior al 5 %, los límites por bulto y por medio de transporte serán inferiores. Para el uranio enriquecido al 100 % los límites de masa por bulto serán de 18 g, 45 g y 15 g con arreglo a lo dispuesto en el párrafo 674 a), b) y c) del Reglamento de Transporte, respectivamente. Los límites por medio de transporte serán de 90 g, 225 g y 225 g para un ISC total de 50, y, en uso exclusivo, de 180 g, 450 g y 450 g, respectivamente, para un ISC total de 100. Cabe indicar que los límites por medio de transporte basados en el párrafo 674 b) y c) son idénticos en este ejemplo.

ii) Bultos expedidos anteriormente en virtud del párrafo 417 a) iii) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte

Este ejemplo comprende los materiales no fisibles contaminados por nucleidos fisibles (por ejemplo, productos de desechos) que antes se habrían transportado como materiales fisibles exceptuados aplicando la excepción de “5 g en 10 L” especificada en el párrafo 417 a) iii) de la edición de 2009 del Reglamento de Transporte. Hay consenso en el sentido de que esta excepción no proporcionaba suficiente seguridad, motivo por el que fue retirada. Es probable (pero no seguro)

que los bultos que cumplan la antigua excepción de “5 g en 10 L” contengan una masa mucho mayor de materiales no fisibles que de nucleidos fisibles. Por tanto, es probable que en muchos casos pueda obtenerse la excepción de la clasificación como materiales fisibles prevista en el párrafo 417 f). No obstante, habrá materiales para los cuales esto no sea posible o factible porque:

- a) El remitente no desea demostrar a la autoridad competente el cumplimiento de los requisitos del párrafo 606 del Reglamento de Transporte.
- b) Los materiales no pueden caracterizarse lo suficiente para demostrar el cumplimiento del requisito del párrafo 606 del Reglamento de Transporte o porque el esfuerzo necesario es excesivo. Esto será especialmente importante en el caso de los bultos que ya han sido cargados conforme a la antigua excepción de “5 g en 10 L” y en que no se tenga la certeza de su contenido, aparte de su masa fisible.
- c) Podría darse la situación en que un bulto determinado contenga cantidades suficientemente pequeñas de materiales fisibles que puedan quedar exceptuados de la clasificación como FISIBLES con arreglo al párrafo 417 c) o d). Sin embargo, estos límites son muy bajos y ello es improbable. En estos casos las disposiciones del párrafo 674 del Reglamento de Transporte proporcionan un mecanismo para transportar el material sin tener que obtener la aprobación de la autoridad competente.

Los límites de masa resultantes serán los mismos que en el ejemplo i). Los bultos cargados en virtud de la excepción anterior de “5 g en 10 L” podrían contener cantidades importantes de nucleidos fisibles. Los límites de masa por bulto resultantes de la aplicación de lo dispuesto en el párrafo 674 del Reglamento de Transporte podrían ser restrictivos, especialmente para grados de enriquecimiento superiores.

674.11. Es importante reconocer que la marca de identificación “F” no está relacionada directamente con la seguridad con respecto a la criticidad ni con la preparación para emergencias. Es solo un indicador de que existe un certificado de aprobación multilateral para los diseños de bultos de cada país en cuyo territorio se expide la remesa. La marca FISIBLE con el número de las Naciones Unidas lleva información asociada a la seguridad con respecto a la criticidad y la preparación para emergencias. Una remesa de bultos con materiales fisibles en condiciones de transporte rutinarias puede aproximarse a una masa crítica (cerca del 85 %) sin que ninguno de los bultos lleve una marca de identificación “F” (véase el párr. 674 del Reglamento de Transporte). En la edición de 2009 del Reglamento de Transporte y ediciones anteriores no se requería ningún número de clasificación de las Naciones Unidas, ninguna etiqueta con el ISC ni ninguna

marca de identificación para indicar la necesidad del control de seguridad con respecto a la criticidad de esas remesas. En ediciones posteriores se estableció el requisito de la clasificación de las Naciones Unidas como FISIBLE y las etiquetas del ISC para los bultos de esas remesas.

675.1. La subcriticidad en el transporte de la cantidad de plutonio especificada en el párrafo 675 del Reglamento de Transporte se garantiza cumpliendo el requisito relativo al control del ISC. La fórmula del ISC limitará la carga del medio de transporte a 1 kg del material especificado que, debido a la naturaleza del plutonio, contendrán los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M). Según el método de Monte Carlo, se precisan 6,8 kg de material con un 80 % de Pu 238 y un 20 % de Pu 239 en peso para alcanzar la masa crítica de una esfera metálica con reflexión total por agua (véase la ref. [60]).

Especificación del contenido para las evaluaciones de diseños de bultos que contienen materiales fisibles

676.1. Deberían elegirse adecuadamente los valores de parámetros que sean desconocidos o dudosos para alcanzar el máximo factor de multiplicación neutrónica en las evaluaciones especificadas en los párrafos 673 a 685 del Reglamento de Transporte. En la práctica se puede cumplir este requisito estableciendo suficiente margen en los criterios de aceptación para abarcar el efecto de estas incertidumbres. Las mezclas cuyo contenido no está bien definido a menudo se generan como subproductos de operaciones de producción (por ejemplo, ropas de trabajo, guantes o herramientas contaminados, residuos de análisis químicos y de otras operaciones, barreduras de suelos) y también como productos directos de operaciones de procesamiento de desechos. Es importante determinar la combinación de parámetros que produce la máxima multiplicación de neutrones. Así, en la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad, además de determinarse los parámetros desconocidos, se ha de explicar la relación entre ellos y sus efectos en la multiplicación neutrónica. Es conveniente determinar para cada parámetro el intervalo de posibles valores (a base de la información disponible y en consonancia con la naturaleza del material de que se trate) y debería comprobarse que el factor de multiplicación neutrónica correspondiente a cualquier posible combinación de valores de los parámetros satisface los criterios de aceptación. Este principio debería aplicarse también a las características de la irradiación utilizadas para determinar la composición isotópica del combustible nuclear irradiado.

676.2. Cuando sea demasiado alto el número de posibles parámetros, la probabilidad de que se consiga su valor más reactivo en condiciones de transporte

normales o de accidente podría ser muy reducida. En tales casos quizás no sea necesaria una evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad para evaluar todas las posibles combinaciones siempre que la autoridad competente tenga la certeza de que ha quedado demostrada adecuadamente la seguridad con respecto a la criticidad.

677.1. En el párrafo 677 del Reglamento de Transporte se recogen los requisitos para la evaluación de la criticidad del combustible nuclear irradiado. El principal objetivo es asegurar que el contenido de radionucleidos considerado en la evaluación de la seguridad proporcione una estimación conservadora de la multiplicación neutrónica en comparación con la carga real del bulto. En general, la irradiación de los materiales fisibles reduce el contenido de nucleidos fisibles y produce actínidos que contribuyen a la generación y absorción de neutrones y productos de fisión que contribuyen a la absorción neutrónica. El efecto combinado de estos cambios en la composición isotópica es la reducción de la reactividad respecto de la del estado no irradiado. Sin embargo, los diseños de combustible de reactores que incorporan venenos neutrónicos consumibles fijos pueden experimentar un incremento de la reactividad en períodos cortos de irradiación, en que el aumento de reactividad debido al empobrecimiento de los venenos neutrónicos fijos es mayor que la pérdida de reactividad debida al cambio en la composición del combustible. Si en la evaluación se utiliza una composición isotópica que no coincida con una condición mayor o igual que la de máxima multiplicación neutrónica durante el historial de irradiación, se debería demostrar que la composición de los materiales fisibles considerada da por resultado una multiplicación neutrónica conservadora para las características conocidas del combustible nuclear irradiado que será cargado en el bulto.

677.2. A menos que en la evaluación de la criticidad pueda demostrarse que se prevé la máxima multiplicación de neutrones durante el historial de irradiación verosímil, será necesario realizar mediciones con anterioridad a la expedición para confirmar que las características de los materiales fisibles cumplen los criterios (por ejemplo, exposición total y desintegración) especificados en la evaluación (véase el párr. 503.8). Este requisito de efectuar mediciones antes del transporte es compatible con el requisito de asegurar la presencia de venenos neutrónicos fijos (véase el párr. 501.8) o extraíbles (véase el párr. 503.4), según establezca el certificado de aprobación del diseño del bulto, que son utilizados para el control de la criticidad. En el caso del combustible nuclear irradiado, el empobrecimiento de los nucleidos fisibles y la acumulación de actínidos absorbentes de neutrones y productos de fisión pueden constituir un elemento de control de la criticidad. Si se cuenta con esto para confirmar la subcriticidad, debería asegurarse suficiente quemado.

677.3. Normalmente, la máxima multiplicación de neutrones ocurre en el combustible no irradiado. Sin embargo, una forma de prolongar el tiempo de permanencia de los materiales fisibles en el reactor es distribuir en él venenos neutrónicos fijos consumibles que permitan mantener inicialmente un contenido mayor de nucleidos fisibles, que de otra manera no sería posible. Los diseños de combustible con venenos consumibles pueden experimentar un incremento de la reactividad en períodos cortos de irradiación, en que el aumento de reactividad debido al empobrecimiento de los venenos neutrónicos fijos es mayor que la pérdida de reactividad debida al cambio de la composición del combustible. No será preciso realizar ninguna medición antes de la expedición cuando ese combustible se haya considerado como no irradiado y desprovisto de venenos en la evaluación con respecto a la criticidad, ya que esto representará una estimación conservadora de la máxima multiplicación neutrónica en el historial de irradiación. En tal caso solo se aplicarían los requisitos del párrafo 677 a) del Reglamento de Transporte y no los recogidos en el párrafo 677 b). Asimismo, el combustible de los reactores reproductores y de los reactores de producción puede tener factores de multiplicación que podrían incrementarse con el tiempo de irradiación.

677.4. Para la evaluación del factor de multiplicación neutrónica en el combustible nuclear irradiado se han de considerar las mismas normas de funcionamiento que se establecen para el combustible nuclear no irradiado (véanse los párrs. 680 a 685 del Reglamento de Transporte). Sin embargo, en la evaluación para el combustible nuclear irradiado se tiene que determinar la composición isotópica y su distribución en consonancia con la información disponible del historial de irradiación. La composición isotópica de un determinado conjunto combustible de un reactor depende, en diferentes grados, de la abundancia inicial de radionucleidos, de la energía específica, del historial de funcionamiento del reactor (incluida la temperatura del moderador, el boro soluble, la posición del conjunto del reactor), de la presencia de venenos consumibles o de barras de control y del tiempo de enfriamiento después de la descarga. En contadas ocasiones, por no decir nunca, los que realizan el análisis de seguridad conocen todos los parámetros de irradiación. Por ello, tienen que considerarse los requisitos del párrafo 676 en relación con los parámetros desconocidos. Normalmente la información disponible para la caracterización del combustible nuclear irradiado es la composición inicial del combustible, el quemado medio del conjunto y el tiempo de enfriamiento. Los datos del historial de funcionamiento, la distribución axial del quemado y la presencia de venenos consumibles han de basarse, normalmente, en el conocimiento genérico del comportamiento del reactor en relación con un determinado combustible nuclear irradiado. En el párrafo 676 se especifica que la composición y distribución

de los radionucleidos, determinados utilizando los parámetros de irradiación conocidos y supuestos, así como el tiempo de desintegración, darán lugar a una estimación conservadora del factor de multiplicación neutrónica, una vez sean tenidos en cuenta los sesgos e incertidumbres. Tal conservadurismo puede demostrarse omitiendo todos los productos de fisión o los actínidos absorbentes o parte de ellos, o suponiendo un quemado inferior al real. La distribución axial de los radionucleidos del conjunto combustible irradiado es muy importante porque la región con un quemado menor en los extremos del conjunto puede causar un incremento de la reactividad, en comparación con un conjunto en el que se supone el quemado medio para la composición isotópica en toda su altura axial. En las referencias [61 a 64] se puede encontrar más información sobre este tema.

677.5. Los métodos de cálculo que se utilicen para determinar la multiplicación neutrónica deberían validarse preferentemente en relación con datos de mediciones aplicables (véase el apéndice VI). En el caso del combustible nuclear irradiado esta validación debería incluir la comparación con datos de mediciones de radionucleidos. Los resultados de esta validación deberían considerarse para determinar las incertidumbres y los sesgos asociados normalmente a la multiplicación neutrónica calculada. Las secciones eficaces de los productos de fisión pueden tener importancia en el análisis de la seguridad con respecto a la criticidad del combustible nuclear irradiado. No se ha hecho tanto hincapié en las mediciones y evaluaciones de las secciones eficaces de los productos de fisión en intervalos amplios de energía como en las de los actínidos. Por ello, los que realicen el análisis de seguridad deberían examinar y justificar la idoneidad de las secciones eficaces de los productos de fisión que se han utilizado en la evaluación.

Requisitos en cuanto a geometría y temperatura

678.1. Estos requisitos se aplican a la evaluación de la criticidad de bultos en condiciones de transporte normales. La disposición de no permitir la entrada de un cubo de 10 cm tiene importancia cuando se utilizan tipos de bultos abiertos o del tipo “jaula”. Actualmente puede considerarse que este requisito sirve de criterio para evaluar la integridad del contenedor externo del bulto. Existen bultos con características similares a las del diseño tipo jaula, pero cuyos salientes más allá de la cubierta cerrada del embalaje no se incluyen para garantizar el espaciado entre las unidades de un conjunto de bultos sino, por ejemplo, para limitar los efectos del impacto. Cuando no se dé crédito a esas características para el espaciado entre unidades, no debería considerarse que un cubo de 10 cm, situado detrás o entre los salientes (pero fuera de la cubierta cerrada del embalaje), ha “entrado” en el bulto.

679.1. Con el acuerdo de la autoridad competente, en algunas ocasiones son aceptables desviaciones del intervalo de temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando la evaluación de los aspectos fisibles del bulto se vea afectada negativamente por las temperaturas ambiente, en relación con su respuesta ante los ensayos reglamentarios, la autoridad competente debería especificar en el certificado de aprobación el intervalo de temperaturas para el que se aprueba el bulto.

Evaluación de un bulto por separado

680.1. Debido a que el agua puede tener un efecto considerable en la multiplicación neutrónica de los materiales fisibles, la evaluación de la criticidad de un bulto exige que se considere que el agua se encuentra presente en todos los espacios vacíos del bulto hasta el punto de provocar la máxima multiplicación neutrónica. Puede exceptuarse la presencia de agua en los espacios vacíos que estén protegidos por elementos especiales que eviten la entrada del agua en las condiciones de accidente durante el transporte. Deberían tenerse en cuenta condiciones de transporte verosímiles que podrían producir inundaciones preferentes de los bultos e incrementar la multiplicación neutrónica.

680.2. Para que el bulto se considere “estanco”, a los efectos de prevenir la entrada o la salida del agua desde el punto de vista de la seguridad con respecto a la criticidad, han de considerarse los efectos de los ensayos que representan tanto las condiciones de transporte normales como las de accidente. En el informe de evaluación de la seguridad deberían establecerse criterios, que debería aceptar la autoridad competente, sobre la estanqueidad en caso de fuga respecto de cada diseño de los bultos. Debería demostrarse que estos criterios pueden cumplirse en los ensayos y en los modelos de producción.

680.3. La multiplicación neutrónica en los bultos que contienen hexafluoruro de uranio es muy sensible a la cantidad de hidrógeno en el bulto. A causa de esa sensibilidad, se ha puesto especial interés en restringir la entrada de agua en el bulto. Las personas responsables de los ensayos, la preparación, el mantenimiento y el transporte de estos bultos deberían ser conscientes de la sensibilidad de la multiplicación neutrónica en el hexafluoruro de uranio, incluso ante pequeñas cantidades de agua, y deberían asegurar que se respeten estrictamente las características especiales que aquí se definen.

680.4. En relación con los bultos que contienen hexafluoruro de uranio, con uranio enriquecido en U 235 hasta un máximo del 5 % en masa, los requisitos consignados en el párrafo 680 b) ii) del Reglamento de Transporte pueden cumplirse utilizando un sistema de llenado de bultos de hexafluoruro de

uranio a través de todo el proceso de llenado u otros ensayos aceptados por la autoridad competente.

680.5. Deberían definirse explícitamente los componentes del embalaje en que se confía para preservar la seguridad con respecto a la criticidad. Los componentes del embalaje que se utilicen para mantener la contención y el control de la geometría del material fisible deberían comprender elementos técnicos cuyo diseño esté definido en los planos del embalaje. Estos componentes deberían incluirse en los ensayos físicos o las evaluaciones técnicas del bulto con respecto a las condiciones de transporte normales y las condiciones de accidente hipotéticas, según proceda (véase también el párr. 681.1). Los artículos de manipulación como bolsas, cajas y botes utilizados únicamente como contenedores de productos o para facilitar la manipulación del material radiactivo, deberían tenerse en cuenta para posibles situaciones en que puedan producirse impactos negativos en el comportamiento del bulto, incluso desde el punto de vista estructural, térmico y de la criticidad.

680.6. Es subcrítica cualquier cantidad de hexafluoruro de uranio homogéneo, con un enriquecimiento máximo del 5 % en masa de U 235 y menos del 0,5 % de impurezas (teniendo en cuenta los materiales hidrogenados). Las impurezas en el hexafluoruro de uranio enriquecido comercial están limitadas al 0,5 % [65] con arreglo a la norma ASTM-C996-90 (véase también el párr. 420.1).

680.7. El requisito de prevenir no solo la fuga, sino también el contacto físico de la válvula y el tapón, se basa en aspectos de seguridad con respecto a la criticidad y, conjuntamente con un alto grado de control de calidad, se considera como un tipo de característica especial.

681.1. La parte del bulto y del contenido que constituye el sistema de confinamiento (véanse los párrs. 209.1 y 680.5) tiene que ser considerada cuidadosamente a fin de asegurar que el sistema de confinamiento incluya la parte del bulto que mantiene la configuración de los materiales fisibles. En el Reglamento de Transporte se especifica el agua como material reflector por sus propiedades reflectoras relativamente buenas y por su abundancia natural. La especificación de 20 cm de reflexión por agua se ha seleccionado como valor práctico (10 cm adicionales de reflexión por agua añadirían menos de un 0,5 % de reactividad a una placa infinita de U 235) que está muy próximo a las peores condiciones de reflexión que pueden presentarse habitualmente en el transporte. En la evaluación debería considerarse el sistema de confinamiento reflejado por 20 cm de agua con densidad nominal y el sistema de confinamiento reflejado por el material del embalaje que lo rodea. Para asegurar la subcriticidad debería tomarse como base la situación que dé

lugar a la máxima multiplicación neutrónica. La razón por la que han de tenerse en cuenta ambas situaciones es que es posible que durante las operaciones de carga rutinarias, o las posteriores a un accidente, el sistema de confinamiento se encuentre fuera del embalaje y sea reflejado por el agua.

681.2. En los párrafos 681 y 682 del Reglamento de Transporte se estipula como mínimo una subcriticidad con reflexión total por agua de un bulto determinado en condiciones rutinarias, normales y de accidente. El requisito del párrafo 680 del Reglamento de Transporte se habrá de cumplir en relación con la presencia de agua dentro del bulto. Es probable que la autoridad competente también exija la subcriticidad de los componentes del embalaje interior junto con los materiales fisibles de un bulto determinado y con una reflexión total por agua en condiciones de transporte rutinarias. Esto abarcaría las situaciones en que fuera posible extraer los componentes interiores del embalaje junto con el material fisible y también se aplicaría a los sistemas con barreras múltiples.

682.1. Los requisitos para demostrar la subcriticidad de un bulto independiente se especifican con objeto de determinar la máxima multiplicación neutrónica tanto en las condiciones de transporte normales como en las de accidente. En la evaluación deben tenerse en cuenta los resultados de los ensayos del bulto que se estipulan en los párrafos 684 b) y 685 b) del Reglamento de Transporte así como las condiciones en que puede suponerse la ausencia de penetración o fuga de agua, como se indica en el párrafo 680 del Reglamento de Transporte.

682.2. Cabe señalar que “subcrítico” significa que la máxima multiplicación neutrónica, ajustada de manera adecuada incluyendo un sesgo de cálculo, las incertidumbres y un margen de subcriticidad, debería ser menor de 1,0. Véanse en el apéndice VI recomendaciones sobre el procedimiento de evaluación y sobre cómo determinar un límite superior subcrítico.

683.1. Es posible que los accidentes en la modalidad aérea sean considerablemente más graves que en la terrestre. Por tal razón, en la edición de 1996 del Reglamento de Transporte se establecieron requisitos más estrictos en relación con los bultos diseñados para el transporte de materiales fisibles por vía aérea.

683.2. Los requisitos para bultos que se transporten por vía aérea abarcan la evaluación de la criticidad de un bulto por separado. En el párrafo 683 a) del Reglamento de Transporte se estipula que un bulto, sin infiltración de agua, ha de permanecer subcrítico tras cumplir los requisitos de ensayo definidos para los bultos del Tipo C en el párrafo 734 del Reglamento de Transporte. Este requisito

se establece para excluir una aproximación rápida a la criticidad derivada de posibles cambios geométricos en el bulto; por ello no se considera la infiltración de agua. Se suponen condiciones de reflexión de al menos 20 cm de agua de densidad nominal, ya que ello permite obtener una aproximación conservadora de las condiciones de reflexión que podrían encontrarse con probabilidad. Dado que no se supone la infiltración de agua, solo es preciso considerar el bulto y su contenido al establecer las condiciones geométricas del bulto tras los ensayos especificados. Al especificar las condiciones geométricas del bulto en la evaluación de la criticidad pueden tenerse en cuenta las condiciones del bulto tras los ensayos definidos en el párrafo 734 a) y b) realizados con distintos especímenes de bultos. Las condiciones que se establezcan deberían ser conservadoras, pero compatibles con los resultados de los ensayos. Cuando no se puedan confirmar las condiciones del bulto tras los ensayos, deberían formularse las hipótesis más desfavorables en cuanto a la configuración geométrica del bulto y su contenido, teniendo en cuenta todos los componentes moderadores y estructurales del embalaje. Las hipótesis deberían ser acordes con los peores efectos potenciales de los ensayos mecánico y térmico; y para el análisis deberían considerarse todas las posibles orientaciones del bulto. Hay que demostrar la subcriticidad después de considerar debidamente aspectos como la eficiencia del moderador, la pérdida de los absorbentes de neutrones, la redistribución de los componentes del embalaje y del contenido, los cambios geométricos y los efectos de la temperatura. Deberían tenerse en cuenta posibles aumentos de la reactividad que pudieran ocurrir a causa de una pérdida de moderador del bulto. Cuando no se disponga de información adecuada sobre las condiciones del bulto después de cumplirse los requisitos de ensayo de los bultos del Tipo C mencionados en el párrafo 734, deberían tenerse en cuenta configuraciones que se haya demostrado que den lugar a una reactividad conservadora. Ejemplos de configuraciones que podrían tenerse en cuenta son los siguientes:

- a) un volumen esférico de contenido del bulto rodeado de 20 cm de agua;
- b) un volumen esférico de contenido del bulto rodeado de material de embalaje y reflejado por 20 cm de agua, y
- c) una mezcla esférica de contenido del bulto y material de embalaje rodeada de 20 cm de agua.

Puede haber otros ejemplos más conservadores.

683.3. En el párrafo 683 b) del Reglamento de Transporte se estipula que debe considerarse la penetración o fuga de agua del bulto de que se trate a menos que las barreras múltiples contra el paso del agua permanezcan estancas tras los ensayos de los párrafos 733 y 734. Por tanto, en el caso de los bultos que

se transporten por vía aérea, los ensayos especificados en el párrafo 685 b) deben ser sustituidos por los estipulados en el párrafo 683 b) para determinar la estanqueidad que se establece en el párrafo 680 a).

683.4. En resumen, en el párrafo 683 a) del Reglamento de Transporte se establece una evaluación adicional para bultos que se transporten por vía aérea, mientras que el párrafo 683 b) complementa el párrafo 680 a) que habrá de aplicarse en la evaluación del párrafo 682 relativa a los bultos transportados por vía aérea.

Evaluación de los conjuntos de bultos en condiciones normales de transporte

684.1. En la evaluación se deben considerar todas las disposiciones de los bultos para determinar el número de cinco veces N bultos que es subcrítico, ya que quizás la interacción neutrónica que ocurra entre los bultos del conjunto no sea igual en las tres dimensiones.

684.2. La evaluación podría entrañar el cálculo de grandes conjuntos finitos para los que existe una carencia de datos experimentales. Por ello debería considerarse un margen adicional específico además de los otros márgenes normalmente permitidos para tener en cuenta los efectos aleatorios y sistemáticos en relación con los valores calculados del factor de multiplicación neutrónica.

684.3 Cabe observar que “subcrítico” significa que la multiplicación neutrónica máxima, ajustada debidamente mediante la inclusión de un sesgo de cálculo, incertidumbres y un margen de subcriticidad, debería ser menor de 1,0. Véanse en el apéndice VI las recomendaciones sobre el procedimiento de evaluación y sobre cómo determinar un límite superior subcrítico.

684.4. Tras el ensayo de aspersión, puede suceder que el agua se filtre a un espacio vacío del bulto. El intervalo de cantidad de agua filtrada debería tenerse en cuenta después para determinar el factor de multiplicación neutrónica máximo del conjunto de bultos.

Evaluación de conjuntos de bultos en condiciones de accidente durante el transporte

685.1. A partir de la edición de 1996 del Reglamento de Transporte, los ensayos para las condiciones de accidente durante el transporte han de incluir el ensayo de aplastamiento del párrafo 727 c) para bultos de poco peso (< 500 kg) y de baja

densidad ($< 1000 \text{ kg/m}^3$). Los criterios para efectuar el ensayo de aplastamiento, en lugar del ensayo de caída del párrafo 727 a), son los mismos aplicados a los bultos que tienen un contenido (que no esté constituido por materiales radiactivos en forma especial) mayor de $1000A_2$ (véase el párr. 659 b) del Reglamento de Transporte).

685.2. En el párrafo 685 c) del Reglamento de Transporte se establece una importante restricción sobre los materiales fisibles que puedan escapar del bulto en condiciones de accidente. Debería tomarse todo tipo de precauciones para evitar la emisión de los materiales fisibles desde el sistema de contención. La diversidad de configuraciones posibles de los materiales fisibles que escapan desde el sistema de contención y la posibilidad de que posteriormente se produzcan cambios químicos o físicos, exigen que la cantidad total de materiales fisibles que escapen del conjunto de bultos sea menor que la masa crítica mínima para ese tipo de material fisible, que las condiciones de moderación sean óptimas y que haya una reflexión por 20 cm de agua de densidad nominal. Además, deberían considerarse las interacciones neutrónicas entre el material fisible del que se ha producido el escape y el conjunto de bultos en condiciones de accidente. Debería suponerse que de cada uno de los bultos del conjunto escapa la misma cantidad de material. La dificultad radica en demostrar cuál sería la máxima cantidad que podría escapar del sistema de contención. Según los componentes del embalaje que definan el sistema de contención y el sistema de confinamiento, es posible que los materiales fisibles escapen del sistema de contención, pero no del sistema de confinamiento. En tales casos puede haber suficientes mecanismos para el control de la criticidad. Sin embargo, la finalidad del párrafo 685 c) es asegurar que se considere debidamente cualquier posible escape de materiales fisibles desde el bulto en que debe suponerse la pérdida del control de la criticidad.

685.3. En las condiciones de evaluación que se consideren deberían incluirse también las derivadas de sucesos menos graves que los representados en las condiciones de ensayo. Por ejemplo, es posible que un bulto permanezca subcrítico tras el ensayo de caída desde 9 m, pero que alcance la criticidad en condiciones que representen un impacto menos grave.

685.4. Véanse los párrafos 684.1 a 684.3.

685.5. Tras el ensayo de inmersión puede suceder que el agua se filtre a un espacio vacío del bulto. Después debería tomarse en cuenta la cantidad de agua filtrada para determinar el factor de multiplicación neutrónica máximo del conjunto de bultos.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SEGURIDAD CON RESPECTO A LA CRITICIDAD (ISC) DE LOS BULTOS

686.1. En el párrafo 686 del Reglamento de Transporte se establece el procedimiento para obtener el ISC de un bulto. El valor N usado para determinar el ISC debe ser tal que un conjunto de bultos basado en este valor sería subcrítico en las condiciones establecidas en los párrafos 684 y 685 del Reglamento de Transporte. Sería incorrecto suponer que una condición se cumpliría si solo la otra se hubiera sometido a un análisis detallado. Los resultados de los ensayos especificados podrían originar un cambio en el embalaje o el contenido que podría afectar al sistema de moderación o a la interacción neutrónica entre los bultos y causar un cambio manifiesto en el factor de multiplicación neutrónica. Por lo tanto, no se puede suponer el valor límite de N para condiciones normales o de accidente si antes no se ha realizado una evaluación de ambas condiciones.

686.2. Pueden utilizarse valores preliminares de N con objeto de determinar los valores de N para conjuntos en condiciones de transporte normales (véase el párr. 685 del Reglamento de Transporte), y en condiciones de accidente (véase el párr. 685 del Reglamento de Transporte). Debería someterse a ensayo cualquier conjunto de cinco veces N bultos, cada uno en las condiciones especificadas en el párrafo 684 b) a los fines de verificar si es subcrítico; asimismo, debería comprobarse si es subcrítico cualquier conjunto de dos veces N bultos, cada uno en las condiciones especificadas en el párrafo 685 b). Si esos conjuntos son subcríticos, el valor seleccionado de N podrá utilizarse para determinar el ISC del bulto. Si la evaluación indica que el valor seleccionado de N no da por resultado un conjunto subcrítico, en todas las condiciones requeridas, debería reducirse N y deberían repetirse las evaluaciones de los párrafos 684 y 685 para garantizar la subcriticidad. Otro enfoque más exhaustivo es determinar los dos valores de N que satisfacen por separado los requisitos de los párrafos 684 y 685 y después utilizar el más pequeño de estos dos valores para determinar el valor del ISC. Este último enfoque se considera más minucioso porque constituye una evaluación limitativa para cada una de las condiciones del conjunto: normales y de accidente.

686.3. El ISC para un bulto, sobreenvase o contenedor debería redondearse hasta la primera cifra decimal superior. Por ejemplo, si el valor de N es 11, entonces $50/N$ es 4,5454 y ese valor debería redondearse hasta obtener un ISC de 4,6. El ISC no debería redondearse a la baja. Para evitar las desventajas de este procedimiento de redondeo, que puede dar por resultado la reducción del número de bultos que pueden ser transportados (en el ejemplo anterior el número sería 10), puede tomarse el valor exacto del ISC.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN VI

- [1] GORDON, G., GREDINGH, R., Leach Test of Six 192-Iridium Pellets Based on the IAEA Special Form Test Procedures, AECB Rep. Info-0106, Atomic Energy Control Board, Ottawa (1981).
- [2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Radiological protection — Sealed radioactive sources — General requirements and classification, ISO 2919:2012, ISO, Geneva (2012).
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Radiation Protection — Sealed Radioactive Sources — Leakage Test Methods, ISO 9978:2020, ISO, Geneva (2020).
- [4] ASTON, D., BODIMEADE, A.H., HALL, E.G., TAYLOR, C.B.G., The Specification and Testing of Radioactive Sources Designated as ‘Special Form’ Under the IAEA Transport Regulations, CEC Study Contract XVII/322/80.6, Rep. EUR 8053, CEC, Luxembourg (1982).
- [5] WOODCOOK, E.R., PAXTON, H.C., “The criticality aspects of transportation of fissile materials”, Progress in Nuclear Energy, Series IV, Vol. 4, Pergamon Press, Oxford and New York (1961) 401–430.
- [6] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Exemption from Classification as Fissile Material, 10 CFR 71.15, US Government Printing Office, Washington, DC (2013).
- [7] PARKS, C.V., HOPPER, C.M., LICHTENWALTER, J., Assessment and Recommendations for Fissile-Material Packaging Exemptions and General Licenses Within 10 CFR Part 71, NUREG/CR-5342 (ORNL/TM-13607), Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1998).
- [8] REICHE, I., KRÖGER, H., “Criticality calculations for uranium of various enrichments at low concentrations embedded in materials of low neutron absorption”, paper presented at Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety, St. Petersburg, 2007.
- [9] COOKE, B., “Trunnions for spent fuel element shipping casks”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89 (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).
- [10] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, American National Standard for Special Lifting Devices for Shipping Containers Weighing 10 000 Pounds (4,500 kg) or More for Nuclear Materials, Rep. ANSI N14.6-1978, ANSI, New York (1978).
- [11] KERNTECHNISCHER AUSSCHUSS, Load Attaching Points on Loads in Nuclear Power Plants, KTA 3905, KTA Geschäftsstelle, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Germany (2012).
- [12] SULLIVAN, G. J., STAHLER, U. and FREEMAN, E. L., “Aging Management Assessment of Type B Transportation Packages”, 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2004), Berlin, Germany, September 20–24, 2004.
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology Guidance for Preparation of a Safety Case for a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel, IAEA-TECDOC-1938, IAEA, Vienna (2021).

- [14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Nuclear Energy — Packagings for the transport of uranium hexafluoride (UF₆), ISO 7195: 2020, ISO, Geneva (2020).
- [15] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, “Nuclear Materials – Uranium Hexafluoride – Packaging for Transport”, ANSI N14.1-2012, ANSI, New York (2012).
- [16] ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, *Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea*, edición de 2021–2022, OACI, Montreal, 2020.
- [17] NACIONES UNIDAS, *Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas. Reglamentación Modelo*, Vigésimosegunda edición revisada, ST/SG/AC.10/1/Rev. 22, 2 vols, Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra, 2021.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Series 1 Freight Containers — Specification and Testing — Part 3 Tank Containers for Liquids, Gases and Pressurized Dry Bulk, ISO 1496-3:1995, ISO, Geneva (1995) and subsequent Amendment 1:2006.
- [19] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, COMITÉ DE TRANSPORTES INTERIORES, *Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)*, edición de 2021, CEPE, Nueva York y Ginebra, 2020.
- [20] INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION FOR INTERNATIONAL CARRIAGE BY RAIL (OTIF), Regulations Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID), 2021 Edition, OTIF, Bern (2020).
- [21] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Series 1 Freight Containers – Specifications and Testing – Part 1: General Cargo Containers for General Purposes, ISO 1496-1: 2013, ISO, Geneva (2013) and subsequent Amendment 1:2016.
- [22] ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Convención Internacional sobre la Seguridad de los Contenedores, 1972 (CSC 1972)*, edición de 2014, OMI, Londres, 2014.
- [23] MALLET, A.J., ORGDP Container Test and Development Program: Fire Tests of UF₆-Filled Cylinders, K-D-1984, Union Carbide Corp., Oak Ridge, TN (1966).
- [24] RINGOT, C., HAMARD, J., “The toxic and radiological risk equivalence approach in UF₆ transport”, UF₆ – Safe Handling, Processing and Transporting (Proc. Conf. Oak Ridge, TN, 1988), Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, TN (1988) 29–36.
- [25] BIAGGIO, A.L., LOPEZ VIETRI, J.R., “Uranium hexafluoride in transport accidents”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 86 (Proc. Int. Symp. Davos, 1986), IAEA, Vienna (1987) 381–387.
- [26] SAROUL, J., et al., “UF₆ transport container under fire conditions, experimental results”, Uranium Hexafluoride: Processing, Handling, Packaging, Transporting (Proc. 3rd Int. Conf. Paducah, KY, 1995), Institute of Nuclear Materials Management, Northbrook, IL (1995).
- [27] PINTON, E., DURET, B., RANCILLAC, F., “Interpretation of TEN2 experiments”, *ibid.*
- [28] WILLIAMS, W.R., ANDERSON, J.C., “Estimation of time to rupture in a fire using 6FIRE, a lumped parameter UF₆ cylinder transient heat transfer/stress analysis model”, *ibid.*

- [29] WATARU, M., et al., “Safety analysis on the natural UF₆ transport container”, *ibid.*
- [30] LYKINS, M.L., “Types of corrosion found on 10- and 14-ton mild steel depleted uranium UF₆ storage cylinders”, *ibid.*
- [31] BLUE, S.C., “Corrosion control of UF₆ cylinders”, *ibid.*
- [32] CHEVALIER, G., et al., “L’arrimage de colis de matières radioactives en conditions accidentelles”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 86 (Proc. Int. Symp. Davos, 1986), IAEA, Vienna (1987).*
- [33] UNITED STATES ENRICHMENT CORPORATION, Reference USEC-651, USEC, Washington, DC (2006).
- [34] BRITISH STANDARDS INSTITUTE, *Guide to the Design, Testing and Use of Packaging for the Safe Transport of Radioactive Materials, BS 3895:1976, GR 9, BSI, London (1976).*
- [35] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, *American National Standard for Leakage Tests on Packages for Shipment of Radioactive Material, Rep. ANSI N14.5-2014, ANSI, New York (2014).*
- [36] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Safe Transport of Radioactive Material — Leakage Testing on Packages, ISO 12807:2018I, ISO, Geneva (2018).*
- [37] HOLMAN, J.P., *Heat Transfer, 7th edn, McGraw Hill, New York (2009).*
- [38] MACDONALD, H.F., “Individual and collective doses arising in the transport of irradiated nuclear fuels”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 80 (Proc. Int. Symp. Berlin, 1980), Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980).*
- [39] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., *Dosimetric aspects of permitted activity leakage rates for Type B packages for the transport of radioactive materials, Radiat. Prot. Dosim. 2 (1982) 75.*
- [40] MACDONALD, H.F., *Radiological Limits in the Transport of Irradiated Nuclear Fuels, Rep. TPRD/B/0388/N84, Central Electricity Generating Board, Berkeley, UK (1984).*
- [41] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.*
- [42] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., *The Q System for the Calculation of A₁ and A₂ Values within the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Rep. TPRD/B/0340/R83, Central Electricity Generating Board, Berkeley, UK (1983).*
- [43] UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY, *Shielding Integrity Testing of Radioactive Material Transport Packaging, Gamma Shielding, Rep. AECP 1056, Part 1, UKAEA, Harwell (1977).*

- [44] UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY, Testing the Integrity of Packaging Radiation Shielding by Scanning with Radiation Source and Detector, Rep. AESS 6067, UKAEA, Risley (1977).
- [45] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, American National Standard for Program for Testing Biological Shielding in Nuclear Reactor Plants, Rep. ANSI N18.9-1972, ANSI, New York (1972).
- [46] JANARDHANAN, S., et al., “Testing of massive lead containers by gamma densitometry”, Industrial Isotope Radiography (Proc. Nat. Symp.), Bharat Heavy Electrical Ltd, Tiruchirapalli, India (1976).
- [47] KRISHNAMURTHY, K., AGGARMAL, K.S., “Complementary role of radiometric techniques in radiographic practice”, *ibid.*
- [48] NAGAKURA, T., MAKI, Y., TANAKA, N., “Safety evaluation on transport of fuel at sea and test program on full scale cask in Japan”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 78 (Proc. Int. Symp. New Orleans, 1978), Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1978).
- [49] HEABERLIN, S.W., et al., Consequences of Postulated Losses of LWR Spent Fuel and Plutonium Shipping Packages at Sea, Rep. BNWL-2093, Battelle Pacific Northwest Lab., Richland, WA (1977).
- [50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Severity, probability and risk of accidents during maritime transport of radioactive material: Final report of a co-ordinated research project 1995–1999, IAEA-TECDOC-1231, IAEA, Vienna (2001).
- [51] HIGSON, J., VALLEPIN, C., KOWALEVSKY, H., “A review of information on flow equations for the assessment of leaks in radioactive transport containers”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89 (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).
- [52] BURNAY, S.G., NELSON, K., “Leakage of transport container seals during slow thermal cycling to -40°C ”, Int. J. Radioact. Mater. Transp. 2 (1991).
- [53] JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE, Nuclear Criticality Safety Handbook, Nihan Shibou, Science and Technology Agency (1988) (in Japanese). [English Translation: JAERI-Review 95-013, JAERI, Tokyo (1995)].
- [54] COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Guide de Criticité, Rep. CEA-R-3114, CEA, Paris (1967).
- [55] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Revised Provisions for Transport of Fissile Material in the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material — 2012 Edition, IAEA-TECDOC-1768, IAEA, Vienna (2015).
- [56] DARBY, S., BARTON, N., NUTTALL, M., MENNERDAHL, D., “Fissile Exceptions — A General Scheme for Package Based on CSI Control”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2010 (Proc. Int. Symp. London, 2010, Department for Transport, UK (2010).
- [57] ITO, D., et. Al., “Investigation of criticality effects of deuterium and beryllium in package containing fissile material”, J. Nucl. Sci. Technol. 44 6 (2007) 869–874.

- [58] PARKS, C.V., HOPPER, C.M., LICHTENWALTER, J., Assessment and Recommendations for Fissile-Material Packaging Exemptions and General Licenses Within 10 CFR Part 71, NUREG/CR-5342 (ORNL/TM-13607), Appendix C, D and E, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1998).
- [59] DESNOYERS, B., “Radioactive waste and fissile exceptions”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2010 (Proc. Int. Symp. London, 2010), Department for Transport, London (2010).
- [60] BARTON, N.J., WILSON, C.K., Review of fissile exception criteria in IAEA regulations”, Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, NM, 1995), Vol. 2, Univ. Of New Mexico, Albuquerque, NM (1995) 915–972.
- [61] TAKANO, M., OKUNO, H., OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark, Result of Phase IIA, Rep. NEA/NSC/DOC(96)01, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokyo (1996).
- [62] DeHART, M.D., PARKS, C.V., “Issues related to criticality safety analysis for burnup credit applications”, Nuclear Criticality Safety, ICNC'95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, NM, 1995), Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995) 26–36.
- [63] BOWDEN, R.L., THORNE, P.R., STRAFFORD, P.I., “The methodology adopted by British Nuclear Fuels plc in claiming credit for reactor fuel burnup in criticality safety assessments”, *ibid.*, pp. 1B.3–10.
- [64] PARKS, C.V., GAULD, I.C., MUELLER, D.E., WAGNER, J.C., “Development of technical basis for burnup credit regulatory guidance in the United States”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2010 (Proc. Int. Symp. London, 2010), Department of Transport, London (2010).
- [65] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Uranium Hexafluoride Enriched to Less than 5% U 235, ASTM C996-90, ASTM, Philadelphia, PA (1991).

Sección VII

PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

DEMOSTRACIÓN DEL CUMPLIMIENTO

701.1. En el Reglamento de Transporte se establecen normas funcionales en lugar de requisitos específicos de diseño. Aunque esto supone mayor flexibilidad para el diseñador, plantea más dificultades para obtener la aprobación. La finalidad es permitir que el solicitante utilice prácticas de ingeniería aceptadas para evaluar un bulto de materiales radiactivos (por ejemplo, material radiactivo en forma especial). Esto podría incluir el ensayo de bultos a escala real, de modelos a escala, de maquetas de determinadas partes de un bulto, cálculos y argumentaciones razonadas, o una combinación de estos métodos. Independientemente de los procedimientos aplicados, la documentación debería ser suficientemente completa y apropiada para demostrar ante la autoridad competente que se han considerado todos los aspectos de seguridad y modos de fallo. Cualquier hipótesis debería definirse claramente y justificarse por completo.

701.2. El ensayo de bultos que contienen materiales radiactivos plantea una dificultad especial a causa del peligro radiológico. A pesar de que tal vez no sea recomendable realizar los ensayos utilizando materiales radiactivos, será necesario convencer a la autoridad competente de que se han cumplido los requisitos reglamentarios. Al determinar si en los ensayos se utilizarán materiales radiactivos debería llevarse a cabo una evaluación de seguridad radiológica.

701.3. Para demostrar el cumplimiento de lo estipulado deberían considerarse otros muchos factores, como la complejidad del diseño, los fenómenos especiales que requieran investigación, la disponibilidad de instalaciones y la capacidad para medir con exactitud las respuestas a los ensayos o evaluar los valores obtenidos a escala.

701.4. Siempre que el Reglamento de Transporte exija el cumplimiento de determinado límite de fuga, el diseñador debería incorporar al diseño algún medio que permita demostrar fácilmente el grado de estanqueidad requerido. Un método podría ser incluir algún tipo de cámara de muestreo o puerto de ensayo que pueda comprobarse fácilmente antes de la expedición.

701.5. Los modelos de ensayo deberían representar con exactitud el diseño previsto, con métodos de fabricación y un sistema de gestión similares a los

previstos para el producto acabado. Debería ponerse mayor énfasis en el prototipo, de manera que se asegure que el espécimen que se ensaya represente realmente el producto. Si se utiliza contenido radiactivo simulado, este debería representar verdaderamente el contenido real en cuanto a la masa, la rigidez mecánica, la densidad, la composición química, el volumen y cualquier otra característica importante. El contenido debería simular las cargas derivadas del impacto en la superficie interior del bulto y en las tapas de cierre, incluidos los efectos de colisión interna en el caso del contenido que no permanezca fijo en su lugar. La intensidad de las colisiones internas en probables incidentes o accidentes depende en particular de las fisuras que al principio haya habido entre el contenido y la estructura de la envoltura del bulto. Por tanto, debería considerarse la orientación que provoque el mayor daño dentro de la cavidad del bulto, simulada directamente en el ensayo de caída o incorporada convenientemente en el análisis estructural [1, 2]. Las deficiencias o diferencias en el modelo deberían documentarse antes de los ensayos y debería realizarse alguna evaluación para determinar cómo podrían afectar al resultado de los ensayos, positiva o negativamente.

701.6. El número de especímenes que se empleen en los ensayos estará en relación con las características del diseño que se vaya a ensayar y la fiabilidad deseada de las evaluaciones. Podrán repetirse las pruebas con diversos especímenes para tener en cuenta variaciones debidas a la gama de propiedades en las especificaciones de los materiales o a las tolerancias en el diseño.

701.7. Los resultados de los ensayos pueden hacer necesario aumentar el número de especímenes a fin de cumplir con los requisitos de los procedimientos de ensayo que establecen que se produzca el máximo daño. Para reducir el número de ensayos es posible utilizar simulaciones con códigos informáticos.

701.8. Hay que actuar con cuidado al planificar la instrumentación y el análisis, tanto del ensayo de un modelo a escala como de uno de tamaño real. Debería asegurarse que se disponga de instrumentación y de dispositivos de ensayo adecuados y correctamente calibrados. La instrumentación, los dispositivos de ensayo y las conexiones eléctricas no interferirán de alguna forma que invalide los resultados de los ensayos. Deberían documentarse y validarse las condiciones y los resultados de los ensayos.

701.9. Cuando se utilicen acelerómetros para evaluar el comportamiento durante el impacto del bulto, debería considerarse la frecuencia de corte. La frecuencia de corte debería seleccionarse según la estructura (forma y dimensión) del bulto. Para la consideración inicial de un bulto con una masa de 100 toneladas con limitador de impacto, la frecuencia de corte debería ser de 100 a 200 Hz, y

para bultos más pequeños esa frecuencia de corte debería multiplicarse por un factor $(100/m)^{1/3}$, donde m es la masa del bulto en toneladas. Esta consideración inicial debería verificarse. Cuando el bulto incluya componentes necesarios para garantizar la seguridad ante el impacto y esos componentes tengan una resonancia fundamental o frecuencias de primer modo que superen la frecuencia de corte, quizás sea necesario ajustar la frecuencia de corte de manera que la parte de la señal que se elimine no tenga influencia significativa en la evaluación del comportamiento mecánico de esos componentes. En estos casos probablemente sea necesario un análisis modal. Ejemplos de tales componentes son, entre otros, las cubiertas que se evalúen para determinar la fractura frágil y las estructuras internas necesarias para garantizar la subcriticidad. Cuando estas cuestiones se consideren en la evaluación analítica, el método y los modelos de cálculo deberían permitir la correspondiente evaluación de estos efectos dinámicos. Ello puede requerir el ajuste de los pasos de tiempo y el tamaño de malla a valores bajos en consonancia con las frecuencias utilizadas en el cálculo.

701.10. En muchos casos puede ser más simple y menos costoso ensayar un modelo de tamaño real que utilizar un modelo a escala, o demostrar el cumplimiento mediante cálculo y argumentación razonada. Una de las desventajas de basarse totalmente en los ensayos es que todo cambio futuro del contenido o del diseño del bulto puede ser mucho más difícil, o incluso imposible, de justificar. A menos que la fabricación de los bultos sea muy poco costosa y que se ensayen varios, normalmente en la práctica se requerirá mayor esfuerzo para justificar el cumplimiento de los ensayos.

701.11. Cuando se considere conveniente remitirse a demostraciones similares que se hayan realizado previamente con resultados satisfactorios, deberían tenerse en cuenta todas las semejanzas y diferencias entre los dos bultos. Los aspectos en que haya diferencias pueden requerir la modificación de los resultados de la demostración. El modo y el grado en que las diferencias y las semejanzas afectarán a los resultados de la demostración realizada previamente dependerán de sus efectos. En caso extremo, un embalaje puede ser geoméricamente idéntico a otro que ya se haya utilizado en un bulto aprobado pero, debido a cambios en los materiales del nuevo embalaje, quizás la referencia a la demostración anterior no sea pertinente y, por lo tanto, no debe emplearse.

701.12. Otro método para demostrar el cumplimiento es el cálculo o la argumentación razonada, siempre que se esté de acuerdo en que, en general, los procedimientos y los parámetros de cálculo son fiables o conservadores. Independientemente del método de cualificación elegido, es probable que sea necesario elaborar ciertos cálculos y argumentaciones razonadas. Por lo general

en las especificaciones se definen propiedades de los materiales que implican una probabilidad del 95 % al 98 % de no verse sometidos a esfuerzo. Cuando se utilicen ensayos para obtener datos sobre las propiedades de los materiales debería tenerse en cuenta la dispersión de los datos. También es necesario considerar la dispersión debida a las tolerancias de los materiales y a las de fabricación, a menos que en todos los cálculos se utilice la combinación más desfavorable de las posibles dimensiones. Cuando se utilicen códigos informáticos debería quedar suficientemente claro que las fórmulas utilizadas son aplicables a deformaciones finitas (es decir, no solo un desplazamiento grande sino también una gran tensión). En la mayoría de los casos los ensayos, sobre todo los que implican un impacto accidental, precisarán una fórmula de tensión finita debido al daño grave que posiblemente se inflija. Si no se tienen en cuenta esos detalles podrían cometerse errores importantes. Cualquier argumentación razonada debería basarse en la experiencia de ingeniería. Cuando se aplique la teoría, deberían tenerse en cuenta los detalles del diseño que podrían modificar el resultado derivado de la teoría general, por ejemplo, discontinuidades, asimetrías, una geometría irregular, falta de homogeneidad o propiedades variables de los materiales. Debería evitarse presentar una argumentación razonada que se base en apreciaciones subjetivas.

701.13. Muchos cálculos podrían requerir el uso de códigos informáticos asequibles en la red comercial. Debería analizarse la fiabilidad y la adecuada validación del código seleccionado. En primer lugar, ¿es aplicable el código al cálculo previsto? ¿Para los análisis mecánicos, por ejemplo, puede hacer cálculos del impacto? ¿Es adecuado para calcular deformaciones, tanto plásticas como elásticas? En segundo lugar, ¿representa el código informático adecuadamente el embalaje bajo análisis con el fin de demostrar el cumplimiento de los requisitos? Para cumplir estos dos criterios, quizás el usuario deba aplicar un programa de problemas de referencia en que el código se utilice para modelar y calcular los parámetros de un problema del que ya se conocen los resultados. Las opciones que se elijan pueden tener una gran influencia en la validez de los estudios de referencia para el problema que se pretenda resolver. En los códigos mecánicos, entre las opciones y los aspectos de modelación se incluyen las propiedades de los materiales del bulto en condiciones dinámicas, las deformaciones elásticas y plásticas, el detalle de las conexiones entre componentes, como tornillos y soldaduras, y la consideración de efectos debidos a la fricción, hidrodinámicos, por deslizamiento e inundación. La experiencia del usuario en la selección adecuada de las opciones que permite el código, las propiedades de los materiales y la elección de la malla puede afectar a los resultados. En los estudios de referencia se debería considerar también la sensibilidad de los resultados a las variaciones en los parámetros. Puede aumentarse la confianza efectuando análisis sistemáticos de referencia, procediendo de lo simple a lo complejo. Para otras

aplicaciones, quizás sea preciso hacer comprobaciones como el balance de valores de carga o de energía entre la entrada y la salida. Cuando el código que se aplique no sea ampliamente utilizado y conocido, también deberían presentarse pruebas de que es adecuado desde el punto de vista teórico.

701.14. La demostración del cumplimiento puede realizarse llevando a cabo ensayos con modelos a una escala adecuada, en que se incorporen características significativas del elemento bajo investigación cuando la experiencia de ingeniería haya demostrado que los resultados de esos ensayos son adecuados para los propósitos del diseño. Cuando se utilice un modelo a escala debería tenerse en cuenta la necesidad de ajustar ciertos parámetros de ensayo, como el diámetro de la barra en el ensayo de penetración o la carga en la compresión. Con todo, ciertos parámetros de ensayo no podrán ser ajustados, —por ejemplo, tanto el tiempo como la aceleración gravitacional— y, en consecuencia, será necesario ajustar los resultados mediante factores de escala. Para confirmar que existen suficientes márgenes de seguridad, el uso de modelos a escala debería apoyarse con el cálculo o la simulación por computadora, utilizando programas informáticos a los que se les haya aplicado parámetros de referencia.

701.15. Cuando se utilicen modelos a escala para determinar los daños, deberían tenerse en cuenta los mecanismos que afectan a la absorción de energía, pues la fricción, la rotura, el aplastamiento, la elasticidad, la plasticidad y la inestabilidad pueden presentar distintos factores de escala como resultado del uso de distintos parámetros en el ensayo que se realice. Además, como la demostración del cumplimiento requiere la combinación de tres ensayos (el de penetración, el de caída y el térmico para los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M)), la existencia de requisitos contradictorios para los parámetros de ensayo podría exigir una solución de avenencia, que a su vez arroje resultados que requieran la aplicación de factores de escala. En resumen, el efecto de la escala debería considerarse en todos los aspectos en que se produzca una diferencia.

701.16. La experiencia ha demostrado que el ensayo de modelos a escala puede ser muy útil para demostrar el cumplimiento de determinados requisitos del Reglamento de Transporte, en particular los ensayos mecánicos. La realización de los ensayos térmicos con modelos a escala es problemática (véanse los párrs. 728.23 y 728.24). En los ensayos mecánicos las condiciones de semejanza son relativamente fáciles de conseguir, siempre que se utilicen los mismos materiales y los métodos de fabricación adecuados para el modelo tanto como para el bulto de tamaño real (véase el párr. 701.17). Por consiguiente, será posible analizar, de una manera económica la relación entre la orientación del bulto y el daño resultante, así como la deformación total del bulto, y obtener información

sobre la desaceleración de las diferentes partes del bulto. Además, mediante los ensayos de los modelos pueden optimizarse muchos elementos del diseño.

701.17. Los detalles que deberían incluirse en el modelo son una cuestión de criterio y dependerán del tipo de ensayo para el que esté previsto el modelo. Por ejemplo, para determinar la respuesta estructural tras un impacto sobre uno de los extremos, la omisión en el modelo a escala de las aletas de refrigeración laterales puede provocar daños más graves. Este tipo de criterios puede simplificar la construcción del modelo sin que se menoscabe su validez. Solo es preciso incluir determinadas características estructurales que puedan influir en el resultado del ensayo. No obstante, es fundamental que los materiales de fabricación del modelo a escala y del bulto de tamaño real sean los mismos y que se empleen técnicas de construcción y fabricación adecuadas. En ese sentido, deberían emplearse técnicas de construcción y fabricación que reproduzcan el comportamiento mecánico y la respuesta estructural del bulto de tamaño real, tomando en consideración procesos tales como el mecanizado, la soldadura, el tratamiento térmico y los métodos de unión mecánica. Las propiedades de tensión-deformación de los materiales de construcción no deberían depender de la tasa de deformación hasta el punto en que invaliden los resultados del modelo. Es preciso hacer esta observación por cuanto la tasa de deformación en el modelo puede ser mayor que en el bulto de tamaño real.

701.18. En algunos casos tal vez no sea práctico que todos los componentes del bulto estén hechos a escala de manera precisa; por ejemplo, si se considera el espesor de un limitador de impacto con respecto a la longitud total del bulto. En el modelo, la razón entre el espesor y la longitud total puede ser distinta que en el bulto a escala real. Entre otros ejemplos cabe citar las láminas metálicas, las juntas o los tornillos de tamaño no normalizado o difíciles de conseguir. Cuando exista cualquier discrepancia geométrica apreciable entre el bulto real y el modelo que va a ser sometido a ensayo, el comportamiento de ambos cuando se sometan al ensayo de caída desde una altura de 9 m debería compararse mediante análisis con códigos informáticos para determinar si el efecto de la discrepancia geométrica es un elemento significativo. El código informático que se utilice debería haber sido verificado mediante evaluaciones comparadas adecuadas. Si los efectos de las discrepancias no son importantes, podría considerarse apropiado el modelo a escala para el ensayo de caída. Esto sería aplicable a escalas con una razón de 1:4 o mayor.

701.19. Otro elemento que es preciso analizar es el factor de escala elegido para el modelo, ya que este dependerá de la precisión que se necesite para lograr una representación aceptable del bulto de tamaño real. Cuanto mayor sea la diferencia

respecto del tamaño real, mayor será el error que se introduzca. En consecuencia, la reducción de la escala podría ser mayor cuando se estudie la deformación del bulto en su conjunto que cuando se ensayen determinadas partes del él y, en ocasiones, el factor de escala puede venir determinado por el tipo de ensayo en particular que se vaya a realizar. En algunos ensayos, como el de penetración, la caída II del ensayo mecánico y el ensayo de perforación/desgarramiento, especificados en los párrafos 727 b) y 735 del Reglamento de Transporte, se debería aplicar la escala a la barra o la sonda. En otros casos, en que el embalaje puede estar protegido por una estructura deformable de espesor significativo, o en que pueda producirse una deformación importante de la barra de penetración, tal vez sea necesario corregir la altura de caída [3, 4]. En la corrección debería tenerse en cuenta el posible aumento de la energía del bulto como resultado del movimiento de su centro de gravedad durante el tiempo de impacto. La corrección de la altura de la caída reviste interés tanto para el ensayo de caída I (9 m) como el de caída II (1 m), pero suele ser más importante para el ensayo de caída II.

701.20. En general debería utilizarse un modelo a escala 1:4 o mayor. Para ese modelo el efecto de la dependencia de la tasa de deformación en las propiedades mecánicas del material será despreciable. Debería verificarse el efecto de la dependencia de la tasa de deformación en los materiales que se emplean habitualmente (por ejemplo, el acero inoxidable).

701.21. La aplicación de escalas a los ensayos de caída es posible (teniendo en cuenta los párrs. 701.22 a 701.25) como resultado de las siguientes leyes relativas al modelo, que serán válidas siempre que se mantenga la altura de caída establecida en un principio, que el original y el modelo tengan las mismas propiedades materiales y la deformación del bulto o de la barra de penetración sea ínfima en relación con la altura de caída:

Aceleraciones: $a_{\text{modelo}} = (a_{\text{original}})/M$

Fuerzas: $F_{\text{modelo}} = (F_{\text{original}})M^2$

Tensiones: $\sigma_{\text{modelo}} = \sigma_{\text{original}}$

Deformaciones: $\epsilon_{\text{modelo}} = \epsilon_{\text{original}}$

donde M es la razón de escala (es decir, la razón entre la dimensión del modelo y la del tamaño máximo del bulto).

701.22. Para modelos de poco peso, la posición o la velocidad del modelo durante el ensayo de caída puede verse afectada por factores como el balanceo del “cordón umbilical” de los cables de los sensores de aceleración o de los medidores de deformación, o también por los efectos del viento. La experiencia demuestra que para el ensayo de los bultos de masa de hasta 1000 kg deberían utilizarse modelos de tamaño real, o sistemas de guiado especiales con los modelos a escala de poco peso.

701.23. Cuando la solicitud de aprobación de un diseño de bulto se fundamente de alguna manera en ensayos con modelos a escala, en ella debería incluirse una demostración de la validez de los métodos de escalado que se hayan utilizado. En particular, esa demostración debería comprender:

- a) la definición del factor de escala;
- b) la demostración de que el modelo que se ha construido reproduce con suficiente exactitud los detalles del bulto o de las partes del embalaje que serán ensayadas;
- c) una lista de las partes o elementos que no se reproducen en el modelo;
- d) la justificación de la supresión en el modelo de esas partes o elementos, y
- e) la justificación de los criterios de semejanza que se han aplicado.

701.24. En la evaluación de los resultados de los ensayos con modelos a escala es necesario considerar el deterioro del embalaje. En algunos casos también debería considerarse el daño causado al contenido del bulto, en particular cuando se produzcan cambios en:

- a) la tasa potencial de emisión;
- b) los parámetros que afecten a la criticidad;
- c) la eficacia del blindaje, y
- d) el comportamiento térmico.

701.25. Probablemente sea difícil extrapolar a los bultos de tamaño real los resultados de los ensayos con modelos a escala en que existan sellos o superficies de sellado. Aunque con los modelos a escala es posible obtener información muy valiosa sobre la deformación y el desplazamiento de las superficies de sellado, debería actuarse con prudencia al extrapolar el comportamiento de los sellos, así como las fugas que se produzcan (véase el párr. 716.7). Cuando se utilicen modelos a escala para el ensayo de los sistemas de sellado es preciso considerar el efecto de factores como la rugosidad de la superficie y el comportamiento de los sellos en función del espesor y tipo del material, así como los problemas

asociados al pronóstico de las tasas de fuga a partir de los resultados de los modelos a escala.

702.1. En todo método de evaluación que se utilice tras los ensayos para asegurar el cumplimiento de los requisitos deberían incorporarse las técnicas siguientes según el tipo de bulto sometido a análisis:

- a) inspección visual;
- b) evaluación de la distorsión;
- c) medición de todos los cierres de las separaciones producidas en los sellos;
- d) prueba de estanqueidad de las áreas de sellado;
- e) ensayos destructivos y no destructivos con sus correspondientes mediciones, y
- f) examen microscópico del material dañado.

702.2 En la evaluación del deterioro de un bulto tras el ensayo de caída también deberían tenerse en cuenta todos los daños producidos por los impactos secundarios, salvo en el caso del ensayo de caída II para el transporte en condiciones de accidente, cuya finalidad se limita a demostrar el comportamiento del bulto ante un impacto local (véase el párr. 727.16). El impacto secundario incluye todos los impactos del bulto con el blanco después del primer impacto. También será necesario considerar estos impactos secundarios en las evaluaciones basadas en métodos numéricos. Por tanto, la posición del bulto que produzca el máximo daño debería determinarse teniendo en cuenta los impactos secundarios además del inicial. La experiencia indica que el efecto de los impactos secundarios es a menudo más grave en los bultos más delgados y rígidos, como por ejemplo:

- a) un bulto que tenga una relación de tamaño (longitud-diámetro) mayor de 5, aunque, a veces, incluso tan baja como 2;
- b) un bulto de grandes dimensiones para el que es previsible un importante rebote tras la caída desde los 9 m, y
- c) un bulto que contenga materiales rígidos y más delgados y especialmente vulnerables a los impactos laterales.

ENSAYOS PARA LOS MATERIALES RDIATIVOS EN FORMA ESPECIAL

Disposiciones generales

704.1. Los ensayos de impacto, percusión, flexión y térmico tratan de simular los efectos mecánicos y térmicos a los que se podrían exponer los materiales radiactivos en forma especial si se salieran de su embalaje.

704.2. Después de cada ensayo mencionado en el párrafo 704.1, el espécimen debe someterse a un análisis de lixiviación o un ensayo de fugas volumétricas para que el material radiactivo en forma especial que quede sumergido en líquido como resultado de un accidente cumpla los criterios establecidos en el párrafo 603 del Reglamento de Transporte.

704.3. Los ensayos de un diseño de cápsula pueden realizarse con materiales radiactivos simulados. Por “simulado” se entiende la reproducción de una fuente radiactiva sellada cuya cápsula se ha fabricado exactamente con los mismos materiales que la fuente sellada que representa, pero que, en lugar de materiales radiactivos, contiene una sustancia con propiedades mecánicas, físicas y químicas lo más parecidas posible a las de los materiales radiactivos y que contiene solamente trazas de estos. El trazador debería estar solubilizado en un disolvente que no ataque la cápsula, de conformidad con la norma ISO 2919 [5]. Siempre que sea posible, deberían utilizarse nucleidos de período corto. Sin embargo, cuando se utilicen técnicas de lixiviación será preciso tener cuidado al interpretar los resultados. Será necesario considerar los efectos del factor de escala, cuya importancia dependerá de la actividad máxima que contenga la cápsula, así como de la forma física de su contenido previsto y, en particular, de su solubilidad en comparación con la del radionucleido trazador. Estos problemas pueden evitarse si se aplican ensayos por fugas volumétricas (véanse los párrs. 603.3 y 603.4). Normalmente los ensayos de los materiales radiactivos en forma especial se realizan con fuentes selladas o con materiales sólidos no dispersables a escala real, ya que no resultan caros y los resultados se interpretan fácilmente.

Métodos de ensayo

705.1. Puesto que se trata de que este ensayo sea similar al de caída libre desde 9 m para un bulto del Tipo B(U) (véase el párr. 603.1) el espécimen debería dejarse caer de la manera que sufra el máximo daño.

706.1. Debería prestarse atención especial a las condiciones del ensayo de percusión con el fin de conseguir el máximo daño.

706.2. En los ensayos de percusión realizados con especímenes a temperaturas superiores a la temperatura ambiente deberían adoptarse precauciones especiales para que no se sobrecaliente y reblandezca la lámina de plomo.

709.1. Se admite que los ensayos que se indican en los párrafos 705, 706 y 708 del Reglamento de Transporte no son los únicos y que pueden ser válidos también otros procedimientos de ensayo, ya aceptados a escala internacional. Se han definido dos ensayos establecidos por la ISO como alternativa adecuada para el material radiactivo contenido en una cápsula sellada.

709.2. Los ensayos alternativos que se proponen en el párrafo 709 a) del Reglamento de Transporte son los de impacto Clase 4 de la norma ISO 2919 [5] para materiales radiactivos en bultos en forma especial con una masa inferior a 200 g y el ensayo de impacto Clase 5 de la norma ISO 2919 [5] para materiales radiactivos en bultos en forma especial con una masa superior a 200 g pero inferior a 500 g, que consisten en lo siguiente: el espécimen se sitúa sobre un yunque de acero y se deja caer un martillo en el espécimen desde una altura de 1 metro. El martillo tendrá una masa de 2 kg para la Clase 4 y de 5 kg para la Clase 5, con una superficie plana de impacto de 25 mm de diámetro y con los bordes redondeados con un radio de 3 mm. El yunque tendrá una masa de al menos 20 kg para la Clase 4 y de al menos 50 kg para la Clase 5, con una superficie plana suficientemente grande para abarcar el espécimen completo. El yunque ha de estar montado rígidamente. Estos ensayos pueden realizarse en lugar de los ensayos de impacto (párr. 705 del Reglamento de Transporte) y de percusión (párr. 706 del Reglamento de Transporte).

709.3. En los ensayos alternativos propuestos en el párrafo 709 a) del Reglamento de Transporte debería elegirse la orientación del espécimen que cause el máximo daño.

709.4. El ensayo alternativo que se propone en el párrafo 709 b) del Reglamento de Transporte es el de temperatura Clase 6 de la norma ISO 2919 [5], que consiste en someter el espécimen a una temperatura mínima de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 min y calentarlo posteriormente durante un período que no exceda de 70 min desde la temperatura ambiente hasta los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$; después se le deja a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora y a continuación se le somete a un tratamiento de choque térmico, introduciéndolo en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Métodos de evaluación por lixiviación y por fugas volumétricas

711.1. La evaluación por lixiviación será similar al método que se aplica a los materiales sólidos no dispersables (véase el párr. 710 del Reglamento de Transporte) salvo que el espécimen no se sumerge inicialmente en agua durante siete días. No obstante, las otras fases siguen siendo iguales.

711.2. La evaluación alternativa por fugas volumétricas, tal como se especifica en el párrafo 711 b) del Reglamento de Transporte, comprende cualesquiera de los ensayos previstos en la norma ISO 9978 [6] que sean aceptables para la autoridad competente. Generalmente los ensayos permiten acortar el período de ensayo y, además, algunos de ellos son para sustancias no radiactivas. La opción de evaluación por fugas volumétricas permite reducir el tiempo total que entraña la secuencia de ensayos e incluso el período que se precisa para la utilización de una celda blindada durante el ensayo. Por consiguiente, la opción de la evaluación por fugas volumétricas podría propiciar una importante reducción de los costos.

ENSAYOS DE MATERIALES RADIATIVOS DE BAJA DISPERSIÓN

712.1. Los materiales radiactivos de baja dispersión deben cumplir los mismos criterios que los bultos del Tipo C respecto de la resistencia al impacto y al fuego, sin que se produzca una dispersión de cantidades significativas de material.

712.2. Para que el material sea cualificado como material radiactivo de baja dispersión se requieren tres ensayos: el de impacto a 90 m/s sobre un blanco indeformable, el ensayo térmico reforzado y el de lixiviación. El de impacto y el térmico no son consecutivos. En el ensayo de lixiviación el material ha de estar en una forma que represente las propiedades del material tal como quede tras alguno de los ensayos previstos en el párrafo 605 b) del Reglamento de Transporte. No será preciso que los ensayos que se realicen para demostrar que el material radiactivo de baja dispersión tiene las propiedades requeridas se hagan con el contenido total del bulto si los resultados que se obtienen con una fracción representativa de ese contenido pueden extrapolarse con suficiente confianza al contenido real del bulto. Esto se aplica, por ejemplo, si el bulto contiene varios elementos idénticos y puede demostrarse que multiplicando la emisión establecida en uno de ellos por el número total de ese tipo de elementos en un bulto se obtiene una sobreestimación de la emisión del contenido total del bulto. En el caso de grandes elementos también será posible realizar los ensayos con una parte esencial de ellos o con un modelo a escala, siempre que se establezca

cómo extrapolar los resultados obtenidos de esta forma al comportamiento del contenido completo del bulto.

712.3. En el ensayo de impacto a 90 m/s ha de demostrarse que el impacto del contenido total del bulto sobre un blanco indeformable, sin la protección del embalaje, a una velocidad de 90 m/s como mínimo, daría lugar a una emisión de materiales radiactivos en el aire menor de $100A_2$ en forma de gas o de partículas de hasta 100 μm de diámetro aerodinámico equivalente. El diámetro aerodinámico equivalente de las partículas de aerosol puede determinarse con diversos instrumentos y técnicas de medición de aerosoles y utilizando técnicas como las de impactores, medidores ópticos de partículas y separadores por centrifugado (ciclones). Pueden utilizarse diversas técnicas experimentales de ensayo. Una sería provocar el impacto de un espécimen, lanzado horizontalmente, contra una pared vertical que tenga las características de rigidez definidas para el blanco. Todas las partículas que pasen al aire y que tengan un diámetro aerodinámico equivalente inferior a 100 μm podrán ser arrastradas hacia arriba mediante una corriente de aire ascendente, que tenga la velocidad apropiada, y de esta manera podrá ser analizado su tamaño mediante técnicas de medición de aerosoles. Una corriente de aire con una velocidad ascendente de 30 cm/s serviría como separador, ya que las partículas con un diámetro aerodinámico equivalente $< 100 \mu\text{m}$ se mantendrían en suspensión, mientras que las que fueran mayores serían retiradas (por exceder su velocidad de sedimentación de 30 cm/s).

712.4. Puede obtenerse más información en los párrafos 605.5, 605.6, 605.8, 605.9 y 704.3.

ENSAYOS DE BULTOS

Preparación de los especímenes para su ensayo

713.1. A menos que antes del ensayo se registren datos sobre el estado del espécimen, sería difícil decidir posteriormente si los defectos que se observen han sido ocasionados por el ensayo.

714.1. Puesto que en determinados casos los componentes que forman el sistema de contención pueden ser montados de diferentes maneras, será fundamental que para los ensayos se definan claramente tanto el espécimen como su procedimiento de montaje.

Ensayo de la integridad del sistema de contención y del blindaje y evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad

716.1. Con el fin de determinar el comportamiento de los especímenes que han sido sometidos a los ensayos especificados en los párrafos 719 a 733, tal vez sea preciso seguir un programa de investigación que comprenda inspecciones y ensayos secundarios. Por lo general, en primer lugar se realizará un examen visual y un registro fotográfico del espécimen. Además, pueden ser necesarias otras inspecciones. Si los ensayos se llevaron a cabo con especímenes que contenían trazas de materiales radiactivos, pueden medirse las fugas mediante pruebas de frotis. La estanqueidad puede detectarse aplicando los procedimientos recogidos en los párrafos 648.3 a 648.5 (del Tipo BI, del Tipo A, del Tipo B(U) o del Tipo B(M)). Asimismo, puede evaluarse la integridad del blindaje colocando trazas de materiales radiactivos dentro del embalaje. Tras un examen de la integridad externa, el sistema de contención debería desmontarse para comprobar su estado interno: la integridad de las cápsulas, de los recipientes de vidrio, frascos, etc.; la estabilidad geométrica de los compartimentos, especialmente cuando el contenido sea una sustancia fisible; la distribución de los materiales absorbentes; la estabilidad del blindaje y el funcionamiento de las partes mecánicas. El programa de análisis debería centrarse en el examen de tres aspectos específicos:

- a) la integridad del sistema de contención;
- b) la integridad del blindaje, y
- c) la garantía, cuando sea aplicable, de que ninguna reordenación del contenido fisible o de los venenos neutrónicos o del grado de moderación ha afectado negativamente a las hipótesis y previsiones de la evaluación de la criticidad.

716.2. La integridad del sistema de contención puede evaluarse de muchas maneras. Por ejemplo, la emisión radiactiva desde el sistema de contención puede calcularse en función de las pérdidas volumétricas (por ejemplo, gaseosas).

716.3. En el caso de especímenes de ensayo que sean representativos de sistemas de contención de tamaño real, pueden efectuarse mediciones directas de las fugas en el espécimen de ensayo.

716.4. Después de los ensayos será necesario prestar atención a lo siguiente:

- a) el funcionamiento del sistema de cierre;
- b) las fugas que puedan ocurrir en otras partes del sistema de contención.

716.5. De conformidad con el Reglamento de Transporte, la contención entraña tantas variables que no es factible un único procedimiento normalizado de ensayo.

716.6. En la norma ANSI N14.5 [7] se incluyen, entre otros, los siguientes tipos de ensayos aceptables, enumerados por orden creciente de sensibilidad en condiciones normales:

- a) caída de presión gaseosa;
- b) burbujas por inmersión en agua o burbujas en jabón;
- c) glicol de etileno;
- d) incremento de la presión gaseosa;
- e) burbuja de aire en vacío;
- f) detector de halógenos, y
- g) espectrómetro de masas de helio.

716.7. En la referencia [7] también:

- a) Se relacionan los requisitos reglamentarios relativos a la contención de materiales radiactivos con las tasas de fuga de flujos másicos, detectables en la práctica.
- b) Se define el término “estanqueidad” en función de la tasa de flujo volumétrico.
- c) Se realiza alguna simplificación en forma de hipótesis conservadoras, de manera que puedan consolidarse muchas variables.
- d) Se describe un procedimiento de ensayo de emisión.
- e) Se describen ensayos específicos de fugas volumétricas.

716.8. En la norma ISO 12807 [8]] se especifican criterios para ensayos de fuga de gas y métodos de ensayo con el fin de demostrar que los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M) cumplen con los requisitos de integridad de la contención definidos en el Reglamento de Transporte para el diseño, la fabricación y las verificaciones previas a la expedición y las de carácter periódico. Entre los métodos de ensayo de fugas preferidos que describe la norma ISO 12807 [8] se incluyen los siguientes:

- a) Métodos cuantitativos:
 - caída de la presión gaseosa;
 - incremento de la presión gaseosa;
 - envoltura llena de gas con utilización de detector de gas;
 - envoltura vaciada con utilización de detector de gas, y
 - envoltura vaciada con presurización previa.

- b) Métodos cualitativos:
- técnica por burbujas de gas;
 - técnica por burbujas de jabón;
 - técnica de detección por olor de gas trazador, y
 - método de pulverización de gas trazador.

716.9. La referencia [8] se basa fundamentalmente en las siguientes hipótesis:

- a) Los materiales radiactivos pueden liberarse desde el bulto como un líquido, gas, sólido, líquido con sólidos en suspensión o partículas sólidas en un gas (aerosol), o en cualquier combinación de esas formas.
- b) La emisión o la fuga radiactiva puede suceder por una o más de las siguientes vías: flujo viscoso, flujo molecular o infiltración.
- c) La tasa de emisión del contenido radiactivo se mide indirectamente mediante un ensayo de fuga de gas equivalente, que se mide mediante las tasas de flujo de gas (gas no radiactivo).
- d) Las tasas de emisión pueden relacionarse matemáticamente con el diámetro de un único capilar recto, que se considera que en la mayoría de los casos representa conservadoramente una fuga o fugas.

716.10. Las etapas principales consideradas en la referencia [8] para determinar la fuga, tanto en condiciones normales como de accidente, son las siguientes:

- a) determinación de las tasas de emisión radiactiva permisibles;
- b) determinación de las tasas de fuga normalizadas;
- c) determinación de las tasas de fuga de ensayo permisibles para cada fase de verificación;
- d) selección de los métodos de ensayo apropiados, y
- e) realización de los ensayos y registro de sus resultados.

716.11. Si en los ensayos se utilizan especímenes de menor tamaño que el real, quizás no sea aconsejable la medición directa de la fuga mediante los sistemas de sellado, ya que no todos los parámetros asociados con esa fuga pueden reducirse fácilmente a escala. A ese respecto, comoquiera que la pérdida de hermeticidad se asocia a menudo con la pérdida de la compresión en el sistema de sellado debido, por ejemplo, al alargamiento permanente de los tornillos de apriete de la tapa, se recomienda llevar a cabo una inspección metrológica detallada para determinar en qué medida ha ocurrido en el espécimen sometido a los ensayos mecánicos el alargamiento de los tornillos y la distorsión de las superficies de sellado. Puede aplicarse la escala a los datos obtenidos de la inspección y así determinar la distorsión y el alargamiento equivalentes de los tornillos en el

tamaño real. Utilizando los datos metrológicos de escala puede verificarse el comportamiento del bulto de tamaño real mediante ensayos con sistemas de sellado de tamaño real.

716.12. Con respecto a la evaluación de la integridad del blindaje se señala que si se utiliza una fuente radiactiva para determinar las condiciones tras el ensayo de accidente, los resultados del ensayo podrían quedar invalidados a causa de cualquier daño o modificación que cause la inserción de la fuente en la configuración del bulto.

716.13. Si se utiliza un bulto a escala real en los ensayos, un método para comprobar la integridad del blindaje consiste en colocar una fuente adecuada dentro del espécimen e inspeccionar toda la superficie del espécimen con una película de rayos X o un detector de radiación apropiado para determinar si ha habido una pérdida de blindaje. Si se encuentra alguna evidencia de la pérdida de blindaje en cualquier parte de la superficie del espécimen, la tasa de dosis debería determinarse con mediciones reales y cálculos de manera que se asegure el cumplimiento de los requisitos especificados en los párrafos 648, 653, 659 y 671 del Reglamento de Transporte. Para obtener más información, véanse los párrafos 648.1 a 648.5 y 659.14 a 659.19.

716.14. Como opción puede realizarse una inspección dimensional cuidadosa de los parámetros que contribuyen a la eficacia del blindaje, de manera que se compruebe que no se han afectado de forma negativa, por ejemplo, al producirse hundimientos o la pérdida de plomo en los blindajes que dieran lugar a un incremento general de la radiación o de las tasas de dosis en puntos localizados.

716.15. Los ensayos aplicables podrían demostrar que no son válidas las hipótesis utilizadas en la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad. Un cambio en la geometría o en la forma física o química de los componentes o del contenido del embalaje podría afectar a la interacción neutrónica dentro o entre los bultos, por lo que todo cambio que se produzca debería ser compatible con las hipótesis formuladas en la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad de los párrafos 673 a 685 del Reglamento de Transporte. Si las condiciones tras los ensayos no son acordes con esas hipótesis, podría ser necesario modificar la evaluación de la criticidad.

716.16. Aunque el ensayo de los bultos a escala real o reducida puede realizarse con contenido simulado, del que pueden obtenerse algunos datos sobre el comportamiento de cualquier bastidor o caja que se utilice para colocar el contenido, en la práctica la geometría final dependerá de la

interacción entre el material real (cuyas propiedades mecánicas pueden ser diferentes de las del contenido simulado) y el bastidor o la caja y los demás de componentes del embalaje.

Blanco para los ensayos de caída

717.1. El blanco para los ensayos de caída se define como una superficie esencialmente indeformable. Esta superficie indeformable tiene el propósito de causar al bulto un daño equivalente o superior al previsto en impactos que podrían ocurrir sobre superficies o estructuras reales durante el transporte. El blanco, tal como se especifica, permite comparar y repetir con precisión los análisis y ensayos si fuera necesario. El blanco indeformable, aunque se describe de forma genérica, puede construirse siempre de manera que tenga una masa relativamente grande y rígida respecto del bulto que se someta a ensayo. Los denominados blancos “reales”, como tierra, rocas blandas y algunas estructuras de hormigón, son menos rígidos y podrían causar menos daños al bulto con una determinada velocidad de impacto [9]. Además, es más difícil construir superficies deformables que den lugar a resultados reproducibles tras los ensayos; por otra parte, la forma del objeto que caiga puede afectar a las características de deformación de esa superficie. En consecuencia, si se utilizaran blancos deformables, se incrementaría la incertidumbre de los resultados de los ensayos y sería mucho más difícil la comparación entre cálculos y ensayos.

717.2. Un ejemplo de blanco indeformable que cumpliría con los requisitos reglamentarios sería una plancha de acero de 4 cm de espesor colocada flotando sobre un bloque de hormigón apoyado en suelo firme o sobre un lecho de rocas. La masa combinada del acero con el hormigón debería ser como mínimo 10 veces mayor que la del espécimen que se someta a los ensayos de los párrafos 705, 722, 725 a), 727 y 735 del Reglamento de Transporte y 100 veces mayor que la del espécimen sometido al ensayo definido en el párrafo 737 del Reglamento de Transporte, a menos que se justifique la aplicación de un valor diferente. La plancha de acero debería tener estructuras fijas de acero que sobresalgan en su superficie inferior, de manera que se asegure un firme contacto con el hormigón. Debería tenerse en cuenta la dureza del acero cuando se ensayen bultos con superficies duras. El hormigón debería tener suficiente espesor para minimizar su flexión, aunque en proporción con el tamaño de la muestra que se vaya a ensayar. En las referencias [10 a 14] se describen otros blancos que se han utilizado anteriormente. Dado que ha de evitarse la flexión del blanco, sobre todo en la dirección vertical, se recomienda que este se aproxime a la forma cúbica, de manera que su profundidad sea similar a su anchura y longitud.

Ensayo de embalajes diseñados para contener hexafluoruro de uranio

718.1. En el ensayo hidráulico solo es preciso ensayar el cilindro; las válvulas y otros elementos necesarios para el mantenimiento no deberían incluirse en este ensayo de fugas, sino que deberían ser ensayados de conformidad con la norma ISO 7195 [12].

Ensayos encaminados a demostrar la capacidad de soportar las condiciones de transporte normales

719.1. Las condiciones climáticas a las que los bultos pueden someterse en las condiciones de transporte normales comprenden cambios de humedad, de temperatura ambiente y de presión, así como la exposición a la irradiación solar y a la lluvia.

719.2. Una humedad relativa baja, en particular si va acompañada de una elevada temperatura, hace que los materiales estructurales del embalaje, como la madera, se sequen, se contraigan, se partan y se vuelvan frágiles; la exposición directa de un bulto al sol puede producir una temperatura en la superficie considerablemente superior a la ambiental durante unas pocas horas alrededor del mediodía. El frío intenso endurece o fragiliza algunos materiales, especialmente los que se utilizan para unir o amortiguar. Los cambios de temperatura y de presión pueden ocasionar “transpiración” y un aumento gradual de la humedad en el interior de las partes externas de los embalajes y, si la temperatura desciende lo suficiente, puede producir condensación de agua dentro del embalaje. La humedad en la bodega de las embarcaciones suele ser elevada y un descenso de temperatura produciría una considerable condensación en las superficies externas de los bultos. Si se produce condensación, pueden aplastarse las cajas exteriores de cartón y los espaciadores utilizados para reducir las tasas de dosis externa. Los bultos pueden quedar expuestos a la lluvia mientras se mantienen a la espera de ser cargados o cuando se trasladan y cargan en el medio de transporte.

719.3. En el transporte normal un bulto puede estar sometido también a efectos mecánicos, tanto dinámicos como estáticos. Los primeros pueden comprender sacudidas limitadas, choques repetidos o vibraciones y los últimos, compresiones y tensiones.

719.4. Un bulto puede sufrir una sacudida de carácter limitado al caer sobre una superficie durante su manipulación. Las manipulaciones bruscas, en particular la rodadura de los bultos cilíndricos y el vuelco de los rectangulares, son otra causa común de esas sacudidas limitadas. También pueden producirse por la

penetración de un objeto con un área de sección eficaz relativamente pequeña o por el golpe con el vértice o la arista de otro bulto.

719.5. En el transporte terrestre a menudo se producen golpeteos repetidos; todas las modalidades de transporte producen fuerzas de origen vibratorio que pueden causar fatiga en los metales o la pérdida de tuercas o tornillos. El apilamiento de los bultos para su transporte y cualquier desplazamiento de carga por un cambio repentino de la velocidad durante el transporte, pueden causar compresiones considerables sobre los bultos. Los bultos sufren también tensiones a causa de la elevación y la disminución de la presión ambiente como consecuencia de los cambios de altitud.

719.6. Los ensayos que se han seleccionado para reproducir el tipo de daños y tensiones que podría producir la exposición a estas condiciones climáticas y de manipulación/transporte son el ensayo de aspersión con agua, el de caída libre, el de apilamiento y el de penetración. Es improbable que el mismo embalaje sufra todos los incidentes de manipulación brusca o pequeños percances que representan los cuatro ensayos. La emisión no intencionada de parte del contenido, aunque muy indeseable, no debería suponer un percance importante considerando la limitación del contenido de los bultos del Tipo A. Bastaría utilizar tres especímenes por separado para cada uno de los ensayos de caída libre, apilamiento y penetración, precedidos en cada caso del de aspersión con agua. No obstante, esto impide que se utilice un solo espécimen para todos los ensayos.

719.7. Los ensayos no abarcan todas las situaciones a las que puede someterse un bulto del Tipo A en el entorno del transporte. No obstante, se estiman adecuados frente a los otros requisitos generales de diseño relacionados con el entorno de transporte, como la temperatura ambiente y su variación, la manipulación y la vibración.

720.1. Si se hace la aspersión con agua simultáneamente desde las cuatro direcciones, debería aplicarse un intervalo de 2 h entre el ensayo de aspersión y los siguientes ensayos. Este intervalo representa el tiempo necesario para que el agua empape el bulto de manera gradual, del exterior al interior, y reduzca su fuerza estructural. Si poco después de ese intervalo el bulto se somete a los ensayos de caída libre, apilamiento y penetración, sufrirá el máximo daño. Sin embargo, si la aspersión se aplica consecutivamente desde cada una de las cuatro direcciones, en esas 2 h se produciría progresivamente el calado del agua hacia el interior del bulto en cada dirección y el secado desde su exterior durante un período de 2 h. Por tanto, para este caso no debería permitirse intervalo alguno

entre la finalización del ensayo de aspersión con agua y el siguiente ensayo de caída libre.

721.1. El ensayo de aspersión con agua está en principio previsto para embalajes de materiales que absorben agua o que se ablandan con ella, o materiales que están unidos con pegamentos solubles en agua. En los embalajes cuyas capas exteriores sean totalmente metálicas, de madera, de materiales cerámicos o plásticos, o de cualquier combinación de estos materiales, puede demostrarse que superan el ensayo mediante una argumentación razonada, siempre y cuando no retengan agua y aumente significativamente su masa.

721.2. Un método para realizar el ensayo de aspersión con agua, que se considera que satisface las condiciones estipuladas en el párrafo 721 del Reglamento de Transporte, es el siguiente:

- a) El espécimen se coloca sobre una superficie plana horizontal orientado de manera que sea probable que el bulto sufra el mayor daño. La aspersión uniformemente distribuida se dirige hacia la superficie del bulto, desde cada una de las cuatro direcciones en ángulo recto, durante un período de 15 min; los cambios de dirección de la aspersión deberían efectuarse tan rápidamente como sea posible. Puede ser preciso realizar el ensayo para más de una orientación;
- b) Se recomienda tener en cuenta las siguientes condiciones adicionales de ensayo:
 - i) un ángulo suficiente en el vértice del cono de aspersión para abarcar todo el espécimen;
 - ii) una distancia de 3 m como mínimo de la boquilla al punto más próximo del espécimen;
 - iii) un caudal de agua equivalente a una precipitación pluvial de 5 cm/h, promediado dentro del área del cono de aspersión, en el punto de incidencia con el espécimen y perpendicularmente al eje del cono de aspersión, y
 - iv) el agua deberá escurrir a la misma velocidad con la que se aplica.
- c) El requisito del párrafo 721 del Reglamento de Transporte tiene por objeto lograr que se moje la mayor cantidad de superficie, lo que se puede conseguir dirigiendo la aspersión hacia abajo en un ángulo de 45° con respecto a la horizontal:
 - i) Para especímenes rectangulares la aspersión se puede dirigir hacia cada uno de los cuatro vértices.

- ii) Para especímenes cilíndricos apoyados en una de las caras planas, la aspersión puede realizarse desde cada una de las cuatro direcciones a intervalos de 90°.

721.3. El bulto no debería apoyarse sobre la superficie de manera que pueda recoger el agua que se vaya acumulando en su base.

722.1. El ensayo de caída libre simula el tipo de impacto que experimentaría un bulto si cayese desde la plataforma de un vehículo o durante su manipulación. En la mayoría de los casos, el transporte continuaría tras esos impactos. Dado que es improbable que durante su manipulación normal los bultos más pesados se vean expuestos a grandes alturas de caída, la altura de caída libre para este ensayo se gradúa según la masa del bulto. Si un bulto pesado experimenta una caída importante, debería ser inspeccionado minuciosamente con el fin de detectar daños o una pérdida de su contenido o blindaje. Los bultos ligeros hechos de materiales como cartón o madera requieren caídas adicionales para simular impactos repetitivos derivados de su manipulación.

722.2. Todo ensayo de caída debería llevarse a cabo con la simulación del contenido del bulto hasta su máximo peso. Tal vez se requiera más de un ensayo para evaluar todas las posibles orientaciones de caída. También puede ser necesario ensayar determinados elementos del bulto, como bisagras o cierres, para confirmar que se mantiene la contención, el blindaje y la seguridad con respecto a la criticidad nuclear.

722.3. Los elementos que serán objeto de ensayo dependerán del tipo de bulto que se someta a ensayo. Entre esos elementos se cuentan los componentes estructurales, materiales y dispositivos diseñados para prevenir la pérdida o la dispersión de las sustancias radiactivas o la pérdida de los materiales de blindaje (por ejemplo, el sistema de contención completo, como tapas, válvulas y sus sistemas de sellado). En los bultos que contengan materiales fisibles, otros elementos podrían ser, además de los ya mencionados, los componentes destinados a mantener la subcriticidad, como el bastidor del combustible y los absorbentes de neutrones.

722.4. Por “máximo daño” se entiende el máximo deterioro de la integridad del bulto. En la mayoría de los bultos, para producir el máximo daño debería dejarse caer el espécimen en una o más orientaciones, de modo que resulten máximas la aceleración o la deformación debida al impacto de los componentes examinados. La mayoría de los contenedores tienen alguna asimetría, que provoca diferentes resistencias ante el impacto. En toda investigación se deberían

considerar suficientes elementos estructurales para tener en cuenta la absorción de toda la energía cinética del bulto. Debería argumentarse el daño de los diversos elementos situados entre el punto de impacto y el centro de masas con respecto a su respuesta a la absorción de energía, el desarrollo de cargas internas, las deformaciones, los aplastamientos o plegados y las consecuencias de estos comportamientos.

722.5. Los bultos de poca masa se pueden sostener con las manos por encima del blanco y dejarse caer, siempre que se pueda mantener la orientación que se desee. En todos los demás casos deberían utilizarse medios mecánicos para sujetar el bulto y dejarlo caer con la orientación precisa. Dichos medios pueden consistir simplemente en un mecanismo de soltado, suspendido de una estructura elevada, como una viga en el techo o una grúa, o una torre especialmente concebida para ensayos de caída libre. El diseño de las instalaciones dedicadas a ensayos de caída tiene cuatro elementos principales: la base soporte, el mecanismo de soltado, el sistema de guía de la trayectoria (que normalmente no se utiliza en caídas directas) y el blanco, tal como se define en el párrafo 717 del Reglamento de Transporte. Debe haber altura suficiente en la base soporte para el mecanismo de soltado, el cable o aparejo de suspensión y la profundidad total del espécimen sujeto a ensayo de modo que todavía pueda lograrse la orientación correcta y la altura de caída entre el punto inferior del bulto y el blanco. En el caso de que el bulto tenga limitadores de impacto, la parte más baja del limitador se tomaría como referencia para determinar la altura de caída. El mecanismo de soltado para el ensayo de caída libre debería ser de fácil instalación y permitir la emisión instantánea del bulto, pero sin que afecte negativamente a la orientación del espécimen y sin que le provoque un daño mecánico. Pueden utilizarse diversos tipos de mecanismos, como por ejemplo, mecánicos o electromagnéticos, o una combinación de ellos. En las referencias [13, 14] se describen una serie de instalaciones de ensayo.

722.6. No es necesario que se consideren todas las posibles orientaciones de caída al realizar el ensayo de caída para condiciones de transporte normales. Siempre que en condiciones “normales” no sea posible que el bulto caiga con determinadas orientaciones, estas podrían pasarse por alto al evaluar el peor daño. Se prevé que esta flexibilización solamente se permitiría para bultos de grandes dimensiones o con una gran relación dimensional y requeriría que el diseñador del bulto la justificara documentalmente.

722.7. Las técnicas basadas en modelos a escala pueden resultar útiles para determinar la orientación de caída que sería más dañina (véanse los párrs. 701.7 a 701.25). Debería tenerse cuidado con la selección y el uso de la instrumentación,

ya que las monturas y las frecuencias de los sensores pueden producir errores en los datos que se obtengan.

723.1. El ensayo de apilamiento se ha concebido para simular el efecto de cargas que ejercen presión sobre el bulto durante un período prolongado y tiene la finalidad de confirmar que no sufrirá menoscabo la eficacia de los sistemas de blindaje y de contención, así como la configuración, en el caso de que el contenido sea de materiales fisibles. La duración del ensayo se ajusta a los requisitos de las Recomendaciones de las Naciones Unidas [15].

723.2. Podrá apilarse cualquier bulto cuya parte superior (es decir, la cara opuesta a aquella sobre la que normalmente se apoya) sea paralela y plana. Además, puede conseguirse el apilamiento agregando patas, almohadillas de apoyo o bastidores a los bultos que tengan superficies convexas. Los bultos con superficies convexas no pueden apilarse, a menos que se les dote de almohadillas de apoyo o de patas.

723.3. El espécimen debería colocarse con la base hacia abajo, sobre una superficie esencialmente plana, como un suelo plano de hormigón o una plancha de acero. Si fuera necesario, puede colocarse sobre la superficie superior del espécimen una plancha plana que abarque toda su extensión, de manera que se le pueda aplicar la carga uniformemente. La masa de la plancha debería considerarse en la masa total de apilamiento que se aplique. Si son apilables varios bultos del mismo tipo, un método sencillo consiste en construir una pila de cinco bultos encima del espécimen objeto de ensayo. Otro método consiste en colocar sobre el bulto una o varias planchas de acero u otros materiales con una masa cinco veces mayor que la del bulto.

724.1. El ensayo de penetración tiene la finalidad de garantizar que el contenido no escape del sistema de contención o que el blindaje o el sistema de confinamiento no se dañe si un objeto delgado, como una sección de tubería metálica o el manillar de una bicicleta, golpea y penetra en las capas externas del embalaje.

Ensayos complementarios para los bultos del Tipo A diseñados para contener líquidos y gases

725.1. Estos ensayos complementarios para los bultos del Tipo A diseñados para contener líquidos o gases se establecen porque los materiales radiactivos en forma líquida o gaseosa tienen mayores posibilidades de fuga que los

materiales sólidos. Estos ensayos no requieren que se haga primero el ensayo de aspersión con agua.

Ensayos encaminados a demostrar la capacidad de soportar las condiciones de accidente durante el transporte

726.1. Los ensayos en condiciones de accidente especificados en el Reglamento de Transporte se establecieron al inicio para conseguir dos fines. En primer lugar, se concibieron para producir daños al bulto que fueran equivalentes a los que se ocasionarían en un accidente muy grave (pero no necesariamente todos los accidentes que fueran concebibles). En segundo lugar, los ensayos se estipularon de modo que proporcionasen la base técnica para el diseño. Dado que el análisis es un método aceptable para cualificar los diseños, los ensayos se estipularon mediante especificaciones técnicas que pudieran servir como datos de entrada inequívocos y cuantificables para esos cálculos. Por lo tanto, en la elaboración de los requisitos de ensayo se trató de que estos ensayos fueran reproducibles (véase, por ejemplo, el párr. 717.1).

726.2. La edición de 1961 del Reglamento de Transporte se basó en el principio de proteger el contenido del bulto de las consecuencias del “máximo accidente concebible”. Posteriormente se prescindió de esta frase porque no proporcionaba una única norma con la que trabajar, lo cual era necesario para lograr la aceptación internacional de los diseños sujetos a aprobación unilateral. Actualmente, en los requisitos se tiene en cuenta de manera implícita la índole estadística de los accidentes y sus consecuencias. Entre los principales objetivos de los ensayos de los bultos figuran la aceptación, la uniformidad y la posibilidad de reproducción; los ensayos están diseñados de modo que las condiciones puedan reproducirse fácilmente en cualquier país. Las condiciones de ensayo tienen por objeto simular accidentes muy graves respecto de los daños que se puedan producir en los bultos. Los ensayos causarán daños superiores a los asociados con la gran mayoría de incidentes registrados, tanto si han intervenido o no bultos de materiales radiactivos.

726.3. La finalidad de los ensayos mecánicos (párr. 727 del Reglamento de Transporte) y del ensayo térmico (párr. 728 del Reglamento de Transporte) que les sigue es infligir a los bultos daños equivalentes a los que se producirían si sufriesen accidentes muy graves. El orden y tipo de los ensayos se corresponden con un accidente real de transporte (es decir, impactos mecánicos seguidos de una exposición térmica). La secuencia de los ensayos asegura asimismo que los bultos sufran deterioro mecánico antes de someterlos al ensayo térmico; de este modo es más probable que los bultos experimenten el máximo daño térmico. Los ensayos

mecánicos y térmicos se aplican sucesivamente al mismo espécimen. El ensayo de inmersión en agua (párr. 729 del Reglamento de Transporte) puede realizarse con un espécimen distinto por ser sumamente improbable una inmersión junto con las condiciones mecánicas y térmicas resultantes de un accidente.

727.1. Como los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M) se transportan en todas las modalidades de transporte, en los requisitos de ensayo para los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M) se trata de abarcar una amplia gama de accidentes que pueden exponer los bultos a fuerzas dinámicas de gran magnitud. Los efectos mecánicos de los accidentes pueden agruparse en tres categorías: cargas por impacto, por aplastamiento y por penetración. Aunque los valores definidos para los requisitos de ensayo no se dedujeron al inicio directamente de los análisis de accidentes, los análisis ulteriores de riesgos y de accidentes han demostrado que estos requisitos representan accidentes de transporte muy graves [16 a 21].

727.2. En la caída I, la combinación de la altura de caída de 9 m, el blanco indeformable y la orientación más perjudicial producen condiciones en que la mayoría de la energía de caída es absorbida por la estructura del embalaje. En los accidentes reales de transporte los blancos como la tierra o los vehículos se deforman y absorben parte de la energía del impacto y, por tanto, solo podrán causar un daño equivalente los impactos que se produzcan a una velocidad más alta [19 a 21].

727.3. Los diseños de bultos con paredes delgadas o los diseños con paredes tipo sándwich pueden ser sensibles a las cargas por penetración en lo que respecta a la pérdida de integridad de la contención, la pérdida del aislamiento térmico o el daño del sistema de confinamiento. Incluso diseños con paredes gruesas pueden tener puntos débiles, como los cierres de orificios de drenaje y las válvulas. Es posible que en los accidentes se generen cargas por penetración, ya que con frecuencia las superficies de impacto no son planas. Con el fin de lograr seguridad ante estas cargas, se estableció el ensayo de caída desde 1 m de altura sobre una barra rígida. Los parámetros de altura de caída y de geometría de penetración son más el resultado de análisis técnicos que de deducciones de análisis de accidentes.

727.4. La mayoría de los bultos, por sus características físicas, estarán sujetos al ensayo de caída de 9 m (de impacto) más que al ensayo de aplastamiento (caída III). El grado de gravedad que proporciona la caída de 9 m es menor para los bultos ligeros, de baja densidad, que para los bultos pesados de densidad elevada, debido a la reducida energía de impacto y a la mayor probabilidad de que se produzca el impacto sobre un “blanco” relativamente indeformable [19 a 25].

Esos bultos pueden ser también sensibles a cargas por aplastamiento. Los análisis de accidentes indican que la probabilidad de que se produzcan cargas dinámicas de aplastamiento en accidentes de transporte terrestre es más alta que la de que se produzcan cargas por impacto porque los bultos de poco peso se transportan en grandes cantidades o junto con otros bultos [16 a 18]. También los percances en la manipulación y estiba pueden producir cargas dinámicas o estáticas de aplastamiento indebidas. Por consiguiente, el ensayo de aplastamiento (caída III) se incluyó en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte. Los bultos que contienen una gran cantidad de emisores alfa son generalmente poco pesados, es decir, de baja densidad, debido a su escaso blindaje, y pueden encontrarse en esta categoría. Incluyen, por ejemplo, el óxido de plutonio en polvo y las soluciones de nitrato de plutonio, que son materiales radiactivos con un peligro potencial alto.

727.5. La orientación del bulto, tanto para los ensayos de impacto (caída I) como de aplastamiento (caída III) y de penetración (caída II) debe ser la que produzca el daño máximo, teniendo en cuenta el ensayo térmico. Además, el orden de ejecución de los ensayos será el que produzca el máximo daño. La evaluación del daño máximo debería enfocarse especialmente en la contención del material radiactivo dentro del bulto, en la conservación de suficiente blindaje para mantener las tasas de dosis en el nivel requerido y, cuando se trate de materiales fisibles, en el mantenimiento de la subcriticidad. Se debería considerar todo deterioro que pueda originar un aumento de las tasas de dosis o una pérdida de la contención, o que afecte al sistema de confinamiento después del ensayo térmico. Los daños que hagan que el bulto no pueda seguir utilizándose, pero que no afecten a su capacidad para satisfacer estos requisitos de seguridad, no suponen un motivo para concluir que el espécimen no ha superado los ensayos.

727.6. Como resultado de los ensayos mecánicos es posible conseguir distintos tipos de daño. Es necesario considerar los resultados de todos estos tipos en las evaluaciones analíticas destinadas a demostrar el cumplimiento de los requisitos aplicables. La fractura de un componente crítico o un fallo en el sistema de contención pueden facilitar el escape de los materiales radiactivos. Las deformaciones pueden menoscabar la función de los blindajes contra las radiaciones o de los blindajes térmicos, o pueden alterar la configuración de los materiales fisibles, lo que debería ser recogido en las hipótesis y previsiones formuladas en la evaluación de la criticidad. Los daños locales en el blindaje pueden provocar el deterioro tanto de la protección térmica como de la protección contra las radiaciones a causa del ensayo térmico posterior. En consecuencia, cuando el espécimen no sea simétrico, las investigaciones que se realicen deberían abarcar el estudio de los esfuerzos, tensiones, inestabilidades y efectos locales para todas las orientaciones de caída.

727.7. Tal vez no sea viable efectuar múltiples caídas de un espécimen en el mismo ensayo a causa de los daños que haya sufrido anteriormente. Para pronosticar la orientación que producirá el máximo daño quizás sea preciso utilizar más de una muestra o recurrir a análisis o argumentaciones razonadas basados en datos técnicos y eliminar del proceso de ensayos las orientaciones en que la seguridad no se vea comprometida.

727.8. Con frecuencia, las orientaciones más desfavorables de embalajes simétricos de forma cilíndrica o cúbica pueden determinarse recurriendo a informaciones ya publicadas [24, 26]. Especialmente cuando existen salientes, las asimetrías son a menudo sensibles si se utilizan como punto de impacto. Los dispositivos de elevación y manipulación, como materiales que favorezcan el deslizamiento o puntos de enganche, a menudo presentarán una resistencia o dureza diferente de las partes adyacentes del bulto y deberían considerarse como posibles puntos de impacto.

727.9. Las discontinuidades, como tapas u otros accesorios de penetración, pueden constituir un elemento localmente rígido, con una estructura de resistencia limitada, que podría fallar, ya sea por la deformación estructural adyacente o por la elevada carga (debida a las desaceleraciones) sobre su masa retenida.

727.10. Los bultos de paredes delgadas, como los bidones, deberían estudiarse desde el punto de vista de la deformación plástica que pueda causar la pérdida del sellado de la contención o una distorsión del punto de enganche de la tapa suficiente para que esta se suelte.

727.11. En el párrafo 673 del Reglamento de Transporte se estipula que en las evaluaciones de la criticidad relacionadas con los materiales fisibles se tengan en cuenta los daños resultantes de los ensayos mecánicos y térmicos. Será preciso prestar atención a aspectos tales como la eficiencia de los moderadores, la pérdida de absorbentes neutrónicos, la reordenación del contenido del bulto, los cambios geométricos y los efectos de la temperatura. Las hipótesis formuladas en la evaluación de la criticidad deberían estar en consonancia con los efectos de los ensayos mecánicos y térmicos y en el análisis deberían considerarse todas las posibles orientaciones del bulto.

727.12. Se prevé que la caída del bulto (caídas I y II) o de la masa de 500 kg (caída III) sea una caída libre por gravedad. No obstante, si se utiliza algún tipo de guía, es importante que la velocidad de impacto sea por lo menos igual a la velocidad de impacto en el caso de caída libre del bulto o de la masa (aproximadamente 13,3 m/s para las caídas I y III).

727.13. Para el ensayo de caída II se requiere una longitud mínima de 20 cm de la barra de penetración. Debería utilizarse una barra más larga cuando la distancia entre la superficie externa del bulto y cualquier componente interior importante para la seguridad del bulto sea mayor de 20 cm o cuando lo requiera la orientación que se dé al modelo. En particular, esto es válido para los especímenes con grandes dispositivos que hagan de limitadores de impacto, en que la penetración podría ser considerable. El material especificado para la construcción de la barra es el acero dulce. El límite elástico mínimo de ese material no debería ser inferior a 150 Mpa ni superior a 280 Mpa. La razón entre la tensión de deformación y la tensión de rotura no debería ser superior a 0,6. Quizás sea difícil llevar a cabo un ensayo en que sea posible el pandeo de la barra. Para tales casos debería justificarse la elección de una longitud de barra que produzca el máximo daño al espécimen.

727.14. Para el ensayo de caída II la orientación que produzca más daño al bulto no tiene por qué ser un impacto en posición horizontal sobre la punta de la barra. En algunos diseños de bultos se ha demostrado que una orientación oblicua, con ángulos en el intervalo de 20° a 30° causa el máximo daño debido al inicio de la penetración del borde de la barra en la envoltura exterior del bulto.

727.15. Solo para los fines de un diseño preliminar de la pared externa de un embalaje de acero-plomo-acero, puede emplearse la ecuación siguiente, que permite estimar el espesor necesario de pared para que el bulto no sea penetrado cuando se somete al ensayo de penetración:

$$t = 2148,5 \left(\frac{W}{s} \right)^{0,7} \quad (7.1)$$

donde

T es el espesor de pared externa (cm);

W es la masa del bulto (kg);

s es la resistencia a la tracción del material de la pared externa (Pa).

La ecuación (7.1) se basa en ensayos realizados utilizando acero dulce recocido reforzado con plomo [26]. Los bultos en que se empleen materiales con propiedades físicas distintas pueden requerir un espesor diferente de la pared externa de acero para satisfacer los requisitos. Esta estimación preliminar quizás no sea conservadora para bultos con diámetros pequeños (inferiores a 0,75 m) o

con materiales de diferentes propiedades físicas, o para impactos cercanos a los cambios geométricos o en posiciones oblicuas del bulto [26].

727.16. Para la caída II, la barra debe montarse sobre el blanco como se describe en el párrafo 717 del Reglamento de Transporte. Con el ensayo de caída I se espera evaluar los daños debidos a una caída sobre una superficie plana. Por lo tanto, no es necesario que la caída secundaria (caída II) induzca más daños. No es preciso que la superficie que rodea la barra cumpla los requisitos enunciados en el párrafo 717. Con todo, la superficie que rodea la barra no debería reducir la energía absorbida del impacto del bulto en la barra.

727.17. En el ensayo de aplastamiento (caída III), el embalaje debería estar situado sobre el blanco de forma estable en la orientación seleccionada para causar el máximo daño. Para ello probablemente sea necesario proporcionar apoyo al bulto, y en tal caso la presencia de este apoyo no debería influir en los daños ocasionados al bulto [27]. Al determinar la posición de impacto que sería más dañina, el diseñador debería considerar que el impacto de la plancha podría encontrarse en cualquier lugar de la superficie del espécimen. En la elección de la orientación del espécimen debería asegurarse que la mayoría de la energía del impacto se oriente al aplastamiento del espécimen. La intención no es que el vértice de la plancha sea el primer punto de impacto con el espécimen de ensayo.

727.18. Debería utilizarse instrumentación para efectuar la medición en los especímenes de ensayo, e incluso en el blanco (es decir, para medir la respuesta al impacto) por los motivos siguientes:

- a) Comprobar la validez de las hipótesis del análisis de seguridad.
- b) Tener una base para la modificación del diseño.
- c) Tener una base para el diseño de bultos similares.
- d) Disponer de un ensayo de referencia de códigos informáticos.

727.19. Entre las funciones que deberían medirse durante el ensayo de caída de 9 m (caída I) o de aplastamiento (caída III) figuran la función desaceleración-tiempo y la función deformación-tiempo. Cuando se empleen dispositivos electrónicos para tomar, registrar y almacenar datos, debería realizarse un examen de posibles penetraciones, truncados o cortes, de forma que no se pierdan valores máximos significativos. La mayoría de los instrumentos requerirán la conexión de cables a dispositivos externos. Estas conexiones se deberían hacer de forma que ni limiten la caída libre del bulto ni restrinjan en modo alguno su comportamiento después del impacto (véase el párr. 701.9).

727.20. La referencia [28] puede aportar información útil para seleccionar el ángulo inicial entre el eje del bulto y el blanco que causen el máximo daño por impacto secundario durante una caída de 9 m (caída I).

728.1. Las referencias [16 a 18, 29 a 31] indican que el ensayo térmico especificado en el párrafo 728 del Reglamento de Transporte representa un conjunto de condiciones ambientales que abarca la mayor parte de los accidentes de transporte en que se producen incendios. En el Reglamento de Transporte se especifica una condición de ensayo basada en un incendio producido por la combustión en aire de un hidrocarburo líquido con una duración de 30 min. Se especifican otros parámetros relativos a la geometría del incendio y a las características de transferencia del calor con objeto de definir el aporte de calor al bulto.

728.2. En el ensayo térmico se especifica un incendio por combustión de un hidrocarburo líquido en un depósito abierto, cuya finalidad es simular los daños producidos por incendios en los que intervienen materiales combustibles líquidos, sólidos o gaseosos. El ensayo abarca líquidos tales como el gas licuado del petróleo (GLP), el gas natural líquido (GNL) y el hidrógeno líquido porque, en general, la combustión en depósito abierto de dichos combustibles no durará 30 min. Los productos líquidos derivados del petróleo líquido se transportan frecuentemente por carretera, por ferrocarril y por mar y es posible que den lugar a un incendio tras un accidente. Los líquidos que podrían fluir alrededor de los bultos y crear las condiciones especificadas suponen un pequeño intervalo de valores caloríficos, por lo que el incendio grave queda perfectamente definido.

728.3. La temperatura de la llama y el coeficiente de emisión (800 °C y 0,9, respectivamente) representan las condiciones temporales y espaciales medias que se producen en los incendios en depósitos abiertos. Localmente, dentro de los incendios, las temperaturas y los flujos térmicos pueden exceder de esos valores. Ahora bien, una posición de los bultos dentro del fuego distinta de la teórica, el desplazamiento con el tiempo de la fuente del fuego con respecto a los bultos, el blindaje producido por otros bultos u otros medios de transporte que no sean combustibles y que intervengan en el accidente, los efectos del viento y la sólida estructura de muchos bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M), se combinarán todos para promediar condiciones coincidentes con las del ensayo o menos rigurosas [31, 32]. La propia presencia de un bulto y el alejamiento del suministro de oxígeno (paso de aire aproximadamente a 1 m de la llama) pueden tender a disminuir la temperatura de la llama cerca del bulto. Aunque los vientos naturales pueden suministrar más oxígeno, propenden a retirar la llama de algunas partes del bulto; de ahí el requisito de que las condiciones ambientales sean estables.

El uso de un sistema de guiado de la llama por debajo del bulto minimizará los efectos del viento y hará que la llama lo cubra mejor [33]. El coeficiente de emisión de la llama es difícil de evaluar ya que, en general, no se dispone de mediciones directas, pero los resultados de ensayos reales sugieren que el valor especificado de 0,9 está sobreestimado. Es improbable que la combinación de los parámetros de los resultados del ensayo en condiciones de llama muy severas se vea excedida en las condiciones de accidente.

728.4. La duración de un fuego de gran envergadura causado por petróleo depende de la cantidad de combustible presente y de la disponibilidad de recursos de extinción de incendios. Los combustibles líquidos se transportan en grandes cantidades, pero para que formen un depósito, todas las fugas deben fluir hacia una zona bien definida alrededor del bulto, con las consiguientes pérdidas por drenaje. En general, no todo el contenido de una cisterna dará lugar a esa situación, pues gran parte se consumirá en la propia cisterna o durante su transferencia a las cercanías del bulto. El contenido de otras cisternas arderá muy probablemente en un lugar más alejado a medida que el fuego se traslade de una cisterna a otra. También debe tenerse en cuenta el hecho de que, cuando no hay vidas directamente en peligro, a menudo se permite que los incendios continúen hasta su extinción de forma natural. En consecuencia, los registros históricos de la duración de los incendios deberían tomarse con cautela. Teniendo en cuenta estos factores se ha elegido una duración de 30 min, en que se considera la escasa probabilidad de que un bulto se vea sometido a un incendio provocado por un gran volumen de combustible y la geometría correspondiente al “peor caso” que se ha especificado. Es muy posible que un incendio de poca probabilidad, como un accidente de larga duración, se produzca en combinación con una geometría que reduzca eficazmente el aporte de calor, con el bulto apoyado sobre el terreno o protegido por la estructura del vehículo. Por tanto, el aporte de calor en el ensayo térmico es compatible con situaciones reales de accidentes muy graves.

728.5. La siguiente configuración geométrica del fuego minimiza los efectos de las pérdidas por radiación y maximiza el aporte de calor a los bultos:

- a) Una elevación del bulto de 0,6 m a 1 m garantiza que las llamas estén bien desarrolladas en la posición del bulto, con espacio suficiente para la afluencia lateral de aire. Esto mejora la uniformidad de la llama, sin que se vean afectados los flujos de calor.
- b) La extensión de la fuente de combustible a partir del contorno del bulto garantiza un espesor mínimo de llama de aproximadamente 1 m y da por resultado un coeficiente de emisión de la llama razonablemente alto. Para que la llama cubra mejor el bulto, el tamaño del depósito debería ser tal que

este se extendiera de 1 a 3 m a partir de la superficie externa del espécimen sujeto a ensayo. Una extensión mayor puede provocar un agotamiento del oxígeno en el centro y temperaturas relativamente bajas cerca del bulto [34].

728.6. Solamente la convección natural y la radiación térmica deberían contribuir a la pérdida de calor desde la superficie del bulto después de extinguirse el incendio.

728.7. El Reglamento de Transporte permite el empleo de valores del coeficiente de absorción superficial distintos del valor normalizado de 0,8 cuando pueda justificarse. En la práctica, el fuego en un depósito abierto emite tanto humo que es probable que se deposite hollín en las superficies frías y modifique sus condiciones. Esto probablemente aumentará el coeficiente de absorción, pero interpondrá una barrera a la conducción. El valor de 0,8 es compatible con los coeficientes de captación térmica de las pinturas y puede considerarse que se aproxima a los efectos del depósito de hollín en las superficies. A medida que se calienta la superficie, el hollín no puede retenerse y podrían producirse valores inferiores del coeficiente de absorción superficial.

728.8. Una proporción importante del aporte de calor puede proceder de la convección, en particular cuando la superficie externa del bulto tiene aletas y al principio del ensayo, cuando las superficies están relativamente frías. El aporte de calor por convección debería ser, como mínimo, equivalente al derivado de una combustión en aire de un combustible hidrocarburado en las condiciones especificadas.

728.9. Naturalmente, el principal efecto del ensayo térmico es el aumento de temperatura de los bultos al que van aparejados otros efectos, como las presiones internas elevadas. La temperatura máxima depende en cierto grado de la temperatura inicial que, por tanto, debería determinarse en función de las condiciones iniciales máximas apropiadas de generación de calor interno, irradiación solar y temperatura ambiente. En la práctica no se podrán conseguir en el ensayo todas estas condiciones iniciales, por lo que deberían realizarse las correspondientes mediciones (por ejemplo, de la temperatura ambiente) y corregirse las temperaturas del bulto tras el ensayo.

728.10. Las condiciones de combustión definidas en el Reglamento de Transporte y el requisito de que el bulto se encuentre totalmente rodeado por el fuego mientras dure el ensayo representan un ensayo muy riguroso para un bulto. No se pretende definir el peor fuego imaginable. En la práctica, algunos parámetros pueden ser más exigentes que los especificados en el Reglamento

de Transporte, pero otros lo serían menos. Por ejemplo, es difícil concebir una situación real en que todas las superficies del bulto puedan experimentar los efectos totales del fuego, puesto que es previsible que una parte considerable del área superficial se encuentre protegida, ya sea por el terreno o por los restos y residuos resultantes del accidente. Se ha concedido mayor importancia al flujo de calor que a los parámetros independientes elegidos, por lo que las condiciones especificadas representan un ensayo muy riguroso para cualquier bulto [32]. Cabe también señalar que el ensayo térmico constituye solamente uno de los incluidos en las series acumulativas de ensayos que deben aplicarse para producir el máximo daño en un bulto. Deberá demostrarse que este daño es pequeño en relación con los estrictos criterios de integridad de la contención, la tasa de dosis y la seguridad con respecto a la criticidad.

728.11. Los requisitos del ensayo térmico pueden satisfacerse mediante un ensayo real, una evaluación con cálculos o una combinación de ambos métodos. Esta última solución podría ser necesaria si, por ejemplo, no pueden lograrse las condiciones iniciales que se requieren para el ensayo real o si no se consigue representar completamente en el experimento todas las características de diseño del bulto. En muchos casos, las consecuencias del ensayo térmico deben determinarse mediante cálculo, lo que se convierte, por tanto, en parte integrante de la planificación y la ejecución del ensayo real. Pueden utilizarse otros métodos o técnicas, pero previsiblemente requerirán mayor grado de justificación para aplicarlos. En el Reglamento de Transporte se especifican ciertos parámetros para la combustión, que son datos de entrada fundamentales para el método de cálculo, pero que, por lo general, son parámetros incontrolables en los ensayos reales. Por consiguiente, la normalización del ensayo se logra definiendo el combustible y la geometría del ensayo para un fuego en un depósito y estipulando otros métodos prácticos que proporcionen igual o mayor aporte térmico.

728.12. En lo que concierne al diseño del bulto, algunos materiales de blindaje tienen aleaciones eutécticas con puntos de fusión inferiores a los 800 °C de la temperatura del ensayo térmico. Por consiguiente, debería tenerse en cuenta la capacidad de los materiales estructurales para retenerlos. Los materiales de blindaje local, como plásticos, cera de parafina o agua, pueden evaporarse y provocar una presión que puede romper una pared que ya estuviera debilitada por el daño sufrido en los ensayos mecánicos. Quizás sea necesario realizar un análisis térmico para evaluar si pueden alcanzarse esas presiones.

728.13. La base del bulto objeto de ensayo debería ubicarse entre 0,6 m y 1 m por encima de la superficie de la fuente de combustible líquido. A menos que se agregue más combustible o se sustituya este por otro líquido como agua, el nivel

probablemente descenderá durante el ensayo entre 100 y 200 mm. El espécimen debería sustentarse de modo que el flujo de calor y las llamas sean perturbados lo mínimo posible. Por ejemplo, es preferible utilizar un número mayor de pequeños pilares que un único apoyo que abarque una amplia superficie del bulto. El vehículo de transporte y todo el otro equipo auxiliar, que en la práctica pueda dar protección al bulto, no deberían ser considerados en el ensayo, puesto que ya se ha tenido en cuenta esa protección al definir sus condiciones.

728.14. Las dimensiones del depósito de combustible deberían ser tales que se extiendan entre 1 y 3 m más allá de cualquiera de los bordes del bulto, de modo que todos sus lados estén expuestos a una llama luminosa de un espesor no menor de 0,7 m ni mayor de 3 m, teniendo en cuenta la reducción del espesor de la llama al aumentar la altura desde el depósito de combustible. En general, los bultos de mayores dimensiones requerirán una mayor extensión, puesto que el espesor de la llama variará más cuando las distancias sean mayores. El requisito de que las llamas rodeen completamente el espécimen puede interpretarse como que es preciso que todas las partes del bulto permanezcan invisibles durante los 30 min que dura el ensayo o al menos durante una gran parte de ese tiempo. La mejor manera de cumplir este requisito consiste en prever una cobertura de llamas suficientemente ancha para que pueda adaptarse a las variaciones naturales del espesor sin que llegue a ser transparente. También se precisan bajas velocidades de viento (condiciones de reposo) para lograr una cobertura de llamas estable, si bien los incendios grandes pueden originar velocidades de viento altas de carácter local. Pueden utilizarse pantallas contra el viento o deflectores para estabilizar las llamas, pero debería evitarse modificar el carácter de las llamas, así como la radiación reflejada o directa procedente de las superficies externas. Ello aumentaría el aporte térmico y, por consiguiente, aunque no invalidaría el ensayo, podría hacer que este fuera más riguroso de lo necesario.

728.15. Velocidades del viento inferiores a 2 m/s no deberían impedir la realización del ensayo y las ráfagas de mayor velocidad, pero de breve duración, no tendrán efectos importantes en bultos de elevada capacidad térmica, en particular si se mantiene la cobertura de llamas. Los ensayos al aire libre solo se realizarán cuando se prevea que no lloverá, granizará o nevará antes de finalizar el período de enfriamiento tras el ensayo. El bulto debería colocarse de modo que la menor de sus dimensiones quede en posición vertical para conseguir una cobertura de llamas más uniforme, a menos que una orientación diferente propicie mayor aporte térmico o mayor daño, situación en que debería elegirse esa variante. Es aceptable considerar una única orientación del bulto tanto para el ensayo de exposición al fuego de 30 min como para el período de enfriamiento posterior. La orientación del bulto durante el ensayo de 30 min y el

período posterior de enfriamiento debería ser la que produzca el máximo daño al bulto. No obstante, la orientación del bulto que se considere para la evaluación del estado estable anterior al ensayo de exposición al fuego es la existente en condiciones de transporte rutinarias.

728.16. El combustible para el fuego en un depósito debería ser un destilado de petróleo que tenga un punto final de destilación de 330 °C como máximo, un punto de inflamación en el aire libre de 46 °C como mínimo y un poder calorífico bruto de 46 a 49 MJ/k. Estas condiciones las cumplen la mayoría de los hidrocarburos derivados del petróleo con densidades inferiores a 820 kg/m³, por ejemplo, el keroseno y los combustibles JP4. Puede utilizarse una pequeña cantidad de combustible más volátil para encender el depósito de combustible, ya que sería insignificante el efecto que tendría en el aporte térmico total.

728.17. La elección de la instrumentación estará determinada por el uso que, en la práctica, se pretenda dar al ensayo térmico. Es fundamental contar con cierta instrumentación cuando se prevea utilizar los datos del ensayo en cálculos para demostrar el cumplimiento de los requisitos. El tipo y la ubicación de los instrumentos dependerán de los datos que se precisen, por ejemplo, quizás se requieran mediciones de la presión interna y la temperatura y, cuando se consideren importantes las tensiones, deberían instalarse extensímetros. En todos los casos, los cables que transmitan las señales a través de las llamas deberían protegerse para evitar voltajes extraños creados por las elevadas temperaturas. Como método sustitutivo de la medición en continuo, puede equiparse el bulto de modo que los instrumentos se conecten poco después de que se apague el fuego, con la suficiente celeridad para medir la presión y la temperatura máximas. Puede efectuarse la medición de las fugas realizando una presurización previa y volviendo a medir la presión después del ensayo térmico, introduciendo los ajustes apropiados de temperatura cuando sea necesario (véanse los párrs. 659.5 a 659.24).

728.18. La duración del ensayo puede controlarse preparando un suministro de combustible calculado, de modo que se asegure la duración requerida de 30 minutos, cortando el suministro de combustible en un determinado momento antes de que finalice el ensayo, descargando el combustible del depósito al finalizar el ensayo o extinguiendo cuidadosamente el fuego sin afectar con el agente extintor a las superficies del bulto. La duración del ensayo será el tiempo que transcurra entre el momento en que se logre una buena cobertura de llamas y las temperaturas de llama necesarias, y el momento en que dicha cobertura y temperatura desaparezcan.

728.19. Las mediciones deberían continuar después de la combustión, como mínimo hasta que comiencen a descender las temperaturas y las presiones internas. Si durante ese período llueve u ocurre otro tipo de precipitación, debería construirse una cubierta provisional para proteger el bulto y así prevenir una extinción inadvertida de la combustión de sus materiales, si bien debería tratarse de no restringir la pérdida de calor desde el bulto.

728.20. Cuando el ensayo suministre datos para una evaluación analítica del bulto, las mediciones realizadas a lo largo de su ejecución deberían corregirse para condiciones iniciales de temperatura ambiente, irradiación solar, carga térmica interna, presión, etc., que no sean las normales. Asimismo, deberían evaluarse los efectos que una carga parcial (es decir, cuando el contenido sea inferior al máximo) produciría en la capacidad de captación térmica, así como la transferencia de calor en el bulto.

728.21. Con frecuencia es más conveniente realizar el ensayo térmico en un horno que en un depósito abierto con acción directa del fuego. Otros ambientes de ensayo podrían ser fuegos en fosos y un sistema de quemado al aire libre que funcione con gas licuado de petróleo [35]. Cualquiera de esos ensayos sería aceptable, siempre que satisfaga los requisitos del párrafo 728 del Reglamento de Transporte. El nivel de oxígeno debería tenerse en cuenta, sobre todo cuando el bulto contenga material combustible [36]. En las referencias [37 a 39] pueden encontrarse diversos métodos para verificar el aporte térmico requerido y comprobar las condiciones térmicas.

728.22. Si se establece que el aumento interno de la temperatura no sea inferior al previsto para un fuego de 800 °C, se asegurará que el aporte térmico sea el satisfactorio. No obstante, el ensayo debería continuar por lo menos durante 30 min, tiempo en que la temperatura ambiente media promediada debería ser de 800 °C como mínimo. Debería conseguirse una fuente de radiación de elevado coeficiente de emisión con un horno que tenga una superficie interna mucho mayor que el área alrededor del bulto o una superficie interna que en sí misma tenga un elevado coeficiente de emisión (0,9 o superior). En muchos hornos no puede reproducirse ni el coeficiente de emisión que se precisa ni las condiciones de aporte térmico por convección de un fuego abierto, por lo que puede ser necesario prolongar la duración del ensayo para compensarlo. Como alternativa, puede aplicarse una mayor temperatura al horno, pero la duración del ensayo debería ser de al menos 30 min. Debería medirse la temperatura de las paredes del horno en varios puntos, los suficientes para verificar que la temperatura media es de 800 °C como mínimo. El horno puede precalentarse durante el tiempo suficiente para lograr el equilibrio térmico, evitando así

un considerable descenso de la temperatura cuando se introduzca el bulto. La duración mínima de 30 min debería ser tal que la temperatura del medio promediada en el tiempo sea al menos de 800 °C.

728.23. Si no se realizan muchos ensayos diferentes puede ser imposible calcular la transferencia de calor o determinar los cambios físicos y químicos en el bulto de tamaño natural a base de la extrapolación de los resultados de un ensayo térmico de un modelo a escala. Un programa de amplio alcance, que simule cada proceso por separado, exigiría la realización de una extensa investigación utilizando un modelo teórico, por lo que esta técnica presenta muy pocas ventajas respecto del enfoque analítico normal. Debería demostrarse la validez técnica de todo ensayo en un modelo a escala, así como la interpretación de sus resultados. No obstante, si resultan difíciles los cálculos correspondientes a un componente (por ejemplo, una superficie con aletas), puede ser útil el empleo de modelos de partes del bulto de tamaño natural. Por ejemplo, la eficacia de un blindaje térmico o de un amortiguador de choque que ejerza esa función se podría demostrar más fácilmente mediante el ensayo de ese componente con una estructura relativamente sencilla bajo él. La modelación de los componentes es importante para la validación de los modelos informáticos. Ahora bien, las mediciones de la temperatura de la llama y del coeficiente de emisión de la llama y de la superficie son difíciles de realizar y quizás no suministren una especificación suficientemente precisa para los cálculos de validación. Debería seleccionarse el tamaño del componente y suministrarle un aislamiento apropiado para que no sea excesivo el calor que se transfiera desde los límites artificiales (es decir, los que representan el resto del bulto).

728.24. Los ensayos térmicos en modelos a escala reducida que se ajusten a las condiciones del ensayo térmico pueden arrojar resultados moderados en las temperaturas, suponiendo que no se produzcan cambios fundamentales en el comportamiento térmico de los componentes.

728.25. El cálculo es el método que más se utiliza para evaluar la respuesta del bulto en el ensayo térmico. Para realizar esa modelación del bulto existen muchos códigos informáticos de transferencia térmica de carácter genérico, si bien debería confirmarse que las disposiciones del código son adecuadas para la geometría del bulto, en particular, para la representación de la transferencia de calor por radiación del medio a las superficies externas. En última instancia, tal vez sea necesario efectuar ensayos reales para validar los cálculos, aunque con frecuencia se argumenta que las aproximaciones o hipótesis suponen un ensayo más estricto que el requerido. En general, la validez de los códigos se comprueba por comparación con soluciones analíticas y con otros códigos.

728.26. Por lo general, las condiciones de transporte normales se evalúan mediante cálculo para obtener distribuciones detalladas de temperatura y presión. En otro caso, las temperaturas del bulto podrían medirse experimentalmente, de manera que, tras corregir los valores según la correspondiente temperatura ambiente, los efectos de la irradiación solar y la carga térmica debida al contenido, se obtengan las condiciones iniciales para aplicar las condiciones de cálculo del ensayo térmico. Las correcciones según la temperatura ambiente pueden efectuarse con arreglo a lo especificado en el párrafo 653.4.

728.27. Las condiciones extremas del fuego deberían representar radiación, reflexión y convección. En el Reglamento de Transporte se especifica una temperatura media de 800 °C, de modo que en general debería utilizarse una temperatura media uniforme de 800 °C para la fuente de radiación térmica y para la transferencia térmica por convección.

728.28. Se ha establecido un coeficiente de emisión de la llama de 0,9. Este valor puede utilizarse sin ambigüedades para superficies planas pero, para superficies con aletas, las llamas delgadas entre las aletas tendrán un coeficiente de emisión muy inferior a ese valor y, por tanto, la fuente principal de radiación para las superficies con aletas serán las llamas del exterior de las aletas; puede pasarse por alto la radiación procedente de las llamas dentro de la cavidad de las aletas. En todos los casos, para la fuente de radiación envolvente de las aletas deberían utilizarse factores geométricos apropiados de visualización y también debería tenerse en cuenta la radiación reflejada. Dado que no es una situación normal, debería evitarse la inclusión de radiación térmica “reflejada” desde una superficie que represente las llamas.

728.29. El coeficiente de absorción superficial se establece en 0,8, a menos que pueda determinarse un valor sustitutivo. Será extremadamente difícil demostrar la validez de otros valores en la práctica, puesto que las condiciones de la superficie se modifican con el fuego, en particular como resultado de la formación de hollín, por lo que podrían no ser aplicables los datos obtenidos después de un incendio. Por consiguiente, el valor de 0,8 será el que probablemente se utilice en las evaluaciones analíticas. Es importante tener en cuenta la radiación térmica reflejada, sobre todo en superficies complejas con aletas, puesto que las reflexiones múltiples aumentan el coeficiente de absorción eficaz hasta cerca de la unidad. Esta complejidad puede evitarse suponiendo un valor de 1 para el coeficiente de captación superficial, pero aún en este caso, la radiación térmica de superficie a superficie no debería desestimarse, en particular durante el período de enfriamiento.

728.30. Durante el fuego deberían justificarse los coeficientes de convección. Las velocidades gaseosas en fuegos al aire libre se encuentran por lo general en el intervalo de 5 a 10 m/s [40]. La utilización de esas velocidades en la convección forzada, y en las correlaciones de transferencia de calor (por ejemplo, la relación de Colburn entre los números de Nusselt, Prandtl y Reynolds $Nu = 0,036 Pr^{1/3} Re^{0.8}$ citada en la ref. [41]) da lugar a coeficientes de transferencia de calor por convección de cerca de $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$ para bultos de grandes dimensiones. Los coeficientes de convección natural (cerca de $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) no resultan apropiados, ya que implican un flujo gaseoso descendente contiguo a las paredes frías del bulto, mientras que, en la práctica, predominará un flujo general ascendente de carácter oscilante. Es poco probable que en condiciones atmosféricas estables se produzcan esas elevadas velocidades gaseosas en la superficie superior del bulto puesto que esa zona comprenderá un área de estancamiento al abrigo del flujo gaseoso ascendente. Esa convección reducida se representa adecuadamente por el coeficiente medio, ya que el proceso promediado incluye ese efecto.

728.31. Los coeficientes de convección para el período de enfriamiento tras el ensayo pueden obtenerse de referencias sobre convección natural típica, por ejemplo, de la referencia [41]. En este caso, pueden aplicarse fácilmente los coeficientes apropiados para cada superficie. Para los planos verticales, la ecuación de convección natural turbulenta para números de Grashof $> 10^9$ viene determinada por:

$$Nu = 0,13 (Pr \cdot Gr)^{1/3} \quad (7.2)$$

Deberían utilizarse las condiciones extremas que se aplican para la evaluación de las condiciones en funcionamiento normal. En la evaluación posterior al ensayo deberían considerarse los cambios que provoque el fuego en las condiciones o en la geometría de la superficie, puesto que pueden afectar a las pérdidas de radiación térmica y de calor por convección. Debería considerarse un margen para el aporte térmico continuo si los componentes del bulto continúan en combustión después de la exposición al ensayo térmico.

728.32. Debería modelarse adecuadamente todo el blindaje térmico, por ejemplo, los limitadores de impacto, que se haya visto afectado en los ensayos mecánicos mencionados en el párrafo 727 del Reglamento de Transporte. Algunos ejemplos serían: cambios de forma o dimensiones, cambios de densidad de los materiales a causa de la compactación y la separación del blindaje térmico.

728.33. Los cálculos que se realicen utilizando modelos de elementos finitos o diferencias finitas deberían tener una malla o distribución de elementos suficientemente fina para representar adecuadamente la conducción interna y las condiciones extremas externas e internas. Debería prestarse atención especial a los elementos exteriores, como las aletas, ya que los gradientes de temperatura pueden ser considerables y quizás exijan cálculos detallados por separado para determinar el flujo térmico hacia el cuerpo principal del embalaje. Debería decidirse si se eligen modelos monodimensionales, bidimensionales o tridimensionales, y si se evalúa el bulto completo o solo sus partes por separado.

728.34. Las superficies exteriores que tengan baja conductividad térmica pueden producir oscilaciones en las temperaturas calculadas. Para resolver este problema podría ser necesario utilizar técnicas especiales (por ejemplo, condiciones extremas simplificadas) o hipótesis especiales (por ejemplo, que las temperaturas promediadas en el tiempo sean lo suficientemente exactas).

728.35. La conducción y la radiación pueden modelarse generalmente de manera explícita, y la convección externa plantea pocos problemas en relación con los códigos informáticos. No obstante, quizás se requieran pruebas experimentales para corroborar las hipótesis de los modelos y los datos básicos utilizados para representar la convección y la radiación internas. La reflexión de la radiación será importante en los bultos que contengan gas, y un insuficiente conocimiento de los coeficientes de emisión térmica puede repercutir negativamente en la precisión final. Puede utilizarse un estudio de sensibilidad con diferentes valores de emisión térmica para demostrar que las hipótesis son adecuadas o para obtener límites conservadores (es decir, máximos) de las temperaturas que se calculan.

728.36. La convección interna será importante en lo que respecta a los bultos que contengan agua y puede resultar considerable en los bultos que contengan gas. Este proceso es difícil de prever a menos que existan suficientes datos experimentales para corroborar las hipótesis de los modelos. Cuando existan vías de circulación del agua, la disipación térmica interna será rápida en comparación con otras constantes temporales, y podrán establecerse entonces hipótesis simplificadoras (por ejemplo, el agua puede modelarse con un material artificial de elevada conductividad). Habría que tratar de tener en cuenta las zonas sin circulación (zonas de estancamiento), pues en ellas pueden producirse temperaturas altas debido a la conductividad térmica inherentemente baja del agua.

728.37. Los huecos de gas y las resistencias de contacto pueden variar con la expansión diferencial de los componentes y no siempre resulta claro si una determinada hipótesis arrojará temperaturas bajas o elevadas. Por ejemplo, un

hueco de gas de elevada resistencia impedirá la circulación de calor, minimizando las temperaturas en el interior, pero maximizando otras temperaturas debido a la reducida capacidad de captación térmica efectiva. En estos casos, los cálculos basados en dos hipótesis extremas pueden demostrar que ambas condiciones son aceptables y, en consecuencia, que todas las variaciones entre ellas también lo son. Los huecos y la resistencia de contacto en la muestra de ensayo deberían ser representativos de la futura producción. Rara vez se representan explícitamente los sistemas de sellado, pero pueden utilizarse las temperaturas locales como una buena aproximación a las temperaturas que aquellos pueden alcanzar.

728.38. El cálculo de los transitorios del ensayo térmico debería incluir una representación de las condiciones iniciales, un período de 30 min en las condiciones externas que representan el fuego y un período de enfriamiento que se prolongue hasta que todas las temperaturas disminuyan con el tiempo. Además, deberían realizarse otros cálculos, quizá con una distribución de malla distinta, para verificar la validez del modelo y evaluar las incertidumbres relacionadas con las hipótesis adoptadas en la modelación.

728.39. Los resultados del análisis se utilizarán para confirmar que el bulto tiene una resistencia adecuada y que las tasas de fuga serán aceptables. Una medida importante es determinar las presiones a partir de las temperaturas que se calculen, en particular, cuando el bulto contiene un líquido volátil como el agua o el hexafluoruro de uranio. A menudo, no debe permitirse que se fundan determinadas partes, como los blindajes de plomo, puesto que las condiciones resultantes no pueden definirse con exactitud y, por consiguiente, tal vez no sea posible realizar las evaluaciones relativas al blindaje. Deberían examinarse las temperaturas de los componentes, si fuera preciso en conexión con puntos calientes localizados, para tener la certeza de que no se producirá una fusión u otros modos de fallo a lo largo de todo el proceso. Deberían conocerse las incertidumbres en el modelo, en los datos (por ejemplo, las tolerancias de fabricación) y las limitaciones de los códigos informáticos, y adoptarse en consecuencia los márgenes para esas incertidumbres.

728.40. Las temperaturas y la presión de equilibrio que se produzcan tras la exposición podrían verse afectadas por cambios irreversibles ocurridos en el ensayo térmico (quizá debido a medidas de protección, como la utilización de revestimientos que se dilatan o la fusión y posterior reubicación del plomo dentro del bulto). Estos efectos deberían evaluarse.

729.1. Como resultado de accidentes de transporte que ocurran cerca o dentro de un río, lago o mar, un bulto podría someterse a una presión externa

por su inmersión en el agua. Para simular el daño equivalente que causaría este suceso de poca probabilidad, en el Reglamento de Transporte se establece que un embalaje debe poder resistir las presiones externas resultantes de la inmersión a profundidades que sean razonables. Estimaciones de ingeniería indicaron que las profundidades en el agua, cerca de la mayoría de los puentes, autovías o puertos, serían inferiores a 15 m. Por ello se escogieron esos 15 m como profundidad de inmersión para los bultos (cabe señalar que los bultos que contengan grandes cantidades de combustible nuclear irradiado deberán resistir la inmersión a una profundidad superior (véase el párr. 730 del Reglamento de Transporte). Aunque es posible la inmersión a profundidades superiores a 15 m, se seleccionó este valor para abarcar el daño equivalente debido a la mayoría de los accidentes de transporte. Además, las posibles consecuencias de una emisión significativa serían mayores cerca de la costa o en una masa de agua de poca profundidad. El período de 8 h es suficientemente largo para que el bulto pueda alcanzar un estado estable respecto de los efectos derivados de la inmersión (por ejemplo, la inundación de los compartimentos externos).

729.2. Los requisitos del ensayo de inmersión en agua se pueden satisfacer mediante la inmersión del bulto, un ensayo de presión de al menos 150 kPa, un ensayo de presión en los componentes críticos combinado con cálculos, o mediante cálculos para el conjunto del bulto. No tiene por qué someterse el bulto completo al ensayo de presión. En la evaluación debería incluirse una justificación de las hipótesis del modelo en relación con la respuesta de los componentes críticos.

Ensayo de inmersión en agua aplicable a los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M) que contengan más de $10^5 A_2$, y a los bultos del Tipo C

730.1. Véanse los párrafos 660.1 a 660.7, 729.1 y 729.2.

730.2. El requisito de un ensayo de inmersión en agua puede satisfacerse con la inmersión del bulto, mediante un ensayo de presión de al menos 2 Mpa, o un ensayo de presión de los componentes críticos junto con la realización de cálculos, o mediante cálculos para el bulto en su conjunto. A modo de ejemplo, los componentes críticos, como el área de tapa, pueden someterse a una presión manométrica externa de al menos 2 Mpa y el equilibrio estructural puede evaluarse mediante cálculos.

730.3. Si se opta por la técnica basada en cálculos, debería tenerse en cuenta que los métodos utilizados en la actualidad normalmente tienen la finalidad de definir materiales, propiedades y geometrías conducentes a un diseño capaz

de soportar la carga de presión requerida sin daño alguno. En relación con el requisito de inmersión durante un período no inferior a 1 h, es aceptable algún grado de pandeo o deformación del bulto, siempre que la condición final se ajuste a lo establecido en el párrafo 660 del Reglamento de Transporte.

Ensayo de infiltración de agua aplicable a los bultos con sustancias fisibles

732.1. Se requiere este ensayo porque la entrada de agua puede afectar considerablemente al contenido de materiales fisibles permisible de un bulto. Se elegirá la secuencia de ensayos que cree condiciones que permitan la libre entrada de agua en el bulto y daños que puedan variar la disposición del contenido fisible.

733.1. El ensayo de inmersión tiene por objeto asegurar que los resultados de la evaluación de criticidad sean conservadores. La secuencia de ensayos que se realicen con antelación a la inmersión simula las condiciones que un bulto podría encontrar en un accidente muy grave ocurrido durante su transporte cerca o dentro del agua.

Ensayos aplicables a los bultos del Tipo C

734.1. En el Reglamento de Transporte no se estipula que se someta el mismo espécimen a todos los ensayos establecidos porque en la realidad no se produce ninguna secuencia de accidentes que combine todos los ensayos en su intensidad máxima. En su lugar, en el Reglamento de Transporte se dispone que los ensayos se realicen en secuencias que concentren el daño en una sucesión lógica que sea típica de los accidentes muy graves (véase la ref. [42]).

734.2. Pueden someterse diferentes especímenes a las secuencias de ensayos. El criterio para la evaluación del cumplimiento del ensayo de inmersión en agua que se establece en el párrafo 730 del Reglamento de Transporte difiere del criterio especificado para otros ensayos. La evaluación de la integridad del blindaje y de la contención del bulto tiene que realizarse al término de cada una de las secuencias de ensayos.

735.1. Hay muchas posibilidades de que ocurra una perforación o un desgarramiento. No obstante, las condiciones de accidente son difíciles de describir de manera cualitativa y cuantitativa [43, 44]. El daño por perforación podrían causarlo partes de la estructura del avión o la carga. La perforación en tierra es posible, pero se considera de menor importancia.

735.2. La perforación podría originar una emisión desde el sistema de contención del bulto, aunque la probabilidad es muy escasa. Sería más preocupante que se dañara la capacidad de aislamiento térmico del bulto, pues provocaría un comportamiento insatisfactorio si se produce un incendio tras un impacto.

735.3. El diseño de los ensayos exige la definición de una sonda de determinada longitud, diámetro y masa; un blanco indeformable y una velocidad de impacto. Para especificar la sonda, una posibilidad es remitirse a los componentes de la aeronave. En algunos ensayos o propuestas de ensayos se ha incorporado un travesaño en forma de I, pero se ha preferido adoptar un objeto con una geometría más convencional como, por ejemplo, un cono circular recto. Se considera que esa configuración sería una de las que podría causar un daño considerable. Una altura de caída o un recorrido de la sonda de unos pocos metros representa el hundimiento de las estructuras o los rebotes que pueden producirse dentro de una aeronave.

735.4. La rotura de los motores puede generar fragmentos sueltos en un grado que merece consideración. La pérdida de la aeronave es solo una entre muchas de las posibles consecuencias que tiene la emisión de proyectiles, que pueden ser bastante energéticos (hasta 105 J). Sin embargo, en estudios específicos se ha descubierto que la probabilidad de que un fragmento golpee un bulto es muy escasa [42, 45, 46] y la probabilidad de que ocurra una perforación, aunque no se ha estimado, sería menor aún. Por tanto, partiendo de esta poca probabilidad, se consideró innecesario definir un ensayo que abarcara los daños debidos a fragmentos de los motores.

735.5. En relación con el párrafo 735 a) del Reglamento de Transporte, se dejan sin especificar la longitud total de la sonda y los detalles de su construcción, si bien deberían ajustarse de modo que se cumpla el requisito de masa que se establece. En cuanto al párrafo 735 b), el objeto perforador debería tener una longitud y una masa suficientes para poder atravesar los materiales absorbentes de energía y los de aislamiento térmico que rodeen la contención interna y debería tener suficiente rigidez para suministrar fuerza de penetración sin que se rompa o se aplaste. En ambos casos deberían alinearse los centros de gravedad de la sonda y del embalaje para evitar que se produzca un pandeo que no facilite la penetración [47].

735.6. Véase más información en el párrafo 727 del Reglamento de Transporte.

736.1. En el caso del accidente aéreo se estableció una duración de 60 minutos para el ensayo térmico. Las estadísticas sobre incendios producidos en accidentes aéreos apoyan la conclusión de que un ensayo térmico de 60 min supera la mayoría de las condiciones de incendio en que se encontraría un bulto en un accidente aéreo. Con frecuencia las estadísticas sobre duración de incendios están sesgadas por la duración de fuegos de estructuras en tierra y de otros elementos sin relación con la aeronave, así como por la ubicación de la carga asociada al accidente. Para considerar este efecto se evaluó cuidadosamente la información sobre la duración de incendios a fin de evitar el sesgo que producirían los fuegos no relacionados con la aeronave.

736.2. Cuando se definieron los requisitos del ensayo térmico se valoró la importancia de las “bolas de fuego” como un entorno de un accidente aéreo muy grave. Los estudios han demostrado que las bolas de fuego de corta duración y de alta temperatura ocurren normalmente en las primeras fases de los incendios de aeronaves y a ellas les sigue generalmente un incendio en tierra [48, 49]. El aporte de calor al bulto a causa de las bolas de fuego no es significativo si se compara con el aporte debido al ensayo térmico prolongado. Por tanto, no se requieren ensayos para analizar cómo influyen las bolas de fuego en la supervivencia del bulto.

736.3. La presencia en la aeronave de determinados materiales como el magnesio podría originar un fuego intenso. Sin embargo, no ha sido considerada como una amenaza importante para el bulto, ya que es probable que solo existan pequeñas cantidades de este material y porque estos fuegos son de carácter localizado. Asimismo, el aluminio se encuentra en grandes cantidades formando parte de los paneles del fuselaje. Estos paneles se fundirán en pocos minutos y, por tanto, no se considera verosímil que se quemara el aluminio y se incrementara considerablemente la carga de calor sobre el bulto.

736.4. Este ensayo no se realiza consecutivamente al de impacto a una velocidad de 90 m/s, que se describe en el párrafo 737 del Reglamento de Transporte. En los accidentes muy graves no se espera que coincidan el impacto a gran velocidad y los incendios de larga duración porque en los accidentes a gran velocidad el combustible se dispersa y provoca incendios no envolventes, más extendidos y con menos consecuencias. El bulto del Tipo C tiene que someterse a una extensa secuencia de ensayos, que incluye los de impacto y aplastamiento requeridos para bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) (caída I — párr. 727 a) del Reglamento de Transporte) y el ensayo de aplastamiento (caída III — párr. 727 a) y c) del Reglamento de Transporte), que son seguidos de los de perforación-desgarramiento (párr. 735 del Reglamento de Transporte) y que culminan con el

ensayo térmico reforzado (párr. 736 del Reglamento de Transporte). Se considera que la combinación acumulativa de estos ensayos suministra protección ante accidentes aéreos muy graves que entrañen tanto un impacto como un incendio.

736.5. Debería tenerse en cuenta que en este fuego de mayor duración, en comparación con el de los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M), el aislante térmico o el material estructural del que depende la eficacia del aislante puede fundirse, quemarse o perderse.

736.6. Véase más información en los párrafos 728.1 a 728.40.

737.1. El objetivo que se perseguía al establecer las condiciones del ensayo de impacto era definir la combinación de determinadas velocidades normales de un blanco indeformable que produjera condiciones de daño en el espécimen equivalentes a las que podrían preverse de impactos de aeronaves a velocidades reales sobre superficies reales y en ángulos aleatorios. Se consideraron distribuciones probabilistas de la variable en los accidentes, así como la orientación del bulto que sería más vulnerable al daño.

737.2. Los datos en que se basan los análisis de accidentes se han obtenido de informes sobre las circunstancias de accidentes registrados por los funcionarios presentes en la escena del accidente y por los que intervinieron en las investigaciones posteriores. Algunos datos se basan en mediciones reales. Otros se derivan del análisis de los datos y de deducciones basadas en una noción de cómo evolucionó probablemente el accidente. Cada informe de accidente tiene que ser evaluado y los datos transformados en algunas de las características básicas, como la velocidad de impacto, las características de la masa impactada, el ángulo de impacto y la naturaleza de la superficie de impacto. Con frecuencia es necesario obtener otros informes sobre el accidente a fin de hacer una comprobación cruzada de la información.

737.3. Los datos básicos que pueden obtenerse del informe de un accidente son útiles, pero no incluyen los efectos del accidente que haya soportado la carga afectada. Por ejemplo, el daño al medio de transporte y a la carga podría ser muy distinto si aquel chocó con un vehículo pequeño, un terraplén blando o el contrafuerte de un puente. A fin de tener en cuenta este efecto, se realiza un análisis para traducir la velocidad de impacto real en una velocidad efectiva de impacto de frente sobre una superficie indeformable (véanse los párrs. 717.1 y 717.2). Así, toda la energía disponible provoca la deformación del vehículo y de la carga de bultos. Es lógico suponer que la aeronave no absorbe energía, lo que implica un análisis conservador.

737.4. La hipótesis de que la carga impacta a la velocidad de la aeronave sobre una superficie indeformable dará por resultado una velocidad de impacto efectiva inferior, que dependerá de la dureza relativa de la carga respecto de la superficie real de impacto. Para un bulto “duro” y un blanco (por ejemplo, un cofre de combustible irradiado contra el agua), la razón entre la velocidad real y la efectiva puede oscilar entre 7 y 9. Cuando la dureza del bulto y de la superficie es similar, la razón puede ser del orden de 2 o superior. Para las carreteras y pistas de aterrizaje de hormigón, la razón entre las velocidades podría encontrarse en el intervalo de 1,1 a 1,4. Hay muy pocas superficies en que la razón sea 1 [42].

737.5. La transformación de los datos básicos del informe de accidente en una velocidad de impacto efectiva se realiza para normalizar las condiciones de accidente en relación con el impacto en un formato estándar que elimine gran parte de la variabilidad de las situaciones de accidente, preservando al mismo tiempo el esfuerzo sobre la carga. La repetición de este proceso para todos los accidentes aéreos aplicables genera una base estadística que permite escoger una velocidad efectiva de impacto sobre un blanco rígido [47 a 49].

737.6. Los diseños de bultos que liberen una cantidad no mayor de A_2 de material radiactivo en una semana tras los ensayos de resistencia probablemente perderían su contenido total en condiciones solo algo más rigurosas. Sin embargo, no es de esperar tal circunstancia. Más bien se espera que un bulto diseñado para cumplir el Reglamento de Transporte limite sus fugas a los niveles aceptados hasta condiciones de accidente más graves que las previstas en los ensayos requeridos y permita un incremento gradual de las fugas solo cuando las condiciones de accidente superen considerablemente los niveles de exigencia de los ensayos (es decir, los bultos deberían fallar “de manera estabilizada”). Este comportamiento es resultado de lo siguiente:

- a) los márgenes de seguridad incorporados en los diseños de bultos;
- b) la capacidad de los materiales utilizados en el bulto para determinado propósito, como el blindaje, para mitigar las cargas cuando esa capacidad no se considere explícitamente en el análisis del diseño;
- c) la capacidad de los materiales para resistir cargas mucho más allá del límite elástico, y
- d) la renuencia de los diseñadores a utilizar, o de las autoridades competentes a aprobar, materiales que tengan umbrales de fallo repentino como resultado de la fusión o la fractura en las condiciones que probablemente ocurran en el transporte.

737.7. Aunque se espera que todas esas características de un buen diseño de bulto faciliten un “fallo estabilizado”, también es cierto que se dispone de datos muy limitados de ensayos realizados en bultos para provocar su fallo y ver así el incremento de las fugas en función de la gravedad de las condiciones de accidente. Pocos datos de ensayo y análisis que se han realizado apoyan el concepto del fallo estabilizado [49 a 51].

737.8. La velocidad de impacto del ensayo se dedujo de estudios probabilistas acumulativos de distribución de frecuencias [42, 52 a 54]. La mayoría de los análisis de accidentes revelan que, al aumentar la gravedad del impacto, el número de sucesos aumenta rápidamente hasta un máximo y entonces cae hasta cero cuando la gravedad se aproxima a un límite físico, como la limitación máxima de la velocidad de la aeronave. Transformando estos datos en una curva acumulativa (es decir, un porcentaje de sucesos de una gravedad menor que un valor dado) se obtiene una curva que se eleva con rapidez al principio y después con mucha lentitud justo tras el “codo” de la curva. Cuando los datos son tratados en un formato que muestra la probabilidad de superar una velocidad de impacto determinada, la escasez de accidentes muy graves se manifiesta como un giro o codo marcado en la curva. Esta área de la curva reviste interés porque indica cuándo un incremento de los niveles de protección en la construcción de un bulto comienza a tener menos influencia en la probabilidad de fallo. Además, el área del lado izquierdo del codo de la curva abarca aproximadamente el 95 % de todos los accidentes. El “codo” de la curva se produce a 90 m/s. Este fue el valor que se escogió para el ensayo de impacto.

737.9. Exigir un diseño de bulto que proteja contra una velocidad vertical mucho más alta que el valor correspondiente al codo de la curva implicará en general un diseño más pesado, complicado y caro para conseguir un pequeño incremento en la protección del público. Aún más, un diseño que supere el impacto a la velocidad correspondiente al codo de la curva superará muchos accidentes a velocidades más altas debido al conservadurismo aplicado en el diseño de un bulto y en el análisis de los datos de accidentes, así como en la conversión de esos datos en una velocidad de impacto efectiva sobre un blanco indeformable. Dicho de otra forma, no es probable que ocurra un fallo catastrófico de la contención, incluso en el lado extremo de la curva.

737.10. Aunque en el contexto del ensayo de impacto se examinó la necesidad de realizar un ensayo de velocidad terminal para un bulto, cabe esperar que en el ensayo de impacto de 90 m/s se tome en cuenta el impacto de un bulto a la velocidad terminal. El propósito de una condición de velocidad terminal sería demostrar que el diseño del bulto proporcionaría protección en el caso de que

saliera despedido desde la aeronave. Esta situación podría ocurrir como resultado de una colisión en el aire o una rotura del fuselaje en vuelo. En cualquier caso, se observa que los requisitos para un bulto del Tipo C ya incluyen un ensayo de impacto contra una superficie indeformable a una velocidad de 90 m/s. Este ensayo sirve para demostrar rigurosamente la integridad del bulto para situaciones de descarga al exterior.

737.11. Aunque es probable que el bulto en caída libre pueda superar los 90 m/s, es improbable que la superficie de impacto sea tan dura como la superficie indeformable especificada para el ensayo. También hay que señalar que la probabilidad de que ocurra cualquier tipo de accidente aéreo es escasa y que el porcentaje de esos accidentes que entrañan colisiones en el aire o roturas del fuselaje en vuelo es muy bajo. Si ese tipo de accidente ocurre a una aeronave que transporte un bulto del Tipo C, el daño al bulto podría mitigarse si este permanece unido a los restos del fuselaje durante el descenso, lo que tendería a reducir la velocidad de impacto del bulto.

737.12. Someter un bulto a un impacto sobre una superficie indeformable con una velocidad de impacto de 90 m/s es un ensayo difícil de llevar a cabo de manera correcta. Esta velocidad de impacto se corresponde con una caída libre desde unos 420 m, sin considerar la resistencia del aire. Ello supone que normalmente se precisarán cables guía para asegurar que el bulto impacte en el punto deseado y con la orientación adecuada. La caída libre guiada implica que para tener en cuenta la fricción se precisará una altura de caída mayor, de manera que la velocidad de impacto sea la correcta. Pueden también utilizarse otras fuentes de energía para conseguir la velocidad y la orientación precisas. Este tipo de técnicas incluyen la propulsión con cohetes e instalaciones con cables para arrastre en caída y cañones de aire.

737.13. Puede obtenerse información adicional de utilidad en los párrafos 701.1 a 701.25 y 727.6 a 727.11.

737.14. Para un bulto que contenga materiales fisibles en cantidades no exceptuadas por lo establecido en el párrafo 674 del Reglamento de Transporte, el término “máximo daño” debería considerarse como las condiciones de daño que den lugar al factor de máxima multiplicación neutrónica.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN VII

- [1] BJORKMAN, G., “The effect of gaps on the impact response of a cask closure lid”, ASME PVP 2009-77800 (Pressure Vessels and Piping Conference), Prague, Czech Republic (2009).
- [2] WILLE, F., BALLHEIMER, V., QUERCETTI, T., STERTHAUS, J., “Consideration of gaps between content and lid within package design assessment”, RAMTrans 2015 (Radioactive Materials Transport and Storage Conference and Exhibition), Oxford, UK (May 2015).
- [3] WILLE, F., BALLHEIMER V., DROSTE, B., Suggestions for correct performance of IAEA 1m puncture bar drop test with reduced scale packages considering similarity theory aspects, *Packag. Transp. Storage Sec. Radioact. Mat.* 18 2 (2007) 111–116.
- [4] LE MAO, S., MOUTARDE, M., LIZOT, M.-T., SERT, G., “IRSN’s experience feedback list for the transport package design safety appraisals”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2007* (Proc. Int. Symp. Miami, 2007), Institute of Nuclear Materials Management, Deerfield, IL (2007).
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Radiation Protection, Sealed Radioactive Sources — General Requirements and Classification, ISO 2919-2012*, ISO, Geneva (2012).
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Radiation Protection — Sealed Radioactive Sources — Leakage Test Methods, ISO 9978:2020*, ISO, Geneva (2020).
- [7] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, *American National Standard for Leakage Tests on Packages for Shipment, ANSI N14.5-2014*, ANSI, New York (2014).
- [8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Safe Transport of Radioactive Material — Leakage Testing on Packages, ISO 12807:2018*, ISO, Geneva (2018).
- [9] DROSTE, B., et al., “Evaluation of safety of casks impacting different types of targets”, *The 12th Conference on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 98* (Proc. Int. Symp. Paris, 1998), Vol. 3, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Paris (1998) 1343–1351.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Transport Packaging for Radioactive Materials* (Proc. Sem. Vienna, 1976), IAEA, Vienna (1976).
- [11] *Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM)*, Proc. Symp.: (Albuquerque, NM, 1965, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1965); Gatlinburg, TN, 1968, United States Atomic Energy Commission, Oak Ridge, TN (1968); Richland, WA, 1971, United States Atomic Energy Commission, Oak Ridge, TN (1971); Miami Beach, FL, 1974, Union Carbide Corp., Nuclear Division, Oak Ridge, TN (1975); Las Vegas, NV, 1978, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1978); Berlin (West), 1980, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980); New Orleans, LA, 1983, Oak Ridge Natl Lab., Oak Ridge, TN (1983); Davos, 1986, IAEA, Vienna (1987).

- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Nuclear Energy — Packagings for the transport of uranium hexafluoride (UF₆), ISO 7195:2020, ISO, Geneva (2020).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Directory of Transport Packaging Test Facilities, IAEA-TECDOC-295, IAEA, Vienna (1983).
- [14] 2001 Directory of Test Facilities for Radioactive Materials Transport Packages, Int. J. Radioact. Mater. Transp., Special Issue 12 2–3 (2001).
- [15] UNITED NATIONS, Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations, Twenty-second revised edition, ST/SG/AC.10/1/Rev.22, UN, 2 vols, New York and Geneva (2021).
- [16] CLARKE, R.K., FOLEY, J.T., HARTMAN, W.F., LARSON, D.W., Severities of Transportation Accidents, Rep. SLA-74-0001, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1976).
- [17] DENNIS, A.W., FOLEY, J.T., HARTMAN, W.F., LARSON, D.W., Severities of Transportation Accidents Involving Large Packages, Rep. SLA-77-0001, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1978).
- [18] McCLURE, J.D., An Analysis of the Qualification Criteria for Small Radioactive Material Shipping Packages, Rep. SAND 76-0708, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1977).
- [19] McCLURE, J.D., et al., “Relative response of Type B packagings to regulatory and other impact test environments”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 80 (Proc. Int. Symp. Berlin, 1980), Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980).
- [20] BLYTHE, R.A., MILES, J.C., HOLT, P.J., “A study of the influence of target material on impact damage”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 83 (Proc. Int. Symp. New Orleans, 1983), Oak Ridge Natl Lab., TN (1983).
- [21] GABLIN, K.A., “Non-shielded transport package impact response to unyielding and semi-yielding surfaces”, *ibid.*
- [22] HÜBNER, H.W., MASSLOWSKI, J.P., “Interactions between crush conditions and fire resistance for Type B packages less than 500 kg”, *ibid.*
- [23] DIGGS, J.M., LEISHER, W.B., POPE, R.B., TRUJILLO, A.A., “Testing to define the sensitivity of small Type B packagings to the proposed IAEA crush test requirement”, *ibid.*
- [24] CHEVALIER, G., GILLES, P., POUARD, P., “Justification and advantages of crushing tests compared with fall tests and the modification of existing regulations”, *ibid.*
- [25] COLTON, J.D., ROMANDER, C.M., Potential Crush Loading of Radioactive Material Packages in Highway, Rail and Marine Accidents, Rep. NUREG/CR-1588, SRI International, Menlo Park, CA (1980).
- [26] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Cask Designers Guide, Rep. ORN L–NSIC–68, UC-80, Oak Ridge Natl Lab., TN (1976).
- [27] DIGGS, J.M., POPE, R.B., TRUJILLO, A.A., UNCAPHER, W.L., Crush Testing of Small Type B Packagings, Rep. SAND 83-1145, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1985).

- [28] QUERCETTI, T., BALLHEIMER, V., WIESER, G., “Analytical, numerical and experimental investigation on the impact behavior of packagings under slap down conditions”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2001 (Proc. Int. Symp. Chicago, 2001) Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (2001).
- [29] McCLURE, J.D., The Probability of Spent Fuel Transportation Accidents, Rep. SAND-80-1721, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1981).
- [30] WILMOT, E.L., McCLURE, J.D., LUNA, R.E., Report on a Workshop on Transportation Accident Scenarios Involving Spent Fuel, Rep. SAND-80-2012, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1981).
- [31] POPE, R.B., YOSHIMURA, H.R., HAMANN, J.E., KLEIN, D.E., An Assessment of Accident Thermal Testing and Analysis Procedures for a RAM Shipping Package, ASME Paper 80-HT-38, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1980).
- [32] JEFFERSON, R.M., McCLURE, J.D., “Regulation versus reality”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 83 (Proc. Int. Symp. New Orleans, 1983), Oak Ridge Natl Lab., TN (1983).
- [33] FRY, C.J., “The use of CFD for modelling pool fires”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 92 (Proc. Int. Symp. Yokohama City, 1992), Science and Technology Agency, Tokyo (1992).
- [34] FRY, C.J., “An experimental examination of the IAEA fire test parameters”, *ibid.*
- [35] WIESER, G., DROSTE, B., “Thermal test requirements and their verification by different test methods”, *ibid.*
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Practice for Thermal Qualification of Type B Packages for Radioactive Material, Standard ASTM E 2230-02-08, ASTM, Philadelphia, PA (2008).
- [37] BAINBRIDGE, B.L., KELTNER, N.R., Heat transfer to large objects in large pool fires, *J. Hazard. Mater.* 20 (1988) 21–40.
- [38] KELTNER, N.R., MOYA, J.L., Defining the thermal environment in fire tests, *Fire Mater.* 14 (1989) 133–138.
- [39] BURGESS, M., FRY, C.J., Fire testing for package approval, *Int. J. Radioact. Mater. Transp.* 1 (1990) 7–16.
- [40] McCAFFERY, B.J., Purely Buoyant Diffusion Flames — Some Experimental Results, Rep. PB80-112 113, US National Bureau of Standards, Washington, DC (1979).
- [41] McADAMS, W.H., Heat Transmission, McGraw Hill, New York (1954).
- [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Air Transport of Radioactive Material in Large Quantities or with High Activity, IAEA-TECDOC-702, IAEA, Vienna (1993).
- [43] McSWEENEY, T.I., JOHNSON, J.F., An Assessment of the Risk of Transporting Plutonium Dioxide by Cargo Aircraft, Rep. BNWL-2-30 UC-71, Battelle Pacific Northwest Lab., Richland, WA (1977).
- [44] McCLURE, J.D., VON RIESEMANN, W.A., Crush Environment for Small Containers Carried on US Commercial Jet Aircraft, Report Letter, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1976).

- [45] BROWN, M.L., et al., Specification of Test Criteria for Containers to be Used in the Air Transport of Plutonium, UKAEA, London (1980).
- [46] HARTMAN, W.F., et al., "An analysis of the engine fragment threat and the crush environment for small packages carried on US commercial jet aircraft", Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 78 (Proc. Int. Symp. New Orleans, 1978), Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1978).
- [47] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Qualification Criteria to Certify a Package for Air Transport of Plutonium, Rep. NUREG/0360, NRC, Washington, DC (1978).
- [48] WILKINSON, H.L., "A study of severe aircraft crash environments with particular reference to the carriage of radioactive material", SARSS 89 (Proc. Symp. Bath, UK, 1989), Elsevier, Amsterdam and New York (1989).
- [49] BONSON, L.L., Final Report on Special Impact Tests of Plutonium Shipping Containers: Description of Test Results, Rep. SAND76-0437, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1977).
- [50] McWHIRTER, M., et al., Final Report on Special Tests of Plutonium Oxide Shipping Containers to FAA Flight Recorder Survivability Standards, Rep. SAND75-0446, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1975).
- [51] STRAVASNIK, L.F., Special Tests for Plutonium Shipping Containers 6M, SP5805 and L-10, Development Rep. SC-DR-72059, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1972).
- [52] BROWN, M.L., et al., Specification of Test Criteria for Containers to be Used in the Air Transport of Plutonium, Rep. EUR 6994 EN, CEC, Brussels and Luxembourg (1980).
- [53] McCLURE, J.D., LUNA, R.E., "An analysis of severe air transport accidents", Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 89 (Proc. Int. Symp. Washington, DC, 1989), Oak Ridge Natl Lab., TN (1989).
- [54] DEVILLERS, C., et al., "A regulatory approach to the safe transport of plutonium by air", *ibid.*

Sección VIII

REQUISITOS ADMINISTRATIVOS Y DE APROBACIÓN

DISPOSICIONES GENERALES

801.1. En el Reglamento de Transporte se distingue entre los casos en que el transporte puede realizarse sin la aprobación del diseño del bulto por la autoridad competente y aquellos en los que se precisa ese tipo de aprobación. En ambos casos, en el Reglamento de Transporte se hace recaer la responsabilidad primordial de su cumplimiento en el remitente y en el transportista. El remitente debería ser capaz de suministrar a la autoridad competente la documentación que demuestre que el diseño del bulto cumple los requisitos del Reglamento de Transporte, por ejemplo, mediante cálculos o con informes de ensayos. El diseñador del bulto debería compilar un informe de seguridad sobre el diseño del bulto que recoja todos los requisitos reglamentarios de manera sistemática y debería expedir al remitente un certificado de cumplimiento en que se resuma la conformidad del bulto con el Reglamento.

801.2. Por “autoridad competente pertinente” puede entenderse también las autoridades competentes de los países en tránsito.

801.3. En los casos de bultos que no requieran la aprobación de la autoridad competente, debería aplicarse alguna forma de “certificado de cumplimiento”. Este tipo de certificado de cumplimiento debería incluir la información siguiente:

- a) Tipo de bulto.
- b) Identificación del embalaje.
- c) Fecha de emisión y de expiración.
- d) Restricciones con respecto a las modalidades de transporte, si procede.
- e) Lista de reglamentos nacionales e internacionales aplicables, incluida la edición del Reglamento de Transporte y los párrafos pertinentes con que cumple el diseño del bulto y referencia a documentos que demuestren el cumplimiento.
- f) La siguiente declaración:

“El presente certificado no exime al remitente del cumplimiento de cualquier requisito impuesto por el gobierno de cualquier país a través del cual o al cual se transporte el bulto”.

- g) Descripción del embalaje mediante referencia a los planos o a la especificación del diseño. Se incluirá igualmente una ilustración que pueda reproducirse, de tamaño no superior a 21 cm × 30 cm, en la que se indique cómo está constituido el bulto, acompañada de una breve descripción del embalaje, comprendidos los materiales de que está construido, masa bruta, dimensiones externas generales y aspecto.
- h) Especificación del diseño mediante referencia a los planos.
- i) Especificación del contenido radiactivo autorizado, comprendida cualquier restricción que afecte al contenido radiactivo que no resulte evidente a juzgar por la naturaleza del embalaje. Se deberá indicar la forma física y química, las actividades de que se trate (comprendidas las de los distintos isótopos, si procede), la masa en gramos y si están presentes materiales radiactivos en forma especial.
- j) Referencia a las instrucciones de manipulación, embalaje y mantenimiento.
- k) Especificación de un sistema de gestión aplicable, como se dispone en el párrafo 306 del Reglamento de Transporte.
- l) Cualesquiera disposiciones de emergencia que se estimen necesaria.
- m) Firma e identificación de la persona encargada de certificar el cumplimiento.

802.1. Véanse los párrafos 204.1 a 204.3 y 205.1.

802.2. Cuando se requiera la aprobación de la autoridad competente, esta debería llevar a cabo, cuando sea aplicable, una evaluación independiente con respecto a los materiales radiactivos en forma especial o de baja dispersión, los bultos que contengan 0,1 kg o más de hexafluoruro de uranio, los bultos que contengan materiales fisibles, los materiales fisibles que queden exentos conforme al párrafo 417 f) del Reglamento de Transporte, los bultos del Tipo B(U) y del Tipo B(M), los bultos del Tipo C, los arreglos especiales, determinados tipos de expediciones, los programas de protección radiológica para embarcaciones de uso especial y el cálculo de los valores A_1 y A_2 , de las concentraciones de actividad para material exento no incluidas en la lista y de los límites de actividad para remesas exentas que no hayan sido tabulados.

802.3. En relación con el requisito de aprobación por la autoridad competente de los bultos diseñados para contener materiales fisibles, en los párrafos 417, 674 y 675 del Reglamento de Transporte se excluyen ciertos bultos de los requisitos aplicables específicamente a los materiales fisibles. No obstante, siguen siendo aplicables todos los requisitos relacionados con las propiedades radiactivas, no fisibles, del contenido del bulto.

802.4. La relación entre la autoridad competente y el solicitante debe ser bien entendida. Incumbe al solicitante la responsabilidad de demostrar el cumplimiento de los requisitos aplicables. La responsabilidad de la autoridad competente consiste en juzgar si la información presentada demuestra adecuadamente, o no, ese cumplimiento. La autoridad competente debería tener libertad para verificar las declaraciones, los cálculos y las evaluaciones del solicitante, incluso realizando, si fuera necesario, cálculos o ensayos independientes. La autoridad competente no debería fundamentar el caso por el solicitante; ahora bien, esto no le impide asesorarlo, sin compromiso, sobre lo que podría ser probablemente una forma aceptable de demostrar el cumplimiento.

802.5. En los reglamentos publicados a escala nacional o por las organizaciones internacionales de transporte pueden obtenerse más detalles sobre el papel de la autoridad competente.

802.6. El solicitante debería contactar con la autoridad competente en las primeras fases del diseño para examinar la puesta en práctica de los principios de diseño correspondientes y para establecer tanto el procedimiento de aprobación como las acciones que deberían llevarse a cabo.

802.7. La experiencia ha demostrado que muchos solicitantes presentan su primera solicitud en función de una necesidad específica e inmediata de alcance bastante reducido y posteriormente formulan varias peticiones de modificación del certificado de aprobación a medida que tratan de ampliar su alcance para emplear el embalaje para otros tipos de materiales o expediciones. Siempre que sea posible, se debería animar a los solicitantes a presentar su primera solicitud de manera general que prevea sus necesidades futuras. Esto hará que el sistema de solicitud y aprobación funcione más eficazmente. Además, en ciertos casos será ventajoso, tanto para el solicitante como para la autoridad competente, examinar a grandes rasgos el proyecto de solicitud antes de que este sea presentado oficialmente en detalle.

802.8. Después que el solicitante presente la información sobre el diseño del bulto y su expedición, en forma pormenorizada, la autoridad competente podrá expedir un certificado único con los certificados de aprobación del diseño del bulto y de expedición en conjunto, si se considera razonable.

802.9. En el anexo I de la publicación N° SSG-78 [1] se ofrece más orientación.

APROBACIÓN DE LOS MATERIALES RADIATIVOS EN FORMA ESPECIAL Y DE LOS MATERIALES RADIATIVOS DE BAJA DISPERSIÓN

803.1. El diseño de los materiales radiactivos en forma especial precisa la aprobación unilateral de la autoridad competente con antelación a su transporte, mientras que el diseño de los materiales radiactivos de baja dispersión requiere la aprobación multilateral. En el párrafo 803 del Reglamento de Transporte se especifica la información mínima que se habrá de incluir en la solicitud de aprobación.

803.2. Debería facilitarse una declaración cuantitativa de las características de diseño de materiales en forma especial que dependan del tiempo y que puedan afectar a su capacidad de cumplir los requisitos relativos a materiales radiactivos en forma especial enunciados en los párrafos 602 a 604 del Reglamento de Transporte.

803.3. Podría haber algunos procesos que influyan en la integridad de una cápsula en forma especial. Estos deberían tenerse en cuenta en el diseño de la cápsula en forma especial. Por ejemplo, la desintegración de isótopos alfa productores de gases puede causar la presurización de una cápsula.

803.4. Debería darse a la autoridad competente una oportunidad razonable para observar o comentar los ensayos que se realicen o planifiquen para demostrar el cumplimiento de lo estipulado en el Reglamento de Transporte con respecto a los materiales radiactivos en forma especial y los materiales radiactivos de baja dispersión. En la solicitud debería incluirse un informe detallado sobre los ensayos y sus resultados.

804.1. En los párrafos 832.1 a 832.3 se ofrece información pormenorizada sobre las marcas de identificación.

APROBACIÓN DE LOS DISEÑOS DE BULTOS

Aprobación de los diseños de bultos destinados a contener hexafluoruro de uranio

807.1. La aprobación de los bultos diseñados para el transporte de hexafluoruro de uranio no fisible o fisible exceptuado en cantidades superiores a 0,1 kg se estableció en la edición de 1996 del Reglamento de Transporte. Se creó una

nueva categoría de identificación de bultos (véase el párr. 832 del Reglamento de Transporte).

807.2. Los bultos que cumplan los requisitos establecidos en los párrafos 631 a 633 del Reglamento de Transporte pueden requerir también la aprobación multilateral por otras razones, como por el carácter fisible del material.

807.3. Debería darse a la autoridad competente una oportunidad razonable para observar o comentar los ensayos que se efectúen, o se prevea efectuar, con bultos que contengan 0,1 kg o más de hexafluoruro de uranio a fin de demostrar el cumplimiento de lo estipulado en el Reglamento de Transporte. La solicitud debería incluir un informe detallado sobre los ensayos y sus resultados.

807.4. En la solicitud de aprobación de diseños de bultos que se prevea que contengan hexafluoruro de uranio debería incluirse una lista de todos los requisitos aplicables (por números de párrafos del Reglamento de Transporte) y hacerse referencia a los documentos u otras justificaciones que demuestren el cumplimiento de esos requisitos.

Aprobación de los diseños de bultos del Tipo B(U) y del Tipo C

809.1. En la solicitud de aprobación de diseños de bultos debería incluirse una lista de todos los requisitos aplicables (por números de párrafos del Reglamento de Transporte) y hacerse referencia a los documentos u otras justificaciones que demuestren el cumplimiento de estos requisitos.

809.2. Debería darse a la autoridad competente una oportunidad razonable para observar o comentar los ensayos que se realicen o planifiquen con bultos del Tipo B(U) o del Tipo C para demostrar el cumplimiento de lo estipulado en el Reglamento de Transporte. La solicitud debería incluir un informe detallado sobre los ensayos y sus resultados.

809.3. Como los bultos utilizados para expedición después del almacenamiento pueden haber estado mucho tiempo en servicio con el contenido radiactivo cargado, deberían evaluarse los efectos de los mecanismos de degradación y los procesos de envejecimiento con el fin de cumplir con las justificaciones de seguridad durante todo el período de almacenamiento y verificar su transportabilidad después del almacenamiento. Esto puede demostrarse con evaluaciones periódicas de la seguridad junto con inspecciones y actividades de monitorización y vigilancia del bulto y sus condiciones operacionales y ambientales, así como su mantenimiento durante el almacenamiento.

Dichas evaluaciones deberían documentarse en un programa de gestión del envejecimiento (véase el párr. 613A.4). En las referencias [2 a 7] se pueden encontrar ejemplos de consideración de los mecanismos de envejecimiento de un bulto utilizado para la expedición después del almacenamiento.

809.4. Es necesario establecer un programa de análisis de deficiencias. Un análisis de deficiencias es una evaluación periódica con objeto de determinar si el diseño del bulto cumple con el Reglamento de Transporte actual. En el análisis deberían tenerse en cuenta los cambios que se produzcan en las reglamentaciones, en los conocimientos técnicos y en el estado del diseño del bulto durante el almacenamiento, y luego señalarse las deficiencias existentes. En el programa de análisis de deficiencias debería describirse el procedimiento para llevar a cabo dicho análisis. Esto sirve de apoyo para el proceso de renovación del certificado de aprobación del diseño del bulto y la verificación de la validez de los certificados existentes durante todo el período de almacenamiento y para la expedición después del almacenamiento. En la referencia [8] figura información detallada sobre los objetivos del programa de análisis de deficiencias, y en las referencias [9 a 12] se pueden encontrar más fuentes sobre el análisis de deficiencias con respecto a los bultos utilizados para la expedición después del almacenamiento.

Aprobación de los diseños de bultos del Tipo B(M)

812.1. La información que presente el solicitante a la vista del párrafo 812 a) y b) del Reglamento de Transporte permitirá a la autoridad competente estudiar las consecuencias de la falta de conformidad del diseño del Tipo B(M) con los requisitos del Tipo B(U), así como determinar si los controles complementarios propuestos son suficientes para conseguir un nivel equiparable de seguridad. El propósito de los controles complementarios es compensar las medidas de seguridad que no pudieron incorporarse en el diseño. Mediante el mecanismo de aprobación multilateral, el diseño de un bulto del Tipo B(M) se somete a una evaluación independiente por las autoridades competentes de todos los países a través de los cuales o dentro de los cuales se transportan esos bultos.

812.2. Deberían individualizarse, describirse y justificarse plenamente los controles o restricciones operacionales complementarios que se propongan (es decir, distintos de los estipulados ya en el Reglamento de Transporte) y que se apliquen para compensar el incumplimiento de uno o más de los requisitos mencionados en los párrafos 639, 656, 657 y 660 a 666 del Reglamento de Transporte. Deberían determinarse las condiciones ambientales máximas y mínimas de temperatura y de irradiación solar que se prevé que se produzcan

durante el transporte, y justificarse con referencia a las regiones o los países de uso del bulto y los datos meteorológicos aplicables (véanse los párrs. 667.1 y 667.2).

812.3. Cuando se precise el venteo intermitente de los bultos del Tipo B(M), debería presentarse a la autoridad competente, para su aprobación, una descripción completa de los procedimientos y controles aplicados. Puede obtenerse más información en los párrafos 668.1 a 668.6.

812.4. Debería darse a la autoridad competente una oportunidad razonable para observar o comentar los ensayos que se efectúen, o se prevea efectuar, con bultos del Tipo B(M) para demostrar el cumplimiento del Reglamento de Transporte. La solicitud debería incluir un informe detallado sobre los ensayos y los resultados obtenidos.

Aprobación de los diseños de bultos destinados a contener materiales fisibles

814.1. Se requiere la aprobación multilateral de todos los diseños de bultos para materiales fisibles (IF, AF, B(U)F, B(M)F y CF), fundamentalmente debido a la naturaleza del peligro asociado con la criticidad y a la importancia de mantener la subcriticidad en todo momento durante el transporte. Además, las disposiciones reglamentarias relativas al diseño de bultos para materiales fisibles dan total libertad respecto de los métodos, normalmente de tipo informático, que se apliquen para demostrar el cumplimiento de los requisitos. Por ello es necesario que las autoridades competentes evalúen y aprueben de forma independiente todos los diseños de bultos para materiales fisibles.

814.2. El diseño de un bulto para materiales fisibles debe cumplir los requisitos aplicables tanto a las propiedades radiactivas como a las propiedades fisibles de su contenido. Por lo que se refiere a las propiedades radiactivas, un bulto se clasifica según la definición de bulto que figura en el párrafo 231 del Reglamento de Transporte. Cuando proceda, será necesaria una aprobación del diseño del bulto basada en las propiedades radiactivas no fisibles de su contenido. Además de esa aprobación, se requerirá otra para el diseño en relación con las propiedades fisibles del contenido. En los párrafos 417, 674 y 675 del Reglamento de Transporte se prevén excepciones con respecto a los requisitos aplicables a la aprobación del diseño de bultos para materiales fisibles.

815.1. En la información que se suministre a la autoridad competente con la solicitud de aprobación se debe demostrar minuciosamente que se cumple cada uno de los requisitos enunciados en los párrafos 673 y 676 a 685 del

Reglamento de Transporte. Esta información debería incluir una lista de todos los requisitos aplicables (por números de párrafos del Reglamento de Transporte) de conformidad con el párrafo 673 b) i) a iv), con referencia a los documentos u otras justificaciones que demuestren el cumplimiento de estos requisitos, y debería incluir además los elementos citados específicamente en el certificado de aprobación de la autoridad competente, que se detallan en el párrafo 838 n) del Reglamento de Transporte. Debería incluirse la información apropiada sobre los experimentos, cálculos o argumentaciones razonadas que se utilicen para demostrar la subcriticidad de un solo bulto o de conjuntos de bultos. El solicitante debería ser consciente de que debería procurar asesoramiento de la autoridad competente de la jurisdicción en que presente la solicitud.

DISPOSICIONES DE TRANSICIÓN

Bultos que no requieren la aprobación del diseño de la autoridad competente de conformidad con las ediciones de 1985, de 1985 (enmendada en 1990), de 1996, de 1996 (revisada), de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 del Reglamento de Transporte

819.1. Tras la aprobación de la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, ya no pudieron utilizarse bultos que no requerían la aprobación de diseño de la autoridad competente sobre la base de la edición de 1973 del Reglamento de Transporte y la de 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte. Para continuar empleando esos bultos se pedía que su diseño fuera revisado en conformidad con los requisitos de la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, o que las expediciones fueran evaluadas y aprobadas por la autoridad competente en virtud de arreglos especiales, si bien esto no se establecía de manera explícita en el Reglamento de Transporte.

819.2. El párrafo 819 se introdujo en la edición de 1996 del Reglamento de Transporte y se volvió a revisar en ediciones posteriores para que los embalajes de ese tipo que ya existieran en ese momento pudieran seguirse utilizando durante un período determinado y limitado tras su publicación, período durante el cual los diseños podrían revisarse y, si fuera necesario, modificarse con el fin de asegurar el total cumplimiento de los requisitos de la edición más reciente del Reglamento de Transporte. Para los casos en que esa revisión o modificación resulte impracticable, el período de transición tiene por objeto conceder un tiempo para permitir la retirada paulatina de esos diseños de bultos y la implantación de otros nuevos que se ajusten a lo establecido en la edición más reciente del Reglamento de Transporte. Los bultos preparados con arreglo a la edición

de 1985 u otras ediciones posteriores del Reglamento de Transporte a veces permanecen almacenados durante muchos años antes de su posterior expedición. Esto puede ser especialmente aplicable a bultos industriales o del Tipo A que contienen desechos radiactivos y que están a la espera de su expedición a las instalaciones de almacenamiento intermedio o definitivo. En el párrafo 819 se permite que esos bultos, preparados durante un determinado período y siempre que se mantengan y examinen adecuadamente, sean transportados en el futuro sobre la base del cumplimiento de la edición de 1985 u otra edición posterior del Reglamento de Transporte. En la edición de 2018 del Reglamento de Transporte se añadieron disposiciones de transición adicionales para las ediciones de 1996, de 1996 (revisada), de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 del Reglamento de Transporte.

819.3. En el párrafo 819 se hace hincapié en el requisito de que se apliquen las medidas del sistema de gestión, de conformidad con la edición actual del Reglamento de Transporte, que aseguren que se mantengan en uso solo los bultos que continúen ajustándose al diseño original o que cumplan los requisitos reglamentarios. La mejor manera de conseguirlo es velando por que se apliquen las medidas más actualizadas del sistema de gestión a las actividades posteriores a la fabricación, como la reparación, el mantenimiento, la modificación y el uso de esos bultos.

819.4. Se incluye la referencia a la sección IV de la edición actual del Reglamento de Transporte para asegurar que solo se utilicen los datos radiológicos más recientes (consignados en los valores A_1 y A_2) con el fin de definir el contenido de los bultos y otros límites conexos. Cabe señalar que el alcance de las disposiciones de transición del Reglamento de Transporte solo es extensivo a los requisitos de ciertos embalajes y bultos. En todos los demás aspectos se aplicarán los requisitos de la edición actual del Reglamento de Transporte, por ejemplo, en lo relativo a las disposiciones generales, los requisitos y controles para el transporte, incluidos los límites fijados a las remesas y los medios de transporte, y los requisitos administrativos y de aprobación.

819.5. Toda revisión del diseño original del bulto, o el incremento de la actividad de su contenido, o la adición de otros tipos de materiales radiactivos que afecten de manera significativa y negativa a la seguridad, según lo determine el propietario del bulto en consulta con el diseñador de este, requerirá la reevaluación del diseño con arreglo a la edición actual del Reglamento de Transporte. Al respecto podrían considerarse también elementos como el aumento de masa del contenido, cambios en los sistemas de cierre, en los limitadores de impacto, en la protección térmica o el blindaje y en el contenido.

Diseños de bultos aprobados de conformidad con las ediciones de 1985, de 1985 (enmendada en 1990), de 1996, de 1996 (revisada), de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 del Reglamento de Transporte

820.1. Tras la aprobación de la edición de 2018 del Reglamento de Transporte, ya no está permitido utilizar los bultos que requieren la aprobación del diseño por la autoridad competente (bultos del Tipo B, del Tipo B(U) del Tipo B(M) y bultos de materiales fisibles) que se basaban en la edición de 1973 del Reglamento de Transporte y la edición de 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte. La continuación del uso operacional de esos bultos requería que el diseño fuera revisado en función de los requisitos de la edición actual del Reglamento de Transporte o que las expediciones se examinaran y aprobaran por la autoridad competente en calidad de arreglos especiales.

820.2. Se permite que continúen en uso los bultos que requieren la aprobación del diseño por la autoridad competente en función de las ediciones anteriores del Reglamento de Transporte con sujeción a ciertas limitaciones. Esta disposición, conocida coloquialmente como “cláusula de derechos adquiridos”, se introdujo nuevamente en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte para facilitar su transición. Esto permitía que los bultos continuaran en uso siempre que se les diera el adecuado mantenimiento y continuaran ajustándose al diseño original hasta el final de su vida útil de diseño. Asimismo, se daba un plazo tras la publicación durante el cual los diseños podrían revisarse y, si fuera necesario, modificarse con el fin de conseguir el total cumplimiento de los requisitos de la edición actual del Reglamento de Transporte. En los casos en que esa revisión o modificación fuera impracticable, el período de transición daba tiempo para la retirada paulatina de los diseños de bultos y la implantación de otros nuevos que se ajustaran a la edición actual del Reglamento de Transporte.

820.3. En las ediciones de 1973 y de 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte solo se pedía que se establecieran programas de garantía de calidad (conocida ahora como sistema de gestión)¹ para la fabricación de embalajes. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte se especificaba debidamente la necesidad de que los programas de garantía de calidad abarcaran todos los aspectos del transporte, desde el diseño, la fabricación, el ensayo, la documentación, el uso, el mantenimiento y la inspección de todos los bultos, hasta el transporte y las operaciones de almacenamiento en tránsito. En virtud de

¹ Cabe señalar que en las ediciones actuales del Reglamento de Transporte y las guías de seguridad conexas se emplea ahora la expresión “sistema de gestión” en lugar de “garantía de calidad”.

la edición de 2018 del Reglamento de Transporte, ya no está permitido utilizar los embalajes fabricados según un diseño de bulto aprobado con arreglo a las disposiciones de las ediciones de 1973 o de 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte.

820.4. Al considerar las aprobaciones de bultos incluidos en la cláusula de derechos adquiridos, los “requisitos aplicables” del párrafo 306 del Reglamento de Transporte serán relacionados con a) los programas de garantía de calidad (conocida ahora como sistema de gestión) establecidos en el momento de fabricación inicial del embalaje, y b) las partes del sistema de gestión que abordan las actividades de transporte en curso como la utilización, la inspección, el mantenimiento y el servicio, así como el transporte y las operaciones de almacenamiento en tránsito. Las disposiciones del sistema de gestión vinculadas con las actividades mencionadas en el apartado b) deberían cumplir las normas nacionales o internacionales vigentes respecto del sistema de gestión que acordara la autoridad competente.

820.5. Se incluyen las referencias a los párrafos y secciones de la edición actual del Reglamento de Transporte para asegurar que, a los fines de definir el contenido del bulto y otros límites conexos, se apliquen los requisitos relativos al sistema de gestión (párr. 306 del Reglamento de Transporte), los límites de actividad y las disposiciones asociadas a la clasificación (sección IV del Reglamento de Transporte), incluidos los datos radiológicos más recientes (consignados en los valores A_1 y A_2); los requisitos y controles para el transporte (sección V del Reglamento de Transporte); y cuando proceda, los requisitos para los materiales fisibles transportados por vía aérea (párr. 683 del Reglamento de Transporte). Cabe señalar que el alcance de las disposiciones de transición del Reglamento de Transporte solo se amplía para abarcar los requisitos de ciertos embalajes y bultos. En todos los demás aspectos se aplicarán las disposiciones de la edición actual del Reglamento de Transporte, por ejemplo, en lo relativo a las disposiciones generales, los requisitos y controles para el transporte, incluidos los límites fijados a las remesas y los medios de transporte, y los requisitos administrativos y de aprobación. También deben utilizarse los requisitos más recientes relativos a los materiales fisibles exceptuados (párrs. 417, 674 y 675 del Reglamento de Transporte).

820.6. En la elaboración de la edición de 2018 del Reglamento de Transporte se determinó que tras su aprobación no sería necesario un cambio inmediato, si bien estarían justificados los cambios que estuvieran destinados a mejorar la seguridad en el transporte a largo plazo. Así se decidió aceptar que se siguieran utilizando ciertos bultos diseñados y aprobados según las ediciones de 1985, de 1985

(enmendada en 1990), de 1996 y de 1996 (revisada), de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 del Reglamento de Transporte. No se consideró necesario o justificado que continuaran en uso los embalajes existentes fabricados según un diseño de bulto aprobado en virtud de las disposiciones de las ediciones de 1967, 1973 o 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte.

820.7. El uso ininterrumpido de los bultos aprobados que cumplan con los requisitos de las ediciones de 1985, 1985 (enmendada en 1990), de 1996, de 1996 (revisada), de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 del Reglamento de Transporte está sujeto a la aprobación multilateral para que así las autoridades competentes puedan establecer un marco dentro del que pueda aprobarse esa continuidad en el uso. Además, no se permite que se inicie una nueva fabricación de estos diseños de embalaje. Se ha determinado ese período de transición en función de la evaluación del tiempo necesario para que la edición de 2018 del Reglamento de Transporte se incorpore a las reglamentaciones nacionales e internacionales, tomando en consideración la experiencia adquirida durante la aplicación de las disposiciones del período de transición de la edición de 1996 del Reglamento de Transporte.

820.8. En toda revisión del diseño original del bulto o el incremento de la actividad de su contenido o la adición de otros tipos de materiales radiactivos, que afecten de manera significativa y negativa a la seguridad, según determine la autoridad competente, el diseño debería reevaluarse y aprobarse de conformidad con los requisitos de la actual edición del Reglamento de Transporte. Estos factores podrían incluir un aumento de la masa del contenido y cambios en los sistemas de cierre, en los limitadores de impacto, en la protección térmica o el blindaje y en la forma del contenido.

820.9. Cuando sea aplicable el párrafo 820 del Reglamento de Transporte, deberían mantenerse, tanto en los bultos como en los certificados de aprobación del diseño de la autoridad competente, la marca de identificación de la autoridad competente de origen y los códigos relativos al tipo de diseño que esta les haya asignado, aunque estos bultos vayan a ser sometidos a una aprobación multilateral de diseño. Esto significa que, cuando se aplique lo dispuesto en el párrafo 820, los bultos que inicialmente fueron designados como del Tipo B(U)-85 o del Tipo B(U)F-85 en consonancia con la edición de 1985 del Reglamento de Transporte no deberían volver a ser designados como del Tipo B(M) o del Tipo B(M)F. Esto se hace para que esos bultos se puedan identificar claramente como bultos incluidos en la cláusula de derechos adquiridos con arreglo a las disposiciones del párrafo 820 que fueron aprobados inicialmente en virtud de la edición de 1985 del Reglamento de Transporte.

820.10. Véanse los párrafos 832.2 y 832.3.

Materiales radiactivos en forma especial aprobados de conformidad con las ediciones de 1985, de 1985 (enmendada en 1990), de 1996, de 1996 (revisada), de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 del Reglamento de Transporte

823.1. En el párrafo 823 del Reglamento de Transporte se establecen disposiciones transitorias para los materiales radiactivos en forma especial cuyo diseño también está sujeto a la aprobación de la autoridad competente. Se subraya la necesidad de aplicar medidas del sistema de gestión de manera que se asegure que se mantengan en uso solo los materiales radiactivos en forma especial que continúen ajustándose al diseño original o a los requisitos establecidos en las reglamentaciones. La mejor manera de conseguirlo es asegurando que se apliquen las medidas más actualizadas del sistema de gestión a las actividades posteriores a la fabricación, como la reparación, el mantenimiento, la modificación y el uso de esos materiales en forma especial. Cabe señalar que el alcance de las disposiciones transitorias del Reglamento de Transporte solo se amplía para abarcar los requisitos de ciertos materiales radiactivos en forma especial. En todos los demás aspectos se aplicará la edición actual del Reglamento de Transporte, por ejemplo, en lo relativo a las disposiciones generales, los requisitos y controles para el transporte, incluidos los límites fijados a las remesas y los medios de transporte, y los requisitos administrativos y de aprobación.

823.2. En la elaboración de la edición de 2018 del Reglamento de Transporte se determinó que no sería necesario un cambio inmediato del Reglamento de Transporte tras su adopción, si bien estarían justificados los que estuvieran destinados a mejorar la seguridad en el transporte a largo plazo. Por tanto, también se decidió aceptar que continuaran utilizándose los materiales radiactivos en forma especial que hubieran sido diseñados y aprobados según las ediciones de 1985 y de 1985 (enmendada en 1990), de 1996, de 1996 (revisada) y de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009, y 2012 del Reglamento de Transporte. Sin embargo, no se permite el inicio de la nueva fabricación de estos diseños de materiales radiactivos en forma especial. No se consideró necesario o justificado que continuaran en uso los materiales radiactivos en forma especial existentes aprobados en virtud de las disposiciones de las ediciones de 1967, 1973 o 1973 (enmendada) del Reglamento de Transporte.

823.3. Véanse los párrafos 832.2 y 832.3.

NOTIFICACIÓN Y REGISTRO DE NÚMEROS DE SERIE

824.1. La autoridad competente, dentro de su programa de verificación del cumplimiento, debería supervisar determinadas facetas asociadas al diseño, la fabricación y la utilización de los embalajes (véase el párr. 307 del Reglamento de Transporte). Para verificar el cumplimiento adecuado, es preciso facilitar a la autoridad competente el número de serie de todos los embalajes fabricados de conformidad con un diseño que haya aprobado. Las autoridades competentes deberían mantener un registro de esos números de serie.

824.2. También debería asignarse un número de serie a los embalajes fabricados según un diseño de bulto cuyo uso continuo se haya aprobado en virtud de las disposiciones de transición (“cláusulas de derechos adquiridos”) establecidas en el párrafo 820 del Reglamento de Transporte. El número de serie, así como su conocimiento por parte de la autoridad competente, será fundamental, ya que el número es un medio para precisar claramente qué embalajes están sometidos a la respectiva “cláusula de derechos adquiridos”.

824.3. El número de serie del embalaje debería identificar de manera única cada uno de los embalajes fabricados. Se informará sobre el número de serie a la autoridad competente pertinente. El término “pertinente” tiene una amplia interpretación y podría referirse a lo siguiente:

- a) al país donde se originó el diseño del bulto;
- b) al país donde se fabricó el embalaje, y
- c) al país o los países donde se utiliza el bulto.

En el caso de los embalajes fabricados según un diseño de bulto aprobado para seguir utilizándolo con arreglo al párrafo 820 del Reglamento de Transporte, todas las autoridades competentes que intervengan en el proceso de aprobación multilateral deberían recibir información sobre los números de serie de los embalajes.

APROBACIÓN DE EXPEDICIONES

825.1. Cuando se requieran aprobaciones de expedición, tales aprobaciones deben abarcar la circulación completa de una remesa desde el origen hasta su destino. Si la remesa cruza una frontera nacional, la aprobación de la expedición tiene que ser multilateral (es decir, la expedición tiene que ser aprobada por la autoridad competente del país en que se inicia y por las autoridades competentes

de todos los países a través o dentro de los cuales se transporta la remesa). El requisito de la aprobación multilateral tiene el propósito de permitir a todas las autoridades competentes afectadas juzgar si es necesario aplicar controles especiales durante el transporte.

825.2. Cada uno de los requisitos estipulados en el párrafo 825 del Reglamento de Transporte debería aplicarse por separado. Por ejemplo, una remesa de un bulto del Tipo B(M) con venteo, que contenga materiales fisibles, podría precisar la aprobación de expedición de conformidad con el párrafo 825 a) y c).

825.3. La necesidad de aplicar el párrafo 825 del Reglamento de Transporte está regida por el contenido real del bulto que se va a transportar. Por ejemplo, cuando un bulto del Tipo B(M) cuyo certificado de aprobación de diseño establece un contenido máximo permitido de 1600 TBq de Co 60, se usa para el transporte de solo 400 TBq de Co 60, no se requiere la aprobación de la expedición, ya que 400 TBq es menos que 1000 TBq.

825.4. El párrafo 825 c) del Reglamento de Transporte tiene la finalidad de que los requisitos de aprobación de las expediciones se apliquen solamente a los casos en que la suma de los ISC en una bodega, compartimento o área definida de la cubierta de una embarcación marítima excede de 50. La suma de los ISC para la embarcación en su totalidad no se limita a 50 porque se aplica el requisito de separación de 6 m, y la bodega, compartimento o área definida de la cubierta pueden considerarse como medios de transporte por separado.

826.1. Según el párrafo 802 a) iv) a vii) del Reglamento de Transporte, las aprobaciones de diseños de bultos se necesitan para determinados diseños. Algunos de esos bultos pueden ser transportados sin una aprobación adicional de expedición, mientras que otros sí la requieren (véase el párr. 825 del Reglamento de Transporte). En algunos casos se exige una aprobación adicional de expedición porque quizás sean necesarios controles operacionales o de otro tipo en función del contenido real del bulto. En las situaciones en que la necesidad de controles durante la expedición pueda determinarse durante la fase de análisis y aprobación del diseño, no será necesario realizar un análisis de cada una de las expediciones. En tales casos, la aprobación del diseño del bulto y la de la expedición podrían combinarse en un solo documento.

826.2. Conceptualmente, en el Reglamento de Transporte se establece una diferencia entre las aprobaciones del diseño y las de la expedición. En el caso de que una aprobación de expedición se incorpore dentro del correspondiente certificado de aprobación del diseño, debería tratarse de definir claramente

la doble naturaleza del certificado y aplicarse los correspondientes códigos de tipos. Véase el párrafo 832 del Reglamento de Transporte en relación con los códigos de tipos.

827A.1. Véanse las recomendaciones sobre el plan de transporte en los párrafos 520.3 a 520.5.

APROBACIÓN DE EXPEDICIONES EN VIRTUD DE ARREGLOS ESPECIALES

829.1. Aunque la aprobación de una expedición en virtud de arreglos especiales exigirá tener en cuenta tanto los procedimientos de expedición como de diseño del bulto, la aprobación es, conceptualmente, una aprobación de expedición. En los párrafos 310.1 a 310.4 pueden consultarse otras recomendaciones.

830.1. El nivel necesario de seguridad de las expediciones en virtud de arreglos especiales se consigue normalmente imponiendo controles operacionales que compensen toda desviación de los procedimientos de embalaje o expedición. A continuación se indican algunos de los controles operacionales que pueden aplicarse:

- a) Uso exclusivo del vehículo (véase el párr. 221 del Reglamento de Transporte).
- b) Acompañamiento de la expedición. Normalmente desempeñará la función de escolta un especialista en protección radiológica dotado de instrumentos de monitorización radiológica que conozca los procedimientos de emergencia que, en caso de accidente o de otro suceso anormal, le permitan identificar rápidamente cualquier peligro de irradiación o contaminación y prestar asesoramiento adecuado a las autoridades civiles. En el transporte por carretera, siempre que sea posible, el personal de escolta también debería ir en un vehículo independiente, de manera que no quede incapacitado a causa del mismo accidente. El personal de escolta también debería ir equipado con estacas, cuerdas y señalizaciones para acordonar la zona del accidente, así como con un extintor de incendios para controlar pequeños incendios y un sistema de comunicación. Si se considera prudente, el especialista en protección radiológica podría ir acompañado por miembros de la policía o los bomberos.
- c) Los itinerarios de la expedición pueden controlarse a fin de seleccionar las rutas potencialmente menos peligrosas y, si fuera posible, evitar zonas de alta densidad de población y con posibles peligros, como zonas escarpadas y pasos a nivel de ferrocarril.

- d) El itinerario de la expedición puede controlarse para evitar períodos con mucha densidad de tráfico, como las horas punta diarias o de fines de semana.
- e) Siempre que sea posible, las expediciones deberían realizarse directamente (es decir, sin paradas intermedias o transbordos).
- f) La velocidad del vehículo de transporte puede limitarse, sobre todo si el embalaje tiene poca resistencia al impacto y siempre que la velocidad reducida del vehículo de transporte no cause otros peligros (como la colisión con vehículos que circulen más rápido).
- g) Debería considerarse la necesidad de notificar la expedición por anticipado a los servicios de emergencia (policía y bomberos).
- h) En los procedimientos de emergencia aplicables deberían tenerse en cuenta las contingencias que se presenten en caso de que la expedición en virtud de arreglos especiales se vea afectada por un accidente (véase el párr. 554 c) del Reglamento de Transporte).
- i) Deberían utilizarse como mecanismos compensatorios de seguridad equipos auxiliares, tales como sistemas de amarre del bulto al vehículo o absorbentes de impactos, así como otros dispositivos o estructuras de protección.

CERTIFICADOS DE APROBACIÓN DE LA AUTORIDAD COMPETENTE

Marcas de identificación de la autoridad competente

832.1. Los códigos de tipos se basan en el uso de varios indicadores destinados a proporcionar rápidamente información sobre el tipo de bulto o expedición de que se trate. Los indicadores suministran información sobre las características de diseño del bulto (por ejemplo, del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C), sobre la disponibilidad de un certificado de aprobación multilateral de diseño del bulto para los materiales fisibles, así como sobre otros aspectos específicos del certificado de aprobación (por ejemplo, para los arreglos especiales, la expedición, la forma especial, el material de baja dispersión, el hexafluoruro de uranio no fisible o fisible exceptuado o los materiales fisibles exceptuados). En consecuencia, la aparición en el código, por ejemplo, de la marca de identificación B(U)F no entraña necesariamente la presencia de materiales fisibles en un determinado bulto, sino solo la posibilidad de que los contenga.

832.2. Es indispensable disponer de medios sencillos, preferiblemente en la marca de identificación, para determinar la edición del Reglamento de Transporte en virtud de la cual se emitió la aprobación del diseño del bulto original. Con la edición

de 1985 del Reglamento de Transporte esto se consiguió añadiendo el símbolo “-85” a la marca de identificación, que se transformó en “-96” cuando fue publicada la edición de 1996 del Reglamento de Transporte. La marca de identificación que incluía “-96” se mantuvo en las ediciones del Reglamento de Transporte de 1996 (revisada) y de 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012. En los casos en que no aparece el símbolo del año se entenderá que el diseño ha sido aprobado con arreglo a los requisitos de la edición actual del Reglamento de Transporte.

Ejemplo:

Edición del Reglamento de Transporte	Marca de identificación de diseño del bulto
1985	A/132/B(U)-85, o A/132/B(M)-85
1996	A/132/B(U)-96, o A/132/B(M)-96
2018	A/132/B(U), o A/132/B(M)

832.3. El procedimiento de añadir el mismo símbolo “-96” al código de tipo para la edición del Reglamento de Transporte de 1996 y las ediciones de 1996 (revisada) y 1996 (enmendada en 2003), de 2005, 2009 y 2012 se justificaba porque en las ediciones que salieron a la luz desde la edición de 1996 hasta la de 2012 del Reglamento de Transporte no se introdujeron modificaciones importantes relacionadas con la seguridad en los requisitos de diseño o ensayo de los bultos, materiales radiactivos en forma especial y materiales radiactivos de baja dispersión. Todos los diseños, con la adición de “-85” o “-96” están sujetos a las disposiciones de transición enunciadas en los párrafos 820 a 823 del Reglamento de Transporte, respectivamente, y podrán identificarse claramente como tales.

CONTENIDO DE LOS CERTIFICADOS DE APROBACIÓN

Certificados de aprobación para materiales radiactivos en forma especial y materiales radiactivos de baja dispersión

834.1. La cuidadosa descripción del contenido del certificado de aprobación tiene un doble propósito: ayudar a las autoridades competentes a diseñar sus certificados y facilitar cualquier comprobación de los certificados debido a que la información que contienen está normalizada.

834.2. En el Reglamento de Transporte se especifica la información básica que tiene que aparecer en los certificados de aprobación, así como un sistema de marcas de identificación de las autoridades competentes. El cumplimiento de estas disposiciones contribuye a conseguir la uniformidad internacional en la certificación. En cada certificado debería hacerse referencia no solo a la reglamentación nacional aplicable y a la reglamentación internacional pertinente, sino también a la edición del Reglamento de Transporte que sea apropiada, ya que esta es la norma internacionalmente conocida y reconocida. El código internacional de matrículas de vehículos (VRI) [13], que se utiliza en las marcas de identificación de la autoridad competente, se recoge en el cuadro 4 de la presente guía de seguridad. El VRI representa el signo distintivo empleado internacionalmente en los vehículos de tráfico por carretera².

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES

País	Código VRI
Afganistán	AFG
Albania	AL
Alemania	D
Andorra	AND
Angola	AO
Arabia Saudita	SA
Argelia	DZ
Argentina	RA
Armenia	AM
Australia	AUS
Austria	A
Azerbaiyán	AZ
Bahamas	BS
Bahrein	BRN

² Signo distintivo del Estado de registro empleado en los vehículos de motor y remolques en el tráfico internacional por carretera, por ejemplo, de conformidad con el Convenio de Ginebra sobre Circulación por Carretera de 1949 o la Convención de Viena sobre la Circulación Vial de 1968.

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES (cont.)

País	Código VRI
Bangladesh	BD
Barbados	BDS
Belarús	BY
Bélgica	B
Belice (antigua Honduras Británica)	BH ^a
Benin	DY
Bolivia	BOL
Bosnia y Herzegovina	BIH
Botswana	BW
Brasil	BR
Brunei	BRU
Bulgaria	BG
Burkina Faso	BF
Burundi	RU
Camboya	KH ^b
Camerún	CAM
Canadá	CDN
Chad	TCH/TD
Chile	RCH
China, República Popular	RC
Chipre	CY
Colombia	CO
Congo	RCB
Corea, República Democrática Popular de	KP
Costa Rica	CR
Côte d'Ivoire	CI
Croacia	HR
Cuba	CU ^c
Dinamarca	DK
Islas Feroe	FO

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES (cont.)

País	Código VRI
Dominica (Islas de Barlovento)	WD
Ecuador	EC
Egipto	ET
El Salvador	ES
Emiratos Árabes Unidos	SV
Eritrea	ER
Eslovaquia	SK
Eslovenia	SLO
España	E
Estado de Libia	LAR
Estados Unidos de América	USA
Estonia	EST
Eswatini	SD
Etiopía	ETH
Ex República Yugoslava de Macedonia	MK
Federación de Rusia	RUS
Fiji	FJI
Filipinas	RP
Finlandia	FIN
Francia	F
Gabón	G
Gambia	WAG
Georgia	GE
Ghana	GH
Granada (Islas de Barlovento)	WG
Grecia	GR
Guatemala	GCA
Guinea	RG
Guyana	GUY

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES (cont.)

País	Código VRI
Haití	RH
Hong Kong	HK
Hungría	H
India	IND
Indonesia	RI
Irán, República Islámica del	IR
Iraq	IRQ
Irlanda	IRL
Islandia	IS
Islas Marshall	PC
Islas Vírgenes	BVI
Israel	IL
Italia	I
Jamaica	JA
Japón	J
Jordania	HKJ
Kazajstán	KZ
Kenya	EAK
Kirguistán	KG
Kuwait	KWT
Lesoto	LS
Letonia	LV
Líbano	RL
Liberia	LB
Liechtenstein	FL
Lituania	LT
Luxemburgo	L
Madagascar	RM
Malasia	MAL
Malawi	MW

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES (cont.)

País	Código VRI
Malí	RMM
Malta	M
Marruecos	MA
Mauricio	MS
Mauritania	RIM
México	MEX
Mónaco	MC
Mongolia	MGL
Montenegro	MNE
Mozambique	MOC
Myanmar	BUR
Namibia	NAM
Nauru	NAU
Nepal	NEP
Nicaragua	NIC
Níger	RN
Nigeria	WAN
Noruega	N
Nueva Zelandia	NZ
Países Bajos, Reino de los	NL
Antillas Holandesas	NA
Pakistán	PK
Panamá	PA
Papua Nueva Guinea	PNG
Paraguay	PY
Perú	PE
Polonia	PL
Portugal	P
Qatar	Q
Reino Unido	GB

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES (cont.)

País	Código VRI
Alderney	GBA
Gibraltar	GBZ
Guernsey	GBG
Isla de Man	GBM
Jersey	GBJ
República Árabe Siria	SYR
República Centroafricana	RCA
República Checa	CZ
República de Corea	ROK
República de Moldova	MD ^c
República Democrática del Congo	ZRE
República Democrática Popular Lao	LAO
República Dominicana	DOM
República Unida de Tanzania	
Tanganica	EAT
Zanzíbar	EAZ
Rumania	RO
Rwanda	RWA
Samoa	WS
San Marino	RSM
San Vicente y las Granadinas (Islas de Barlovento)	WV
Santa Lucía (Islas de Barlovento)	WL
Santa Sede	V
Senegal	SN
Serbia	SRB
Seychelles	SY
Sierra Leona	WAL
Singapur	SGP
Somalia	SO

CUADRO 4. LISTA DE CÓDIGOS VRI POR PAÍSES (cont.)

País	Código VRI
Sri Lanka	CL
Sudáfrica	ZA
Sudán	SUD
Suecia	S
Suiza	CH
Suriname	SME
Tailandia	T
Tayikistán	TJ
Togo	TG
Trinidad y Tabago	TT
Túnez	TN
Türkiye	TR
Turkmenistán	TM
Ucrania	UA
Uganda	EAU
Uruguay	ROU
Uzbekistán	UZ
Venezuela	YV
Viet Nam	VN
Yemen	YAR
Zambia	RNR
Zimbabwe	ZW

^a Después de su independencia, el cambio de nombre del Estado no fue notificado en el Convenio sobre Circulación por Carretera de 1949.

^b Camboya fue conocida anteriormente como Kampuchea Democrática.

^c La señal distintiva no fue notificada al Secretario General de las Naciones Unidas.

Certificados de aprobación para arreglos especiales

836.1. Como ya se trató en el párrafo 418.1, al preparar el certificado debería prestarse especial atención a la cantidad autorizada, el tipo y la forma del contenido de cada bulto a causa de su impacto potencial en la seguridad con respecto a la criticidad.

En el certificado deberían especificarse las inspecciones o los ensayos del contenido que se hayan realizado para confirmar sus características antes de la expedición. Esto tiene especial importancia en el caso de todo veneno neutrónico extraíble u otro elemento para el control de la criticidad que tenga que colocarse en el bulto antes de la expedición (véanse los párrs. 503.4 y 503.5). Cuando proceda, deberían especificarse o referenciarse en el certificado de aprobación los criterios que han de cumplirse en la medición.

836.2. En el certificado de aprobación para arreglos especiales debería señalarse todo arreglo especial para la carga de los bultos que deba cumplirse o evitarse.

Certificados de aprobación de las expediciones

837.1. Véase el párrafo 836.1.

837.2. Los bultos que contengan materiales fisibles quedan exceptuados de los requisitos de los párrafos 676 a 685 del Reglamento de Transporte si cumplen determinados requisitos aplicables al bulto y a la remesa: véase el párrafo 674 a) a d) del Reglamento de Transporte. Si los bultos de la remesa contienen materiales fisibles exceptuados en función de los límites del bulto, debería velarse por que no se superen los límites de la remesa. Esto significa que el remitente debería conocer el límite máximo para las cantidades de materiales fisibles por bulto o atribuir el límite máximo a cada bulto (véase el párr. 674 a)).

Certificados de aprobación para diseños de bultos

838.1. Como ya se trató en el párrafo 418.1, debería prestarse especial atención a la cuestión de la cantidad autorizada, el tipo y la forma del contenido de cada bulto a causa de su impacto potencial en la seguridad con respecto a la criticidad. En el certificado deberían especificarse las inspecciones o ensayos del contenido que se hayan realizado para confirmar sus características antes de la expedición. Si el bulto contiene combustible nuclear irradiado, quizás sea necesario efectuar mediciones que satisfagan los requisitos definidos en el párrafo 677 b) antes de la carga o expedición. Los criterios que tienen que cumplir las mediciones deberían

especificarse o referenciarse en el certificado del bulto (véase lo recomendado en el párr. 503.8). De igual manera, si se permiten sistemas especiales para evitar la entrada de agua, en el certificado deberían establecerse (o referenciarse) las inspecciones o los procedimientos de ensayo específicos para asegurar el cumplimiento de ese requisito.

VALIDACIÓN DE LOS CERTIFICADOS

840.1. Normalmente el certificado de aprobación de la autoridad competente del país de origen es el primero que se emite dentro de los sucesivos certificados de aprobación multilateral. Las autoridades competentes distintas de la del país de origen tienen la opción de realizar una evaluación de seguridad independiente o de hacer uso de la evaluación ya realizada por la autoridad competente de origen, limitando así el alcance y magnitud de su propia evaluación.

840.2. Los certificados de aprobación sucesivos pueden presentarse de dos formas. En primer lugar, una autoridad competente de uno de los países sucesivos puede refrendar el certificado original (es decir, aceptar y refrendar el certificado original, incluida toda especificación de los controles que en él se establezcan). Esto sería una aprobación multilateral por convalidación del certificado original. La aprobación por convalidación no precisará una marca de identificación adicional de la autoridad competente en lo referente a la identificación del certificado o al marcado de los bultos. En segundo lugar, una autoridad competente puede expedir un certificado de aprobación que se asocie, si bien de manera independiente, con el certificado original de manera que el certificado posterior llevaría una marca de identificación distinta de la marca de identificación de origen. Además, en este caso los embalajes que se utilicen en virtud de esta aprobación multilateral tendrán que ser marcados con las marcas de identificación tanto del certificado de origen como de los certificados de aprobación ulteriores (véase el párr. 833 b) del Reglamento de Transporte).

840.3. Cuando se prevea utilizar un bulto para su expedición después del almacenamiento, la autoridad competente del país en que tenga lugar el almacenamiento y en que se inicie la expedición después del almacenamiento puede ser diferente de la del país de origen del diseño del bulto. Cuando se retire la aprobación del diseño del bulto o no se renueve en el país de origen del diseño, ya no se podrá autorizar que el bulto se transporte en el país en que esté almacenado sin que se conceda la aprobación de su diseño en ese país. Por este motivo la autoridad competente que se ocupe del almacenamiento y la expedición después del almacenamiento puede considerar la posibilidad

de expedir y mantener la aprobación de su propio diseño de bulto. Esto puede basarse en parte en la evaluación que ya haya efectuado la autoridad competente del país de origen del diseño del bulto, si bien después completarse con una nueva evaluación relacionada con aspectos concretos del almacenamiento y la expedición después del almacenamiento, como la gestión del envejecimiento, el análisis de deficiencias, los requisitos antes de la expedición, los requisitos para la expedición después del almacenamiento, y los diversos períodos de aprobación.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN VIII

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Compliance Assurance for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. SSG-78, IAEA, Vienna (2023).
- [2] ERHARD, A., PROBST, U., WOLFF, D., Aging management for long-term interim storage casks, Packaging Transport Storage and Security of Radioactive Material, Vol. 22 No.1, W.S. Maney & Son Ltd., Leeds, UK (2011).
- [3] CHOPRA, O. K., DIERCKS, D., et. Al., Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-Term Storage and Transportation of Used Fuel Rev. 1, FCRD-UFD-2013-000294, ANL-13/15, Argonne National Laboratory, Argonne, IL (2013).
- [4] SAEGUSA, T., Ageing management and post-storage transport of dual purpose cask for spent fuel, Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, Vol. 25 No. 2, W. S. Maney & Son Ltd., W.S. Maney & Son Ltd., Leeds, UK (2014).
- [5] WILLE, F., WOLFF, D., et. Al., German approach and feedback on experience of transportability of SNF packages after interim storage, Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, Vol. 25 No. 2, W. S. Maney & Son Ltd., W.S. Maney & Son Ltd., Leeds, UK (2014).
- [6] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE, Guidance for Operations-Based Aging Management for Dry Cask Storage, NEI 14-03 Revision 0, Washington DC (2014).
- [7] DROSTE, B., KOMANN, S., et. Al., Consideration of aging mechanism influence on transport safety of dual purpose casks for spent nuclear fuel or HLW, Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, Vol. 25, No. 3-4, W. S. Maney & Son Ltd., W.S. Maney & Son Ltd., Leeds, UK (2014).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology for Preparation of a Safety Case of a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel, IAEA-TECDOC-1938, IAEA, Vienna (2020).
- [9] HANSON, B., ALSAED, H., et. Al, Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel Rev.0, CED-USED-2011-000136 Rev.0, PNNL-20509, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (2012).
- [10] PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, Review of Used Nuclear Fuel Storage and Transportation Technical Gap Analysis, FCRD-USED-2012-000215, PNNL-21596, Richland, WA (2012).

- [11] DROSTE, B., WILLE, F., Maintenance of Package Design Safety Report Effectiveness of SNF/HLW Dual Purpose Casks, Proceedings of 17th International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2013), San Francisco, CA (2013).
- [12] KOMANN, S., WILLE, F., DROSTE, B., Gap Analysis Examples from Periodical Reviews of Transport Package Design Safety Report of SNF/HLW Dual Purpose Casks, Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12, Honolulu, Hawaii (2014).
- [13] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, Distinguishing Signs of Vehicles in International Traffic Notified to the Secretary General of the United Nations in Accordance with the 1968 Convention on Road Traffic (Article 45(4)) and the 1949 Convention on Road Traffic (Annex 4), UNECE, Geneva (2007).

Apéndice I

EL SISTEMA Q PARA EL CÁLCULO Y APLICACIÓN DE LOS VALORES A_1 Y A_2

INTRODUCCIÓN

I.1. El sistema Q define los límites de “cantidad” de un radionucleido, en función de los valores A_1 y A_2 , que puede ser transportado en un bulto del Tipo A. Estos límites se emplean en el Reglamento de Transporte para varios otros propósitos, como para especificar los límites de fuga de actividad en un bulto del Tipo B(U), del Tipo B(M) o del Tipo C, los límites de contenido para el material BAE y los bultos exceptuados y los límites de contenido de los materiales radiactivos en forma especial (no dispersable) y en forma no especial (dispersable). La “Q” dentro de la terminología del sistema Q significa “cantidad”.

I.2. En la referencia [I.1] figura un resumen del sistema Q original. El sistema Q fue perfeccionado en 1982 por un grupo de trabajo especial del OIEA. Ello sirvió de base para definir los valores A_1 y A_2 en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte. En las referencias [I.2 a I.7] se proporciona más información.

I.3. Con antelación a la publicación de la edición de 1996 del Reglamento de Transporte, se incorporaron al sistema Q las últimas recomendaciones de la ICRP y los datos en la forma de coeficientes de dosis por unidad de incorporación (coeficientes de dosis) [I.8]. Sus resultados sirvieron de base para la actualización de los valores A_1 y A_2 . Una parte esencial de este trabajo supuso volver a examinar los modelos dosimétricos utilizados en el cálculo de los límites del contenido de un bulto del Tipo A. Esta revisión de los modelos previos redundó en el perfeccionamiento del sistema Q, que supone una mejora en el método de evaluación de los valores A_1 y A_2 . En este apéndice se exponen los métodos revisados para determinar los valores A_1 y A_2 y sus resultados. Aunque gran parte de la información y del examen que figuran en este apéndice es de carácter histórico, se incluye por considerarla fundamental para la plena comprensión de las orientaciones formuladas.

ANTECEDENTES

I.4. Los diversos límites que se establecen en el Reglamento de Transporte para el control de las emisiones de materiales radiactivos desde los bultos se basan

en los límites de actividad definidos para el contenido de los bultos del Tipo A. Los bultos del Tipo A están previstos para el transporte económico de un gran número de remesas de baja actividad y para el mantenimiento de un alto nivel de seguridad. Los límites de actividad se fijan de modo que se asegure que no sean inaceptables las consecuencias radiológicas debidas a un daño importante de un bulto del Tipo A y que no se precise la aprobación del diseño del bulto por la autoridad competente, salvo para los que contengan materiales fisibles.

I.5. Las actividades superiores a los límites fijados para un bulto del Tipo A están incluidas en los requisitos establecidos en el Reglamento de Transporte para los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M), que sí requieren la aprobación de la autoridad competente. Los requisitos de diseño de los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) están destinados a reducir a un nivel muy bajo la probabilidad de que se produzca una emisión significativa de radiactividad de los bultos tras un accidente muy grave.

I.6. Inicialmente los radionucleidos se clasificaron en siete grupos, para fines de transporte y cada uno de estos grupos tenía límites de contenido de bultos del Tipo A para materiales radiactivos en forma especial y para materiales en todas las otras formas. Se definieron como materiales radiactivos en forma especial aquellos que no son dispersables cuando se les somete a los ensayos especificados. En la edición de 1973 del Reglamento de Transporte el sistema de clasificación por grupos evolucionó a un sistema A_1/A_2 , en que cada radionucleido tiene un límite de contenido de bulto del Tipo A de A_1 curios cuando se transporta en forma especial y de A_2 curios cuando no se transporta en forma especial.

I.7. Los fundamentos dosimétricos del sistema A_1/A_2 se basaban en un determinado número de suposiciones algo pragmáticas. Para determinar los valores A_1 , la exposición del cuerpo entero se limitaba a 30 mSv a una distancia de 3 m durante 3 h. Asimismo, para determinar A_2 se partía de una incorporación de $10^{-6}A_2$, que daba lugar a la mitad del límite de incorporación anual para un trabajador expuesto, como consecuencia de un accidente de tipo “medio”. De manera arbitraria se definió como accidente de tipo medio aquel que da lugar a la pérdida completa del blindaje y a una emisión de 0,1 % del contenido del bulto, de manera que 0,1 % de ese material emitido es posteriormente incorporado por una persona que esté presente. En el sistema Q que aquí se describe se considera un intervalo más amplio para las vías de exposición específicas, en comparación con el anterior sistema A_1/A_2 , pero se utilizan las mismas hipótesis de partida que en el sistema Q, que fue incluido en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte. Muchas de las hipótesis de partida son similares a las que se consideraron, o supusieron, en la edición de 1973 del Reglamento de Transporte,

pero en las situaciones en que se produce la incorporación de materiales radiactivos se utilizan nuevos datos y conceptos recomendados recientemente en las referencias [I.8, I.9]. En particular, se hacen suposiciones pragmáticas en relación con la magnitud del daño del bulto y la emisión de su contenido, como se analizará posteriormente, sin que se haga alusión a un accidente de tipo medio.

FUNDAMENTOS DEL SISTEMA Q

I.8. En el sistema Q se consideran una serie de vías de exposición, cada una de las cuales podría originar una exposición a la radiación, externa o interna, de las personas que se encuentren en las proximidades de un bulto del Tipo A que ha sufrido un accidente muy grave de transporte. Las vías de exposición se representan de manera esquemática en la figura I.1 y dan lugar a cinco valores límite para el contenido: Q_A , Q_B , Q_C , Q_D y Q_E , en relación con la dosis externa debida a fotones, la dosis externa por partículas beta, la dosis por inhalación, la dosis en piel y por ingestión debida a la transferencia de la contaminación y la dosis por inmersión, respectivamente. Los límites de contenido para los materiales en forma especial que sean emisores alfa y de neutrones y para el tritio se tratan por separado.

I.9. Los límites de contenido de bultos del Tipo A se determinan para cada radionucleido como en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte. El valor A_1 para materiales en forma especial es el menor de los valores Q_A y Q_B , mientras que el valor A_2 , para los materiales radiactivos que no estén en forma especial es el menor de entre A_1 y el resto de los valores Q. Aunque a continuación se tratarán hipótesis concretas para las vías de exposición que se han utilizado en el cálculo de los valores Q, todas se basan en los siguientes criterios radiológicos:

- a) La dosis efectiva o la dosis efectiva comprometida que reciba una persona en las proximidades de un bulto de transporte tras un accidente no debería superar una dosis de referencia de 50 mSv.
- b) La dosis equivalente o la dosis equivalente comprometida recibida por cada uno de los órganos, incluida la piel, de una persona afectada en el accidente no debería exceder de 0,5 Sv o, en el caso especial del cristalino, de 0,15 Sv.
- c) Es improbable que una persona permanezca a 1 m del bulto dañado durante más de 30 min.

I.10. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, la dosis de referencia que se empleó para el cálculo de los valores A_1/A_2 , una dosis efectiva o dosis efectiva comprometida de 50 mSv recibida por una persona situada en

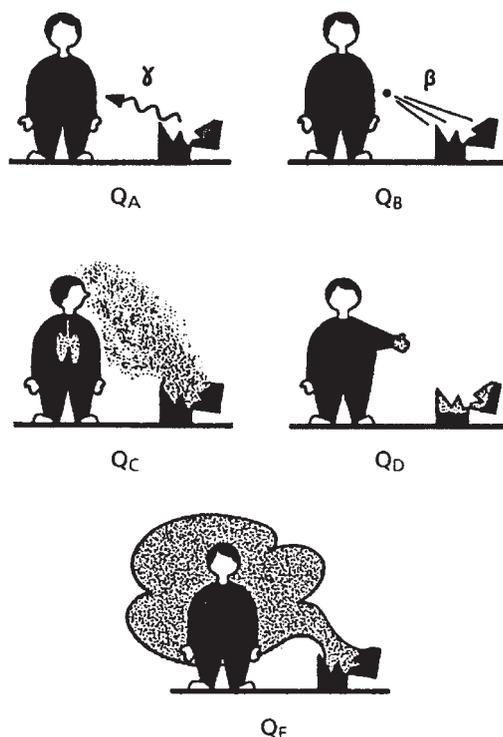


Fig. I.1. Representación esquemática de las vías de exposición consideradas en el sistema Q

las proximidades de un bulto que ha sufrido un accidente estaba vinculada al límite de dosis anual para los trabajadores expuestos en ese momento. En el sistema Q revisado la dosis de referencia de 50 mSv se ha mantenido como base por considerar que los accidentes reales en los que han intervenido bultos del Tipo A han dado lugar a exposiciones muy bajas. Para la elección de una dosis de referencia es importante tener en cuenta también la probabilidad de que una persona sufra una exposición a causa de un accidente de transporte. Se puede considerar que, en general, esas exposiciones solo se producirán una vez en la vida. Está claro que la mayoría de las personas nunca llegarán a quedar expuestas.

I.11. La dosis efectiva que reciba una persona por estar en las proximidades de un bulto de transporte tras un accidente no debería exceder de 50 mSv. Como base para el cálculo se considera que la persona se encuentra a una distancia de 1 m del bulto dañado y que permanece en ese lugar durante 30 min. La dosis efectiva es la suma de las dosis equivalentes en los tejidos, cada una multiplicada por el correspondiente factor de ponderación [I.10]. Los factores de ponderación

para los tejidos utilizados en la protección radiológica son los recogidos en la Publicación N° 103 de la ICRP [I.8], salvo en el caso de los siete radionucleidos añadidos en la edición de 2018 del Reglamento de Transporte, para lo cual se emplearon los datos de la Publicación N° 116 de la ICRP [I.11].

I.12. El período de exposición de 30 minutos a una distancia de 1 m es una estimación cautelosa de la exposición incidental que sufrirían las personas presentes inicialmente en la escena del accidente, ya que se supone que las operaciones posteriores de recuperación se realizarán bajo control y supervisión radiológicos. Se considera que esta suposición es más realista que la anterior de una exposición de 3 h a 3 m de distancia. Si se consideran los límites de dosis antes citados, esto se traduce en un límite de tasa de dosis procedente del bulto dañado de 0,1 Sv/h a 1 m para una irradiación por fotones al cuerpo entero.

MODELOS DOSIMÉTRICOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA

I.13. En esta sección se describen en detalle los modelos dosimétricos y las hipótesis en que se basa el cálculo de los cinco valores Q principales. Se explican a grandes rasgos las vías de exposición consideradas y se examinan los criterios que afectan a los métodos de cálculo.

Q_A: dosis externa debida a fotones

I.14. El valor Q_A para un radionucleido se determina considerando la dosis externa al cuerpo entero debida a la radiación gamma o a los rayos X que recibe una persona que se encuentra en las proximidades de un bulto del Tipo A dañado tras un accidente. Se supone la pérdida total del blindaje del bulto en el accidente y que la tasa de dosis resultante a 1 m del borde (o la superficie) de los materiales radiactivos sin blindaje está limitada a 0,1 Sv/h. Además, se supone que de hecho el bulto dañado puede ser considerado como una fuente puntual.

I.15. En el anterior sistema Q, Q_A se calculaba utilizando la energía fotónica media por desintegración establecida en la Publicación N° 38 de la ICRP [I.12]. Además, la conversión a dosis efectiva por unidad de exposición al aire libre era de aproximadamente 6,7 mSv/R para los fotones con energías de entre 50 keV y 5 MeV.

I.16. En el sistema Q revisado, los valores Q_A se han calculado utilizando el espectro completo de la emisión de rayos X y gamma para los radionucleidos que se establece en la Publicación N° 38 de la ICRP [I.12], salvo en el caso de los siete

radionucleidos añadidos en la edición de 2018 del Reglamento de Transporte, para lo cual se emplearon los datos de la Publicación N° 107 de la ICRP [I.13]. La relación entre la dosis efectiva y la exposición al aire libre, dependiente de la energía, es la recogida en la Publicación N° 51 de la ICRP [I.14] para una geometría isotrópica de irradiación.

I.17. Los valores Q_A se obtienen de la expresión:

$$Q_A = \frac{D/t}{DRC_\gamma} \quad (I.1)$$

donde

D es la dosis de referencia de 0,05 Sv;

T es el tiempo de exposición de 0,5 h;

DRC_γ es el coeficiente de tasa de dosis efectiva para el radionucleido.

I.18. De esta manera, los valores Q_A se determinan de la manera siguiente:

$$Q_A (\text{TBq}) = \frac{10^{-13}}{\dot{e}_{pt}} \quad (I.2)$$

donde \dot{e}_{pt} es el coeficiente de tasa de dosis efectiva para el radionucleido a la distancia de 1 m ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

I.19. Los coeficientes de dosis y de tasa de dosis se pueden encontrar en el cuadro II.2 del apéndice II.

I.20. El coeficiente de tasa de dosis se ha calculado mediante la expresión:

$$\dot{e}_{pt} = \frac{1}{4\pi d^2} \sum_i \left(\frac{e}{X} \right)_{E_i} Y_i E_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E_i} e^{-\mu_i d} B(E_i, d) \quad (I.3)$$

donde

$(e/X)_{E_i}$ es la relación entre la dosis efectiva y la exposición al aire libre ($\text{Sv} \cdot \text{R}^{-1}$);

Y_i es el rendimiento en fotones de energía E_i por desintegración del radionucleido ($\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$);

E_i	es la energía del fotón (MeV);
$(\mu_{en}/\rho)_{E_i}$	es el coeficiente másico de absorción de energía en aire de fotones de energía E_i ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);
μ_i	es el coeficiente de atenuación lineal en aire de fotones de energía E_i (cm^{-1});
$B(E_i, d)$	es el factor de acumulación de kerma en aire de fotones de energía E_i y a la distancia d .

I.21. Se toma una distancia d de 1 m. Los valores de $(e/X)_{E_i}$ se obtienen por interpolación de los datos recogidos en la Publicación N° 51 de la ICRP [I.14], salvo en el caso de los siete radionucleidos añadidos en la edición de 2018 del Reglamento de Transporte, para lo cual se emplearon los datos de la Publicación N° 116 de la ICRP [I.11]. Este aspecto es válido para fotones de energía en el intervalo de 5 keV a 10 MeV. El valor $(e/X)_{E_i}$ depende de las suposiciones consideradas para la distribución angular del campo de radiación (geometría de exposición). No obstante, las diferencias numéricas entre varias geometrías de exposición son bastante pequeñas, por ejemplo, la razón entre un haz paralelo rotacional y un campo isotrópico es normalmente menor de 1,3.

Q_B: dosis externa debida a emisores beta

I.22. El valor Q_B se determina considerando la dosis beta recibida en piel por una persona expuesta tras un accidente que afecte a un bulto del Tipo A que contenga materiales radiactivos en forma especial. Se supone que en el accidente se pierde la totalidad del blindaje del bulto de transporte, pero se mantiene el concepto, ya incluido en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, de un factor residual de blindaje para los emisores beta (este factor se asocia a materiales como el protector de ventana beta, los restos que queden del bulto, etc.). Ello supone un factor de blindaje de 3, que es de carácter muy conservador, para los emisores beta de energía máxima de ≥ 2 MeV, práctica que dentro del sistema Q se amplía para incluir un intervalo de factores de blindaje en función de la energía beta basándose en un absorbente de unos 150 mg/cm^2 de espesor.

I.23. En el sistema Q revisado, Q_B se calcula utilizando los espectros beta completos para los radionucleidos de la Publicación N° 38 de la ICRP [I.12], salvo en el caso de los siete radionucleidos añadidos en la edición de 2018 del Reglamento de Transporte, para lo cual se emplearon los datos de la Publicación N° 107 de la ICRP [I.13]. Los datos del espectro se utilizan junto con los datos

incluidos en las referencias [I.15 a I.17] relativos a la tasa de dosis en piel por unidad de actividad de un emisor de electrones monoenergéticos. Se consideró que el autoblandaje del bulto representaba una función uniforme de la energía máxima del espectro beta, como se indica en la figura I.2.

Q_B viene determinado por la expresión:

$$Q_B = \frac{D/t}{DRC_\beta} \quad (I.4)$$

donde

D es la dosis de referencia de 0,5 Sv;

T es el tiempo de exposición de 0,5 h;

DRC_β es el coeficiente de tasa de dosis equivalente en piel para el radionucleido.

I.24. De esta manera Q_B se calcula a partir de:

$$Q_B(TBq) = \frac{1 \times 10^{-12}}{\dot{e}_\beta} \quad (I.5)$$

donde \dot{e}_β es el coeficiente de tasa de dosis equivalente en piel para la emisión beta a una distancia de 1 m desde el material autoblandado ($Sv \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1}$). Los coeficientes de dosis y de tasa de dosis pueden encontrarse en el cuadro II.2 del apéndice II.

I.25. El coeficiente de tasa de dosis se define como:

$$\dot{e}_\beta = \frac{1}{SF_{\beta_{max}}} J_{air} \quad (I.6)$$

donde

$SF_{\beta_{max}}$ es el factor de blindaje calculado a la energía máxima del espectro beta;

J_{air} es la dosis a 1 m por desintegración ($MeV \cdot g^{-1} \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$).

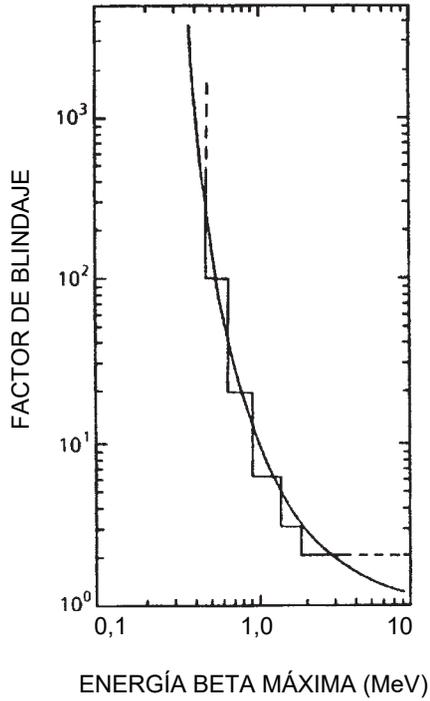


Fig. 1.2. Factor de blindaje en función de la energía beta. Factor de blindaje = e^{ud} , $\mu = 0.017 \times E_{\beta_{\max}}^{1.14}$, $d = 150 \text{ mg/cm}^2$.

El factor J_{air} se calcula como:

$$J_{\text{air}} = \frac{n}{4\pi\rho r^2} \int_0^{E_{\max}} N(E)j(r/r_E, E)(E/r_E)dE \quad (I.7)$$

donde

n es el número de partículas beta emitidas por desintegración;

r es la distancia desde la fuente (cm);

ρ es la densidad del medio ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

N_E es el número de electrones emitidos con una energía entre E y $E + dE$ ($Bq^{-1} \cdot s^{-1}$);

$j(r/r_E, E)$ es la distribución adimensional de dosis, que representa la fracción de energía emitida que se deposita en una superficie esférica de radio r/r_E ; tal como se tabularon en las referencias [I.16, I.17].

I.26. Cabe señalar que, aunque el límite de dosis anual para el cristalino es inferior al establecido para la piel (0,15 Sv frente a 0,5 Sv), las dosis recibidas en profundidad en los tejidos para los emisores beta y, en particular, la absorción a 300 mg/cm² de espesor de las células sensibles del epitelio cristalino, indican que la dosis en piel es siempre limitante para las energías beta máximas de hasta aproximadamente 4 MeV [I.18 a I.20]. Por tanto, es innecesaria una consideración específica de la dosis en el cristalino del ojo.

I.27. En el cálculo de los valores Q los electrones de conversión son tratados como partículas beta monoenergéticas y ponderados según su rendimiento. La radiación por aniquilación no se incluye en la evaluación de la dosis beta en piel, ya que contribuye solo en un pequeño porcentaje a la dosis local en la capa basal. No obstante, los rayos gamma de 0,51 MeV se incluyen en la energía de los fotones por desintegración utilizada para el cálculo de Q_A .

Q_C : dosis interna por inhalación

I.28. El valor Q_C para un radionucleido transportado en forma no especial se determina considerando la dosis por inhalación que recibe una persona expuesta a la emisión de materiales radiactivos desde un bulto del Tipo A dañado tras un accidente. El cumplimiento de los límites de dosis que se han establecido anteriormente se aseguró restringiendo la incorporación de materiales radiactivos en las condiciones de accidente a los límites de incorporación anual recomendados por la ICRP en ese momento [I.21]. El concepto de accidente medio utilizado en la edición de 1973 del Reglamento de Transporte ya no se utiliza.

I.29. En el sistema Q se considera una variedad de situaciones de accidente, entre ellas la inicialmente propuesta para el cálculo del valor Q_C , que abarca accidentes tanto en el interior de recintos como al aire libre e incluye los posibles efectos de los incendios. En la edición de 1973 del Reglamento de Transporte se suponía que 10^{-3} del contenido del bulto podría liberarse como resultado de un accidente medio y que 10^{-3} de ese material podría pasar al interior del cuerpo de una persona afectada en el accidente. Esto da por resultado un factor neto de incorporación de 10^{-6} del contenido del bulto, que se ha seguido manteniendo en

el sistema Q. Sin embargo, ahora se reconoce que esto representa un intervalo de posibles fracciones de emisión y factores de captación y que es conveniente considerar los factores de incorporación en relación con esos dos parámetros de manera independiente.

I.30. El intervalo de fracciones de emisión que se acepta actualmente en el sistema Q, a saber, de 10^{-3} a 10^{-2} , abarca el valor considerado en la edición de 1973 del Reglamento de Transporte y la propuesta inicial hecha en el sistema Q. Se supone tácitamente, como ya se hacía en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, que sería muy escasa la probabilidad de un gran accidente que pudiera causar la emisión de gran parte del contenido del bulto. Este criterio lo ha corroborado el comportamiento de los bultos del Tipo A en las condiciones de accidente muy grave [I.22 a I.24].

I.31. En general, son escasos los datos sobre las fracciones de aerosoles respirables que se producen en las condiciones de accidente y solo se dispone de ellos para una variedad limitada de materiales. Por ejemplo, se han comunicado fracciones de aerosoles respirables de hasta aproximadamente el 1 % en especímenes de uranio y de plutonio que han soportado condiciones más rigurosas de oxidación en aire y en dióxido de carbono [I.25]. Sin embargo, por debajo de este nivel, las fracciones de aerosol mostraban amplias variaciones, que dependían de las temperaturas y las condiciones de flujo atmosférico existentes. En el caso de los líquidos, es evidente que es posible que se produzcan emisiones con fracciones más altas, pero ha de tenerse en cuenta que, incluso tras un impacto grave o accidentes de aplastamiento, se mantendrían las barreras múltiples que suministran los materiales del bulto del Tipo A, como los absorbentes y los sistemas de doble contención [I.24]. Por ejemplo, en un accidente en que una fuente de I 131 fue completamente aplastada, tras la remoción de los restos del bulto quedó en la carretera menos del 2 % de su contenido [I.26].

I.32. En potencia, la condición de accidente más grave para la mayoría de los bultos del Tipo A sería la combinación de daños mecánicos graves con un fuego. Sin embargo, incluso en esta situación, los restos que quedaran del bulto podrían realizar una función importante de retención de los materiales radiactivos emitidos, como se señala en las referencias [I.23, I.24].

I.33. Con frecuencia en los incendios se producen partículas de materiales de tamaño relativamente grande, lo que tendería a minimizar la incorporación por inhalación, aunque al mismo tiempo crearía una superficie importante para la absorción de especies volátiles y, en especial, de líquidos vaporizados. Otro factor mitigador es el incremento de la dispersión local asociado a las corrientes

convectivas de aire provocadas por el fuego, que tenderían a reducir también la incorporación por inhalación.

I.34. El intervalo de 10^{-4} a 10^{-3} de los factores de captación que se utiliza ahora en el sistema Q se basa en la consideración de una variedad de posibles situaciones de accidente, tanto en interiores como al aire libre. En las propuestas originales del sistema Q se consideraba la exposición en un recinto de almacenamiento o en una zona de manipulación de carga de 300 m^3 de volumen, con cuatro renovaciones por hora del aire del recinto. Si se supone la tasa de respiración de $3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un adulto, se obtiene un factor de captación de aproximadamente 10^{-3} para un período de exposición de 30 m. Otra situación de accidente podría ser la que entrañara una exposición en un vehículo de transporte de 50 m^3 de volumen con diez renovaciones de aire por hora, como inicialmente se consideró en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte para determinar el límite de fuga en un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) en condiciones de transporte normales. Si se utilizara un ritmo de respiración y un período de exposición como los empleados anteriormente, ello daría por resultado un factor de captación de $2,4 \times 10^{-3}$.

I.35. En los accidentes que suceden al aire libre, la suposición más conservadora para la dispersión atmosférica del material emitido es que se trata de una fuente puntual a nivel del suelo. Existen factores de dilución tabulados para esa situación, considerando una distancia de 100 m en la dirección del viento, en el intervalo de 7×10^{-4} a $1,7 \times 10^{-2} \text{ s/m}^3$ [I.27], que se corresponden con factores de captación en el intervalo de $2,3 \times 10^{-7}$ a $5,6 \times 10^{-6}$ de la tasa de respiración citada en el párrafo I.34 para un adulto. Estos valores son aplicables a emisiones de corta duración y abarcan un espectro de condiciones meteorológicas desde muy inestables hasta muy estables; el valor correspondiente a las condiciones medias es de $3,3 \times 10^{-7}$, el cual se aproxima al valor inferior del intervalo antes indicado.

I.36. La extrapolación de los modelos empleados para evaluar los factores de dilución atmosférica utilizados aquí para distancias menores en la dirección del viento es poco fiable, aunque si se reduce la distancia de exposición en un orden de magnitud de hasta 10 m, se incrementarían los citados factores de captación en un factor de casi 30. Esto indica que, a distancias de unos pocos metros en la dirección del viento, los factores de captación se aproximarían al intervalo empleado en el sistema Q de 10^{-4} a 10^{-3} . Sin embargo, en estas circunstancias pueden intervenir otros factores que tenderían a reducir la captación y que incluso podrían llegar a ser dominantes. Anteriormente ya se han mencionado las turbulencias que se esperan en el caso de un incendio. Se pueden prever reducciones similares de las concentraciones en aire a causa de turbulencias

originadas por el flujo de aire alrededor de un vehículo afectado en un accidente o por los efectos de edificios circundantes.

I.37. Así, en términos generales, se considera que el intervalo de 10^{-4} a 10^{-3} de los factores de captación es razonable para la determinación de los límites del contenido de los bultos del Tipo A. Tomados de conjunto con las fracciones ya analizadas, se utilizó el factor de incorporación general de 10^{-6} en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte. No obstante, en el sistema Q ese valor representa una combinación de emisiones, en el intervalo típico de 10^{-3} a 10^{-2} del contenido del bulto, en forma de aerosol respirable, junto con un factor de captación de hasta 10^{-4} a 10^{-3} del material emitido. Esto, unido a los límites de dosis citados inicialmente, se traduce en la siguiente expresión para el límite del contenido derivado de la inhalación:

$$Q_c = \frac{D}{1 \times 10^{-6} DC_{inh}} \quad (I.8)$$

donde

D es la dosis de referencia de 0,05 Sv;

1×10^{-6} es la fracción del contenido del bulto que se inhala;

DC_{inh} es el coeficiente de dosis para la inhalación.

Así, Q_c puede ser calculado como:

$$Q_c(TBq) = \frac{5 \times 10^{-8}}{e_{inh}} \quad (I.9)$$

donde e_{inh} es el coeficiente de dosis efectiva para la inhalación del radionucleido (Sv/Bq) (véase el párr. I.38). Los valores de e_{inh} se pueden encontrar en el cuadro III de la publicación GSR Part 3 [I.9].

I.38. Los intervalos de emisión y captación vienen determinados, en parte, por la forma química de los materiales y el tamaño de las partículas de aerosol. La forma química tiene gran influencia en la dosis por unidad de incorporación. Para el cálculo de Q_c , se ha tenido en cuenta la forma química más restrictiva y los coeficientes de dosis efectiva correspondientes a un aerosol caracterizado por un AMAD de $1 \mu m$ [I.9]. Se ha mantenido el valor de $1 \mu m$ para el AMAD, que fue el que se utilizó en el anterior sistema Q, aunque para algunos radionucleidos

hay otros valores de AMAD que pueden dar lugar a coeficientes de dosis más conservadores.

I.39. Para el uranio los valores Q_C se presentan en función de los tipos de absorción pulmonar que se asignan a las principales formas químicas del uranio. Esta evaluación más detallada de Q_C se realizó debido a la sensibilidad de la dosis por unidad de incorporación para cada tipo de absorción y al hecho de que normalmente en el transporte se conoce la forma química del uranio.

Q_D : dosis por contaminación en piel y por ingestión

I.40. El valor Q_D para emisores beta se determina considerando la dosis beta recibida en piel por una persona contaminada con materiales radiactivos que no estaban en forma especial al manipular un bulto del Tipo A dañado. En el modelo propuesto en el sistema Q se supone que un 1 % del contenido del bulto se extiende uniformemente en una superficie de 1 m²; se supone que la manipulación de los restos del bulto da lugar a la contaminación de las manos a un 10 % de ese nivel [I.28]. Además, se supone que la persona expuesta no lleva guantes, pero reconocería la posibilidad de contaminación o se lavaría las manos dentro de un período de 5 h.

I.41. Si se consideran de forma independiente, estas suposiciones son algo arbitrarias, pero en su conjunto representan una base razonable para estimar el nivel de contaminación en piel que podría producirse en las condiciones de accidente. Es decir, $10^{-3} \times Q_D/m^2$, con un límite de tasa de dosis para la piel de 0,1 Sv/h basado en un período de exposición de 5 h.

I.42. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte la conversión a dosis se basó en la energía máxima de los espectros beta presentada en forma de histograma. Ahora los valores Q_D se han calculado utilizando los espectros beta y las emisiones discretas de electrones para los radionucleidos tabuladas por la ICRP [I.12, I.14]. Los datos de emisión del nucleido de interés se emplearon con los datos indicados en la referencia [I.29] para las tasas de dosis en piel debidas a electrones monoenergéticos emitidos desde la superficie de la piel. Así, el valor Q_D viene determinado por:

$$Q_D = \frac{D}{10^{-3} \times DRC_{skin} \times t} \quad (I.10)$$

donde

- D es la dosis de referencia de 0,5 Sv;
- 1×10^{-3} es la fracción del contenido del bulto distribuida por unidad de superficie de piel (m^{-2});
- DRC_{skin} es el coeficiente de tasa de dosis para la contaminación en piel;
- T es el tiempo de exposición de $1,8 \times 10^4$ s (5 h).

I.43. Así, Q_D puede determinarse a partir de:

$$Q_D (\text{TBq}) = \frac{2.8 \times 10^{-2}}{\dot{h}_{\text{skin}}} \quad (\text{I.11})$$

donde \dot{h}_{skin} es la tasa de dosis equivalente en piel por unidad de actividad por unidad de superficie de piel ($\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{TBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$). Los coeficientes de dosis y de tasa de dosis pueden encontrarse en el cuadro II.2 del apéndice II.

I.44. Para varios radionucleidos los valores Q_D son más restrictivos que los del anterior sistema Q. Estos valores más bajos de Q_D están asociados fundamentalmente a radionucleidos que emiten electrones por conversión interna.

I.45. Los modelos que se han utilizado para el cálculo de los valores Q_D basados en la dosis en piel también pueden emplearse para estimar la posible captación de materiales radiactivos por ingestión. Suponiendo que una persona pueda ingerir toda la contaminación existente en 10^{-3} m^2 (10 cm^2) de piel en un período de 24 h [I.28], la incorporación resultante sería de $10^{-6} \times Q_D$, frente a la de $10^{-6} \times Q_C$ estimada anteriormente para la vía de inhalación. Dado que la dosis por unidad de incorporación por inhalación suele ser del mismo orden o mayor que la debida a la ingestión [I.9], la vía de exposición por inhalación será normalmente limitante para la contaminación interna y, por tanto, será innecesario considerar explícitamente la vía de exposición por ingestión.

Q_E : dosis por inmersión debida a isótopos gaseosos

I.46. El valor Q_E para los isótopos gaseosos, que no llegan a incorporarse en el organismo, se determina considerando la dosis recibida por inmersión tras su emisión en un accidente cuando se transportan como materiales radiactivos en forma no especial, en estado comprimido o no. Se supone una emisión rápida del 100 % del contenido del bulto en un recinto de almacenamiento o de

manipulación de carga con unas dimensiones de 3 m x 10 m x 10 m, cuyo aire se renueva cuatro veces en una hora. Esto se traduce en una concentración inicial en el aire de $Q_E/300 \text{ m}^3$, que disminuye exponencialmente con una constante de desintegración de 4 h^{-1} como resultado de la ventilación en el período de exposición ulterior de 30 minutos para dar lugar a una concentración media de $1,44 \times 10^{-3} \times Q_E \text{ (m}^{-3}\text{)}$. Sobre esta base en los cálculos de dosis actuales se utiliza un coeficiente de dosis efectiva o un coeficiente de dosis equivalente en piel por inmersión en una nube semiinfinita, de conformidad con la referencia [I.30], tal como se recoge en el cuadro I.1 de la presente guía de seguridad.

CUADRO I.1. COEFICIENTES DE DOSIS POR INMERSIÓN

Coeficientes de dosis h_{sub} por inmersión ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^3$)

Nucleido	$h_{E,\text{subm}}$ (dosis efectiva)	$H_{\text{skin,subm}}$ (dosis equivalente en piel)	Nucleido	$h_{E,\text{subm}}$ (dosis efectiva)	$H_{\text{skin,subm}}$ (dosis equivalente en piel)
Ar-37	0	0	Xe-122	$2,19 \times 10^{-15}$	$3,36 \times 10^{-15}$
Ar-39	$1,15 \times 10^{-16}$	$1,07 \times 10^{-14}$	Xe-123	$2,82 \times 10^{-14}$	$4,52 \times 10^{-14}$
Ar-41	$6,14 \times 10^{-14}$	$1,01 \times 10^{-13}$	Xe-127	$1,12 \times 10^{-14}$	$1,57 \times 10^{-14}$
Ar-42	Sin valor	Sin valor	Xe-131m	$3,49 \times 10^{-16}$	$4,82 \times 10^{-15}$
Kr-81	$2,44 \times 10^{-16}$	$4,04 \times 10^{-16}$	Xe-133	$1,33 \times 10^{-15}$	$4,97 \times 10^{-15}$
Kr-85	$2,40 \times 10^{-16}$	$1,32 \times 10^{-14}$	Xe-135	$1,10 \times 10^{-14}$	$3,12 \times 10^{-14}$
Kr-85m	$6,87 \times 10^{-15}$	$2,24 \times 10^{-14}$	Rn-218	$3,40 \times 10^{-17}$	$4,30 \times 10^{-17}$
Kr-87	$3,97 \times 10^{-14}$	$1,37 \times 10^{-13}$	Rn-219	$2,46 \times 10^{-15}$	$3,38 \times 10^{-15}$
			Rn-220	$1,72 \times 10^{-17}$	$2,20 \times 10^{-17}$
			Rn-222	$1,77 \times 10^{-17}$	$2,28 \times 10^{-17}$

I.47. El valor Q_E es el menor de dos valores calculados utilizando un coeficiente de dosis efectiva y un coeficiente de dosis equivalente en piel. Q_E está determinado por:

$$Q_E = \frac{D}{d_f \times \text{DRC}_{\text{subm}}} \quad (\text{I.12})$$

donde

D es la dosis de referencia de 0,05 Sv para la dosis efectiva o de 0,5 Sv para la dosis equivalente en piel;

d_f es la concentración en aire integrada en el tiempo;

DRC_{subm} es el coeficiente de dosis efectiva o el coeficiente de dosis en piel por inmersión equivalente en $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^3$.

En la ecuación (I.12), el valor para d_f se fijó en $2,6 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ por Bq emitido con respecto a una habitación definida.

I.48. Así, Q_E puede calcularse a partir de lo siguiente:

Para la dosis efectiva:

$$Q_E(\text{TBq}) = \frac{1,9 \times 10^{-14}}{h_{E, \text{subm}}} \quad (\text{I.13})$$

donde $h_{E, \text{subm}}$ es el coeficiente de dosis efectiva por inmersión en $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^3$.

Para la dosis equivalente en piel:

$$Q_E(\text{TBq}) = \frac{1,9 \times 10^{-13}}{h_{\text{skin, subm}}} \quad (\text{I.14})$$

donde $h_{\text{skin, subm}}$ es el coeficiente de dosis equivalente en piel para la inmersión en $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^3$.

CRITERIOS ESPECIALES

I.49. Los modelos dosimétricos descritos en los párrafos I.8 a I.48 se aplican a la amplia mayoría de radionucleidos de interés y pueden utilizarse para determinar

sus valores Q y los valores A_1 y A_2 conexos. Sin embargo, en un número limitado de casos los modelos son inapropiados o requieren modificación. En esta sección se examinan los criterios especiales aplicables en esas circunstancias.

Consideración de radionucleidos predecesores y descendientes

I.50. En el anterior sistema Q se suponía un período máximo de transporte de 50 días, por lo que se daba por sentado que los productos radiactivos de la desintegración que tuvieran períodos de semidesintegración inferiores a 10 d se encontraban en equilibrio con sus predecesores de período más largo. En tales casos los valores Q se calculaban para los predecesores y sus descendientes y el valor limitante era el utilizado para determinar el A_1 y el A_2 del predecesor. Para las situaciones en que un radionucleido tiene un período de semidesintegración superior a 10 d o mayor que el del nucleido predecesor, el descendiente junto con el predecesor eran considerados como una mezcla.

I.51. Se mantiene el criterio del período de semidesintegración de 10 d. Se supone que los radionucleidos descendientes con períodos de semidesintegración inferiores a 10 d están en equilibrio secular con los predecesores de período más largo; sin embargo, la contribución del descendiente a cada valor Q se suma a la del predecesor. Esto permite contabilizar los descendientes con una fracción de generación menor de uno; por ejemplo, el Ba 137m se genera en un 94,6 % de las desintegraciones de su predecesor el Cs 137. Si el período de semidesintegración del predecesor es menor de 10 d y el del descendiente mayor de 10 d, el remitente utilizará la regla de la mezcla. Por ejemplo, un bulto que contiene Ca 47 (4,53 d) se ha evaluado con su descendiente Sc 47 (3,351 d) en equilibrio transitorio con su predecesor. Un bulto que contenga Ge 77 (11,3 h) será evaluado por el remitente como una mezcla de Ge 77 y de su descendiente As 77 (38,8 h).

I.52. En algunas ocasiones un descendiente de período largo se produce mediante la desintegración de un predecesor de período corto. En tales casos no se puede valorar la contribución del descendiente a la exposición sin conocer la duración del transporte y la acumulación de los nucleidos descendientes. Se precisa determinar la duración del transporte y la acumulación de los nucleidos descendientes en el bulto y establecer los valores A_1/A_2 aplicando la regla de la mezcla. Un ejemplo sería el Te 131m (30 h), que se desintegra en Te 131 (25 min), y este a su vez en I 131 (8,04 d). El remitente debería aplicar la regla de la mezcla a este bulto con la actividad derivada de I 131, tomando como base la duración del transporte y la acumulación de los nucleidos descendientes.

Emisores alfa

I.53. En general, en el caso de los emisores alfa no es apropiado calcular los valores Q_A o Q_B para los materiales en forma especial debido a que tienen emisiones beta y gamma relativamente débiles. En la edición de 1973 del Reglamento de Transporte se introdujo un límite arbitrario más alto de $10^3 A_2$ para las fuentes alfa en forma especial. No hay una justificación dosimétrica para este procedimiento, por lo que considerando esto y el historial satisfactorio del transporte de materiales radiactivos en forma especial y la disminución de muchos valores Q_C para los emisores alfa derivada de las últimas recomendaciones de la ICRP [I.8], se incrementó en diez veces este factor. En consecuencia, se define un valor Q adicional, $Q_F = 10^4 \times Q_C$, para los emisores alfa en forma especial que, cuando procede, se recoge en el cuadro de valores Q , dentro de la columna encabezada por Q_A .

I.54. Un radionucleido se define como emisor alfa si emite partículas alfa en más de 0,1 % de sus desintegraciones o si se desintegra como emisor alfa. Por ejemplo, el Np 235, que se desintegra por emisión alfa en $1,4 \times 10^{-5}$ de sus desintegraciones, no es un emisor alfa a los fines del análisis de los materiales en forma especial. Por otra parte, el Pb 212 sí es un emisor alfa, ya que su descendiente, el Bi 212, sufre desintegración alfa. En conjunto, los límites para los emisores alfa en forma especial han aumentado al incrementarse los valores en Q_C .

I.55. Con respecto a la ingestión de los emisores alfa, se aplican argumentos análogos a los expuestos para los emisores beta en el examen relativo a Q_D y la inhalación más que la ingestión es siempre la vía de exposición más restrictiva; de ahí que no se tenga en cuenta explícitamente esta última.

Emisores de neutrones

I.56. En el caso de los emisores de neutrones, inicialmente se señaló en el sistema Q que no se conocían situaciones con fuentes (α, n) o (γ, n) o el emisor espontáneo de neutrones Cf 252 para las que las dosis por neutrones contribuyeran notablemente a las vías de exposición externa o interna consideradas anteriormente [I.4]. Sin embargo, no pueden despreciarse las dosis por neutrones debidas a las fuentes de Cf 252. Los datos suministrados en la Publicación N° 21 de la ICRP [I.31] para emisiones de neutrones y gamma indican una tasa de dosis de 25,4 Sv/h a 1 metro de una fuente de Cf 252 de 1 g: esto produce un valor de Q_A para el Cf 252 de 0,095 TBq. El incremento en un factor de cerca de 2 en el factor de ponderación recomendado para los neutrones por la ICRP [I.8] lleva

a un valor Q_A de $4,7 \times 10^{-2}$ TBq que se empleó para determinar el valor A_1 en la edición de 1996 del Reglamento de Transporte. Esto es más restrictivo que el valor Q_F de 28 TBq obtenido de la expresión revisada para los emisores alfa en forma especial. El componente neutrónico domina la dosis externa debida a una fuente de Cf 252 y se aplican criterios similares para las otras dos posibles fuentes de fisión espontánea, el Cm 248 y el Cf 254. Para estos radionucleidos los valores Q_A se calcularon suponiendo los mismos factores de conversión de tasa de dosis por unidad de actividad que para el Cf 252 antes citado, teniendo en cuenta sus respectivas tasas de emisión de neutrones con relación a la de esta fuente. El valor A_1 de Cf 252 se actualizó, según se indica en la referencia [I.32] de conformidad con recomendaciones posteriores de la ICRP [I.33], y este valor modificado se utilizó en la edición de 1996 (enmendada) y en todas las ediciones posteriores del Reglamento de Transporte.

Bremsstrahlung

I.57. Los valores A_1 y A_2 tabulados en la edición de 1973 del Reglamento de Transporte estaban sujetos a un límite umbral superior de 1000 Ci a fin de proteger contra los posibles efectos de la *bremsstrahlung*. En el sistema Q este umbral se mantuvo en 40 TBq. Se reconoce que se trata de un corte arbitrario, que no está asociado específicamente con la radiación *bremsstrahlung* ni con ningún otro aspecto dosimétrico.

I.58. Una evaluación preliminar de la *bremsstrahlung*, coherente de alguna manera con las hipótesis de Q_A y Q_B , indica que el valor de 40 TBq es razonable. Sin embargo, la consideración explícita de la *bremsstrahlung* en el sistema Q podría limitar A_1 y A_2 para algunos radionucleidos a unos 20 TBq, es decir, un factor dos veces inferior. En general, este análisis apoya la continuación del uso de un límite umbral de 40 TBq.

Tritio y sus compuestos

I.59. Durante el desarrollo del sistema Q se consideró que los líquidos que contuvieran tritio deberían ser considerados aparte. El modelo que se utilizó fue el derrame de una gran cantidad de agua tritiada en una zona confinada, seguido de un incendio. Como resultado de estas hipótesis el valor A_2 para los líquidos tritiados se estableció en 40 TBq en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, con la condición adicional de que la concentración debería ser inferior a 1 TBq/L. Estos valores se han mantenido.

Radón y su progenie

I.60. Como se indicó en el párrafo I.46, el cálculo de Q_E se aplica a los nucleidos en forma de gases nobles que no se incorporan al organismo. Por tanto, esto solo se aplica a los radionucleidos cuya progenie son un nucleido estable u otro gas noble. En algunos casos esta condición no se cumple plenamente y hay que considerar vías de exposición distintas de la exposición externa debida a la inmersión en una nube radiactiva [I.34]. En el contexto del Reglamento de Transporte el único caso de importancia práctica es el del Rn 222.

I.61. El valor correspondiente a Q_C se calculó en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte como 3,6 TBq. Sin embargo, si se considera un 100 % de emisión de radón, en lugar de la emisión de una fracción de aerosol de 10^{-3} a 10^{-2} incorporada en el modelo de Q_C , se reducirá Q_C a un valor en el intervalo de $3,6 \times 10^{-3}$ a $3,6 \times 10^{-2}$ TBq. Además, al considerar el Rn 222 y sus descendientes como un gas noble, se obtuvo un valor Q_E de $4,2 \times 10^{-3}$ TBq, que se aproxima al valor más bajo del intervalo de valores Q_C , límite citado para el Rn 222 en el cuadro de valores Q de los materiales radiactivos en forma no especial transportados en bultos del Tipo A.

APLICACIONES

Materiales de baja actividad específica con valores A_1 o A_2 “ilimitados”

I.62. En la edición de 1973 del Reglamento de Transporte se reconoció una categoría de materiales cuyas actividades específicas son tan bajas que es inconcebible que ocurra una incorporación que provoque un daño radiológico significativo, a saber, los materiales de baja actividad específica (BAE). Estos materiales se definieron en función de un modelo en que se suponía que era muy improbable que una persona permaneciera en una atmósfera polvorienta el tiempo suficiente para inhalar más de 10 mg de material. En estas condiciones, si la actividad específica del material es tal que la masa inhalada es equivalente o inferior a la actividad que se supone que inhala una persona afectada en un accidente con un bulto del Tipo A, es decir, $10^{-6}A_2$, entonces ese material no debería plantear un peligro mayor durante el transporte que las cantidades de materiales radiactivos que se transportan en bultos del Tipo A. Este modelo hipotético se mantiene en el sistema Q y se traduce en un límite de referencia para materiales BAE de $10^{-4} \times Q_C/g$. De manera que para los radionucleidos que tienen una actividad específica inferior a ese valor, los valores Q se tabulan como “sin límite”. En los casos en que se satisface este criterio, la dosis efectiva

asociada con una incorporación de 10 mg del nucleido es menor que el criterio de dosis de 50 mSv. El uranio y el torio naturales, el uranio empobrecido y otros materiales como U 238, Th 232 y U 235, satisfacen el criterio anterior sobre los BAE. Los cálculos en que se utilizan los coeficientes de dosis mencionados en la publicación GSR Part 3 [I.9] indican que el uranio no irradiado enriquecido a <20 % también satisface el mismo criterio sobre la base de las composiciones isotópicas definidas en la norma ASTM C996-90 [I.35]. Los valores A_1 y A_2 para el uranio irradiado reprocesado deberían calcularse aplicando la ecuación de las mezclas utilizada en el párrafo 405 del Reglamento de Transporte, considerando los radionucleidos del uranio y los productos de fisión.

I.63. Otro criterio aplicable a los materiales BAE en el contexto del modelo de contaminación de la piel que se empleó para el cálculo de Q_D es la masa de material que podría quedar retenida en la piel durante un período considerable. Se estima que, normalmente, entre 1 y 10 mg/cm² de la suciedad presente en las manos sería fácilmente discernible y se eliminaría rápidamente por frotamiento o lavado, independientemente de la posible actividad. Se estuvo de acuerdo en que el valor superior de ese intervalo era adecuado como umbral para la masa de material que se retiene en la piel y, junto con el modelo de contaminación en la piel para Q_D , esto da por resultado un límite de $10^{-5} \times Q_D/g$ para materiales BAE. Sobre esta base, los valores Q_D para los radionucleidos a los que se aplica este criterio se recogen también como sin límite en el cuadro de valores Q.

Tasas de emisión para el transporte en condiciones normales

I.64. En la edición de 1973 del Reglamento de Transporte, para determinar la tasa de emisión máxima permitida para bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) en condiciones de transporte normales se consideró como situación más adversa la de un trabajador que durante el 20 % de su jornada laboral se encontrara en un vehículo cerrado de 50 m³ de volumen, con 10 renovaciones de aire por hora. Se consideró que el vehículo contenía un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) que perdía actividad con una tasa de r (Bq/h) y de manera conservadora se supuso que la consiguiente concentración de actividad en el aire estaba siempre en equilibrio. Con estas hipótesis la incorporación anual de actividad por inhalación, I_a , para una persona que trabajara durante 2000 h al año, con un ritmo de respiración medio de 1,25 m³/h se evaluó de la manera siguiente:

$$I_a = \frac{r}{50 \times 10} \times 1,25 \times 2000 \times 0,2 \quad (I.15)$$

que equivale a:

$$I_a = r$$

I.65. Por tanto, la actividad máxima de incorporación en un año es igual a la actividad emitida en 1 h.

I.66. Esta deducción supone que todo el material que se emite pasa a estar en suspensión en el aire y puede ser inhalado, lo que puede ser una sobreestimación importante para muchos materiales. También se supone que ha habido en todo momento condiciones de equilibrio. Estos factores, junto con el principio de que las emisiones desde los bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) deberían reducirse al mínimo, indicaban que la exposición de los trabajadores del transporte sería en ese momento solo una pequeña fracción de los límites de dosis definidos por la ICRP para los trabajadores expuestos [1.5]. Además, se consideró adecuado este nivel de conservadurismo a fin de tener en cuenta la situación improbable de que varios bultos presentaran fugas en el mismo vehículo.

I.67. En la edición de 1985 del Reglamento de Transporte permanecieron sin cambios las tasas máximas de emisión permitidas para bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) en condiciones de transporte normales, aunque se actualizaron algunos de los parámetros utilizados en la anterior deducción y se tuvieron en cuenta los límites de dosis y los límites de incorporación anuales recomendados por la ICRP en ese momento [1.18]. Estos, a su vez, se integraron en el método mejorado, conocido como el sistema Q, para evaluar los límites de contenido A_1 y A_2 en un bulto del Tipo A.

I.68. En los modelos anteriores se suponía un tiempo de exposición extremadamente pesimista de 2000 h por año. Si se mantiene ese valor junto con la exposición dentro de una habitación de 30 m × 10 m × 10 m (3000 m³) con cuatro renovaciones del aire en una hora y un ritmo de respiración de una persona adulta de 1,25 m³/h, la tasa de emisión admisible, r, para una dosis efectiva de 20 mSv puede calcularse como sigue:

$$r = \frac{20 \times 10^{-6} A_2}{50} \times \frac{3000 \times 4}{2000 \times 1,25} \quad (\text{I.16})$$

$$r = 1,9 \times 10^{-6} A_2 \quad (\text{I.17})$$

I.69. El tamaño de la habitación supuesto es más grande que el considerado para una emisión repentina en el sistema Q. No obstante, el tiempo de exposición supuesto es muy pesimista. Una exposición de 200 h en un espacio mucho más confinado de 300 m³ daría lugar exactamente a la misma dosis efectiva pronosticada. En una exposición de personas que estuvieran al aire libre en las proximidades de un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) que presente fugas, la dosis máxima por inhalación sería mucho más baja.

I.70. En consecuencia, se ha mantenido el actual límite de $10^{-6}A_2$ en una hora, que se ha comprobado que es un límite conservador. La experiencia demuestra que es raro que, en el transporte rutinario, los bultos presenten fugas a tasas próximas al límite admisible. En efecto, en el caso de bultos que lleven líquidos, esas fugas supondrían una contaminación superficial muy grave cerca de los sistemas de sellado, lo que se detectaría con facilidad mediante cualquier inspección radiológica que se hiciera en tránsito o al recibo del bulto por el destinatario.

Tasas de emisión en condiciones de accidente

I.71. Es improbable que en un espacio cerrado ocurran accidentes de la gravedad que simulan los ensayos especificados en el Reglamento de Transporte para los bultos del Tipo B; ahora bien, si se produjeran, la situación resultante sería tal que exigiría la inmediata evacuación de todas las personas situadas en las proximidades [I.2]. Por ello, el supuesto de exposición de interés en este contexto es el que representa un accidente que ocurre al aire libre. En esta situación, las repercusiones radiológicas de la máxima emisión admisible de A_2 en un período de una semana procedente de un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) pueden expresarse como un límite de dosis equivalente, considerando la exposición de una persona que permanezca continuamente en la dirección del viento con respecto al bulto deteriorado durante todo el período de la emisión [I.36].

I.72. Es improbable que en la práctica una emisión accidental persista durante el período completo de una semana. En la mayoría de las situaciones el personal de los servicios de emergencia acudiría a la escena del accidente y adoptaría medidas correctoras eficaces para limitar la emisión de actividad en el plazo de pocas horas. Sobre esta base, las personas expuestas, situadas a una distancia de 50 a 200 m en la dirección del viento respecto de un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) deteriorado, en condiciones atmosféricas medias, recibirían por inhalación una dosis efectiva máxima de 1 a 10 mSv, que se incrementaría en un factor de 5 aproximadamente en el caso, generalmente menos probable, de condiciones meteorológicas continuamente estables (véase, por ejemplo, la fig. 3 de la ref. [I.37]). Los efectos de las estructuras de contención locales y de las

turbulencias atmosféricas cerca de la fuente radiactiva, y los posibles efectos del ascenso del penacho si se produce un incendio, tenderán a minimizar la variación espacial de las dosis a partir de algunas decenas de metros de la fuente hacia el extremo inferior de los intervalos de dosis antes citados. Se considera justificado no tener en cuenta posibles dosis a las personas situadas a algunas decenas de metros de la fuente debido en parte a la hipótesis conservadora de una exposición continua en la dirección del viento a partir de la fuente durante todo el período de emisión y, en parte, por el hecho de que el personal de los servicios de emergencia situado en esta zona debería trabajar bajo supervisión y control radiológico.

Disposición especial relativa al Kr 85

I.73. La disposición especial relativa al Kr 85 que se estableció en la edición de 1973 del Reglamento de Transporte y que se mantuvo en la de 1985, obedece a la consideración de las consecuencias dosimétricas de una emisión de este radionucleido. La emisión admisible de $10A_2$ se dedujo inicialmente a base de una comparación entre la posible dosis de radiación al cuerpo entero o a cualquier órgano crítico de las personas expuestas en un radio de 20 m de la fuente de Kr 85 y otros radionucleidos (gaseosos o no gaseosos). En particular, se observó que el modelo basado en la vía de inhalación que se utilizó en aquel momento en la deducción de los valores A_2 era inapropiado para un gas noble, es decir, que no se incorpora significativamente en los tejidos del cuerpo. En la edición de 1996 del Reglamento de Transporte, según el sistema Q el valor A_2 para el Kr 85 era igual al valor Q_E para la dosis de inmersión en la piel de personas expuestas producida en locales interiores tras una rápida emisión del contenido de un bulto del Tipo A en un accidente. Para una emisión de A_2 con un factor de dilución de d_p la dosis efectiva máxima resultante por inhalación D_{inh} viene determinada por:

$$D_{inh} = A_2 \times d_f \times 3,3 \times 10^{-4} \times \frac{50}{A_2 \times 10^{-6}} \quad (I.18)$$

donde $3,3 \times 10^{-4}$ es la tasa media de respiración de un adulto expresada en m^3/s y una incorporación de $10^{-6}A_2$ se ha calculado con una dosis de 50 mSv. Sobre la misma base, una emisión de $10A_2$ de Kr 85 (100 TBq) da como resultado una dosis por inmersión de:

$$D_{subm} = 100 \times d_f \times 2,4 \times 10^{-1} \quad (I.19)$$

donde $2,4 \times 10^{-1}$ es el coeficiente de dosis por inmersión en $mSv \cdot m^3 \cdot TBq^{-1} \cdot s^{-1}$.

De las expresiones anteriores se deduce que D_{inh}/D_{subm} es aproximadamente 700. De este modo se comprueba que el límite de emisión de actividad de un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M) para el Kr 85 es conservador en más de dos órdenes de magnitud con respecto a otros radionucleidos no gaseosos.

I.74. En 2009 un grupo de expertos examinó la validez del factor de 10 para las tasas de emisión de actividad del Kr 85 en comparación con otros radionucleidos. En relación con las condiciones de transporte normales, se formuló la siguiente hipótesis con respecto a la dosis por inmersión debida a la emisión de actividad del Kr 85 desde un bulto del Tipo B(U) o del Tipo B(M).

- a) Se consideran los mismos parámetros ambientales que los citados en el párrafo I.69:
- una habitación con un volumen de 300 m^3 ;
 - una tasa de renovación del aire de 4 h^{-1} ;
 - un tiempo de exposición de 200 h;
 - un coeficiente de dosis por inmersión en la piel de $1,32 \times 10^{-14} \text{ Sv}\cdot\text{s}^{-1}/(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})$ [I.30].
- b) Con una tasa de emisión uniforme (TE en Bq/h), la concentración media de Kr 85 es la siguiente:

$$\text{concentración (Bq/m}^3) = \text{TE}/(300 \times 4) = 8,3 \times 10^{-4} \times \text{TE} \quad (\text{I.20})$$

- c) La dosis en piel con un tiempo de exposición de 200 h es:

$$D (\text{Sv}) = \text{concentración (Bq/m}^3) \quad (\text{I.21})$$

$$\times \text{coeficiente de dosis equivalente en piel (Sv}\cdot\text{m}^3/(\text{Bq}\cdot\text{s}))$$

$$\times \text{exposición (s)}$$

$$= 8,33 \times 10^{-4} \times \text{TE} \times 1,32 \times 10^{-14} \times 200 \times 3600$$

$$= 7,92 \times 10^{-12} \times \text{TE}$$

- d) Para que no se supere el límite anual de dosis equivalente en piel de 0,05 Sv para el público, la TE debería limitarse a:

$$\text{TE (Bq/h)} = 0,05 / (7,92 \times 10^{-12})$$

$$= 6,3 \times 10^9 \text{ Bq/h} = 6,3 \times 10^{-4} \text{ A}_2/\text{h}$$

- e) Este valor es 63 veces mayor que el criterio de reglamentación actual de $10 \times 10^{-6} \text{A}_2/\text{h}$ para el Kr 85, que es, por tanto, conservador.

En lo referente a las condiciones de accidente de transporte, se formuló la siguiente hipótesis con respecto a la dosis por inmersión debida a la emisión de actividad del Kr 85 desde un bulto del Tipo B:

- a) Se consideraron los mismos parámetros ambientales que los citados en el párrafo I.72, es decir:
- una distancia del bulto de 100 m;
 - un factor de dilución de $8 \times 10^{-3} \text{ s/m}^3$;
 - un coeficiente de dosis equivalente en piel de $1,32 \times 10^{-14} \text{ Sv}\cdot\text{m}^3/(\text{Bq}\cdot\text{s})$;
 - una emisión instantánea de 10A_2 (10^{14} Bq).
- b) La dosis equivalente en piel es la siguiente:

$$D (\text{Sv}) = \text{actividad (Bq)} \times \text{factor de dilución (s/m}^3\text{)} \quad (\text{I.22}) \\ \times \text{coeficiente de dosis equivalente en piel (Sv}\cdot\text{m}^3\text{/Bq}\cdot\text{s)}$$

$$= 10^{14} \times 8 \times 10^{-3} \times 1,32 \times 10^{-14}$$

$$= 10,6 \text{ mSv}$$

- c) Este valor está por debajo de los criterios formulados para la dosis equivalente o la dosis equivalente comprometida recibida por distintos órganos en condiciones de accidente, como se indica en el párrafo I.9 b), y por debajo del límite anual de dosis equivalente en piel de 500 mSv.
- d) Se ha considerado también una distancia del bulto de 15 m; esta distancia implica un factor de dilución 17 veces menor que a 100 m. Por consiguiente, la dosis equivalente en piel pasa a ser de 180 mSv. Este valor todavía está por debajo del límite de dosis equivalente en piel de 500 mSv para distintos órganos en condiciones de accidente.
- e) Seguidamente se llega a la conclusión de que el actual criterio de reglamentación de 10A_2 /semana no daría lugar a que se excediera el límite de dosis en la piel.

TABULACIÓN DE LOS VALORES Q

I.75. En el cuadro I.2 de la presente guía de seguridad se recoge una lista completa de valores Q calculados en función de los modelos que se han descrito en este apéndice. También se incluyen los valores correspondientes de límites de

contenido A_1 y A_2 de los bultos del Tipo A para materiales radiactivos en forma especial y en forma no especial, respectivamente. Los valores Q que figuran en el cuadro I.2 de la presente guía de seguridad se han redondeado a dos cifras significativas y los valores A_1 y A_2 a una cifra significativa; en estos últimos se ha aplicado también el umbral arbitrario de 40 TBq.

I.76. En general, los nuevos valores están dentro de un factor de 3 aproximadamente con respecto a los anteriores; hay algunos radionucleidos en que los nuevos valores A_1 and A_2 están fuera de este intervalo. Algunas decenas de radionucleidos tienen los nuevos valores A_1 mayores que los anteriores en factores que fluctúan entre 10 y 100. Ello obedece fundamentalmente a las mejoras de los modelos de emisores beta. No hay nuevos valores A_1 o A_2 que sean más bajos que los anteriores en un factor superior a 10. Algunos radionucleidos que se habían tabulado anteriormente ahora se excluyen, pero se han incluido otros isómeros, a saber, el Eu 150 y el Np 236.

Consideración de las propiedades físicas y químicas

I.77. Otro factor considerado es la necesidad de aplicar límites adicionales para materiales cuyas propiedades físicas pudieran invalidar las hipótesis utilizadas para deducir los valores Q. Estos criterios son aplicables a los materiales que puedan volverse volátiles a las elevadas temperaturas que podrían producirse en un incendio o que pudieran transportarse como polvos finamente divididos, en especial para el modelo utilizado a efectos de evaluar los valores Q_C . No obstante, se consideró en definitiva que solamente en las circunstancias más extremas se rebasaría el factor de incorporación supuesto de 10^{-6} y que era innecesaria una modificación especial del modelo de Q_C para estos materiales.

I.78. Como en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, no se consideraron las formas o propiedades químicas de los radionucleidos. No obstante, en la determinación de los valores Q_C se utilizaron los valores más restrictivos de los coeficientes de dosis recomendados por la publicación GSR Part 3 [I.9].

Vías múltiples de exposición

I.79. Con arreglo a la edición de 1985 del Reglamento de Transporte, en la aplicación del sistema Q se considera por separado la deducción de cada valor Q y, en consecuencia, cada vía potencial de exposición. En general, esto propiciará el cumplimiento de los criterios dosimétricos antes definidos, siempre que las dosis que reciban las personas expuestas cerca de un bulto deteriorado

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A – Q_F , A_1 y A_2

Radionucleido	a – Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Ac 225		$4,9 \times 10^{+00}$	$8,5 \times 10^{-01}$	$6,3 \times 10^{-03}$	$3,0 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	6×10^{-03}
Ac 227	a	$9,3 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{+02}$	$9,3 \times 10^{-05}$	$3,7 \times 10^{+01}$	9×10^{-01}	9×10^{-05}
Ac 228		$1,2 \times 10^{+00}$	$5,6 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{+00}$	$5,2 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	5×10^{-01}
Ag 105		$2,0 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,3 \times 10^{+01}$	$2,5 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Ag 108m		$6,5 \times 10^{-01}$	$5,9 \times 10^{-00}$	$1,4 \times 10^{+00}$	$6,0 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Ag 110m		$4,2 \times 10^{-01}$	$1,9 \times 10^{+01}$	$4,2 \times 10^{+00}$	$2,1 \times 10^{+00}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Ag 111		$4,1 \times 10^{+01}$	$1,9 \times 10^{+00}$	$2,9 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Al 26		$4,3 \times 10^{-01}$	$1,4 \times 10^{-01}$	$2,8 \times 10^{+00}$	$7,1 \times 10^{-01}$	1×10^{-01}	1×10^{-01}
Am 241	a	$1,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{-03}$	$3,8 \times 10^{+02}$	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
Am 242m	a	$1,4 \times 10^{+01}$	$5,0 \times 10^{+01}$	$1,4 \times 10^{-03}$	$8,4 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Am 243		$5,0 \times 10^{+00}$	$2,6 \times 10^{+02}$	$1,3 \times 10^{-03}$	$4,1 \times 10^{-01}$	$5 \times 10^{+00}$	1×10^{-03}
Ar 37		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	—	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Ar 39		—	$7,3 \times 10^{+01}$	—	$1,8 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$
Ar 41		$8,8 \times 10^{-01}$	$3,1 \times 10^{-01}$	—	$3,1 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
As 72		$6,1 \times 10^{-01}$	$2,8 \times 10^{-01}$	$5,4 \times 10^{+01}$	$6,5 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
As 73		$9,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,4 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
As 74		$1,4 \times 10^{+00}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$2,4 \times 10^{+01}$	$9,4 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	9×10^{-01}
As 76		$2,5 \times 10^{+00}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$6,8 \times 10^{+01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
As 77		$1,3 \times 10^{+02}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$1,3 \times 10^{+02}$	$6,5 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}
At 211		$2,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,1 \times 10^{-01}$	$4,4 \times 10^{+02}$	$2 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Au 193		$7,0 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,2 \times 10^{+02}$	$1,8 \times 10^{+00}$	$7 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Au 194		$1,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,0 \times 10^{+02}$	$6,1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Au 195		$1,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,1 \times 10^{+01}$	$5,5 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+01}$	$6 \times 10^{+00}$
Au 198		$2,6 \times 10^{+00}$	$1,1 \times 10^{+00}$	$6,0 \times 10^{+01}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Au 199		$1,4 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,7 \times 10^{+01}$	$6,4 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Ba 131		$1,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,9 \times 10^{+02}$	$2,2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Ba 133		$2,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Ba 133m		$1,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,6 \times 10^{+02}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Ba 135m		$1,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+02}$	$5,9 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Ba 140		$6,3 \times 10^{-01}$	$4,5 \times 10^{-01}$	$2,4 \times 10^{+01}$	$3,1 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	3×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Be 7		$2,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,4 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$
Be 10		—	$5,8 \times 10^{+01}$	$1,5 \times 10^{+00}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Bi 205		$6,9 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,4 \times 10^{+01}$	$1,1 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Bi 206		$3,4 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,9 \times 10^{+01}$	$1,1 \times 10^{+00}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Bi 207		$7,1 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,4 \times 10^{+00}$	$5,0 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Bi 210		—	$1,3 \times 10^{+00}$	$6,0 \times 10^{-01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Bi 210m		$4,3 \times 10^{+00}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$4,9 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	2×10^{-02}
Bi 212		$1,0 \times 10^{+00}$	$6,5 \times 10^{-01}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$5,8 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	6×10^{-01}
Bk 247	a	$7,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,7 \times 10^{-04}$	$1,4 \times 10^{+00}$	$8 \times 10^{+00}$	8×10^{-04}
Bk 249		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$	3×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Br 76		$4,4 \times 10^{-01}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$9,9 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Br 77		$3,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,7 \times 10^{+02}$	$2,3 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Br 82		$4,1 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,8 \times 10^{+01}$	$7,7 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
C 11		$1,0 \times 10^{+00}$	$2,0 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
C 14		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$8,6 \times 10^{+01}$	$3,2 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$
Ca 41		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Ca 45		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,9 \times 10^{+01}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$
Ca 47		$2,7 \times 10^{+00}$	$3,7 \times 10^{+01}$	$2,0 \times 10^{+01}$	$3,3 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	3×10^{-01}
Cd 109		$2,9 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,2 \times 10^{+00}$	$1,9 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$
Cd 113m		—	$9,1 \times 10^{+01}$	$4,5 \times 10^{-01}$	$6,9 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Cd 115		$3,9 \times 10^{+00}$	$3,3 \times 10^{+00}$	$4,3 \times 10^{+01}$	$3,9 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	4×10^{-01}
Cd 115m		$5,0 \times 10^{+01}$	$5,2 \times 10^{-01}$	$6,8 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Ce 139		$6,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,8 \times 10^{+01}$	$2,2 \times 10^{+00}$	$7 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Ce 141		$1,6 \times 10^{+01}$	$3,2 \times 10^{+02}$	$1,4 \times 10^{+01}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Ce 143		$3,7 \times 10^{+00}$	$8,9 \times 10^{-01}$	$6,2 \times 10^{+01}$	$6,0 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	6×10^{-01}
Ce 144		$2,2 \times 10^{+01}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+00}$	$3,8 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
Cf 248	a	$6,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,1 \times 10^{-03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-03}
Cf 249		$3,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,6 \times 10^{-04}$	$4,6 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$	8×10^{-04}
Cf 250	a	$1,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{-03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2 \times 10^{+01}$	2×10^{-03}
Cf 251	a	$7,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,5 \times 10^{-04}$	$5,2 \times 10^{-01}$	$7 \times 10^{+00}$	7×10^{-04}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Cf252		$1,3 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,8 \times 10^{-03}$	$5,2 \times 10^{+02}$	1×10^{-01}	3×10^{-03}
Cf253	a	$4,2 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,2 \times 10^{-02}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	4×10^{-02}
Cf254		$1,4 \times 10^{-03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{-03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	1×10^{-03}	1×10^{-03}
Cl 36		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+01}$	$7,2 \times 10^{+00}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Cl 38		$8,1 \times 10^{-01}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,6 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
Cm 240	a	$1,7 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,7 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-02}
Cm 241		$2,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$1,5 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Cm 242	a	$1,0 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	1×10^{-02}
Cm 243		$8,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{-03}$	$8,3 \times 10^{-01}$	$9 \times 10^{+00}$	1×10^{-03}
Cm 244	a	$1,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{-03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2 \times 10^{+01}$	2×10^{-03}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Cm 245	a	$9,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,1 \times 10^{-04}$	$2,7 \times 10^{+00}$	$9 \times 10^{+00}$	9×10^{-04}
Cm 246	a	$9,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,1 \times 10^{-04}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9 \times 10^{+00}$	9×10^{-04}
Cm 247		$3,2 \times 10^{+00}$	$1,6 \times 10^{+02}$	$9,8 \times 10^{-04}$	Sin límite	$3 \times 10^{+00}$	1×10^{-03}
Cm 248		$1,8 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,5 \times 10^{-04}$	Sin límite	2×10^{-02}	3×10^{-04}
Co 55		$5,4 \times 10^{-01}$	$9,7 \times 10^{-01}$	$9,1 \times 10^{+01}$	$7,7 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Co 56		$3,3 \times 10^{-01}$	$1,5 \times 10^{+01}$	$7,8 \times 10^{+00}$	$2,9 \times 10^{+00}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Co 57		$1,0 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,3 \times 10^{+01}$	$1,3 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Co 58		$1,1 \times 10^{+00}$	$7,8 \times 10^{+02}$	$2,5 \times 10^{+01}$	$3,8 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Co 58m		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Co 60		$4,5 \times 10^{-01}$	$7,3 \times 10^{+02}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$9,7 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Cr 51		$3,4 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Cs 129		$3,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,7 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$
Cs 131		$3,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Cs 132		$1,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,1 \times 10^{+02}$	$2,5 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Cs 134		$6,9 \times 10^{-01}$	$3,6 \times 10^{+00}$	$7,4 \times 10^{+00}$	$9,2 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Cs 134m		$3,7 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Cs 135		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	$1,5 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$
Cs 136		$5,1 \times 10^{-01}$	$8,3 \times 10^{+02}$	$3,8 \times 10^{+01}$	$7,0 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Cs 137		$1,8 \times 10^{+00}$	$8,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+01}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Cu 64		$5,6 \times 10^{+00}$	$1,1 \times 10^{+02}$	$4,2 \times 10^{+02}$	$1,1 \times 10^{+00}$	$6 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Cu 67		$1,0 \times 10^{+01}$	$4,1 \times 10^{+02}$	$8,6 \times 10^{+01}$	$6,9 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}
Dy 159		$2,0 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$
Dy 165		$4,1 \times 10^{+01}$	$9,4 \times 10^{-01}$	$8,2 \times 10^{+02}$	$6,1 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	6×10^{-01}
Dy 166		$3,4 \times 10^{+01}$	$8,6 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{+01}$	$3,4 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	3×10^{-01}
Er 169		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,1 \times 10^{+01}$	$9,5 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$
Er 171		$2,9 \times 10^{+00}$	$8,3 \times 10^{-01}$	$2,3 \times 10^{+02}$	$5,1 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	5×10^{-01}
Eu 147		$2,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,0 \times 10^{+01}$	$3,8 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Eu 148		$5,1 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,9 \times 10^{+01}$	$1,9 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Eu 149		$1,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,9 \times 10^{+02}$	$7,4 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$
Eu 150		$7,2 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+00}$	$7,1 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Eu 150m		$2,3 \times 10^{+01}$	$1,5 \times 10^{+00}$	$2,6 \times 10^{+02}$	$6,9 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}
Eu 152		$9,6 \times 10^{-01}$	$1,7 \times 10^{+02}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Eu 152m		$3,7 \times 10^{+00}$	$8,1 \times 10^{-01}$	$2,3 \times 10^{+02}$	$7,8 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	8×10^{-01}
Eu 154		$9,0 \times 10^{-01}$	$1,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+00}$	$5,5 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	6×10^{-01}
Eu 155		$1,9 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,7 \times 10^{+00}$	$3,2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$
Eu 156		$8,8 \times 10^{-01}$	$7,4 \times 10^{-01}$	$1,5 \times 10^{+01}$	$6,7 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
F 18		$1,0 \times 10^{+00}$	$2,8 \times 10^{+01}$	$8,3 \times 10^{+02}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Fe 52		$4,1 \times 10^{-01}$	$3,2 \times 10^{-01}$	$7,6 \times 10^{+01}$	$3,7 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Fe 55		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Fe 59		$9,4 \times 10^{-01}$	$4,4 \times 10^{+01}$	$1,4 \times 10^{+01}$	$8,9 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	9×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Fe 60		$2,0 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,1 \times 10^{-01}$	$3,7 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-01}
Ga 67		$7,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,2 \times 10^{+02}$	$3,2 \times 10^{+00}$	$7 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Ga 68		$1,1 \times 10^{+00}$	$4,6 \times 10^{-01}$	$9,8 \times 10^{+02}$	$6,6 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Ga 72		$4,3 \times 10^{-01}$	$3,7 \times 10^{-01}$	$9,1 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Gd 146		$5,3 \times 10^{-01}$	$2,9 \times 10^{+02}$	$7,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+00}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Gd 148	a	$2,0 \times 10^{+01}$	—	$2,0 \times 10^{-03}$	—	$2 \times 10^{+01}$	2×10^{-03}
Gd 153		$9,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,4 \times 10^{+01}$	$8,9 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+01}$	$9 \times 10^{+00}$
Gd 159		$2,1 \times 10^{+01}$	$3,1 \times 10^{+00}$	$1,9 \times 10^{+02}$	$6,4 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Ge 68		$1,1 \times 10^{+00}$	$4,6 \times 10^{-01}$	$3,8 \times 10^{+00}$	$6,6 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Ge 69		$1,1 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{+00}$	$1,6 \times 10^{+02}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Ge 71		$5,2 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Ge 77		$1,1 \times 10^{+00}$	$3,3 \times 10^{-01}$	$1,4 \times 10^{+02}$	$6,0 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Hf 172		$5,8 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,5 \times 10^{+00}$	$1,7 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Hf 175		$2,9 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$4,7 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Hf 181		$1,9 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{+01}$	$5,0 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	5×10^{-01}
Hf 182		$4,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Hg 194		$1,1 \times 10^{+00}$	$10 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Hg 195m		$3,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,3 \times 10^{+00}$	$7,3 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}
Hg 197		$1,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{+01}$	$1,6 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Hg 197m		$1,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$8,1 \times 10^{+00}$	$3,5 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	4×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Hg 203		$4,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,7 \times 10^{+00}$	$1,1 \times 10^{+00}$	$5 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Ho 166		$3,8 \times 10^{+01}$	$4,4 \times 10^{-01}$	$7,6 \times 10^{+01}$	$5,8 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Ho 166m		$6,2 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,5 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}	5×10^{-01}
I 123		$6,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,3 \times 10^{+02}$	$2,9 \times 10^{+00}$	$6 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
I 124		$1,1 \times 10^{+00}$	$6,0 \times 10^{+00}$	$3,8 \times 10^{+00}$	$2,5 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
I 125		$1,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$
I 126		$2,3 \times 10^{+00}$	$6,4 \times 10^{+00}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
I 129		$2,9 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
I 131		$2,8 \times 10^{+00}$	$2,0 \times 10^{+01}$	$2,3 \times 10^{+00}$	$6,9 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}
I 132		$4,8 \times 10^{-01}$	$4,4 \times 10^{-01}$	$1,8 \times 10^{+02}$	$6,1 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
I 133		$1,8 \times 10^{+00}$	$7,3 \times 10^{-01}$	$1,1 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	6×10^{-01}
I 134		$4,2 \times 10^{-01}$	$3,2 \times 10^{-01}$	$6,9 \times 10^{+02}$	$5,9 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
I 135		$8,2 \times 10^{-01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$5,2 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
In 111		$2,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,2 \times 10^{+02}$	$3,0 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
In 113m		$4,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
In 114m		$1,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,4 \times 10^{+00}$	$4,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}
In 115m		$6,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$8,3 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+00}$	$7 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Ir 189		$1,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,1 \times 10^{+01}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Ir 190		$7,5 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,2 \times 10^{+01}$	$7,5 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Ir 192		$1,3 \times 10^{+00}$	$4,6 \times 10^{+01}$	$8,1 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Ir 193m		$7,7 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,8 \times 10^{+01}$	$3,0 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+00}$
Ir 194		$1,2 \times 10^{+01}$	$3,3 \times 10^{-01}$	$8,9 \times 10^{+01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
K 40		$7,3 \times 10^{+00}$	$9,4 \times 10^{-01}$	Sin límite	Sin límite	9×10^{-01}	9×10^{-01}
K 42		$4,2 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$3,8 \times 10^{+02}$	$5,7 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
K 43		$1,1 \times 10^{+00}$	$7,3 \times 10^{-01}$	$3,3 \times 10^{+02}$	$6,2 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	6×10^{-01}
Kr 81		$1,1 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	—	$7,9 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Kr 85		$4,8 \times 10^{+02}$	$1,4 \times 10^{+01}$	—	$1,4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Kr 85m		$7,5 \times 10^{+00}$	$7,6 \times 10^{+00}$	—	$2,8 \times 10^{+00}$	$8 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Kr 87		$1,5 \times 10^{+00}$	$2,1 \times 10^{-01}$	—	$4,8 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
La 137		$3,0 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3 \times 10^{+01}$	$6 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
La 140		$4,9 \times 10^{-01}$	$3,7 \times 10^{-01}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$6,0 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Lu 172		$5,9 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+01}$	$2,2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Lu 173		$8,0 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,2 \times 10^{+01}$	$1,7 \times 10^{+01}$	$8 \times 10^{+00}$	$8 \times 10^{+00}$
Lu 174		$8,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+01}$	$2,9 \times 10^{+01}$	$9 \times 10^{+00}$	$9 \times 10^{+00}$
Lu 174m		$1,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+01}$	$3,7 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Lu 177		$3,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,2 \times 10^{+01}$	$7,3 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}
Mg 28		$3,7 \times 10^{-01}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,6 \times 10^{+01}$	$3,2 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Mn 52		$3,2 \times 10^{-01}$	$7,3 \times 10^{+02}$	$3,6 \times 10^{+01}$	$1,9 \times 10^{+00}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Mn 53		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Mn 54		$1,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Mn 56		$6,7 \times 10^{-01}$	$3,0 \times 10^{-01}$	$3,8 \times 10^{+02}$	$6,0 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Mo 93		$8,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$
Mo 99		$6,2 \times 10^{+00}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$5,1 \times 10^{+01}$	$5,5 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
N 13		$1,0 \times 10^{+00}$	$9,3 \times 10^{-01}$	—	$5,8 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	6×10^{-01}
Na 22		$5,0 \times 10^{-01}$	$3,8 \times 10^{+00}$	$3,8 \times 10^{+01}$	$6,5 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Na 24		$3,0 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{-01}$	$1,7 \times 10^{+02}$	$6,0 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
Nb 93m		$4,9 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Nb 94		$6,8 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{+00}$	$7,0 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Nb 95		$1,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,1 \times 10^{+01}$	$4,0 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Nb 97		$1,6 \times 10^{+00}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,1 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	6×10^{-01}
Nd 147		$7,4 \times 10^{+00}$	$5,6 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{+01}$	$6,5 \times 10^{-01}$	$6 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Nd 149		$2,9 \times 10^{+00}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$5,6 \times 10^{+02}$	$5,1 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	5×10^{-01}
Ni 57		$5,9 \times 10^{-01}$	$6,8 \times 10^{+00}$	$8,9 \times 10^{+01}$	$1,3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Ni 59		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Ni 63		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,9 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Ni 65		$2,1 \times 10^{+00}$	$4,4 \times 10^{-01}$	$5,7 \times 10^{+02}$	$6,1 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Np 235		$1,4 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Np 236		$8,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,7 \times 10^{-02}$	$5,0 \times 10^{-01}$	$9 \times 10^{+00}$	2×10^{-02}
Np 236m		$2,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+01}$	$1,5 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Np 237	A	$2,4 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,4 \times 10^{-03}$	Sin límite	$2 \times 10^{+01}$	2×10^{-03}
Np 239		$6,7 \times 10^{+00}$	$2,6 \times 10^{+02}$	$5,6 \times 10^{+01}$	$4,1 \times 10^{-01}$	$7 \times 10^{+00}$	4×10^{-01}
Os 185		$1,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+01}$	$2,3 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Os 191		$1,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,8 \times 10^{+01}$	$2,3 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$
Os 191m		$1,3 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+02}$	$2,7 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Os 193		$1,5 \times 10^{+01}$	$1,6 \times 10^{+00}$	$9,8 \times 10^{+01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Os 194		$1,2 \times 10^{+01}$	$3,1 \times 10^{-01}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
P 32		—	$4,5 \times 10^{-01}$	$1,6 \times 10^{+01}$	$6,0 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
P 33		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,6 \times 10^{+01}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$
Pa 230		$1,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,6 \times 10^{-02}$	$2,1 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	7×10^{-02}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Pa 231	A	$3,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,8 \times 10^{-04}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+00}$	4×10^{-04}
Pa 233		$5,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{+01}$	$6,5 \times 10^{-01}$	$5 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}
Pb 201		$1,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,7 \times 10^{+02}$	$3,3 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Pb 202		$9,0 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	$1,6 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$
Pb 203		$3,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,5 \times 10^{+02}$	$2,6 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Pb 205		$8,3 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Pb 210		$2,4 \times 10^{+02}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$5,1 \times 10^{-02}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	5×10^{-02}
Pb 212		$1,0 \times 10^{+00}$	$7,0 \times 10^{-01}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$2,7 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	2×10^{-01}
Pd 103		$4,7 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Pd 107		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Pd 109		$7,0 \times 10^{+01}$	$1,9 \times 10^{+00}$	$1,4 \times 10^{+02}$	$4,7 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	5×10^{-01}
Pm 143		$3,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,6 \times 10^{+01}$	$3,6 \times 10^{+02}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Pm 144		$6,7 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,4 \times 10^{+00}$	$3,4 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}	7×10^{-01}
Pm 145		$2,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Pm 147		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{+01}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$
Pm 148m		$8,3 \times 10^{-01}$	$7,6 \times 10^{+00}$	$9,1 \times 10^{+00}$	$7,2 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	7×10^{-01}
Pm 149		$1,0 \times 10^{+02}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$6,9 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Pm 151		$3,3 \times 10^{+00}$	$1,8 \times 10^{+00}$	$1,1 \times 10^{+02}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Po 210	A	$1,7 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,7 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-02}
Pr 142		$2,0 \times 10^{+01}$	$3,6 \times 10^{-01}$	$8,9 \times 10^{+01}$	$6,0 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Pr 143		$1,0 \times 10^{+03}$	$3,0 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{+01}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Pt 188		$9,7 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,7 \times 10^{+01}$	$7,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	8×10^{-01}
Pt 191		$3,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,5 \times 10^{+02}$	$3,5 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Pt 193		$8,7 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Pt 193m		$9,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,8 \times 10^{+02}$	$5,5 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}
Pt 195m		$1,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,6 \times 10^{+02}$	$4,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}
Pt 197		$4,7 \times 10^{+01}$	$2,4 \times 10^{+01}$	$5,5 \times 10^{+02}$	$6,3 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Pt 197m		$1,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	6×10^{-01}
Pu 236	A	$2,8 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,8 \times 10^{-03}$	$6,5 \times 10^{+02}$	$3 \times 10^{+01}$	3×10^{-03}
Pu 237		$2,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{+02}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Pu 238	A	$1,2 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{-03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
Pu 239	A	$1,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{-03}$	Sin límite	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
Pu 240	A	$1,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{-03}$	Sin límite	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
Pu 241		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,9 \times 10^{-02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-02}
Pu 242	A	$1,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{-03}$	Sin límite	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
Pu 244		$3,1 \times 10^{+00}$	$3,8 \times 10^{-01}$	$1,1 \times 10^{-03}$	Sin límite	4×10^{-01}	1×10^{-03}
Ra 223		$3,9 \times 10^{+00}$	$4,0 \times 10^{-01}$	$7,2 \times 10^{-03}$	$2,6 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	7×10^{-03}
Ra 224		$1,1 \times 10^{+00}$	$4,3 \times 10^{-01}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$2,7 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	2×10^{-02}
Ra 225		$1,2 \times 10^{+01}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$3,6 \times 10^{-03}$	$2,3 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	4×10^{-03}
Ra 226		$6,5 \times 10^{-01}$	$2,5 \times 10^{-01}$	$2,7 \times 10^{-03}$	$2,7 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	3×10^{-03}
Ra 228		$1,2 \times 10^{+00}$	$5,6 \times 10^{-01}$	$1,9 \times 10^{-02}$	$5,2 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	2×10^{-02}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Rb 81		$1,7 \times 10^{+00}$	$1,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$8,3 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	8×10^{-01}
Rb-83		$2,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,9 \times 10^{+01}$	$4,3 \times 10^{+02}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Rb 84		$1,2 \times 10^{+00}$	$4,0 \times 10^{+01}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$2,2 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Rb 86		$1,2 \times 10^{+01}$	$4,8 \times 10^{-01}$	$5,2 \times 10^{+01}$	$6,1 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Rb 87		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Rb(nat)		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Re 184		$1,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,8 \times 10^{+01}$	$1,7 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Re 184m		$2,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$8,2 \times 10^{+00}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Re 186		$5,8 \times 10^{+01}$	$2,0 \times 10^{+00}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Re 187		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Re 188		$2,0 \times 10^{+01}$	$3,5 \times 10^{-01}$	$9,1 \times 10^{+01}$	$5,4 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Re 189		$3,2 \times 10^{+01}$	$2,5 \times 10^{+00}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$5,7 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Re(nat)	—	—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Rh 99		$1,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,0 \times 10^{+01}$	$7,5 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Rh 101		$4,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,8 \times 10^{+00}$	$2,6 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Rh 102		$5,0 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,1 \times 10^{+00}$	$5,4 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Rh 102m		$2,2 \times 10^{+00}$	$8,9 \times 10^{+00}$	$7,5 \times 10^{+00}$	$1,8 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Rh 103m		$4,5 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Rh 105		$1,4 \times 10^{+01}$	$1,8 \times 10^{+02}$	$1,5 \times 10^{+02}$	$7,9 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	8×10^{-01}
Rn 222		$6,7 \times 10^{-01}$	$2,6 \times 10^{-01}$	—	$4,2 \times 10^{-03}$	3×10^{-01}	4×10^{-03}
Ru 97		$4,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,5 \times 10^{+02}$	$1,3 \times 10^{+01}$	$5 \times 10^{+00}$	$5 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Ru 103		$2,2 \times 10^{+00}$	$2,0 \times 10^{+02}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$1,6 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Ru 105		$1,4 \times 10^{+00}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$2,8 \times 10^{+02}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Ru 106		$5,3 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$8,1 \times 10^{-01}$	$5,7 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
S 35		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,8 \times 10^{+01}$	$3,0 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$
Sb 122		$2,4 \times 10^{+00}$	$4,3 \times 10^{-01}$	$5,0 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Sb 124		$6,2 \times 10^{-01}$	$7,2 \times 10^{-01}$	$8,2 \times 10^{+00}$	$6,9 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Sb 125		$2,4 \times 10^{+00}$	$2,5 \times 10^{+02}$	$1,1 \times 10^{+01}$	$1,4 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Sb 126		$3,8 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{+00}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$7,1 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Sc 44		$5,1 \times 10^{-01}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$2,6 \times 10^{+02}$	$6,2 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}
Sc 46		$5,4 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,8 \times 10^{+00}$	$8,5 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	5×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Sc 47		$1,1 \times 10^{+01}$	$1,7 \times 10^{+02}$	$7,1 \times 10^{+01}$	$7,0 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}
Sc 48		$3,3 \times 10^{-01}$	$9,0 \times 10^{-01}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$6,5 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Se 75		$2,9 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Se 79		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,7 \times 10^{+01}$	$2,3 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$
Si 31		$1,0 \times 10^{+03}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$6,3 \times 10^{+02}$	$6,0 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Si 32		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,5 \times 10^{-01}$	$1,6 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}
Sm 145		$1,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Sm 147		$5,6 \times 10^{+01}$	—	Sin limite	—	Sin limite	Sin limite
Sm 151		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Sm 153		$1,7 \times 10^{+01}$	$9,1 \times 10^{+00}$	$8,2 \times 10^{+01}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$9 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Sn 113		$3,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,0 \times 10^{+01}$	$1,6 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Sn 117m		$7,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,2 \times 10^{+01}$	$4,0 \times 10^{-01}$	$7 \times 10^{+00}$	4×10^{-01}
Sn 119m		$6,2 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,5 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Sn 121m		$1,4 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,1 \times 10^{+01}$	$8,5 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	9×10^{-01}
Sn 123		$1,6 \times 10^{+02}$	$7,5 \times 10^{-01}$	$6,5 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	6×10^{-01}
Sn 125		$3,6 \times 10^{+00}$	$3,7 \times 10^{-01}$	$1,7 \times 10^{+01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Sn 126		$6,6 \times 10^{-01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	$1,9 \times 10^{+00}$	$3,6 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	4×10^{-01}
Sr 82		$9,7 \times 10^{-01}$	$2,4 \times 10^{-01}$	$5,0 \times 10^{+00}$	$5,9 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
Sr 83		$1,3 \times 10^{+00}$	$2,7 \times 10^{+00}$	$1,4 \times 10^{+02}$	$2,2 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Sr 85		$2,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,5 \times 10^{+01}$	$8,5 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Sr 85m		$5,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$5 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Sr 87m		$3,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Sr 89		$1,0 \times 10^{+03}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$6,7 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Sr 90		$1,0 \times 10^{+03}$	$3,2 \times 10^{-01}$	$3,3 \times 10^{-01}$	$3,1 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Sr 91		$1,5 \times 10^{+00}$	$3,0 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$6,0 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Sr 92		$8,2 \times 10^{+00}$	$1,1 \times 10^{+00}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$3,1 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	3×10^{-01}
T(H 3)		—	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	—	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Ta 178m		$1,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,2 \times 10^{+02}$	$8,2 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	8×10^{-01}
Ta 179		$3,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
Ta 182		$8,7 \times 10^{-01}$	$1,3 \times 10^{+01}$	$5,1 \times 10^{+00}$	$5,4 \times 10^{-01}$	9×10^{-01}	5×10^{-01}
Tb 149		$8,2 \times 10^{-01}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$1,2 \times 10^{+01}$	$2,2 \times 10^{+00}$	$8,0 \times 10^{-01}$	$8,0 \times 10^{-01}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Tb 157		$3,1 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,2 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Tb 158		$1,4 \times 10^{+00}$	$1,6 \times 10^{+02}$	$1,1 \times 10^{+00}$	$1,8 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Tb 160		$9,8 \times 10^{-01}$	$2,3 \times 10^{+00}$	$7,6 \times 10^{+00}$	$5,8 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Tb 161		$2,5 \times 10^{+01}$	$2,4 \times 10^{+02}$	$4,2 \times 10^{+01}$	$7,1 \times 10^{-01}$	$3,0 \times 10^{+01}$	$7,0 \times 10^{-01}$
Tc 95m		$1,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,7 \times 10^{+01}$	$1,2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Tc 96		$4,3 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,0 \times 10^{+01}$	$1,4 \times 10^{+02}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Tc 96m		$4,3 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,1 \times 10^{+01}$	$1,4 \times 10^{+02}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Tc 97		$7,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Tc 97m		$8,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{+01}$	$1,4 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+00}$
Tc 98		$7,5 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	$6,8 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	7×10^{-01}
Tc 99		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	$8,8 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	9×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A , Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Tc 99m		$9,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,3 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+00}$
Te 121		$1,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+02}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Te 121m		$5,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{+01}$	$2,5 \times 10^{+00}$	$5 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Te 123m		$7,7 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,3 \times 10^{+01}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$8 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Te 125m		$2,0 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,5 \times 10^{+01}$	$9,1 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	9×10^{-01}
Te 127		$2,2 \times 10^{+02}$	$1,9 \times 10^{+01}$	$4,2 \times 10^{+02}$	$6,6 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}
Te 127m		$5,0 \times 10^{+01}$	$1,9 \times 10^{+01}$	$6,8 \times 10^{+00}$	$5,0 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+01}$	5×10^{-01}
Te 129		$1,7 \times 10^{+01}$	$6,6 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,1 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	6×10^{-01}
Te 129m		$1,3 \times 10^{+01}$	$8,5 \times 10^{-01}$	$7,9 \times 10^{+00}$	$4,4 \times 10^{-01}$	8×10^{-01}	4×10^{-01}
Te 131m		$7,5 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$4,9 \times 10^{-01}$	7×10^{-01}	5×10^{-01}
Te 132		$4,9 \times 10^{-01}$	$4,9 \times 10^{-01}$	$2,0 \times 10^{+01}$	$4,2 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	4×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Th 22		$1,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,2 \times 10^{-03}$	$4,7 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+01}$	5×10^{-03}
Th 228		$7,6 \times 10^{-01}$	$5,3 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{-03}$	$2,7 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	1×10^{-03}
Th 229	A	$5,1 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,1 \times 10^{-04}$	$1,8 \times 10^{+00}$	$5 \times 10^{+00}$	5×10^{-04}
Th 230	A	$1,2 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{-03}$	Sin límite	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
Th 231		$3,9 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{-02}$	$1,2 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-02}
Th 232		$1,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Th 234		$4,2 \times 10^{+01}$	$3,0 \times 10^{-01}$	$6,8 \times 10^{+00}$	$4,9 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Th(nat)		$4,7 \times 10^{-01}$	$2,7 \times 10^{-01}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Ti 44		$4,8 \times 10^{-01}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$4,2 \times 10^{-01}$	$6,2 \times 10^{-01}$	5×10^{-01}	4×10^{-01}
Ti 200		$8,5 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,6 \times 10^{+02}$	$7,1 \times 10^{+00}$	9×10^{-01}	9×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
TI 201		$1,2 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,0 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+00}$
TI 202		$2,3 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$2,5 \times 10^{+02}$	$1,6 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
TI 204		$9,9 \times 10^{+02}$	$9,6 \times 10^{+00}$	$1,1 \times 10^{+02}$	$6,9 \times 10^{-01}$	$1 \times 10^{+01}$	7×10^{-01}
Tm 167		$7,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4,5 \times 10^{+01}$	$8,2 \times 10^{-01}$	$7 \times 10^{+00}$	8×10^{-01}
Tm 170		$2,0 \times 10^{+02}$	$2,6 \times 10^{+00}$	$7,6 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Tm 171		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,8 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+02}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
U 230 (F)		$5,2 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{-01}$	$3,1 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	1×10^{-01}
U 230 (M)	A	$3,8 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,8 \times 10^{-03}$	$3,1 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+01}$	4×10^{-03}
U 230 (S)	A	$3,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,3 \times 10^{-03}$	$3,1 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+01}$	3×10^{-03}
U 232 (F)	A	$1,4 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{-02}$	$1,8 \times 10^{+02}$	$4 \times 10^{+01}$	1×10^{-02}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
U 232 (M)	A	$7,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,1 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{+02}$	$4 \times 10^{+01}$	7×10^{-03}
U 232 (S)	A	$1,4 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{-03}$	$1,8 \times 10^{+02}$	$1 \times 10^{+01}$	1×10^{-03}
U 233 (F)		$8,0 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$8,8 \times 10^{-02}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	9×10^{-02}
U 233 (M)	A	$1,6 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{-02}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-02}
U 233 (S)	A	$5,7 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,7 \times 10^{-03}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-03}
U 234 (F)		$6,0 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$9,1 \times 10^{-02}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	9×10^{-02}
U 234 (M)	A	$1,6 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,6 \times 10^{-02}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-02}
U 234 (S)	A	$5,9 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,9 \times 10^{-03}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-03}
U 235 (F)		$6,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U 235 (M)		$6,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U 235 (S)		$6,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U 236 (F)		$6,6 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
U 236 (M)	A	$1,7 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,7 \times 10^{-02}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	2×10^{-02}
U 236 (S)	A	$6,3 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,3 \times 10^{-03}$	Sin límite	$4 \times 10^{+01}$	6×10^{-03}
U 238 (F)		$7,5 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U 238 (M)	A	$1,9 \times 10^{+02}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U 238 (S)	A	$6,8 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U (nat)		6,4e-01	$1,3 \times 10^{-01}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
U (<20 % enr.)		—	—	—	—	Sin límite	Sin límite
U(dep)		$4,7 \times 10^{+01}$	$3,3 \times 10^{-01}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
V 48		$3,8 \times 10^{-01}$	$3,0 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{+01}$	$1,1 \times 10^{+00}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
V 49		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
W 178		$8,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,4 \times 10^{+02}$	$4,6 \times 10^{+00}$	$9 \times 10^{+00}$	$5 \times 10^{+00}$
W 181		$2,6 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$5,3 \times 10^{+02}$	$3 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+01}$
W 185		$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$3,6 \times 10^{+02}$	$8,1 \times 10^{-01}$	$4 \times 10^{+01}$	8×10^{-01}
W 187		$2,2 \times 10^{+00}$	$2,1 \times 10^{+00}$	$2,5 \times 10^{+02}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
W 188		$2,0 \times 10^{+01}$	$3,7 \times 10^{-01}$	$4,4 \times 10^{+01}$	$3,5 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	3×10^{-01}
Xe 122		$1,1 \times 10^{+00}$	$4,0 \times 10^{-01}$	—	$8,8 \times 10^{+00}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Xe 123		$1,8 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+01}$	—	$6,8 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	7×10^{-01}
Xe 127		$3,9 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	—	$1,7 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Xe 131m		$3,8 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	—	$4,0 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$	$4 \times 10^{+01}$
Xe 133		$2,1 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	—	$1,5 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+01}$	$1 \times 10^{+01}$
Xe 135		$4,5 \times 10^{+00}$	$3,5 \times 10^{+00}$	—	$1,8 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Y 87		$1,4 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$3,2 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Y 88		$4,3 \times 10^{-01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{+01}$	$2,2 \times 10^{+02}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}
Y 90		$1,0 \times 10^{+03}$	$3,2 \times 10^{-01}$	$3,3 \times 10^{+01}$	$5,9 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Y 91		$3,1 \times 10^{+02}$	$5,9 \times 10^{-01}$	$6,0 \times 10^{+00}$	$6,1 \times 10^{-01}$	6×10^{-01}	6×10^{-01}
Y 91m		$2,0 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Y 92		$4,4 \times 10^{+00}$	$2,2 \times 10^{-01}$	$2,5 \times 10^{+02}$	$5,6 \times 10^{-01}$	2×10^{-01}	2×10^{-01}
Y 93		$1,3 \times 10^{+01}$	$2,6 \times 10^{-01}$	$1,2 \times 10^{+02}$	$5,8 \times 10^{-01}$	3×10^{-01}	3×10^{-01}
Yb 169		$3,5 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,8 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+00}$	$4 \times 10^{+00}$	$1 \times 10^{+00}$
Yb 175		$2,7 \times 10^{+01}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$7,1 \times 10^{+01}$	$4,2 \times 10^{+01}$	$2 \times 10^{+00}$	$2 \times 10^{+00}$
Zn 69		$1,0 \times 10^{+03}$	$3,2 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$6,2 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}

CUADRO I.2. LÍMITES DEL CONTENIDO DE BULTOS DEL TIPO A: Q_A - Q_F , A_1 y A_2 (cont.)

Radionucleido	a - Q_F tabulado en lugar de Q_A	Q_A o Q_F (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D o Q_E (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Zn 69m		$3,4 \times 10^{+00}$	$4,0 \times 10^{+00}$	$1,7 \times 10^{+02}$	$5,9 \times 10^{-01}$	$3 \times 10^{+00}$	6×10^{-01}
Zr 88		$2,6 \times 10^{+00}$	$1,0 \times 10^{+03}$	$1,4 \times 10^{+01}$	$2,1 \times 10^{+01}$	$3 \times 10^{+00}$	$3 \times 10^{+00}$
Zr 93		—	$1,0 \times 10^{+03}$	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite
Zr 95		$1,8 \times 10^{+00}$	$4,5 \times 10^{+02}$	$9,1 \times 10^{+00}$	$8,5 \times 10^{-01}$	$2 \times 10^{+00}$	8×10^{-01}
Zr 97		$9,2 \times 10^{-01}$	$3,7 \times 10^{-01}$	$5,0 \times 10^{+01}$	$5,6 \times 10^{-01}$	4×10^{-01}	4×10^{-01}

se deban principalmente a una vía de exposición. Ahora bien, esto no sucederá necesariamente si dos o más valores Q se aproximan mucho entre sí. Por ejemplo, en el caso de un radionucleido transportado como material radiactivo en forma especial para el que $Q_A \approx Q_B$, la dosis efectiva y la dosis equivalente en piel de una persona expuesta podrían aproximarse a 50 mSv y a 0,5 Sv, respectivamente, sobre la base de los modelos del sistema Q. Un examen del cuadro I.2 demuestra que este criterio es aplicable solo a un número relativamente reducido de radionucleidos y por esta razón las vías de exposición se siguen tratando de manera independiente en el sistema Q.

Mezclas de radionucleidos

I.80. Es necesario considerar los límites del contenido de los bultos para las mezclas de radionucleidos, incluido el caso especial de mezclas de productos de fisión. Para mezclas cuyas identidades y actividades sean conocidas es necesario demostrar que:

$$\sum_i \frac{B(i)}{A_1(i)} + \sum_j \frac{C(j)}{A_2(j)} \leq 1 \quad (I.23)$$

donde

B(i) es la actividad del radionucleido i como material radiactivo en forma especial;

$A_1(i)$ es el valor A_1 para el radionucleido i;

C(j) es la actividad del radionucleido j como material en forma no especial;

$A_2(j)$ es el valor A_2 para el radionucleido j.

I.81. Como alternativa, los valores para las mezclas pueden determinarse de la manera siguiente:

$$X_m \text{ for mixture} = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} \quad (I.24)$$

donde

f(i) es la fracción de actividad del radionucleido i en la mezcla;

$X(i)$ es el valor A_1 o A_2 , según proceda, para el radionucleido;

X_m es el valor A_1 o A_2 calculado para la mezcla.

CADENAS DE DESINTEGRACIÓN UTILIZADAS EN EL SISTEMA Q

I.82. En la observación a) del cuadro 2 del Reglamento de Transporte se tabulan las diversas cadenas de desintegración empleadas para el desarrollo de los valores A_1 y A_2 en el sistema Q, como se indica en los párrafos I.50 a I.52.

CONCLUSIONES

I.83. El sistema Q descrito en el presente documento representa una actualización del sistema A_1/A_2 que se aplicó inicialmente en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte para determinar el contenido de los bultos del Tipo A y otros límites. En él se incorporan las más recientes recomendaciones de la Publicación N° 103 de la ICRP [I.8] y mediante la identificación explícita de los criterios dosimétricos en que se basa la obtención de estos límites, se establece una base firme y justificable para el Reglamento de Transporte.

I.84. El sistema Q en estos momentos tiene las siguientes características:

- a) Los criterios radiológicos y las hipótesis de exposición empleados en la edición de 1985 del Reglamento de Transporte se han revisado y mantenido.
- b) Se ha adoptado la magnitud de dosis efectiva de la Publicación N° 103 de la ICRP [I.8].
- c) Se ha revisado de manera rigurosa la evaluación de la dosis externa debida a fotones y a partículas beta.
- d) La evaluación de las incorporaciones por inhalación se expresa ahora en función de la dosis efectiva y se basa en los coeficientes de dosis de la publicación GSR Part 3 [I.9].

No se descarta una futura revisión basada en posteriores avances.

REFERENCIAS DEL APÉNDICE I

- [I.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Studies on Certain Aspects of the Safe Transport of Radioactive Materials, 1980–1985, IAEA-TECDOC-375, IAEA, Vienna (1986).
- [I.2] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., Dosimetric aspects of permitted activity leakage rates for Type B packages for the transport of radioactive materials, *Radiat. Prot. Dosim.* 2 (1982) 75.
- [I.3] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., “An alternative approach to the A1/A2 system for determining package contents limits and permitted releases of radioactivity from transport packages”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, PATRAM 80 (Proc. Int. Symp. Berlin, 1980), Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980).
- [I.4] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., Dosimetric aspects of Type A package contents limits under the IAEA Regulations, *Radiat. Prot. Dosim.* 1 (1981) 29–42.
- [I.5] MACDONALD, H.F., GOLDFINCH, E.P., Dosimetric aspects of Type A package contents limits under the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials — Supplementary list of isotopes, *Radiat. Prot. Dosim.* 1 (1981) 199–202.
- [I.6] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., “A review of some radiological aspects of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials”, *Radiological Protection — Advances in Theory and Practice* (Proc. Symp. Inverness, 1982), Society for Radiological Protection, Berkeley, UK (1982).
- [I.7] GOLDFINCH, E.P., MACDONALD, H.F., “IAEA regulations for the safe transport of radioactive materials: Revised A1 and A2 values”, *Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, PATRAM 83 (Proc. Int. Symp. New Orleans, 1983), Oak Ridge Natl Lab., TN (1983).
- [I.8] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recomendaciones de 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP, publicación 103, *Ann. ICRP* 37 (2-4), 2007.
- [I.9] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.
- [I.10] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Glosario de Seguridad del OIEA: Terminología empleada en seguridad nuclear y protección radiológica*, edición de 2018, OIEA, Viena, 2021.

- [I.11] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2–5), 2010.
- [I.12] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Task Group on Dose Calculations — Energy and Intensity Data for Emissions Accompanying Radionuclide Transformations, Publication 38, Pergamon Press, Oxford and New York (1984).
- [I.13] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38, 2008.
- [I.14] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Data for Use in Protection against External Radiation, Publication 51, Pergamon Press, Oxford and New York (1987).
- [I.15] ECKERMAN, K.F., WESTFALL, R.J., RYMAN, J.C., CRISTY, M., Nuclear Decay Data Files of the Dosimetry Research Group, Rep. ORNL/TM-12350, Oak Ridge Natl Lab., TN (1993).
- [I.16] CROSS, W.G., ING, H., FREEDMAN, N.O., WONG, P.J., Table of beta-ray dose distributions in an infinite water medium, Health Phys. 63 (1992).
- [I.17] CROSS, W.G., ING, H., FREEDMAN, N.O., MAINVILLE, J., Tables of Beta-Ray Dose Distributions in Water, Air, and Other Media, Rep. AECL-7617, Atomic Energy of Canada Ltd, Chalk River, ON (1982).
- [I.18] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 26, Pergamon Press, Oxford and New York (1977).
- [I.19] CROSS, W.G., ING, H., FREEDMAN, N.O., MAINVILLE, J., Tables of Beta-Ray Dose Distributions in Water, Air, and Other Media, Rep. AECL-2793, Atomic Energy of Canada Ltd, Chalk River, ON (1967).
- [I.20] BAILEY, M.R., BETA: A Computer Program for Calculating Beta Dose Rates from Point and Plane Sources, Rep. RD/B/N2763, Central Electricity Generating Board, London (1973).
- [I.21] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, Publication 30, Parts 1–3, Pergamon Press, Oxford and New York (1980).
- [I.22] LOHMANN, D.H., Transport of radioactive materials: A review of damage to packages from the radiochemical centre during transport, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 80 (Proc. Int. Symp. Berlin, 1980), Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980).
- [I.23] HADJANTONION, A., ARMIRIOTIS, J., ZANNOS, A., The performance of Type A packaging under air crash and fire accident conditions, *ibid.*
- [I.24] TAYLOR, C.B.G., Radioisotope packages in crush and fire, *ibid.*
- [I.25] STEWART, K., Principal Characteristics of Radioactive Contaminants Which May Appear in the Atmosphere, Progress in Nuclear Energy, Series 12, Health Physics, Vol. 2, Pergamon Press, Oxford and New York (1969).

- [I.26] WEHNER, G., The importance of reportable events in public acceptance, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 83 (Proc. Int. Symp. New Orleans, 1983), Oak Ridge Natl Lab., TN (1983).
- [I.27] BRYANT, P.M., Methods of Estimation of the Dispersion of Windborne Material and Data to Assist in their Application, Rep. AHSB(RP)R42, United Kingdom Atomic Energy Authority, Berkeley, UK (1964).
- [I.28] DUNSTER, H.J., Maximum Permissible Levels of Skin Contamination, Rep. AHSB (RP)R78, United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell (1967).
- [I.29] CROSS, W.G., FREEDMAN, N.O., WONG, P.Y., Beta ray dose distributions from skin contamination, Radiat. Prot. Dosim. 40 3 (1992) 149–168.
- [I.30] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, Federal Guidance Rep. No. 12, USEPA, Washington, DC (1993).
- [I.31] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication 15, Publication 21, Pergamon Press, Oxford and New York (1973).
- [I.32] ECKERMAN, K.F., RAWL, R., HUGHES, J.S., BOLOGNA, L., Type A package limits of spontaneous fission radionuclides, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2001 (Proc. Int. Symp. Chicago, 2001), Department of Energy, Washington, DC (2001).
- [I.33] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Publication 74, Pergamon Press, Oxford and New York (1996).
- [I.34] FAIRBAIRN, A., MORLEY, F., KOLB, W., The classification of radionuclides for transport purposes, The Safe Transport of Radioactive Materials (GIBSON, R., Ed.), Pergamon Press, Oxford and New York (1966) 44–46.
- [I.35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Uranium Hexafluoride Enriched to Less than 5% U-235, ASTM-C996-15, ASTM, Philadelphia, PA (2015).
- [I.36] MACDONALD, H.F., Radiological Limits in the Transport of Irradiated Nuclear Fuels, Rep. TPRD/B/0388/N84, Central Electricity Generating Board, Berkeley, UK (1984).
- [I.37] MACDONALD, H.F., Individual and collective doses arising in the transport of irradiated nuclear fuels, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 80 (Proc. Int. Symp. Berlin, 1980), Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1980).

Apéndice II

PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS, COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA

II.1. En el cuadro II.1 de la presente guía de seguridad se presenta una lista del período de semidesintegración y de la actividad específica de cada radionucleido calculados mediante la ecuación (2.1) que figura en el párrafo 240.2 (véase la ref. [II.1]). Como se especifica en el párrafo 240 del Reglamento de Transporte, la actividad específica de un radionucleido es la “actividad por unidad de masa de ese nucleido”, mientras que por actividad específica de un material “se entenderá la actividad por unidad de masa de un material en el que los radionucleidos estén distribuidos de modo esencialmente uniforme”. Los valores específicos de actividad que figuran en el cuadro II.1 se refieren al radionucleido y no al material.

II.2. En el cuadro II.2 de esta guía de seguridad se proporciona una lista de los coeficientes de dosis y de tasa de dosis de cada radionucleido.

II.3. En el cuadro II.3 de la presente guía de seguridad se indica la actividad específica del uranio para varios niveles de enriquecimiento. Estos valores para el uranio incluyen la actividad del U 234, el cual se concentra durante el proceso de enriquecimiento.

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Ac 225	Actinio (89)	10 d	8,640 × 10 ⁵	2,150 × 10 ¹⁵
Ac 227		21,773 a	6,866 × 10 ⁸	2,682 × 10 ¹²
Ac 228		6,13 h	2,207 × 10 ⁴	8,308 × 10 ¹⁶

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)	
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)		
Ag 105	Plata (47)	41 d	3,542 × 10 ⁶	1,124 × 10 ¹⁵	
Ag 108m		127 a	4,005 × 10 ⁹	9,664 × 10 ¹¹	
Ag 110m		249,9 d	2,159 × 10 ⁷	1,760 × 10 ¹⁴	
Ag 111		7,45 d	6,437 × 10 ⁵	5,850 × 10 ¹⁵	
Al 26	Aluminio (13)	7,16 × 10 ⁵ a	2,258 × 10 ¹³	7,120 × 10 ⁸	
Am 241		Americio (95)	432,2 a	1,363 × 10 ¹⁰	1,273 × 10 ¹¹
Am 242m			152 a	4,793 × 10 ⁹	3,603 × 10 ¹¹
Am 243	7380 a		2,327 × 10 ¹¹	7,391 × 10 ⁹	
Ar 37	Argón (18)	35,02 d	3,026 × 10 ⁶	3,734 × 10 ¹⁵	
Ar 39		269 a	8,483 × 10 ⁹	1,263 × 10 ¹²	
Ar 41		1,827 h	6,577 × 10 ³	1,550 × 10 ¹⁸	
As 72	Arsénico (33)	26 h	9,360 × 10 ⁴	6,203 × 10 ¹⁶	
As 73		80,3 d	6,938 × 10 ⁶	8,253 × 10 ¹⁴	
As 74		17,76 d	1,534 × 10 ⁶	3,681 × 10 ¹⁵	
As 76		26,32 h	9,475 × 10 ⁴	5,805 × 10 ¹⁶	
As 77		38,8 h	1,397 × 10 ⁵	3,886 × 10 ¹⁶	

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
At 211	Astato (85)	7,214 h	2,597 × 10 ⁴	7,628 × 10 ¹⁶
Au 193	Oro (79)	17,65 h	6,354 × 10 ⁴	3,409 × 10 ¹⁶
Au 194		39,5 h	1,422 × 10 ⁵	1,515 × 10 ¹⁶
Au 195		183 d	1,581 × 10 ⁷	1,356 × 10 ¹⁴
Au 198		2,696 d	2,329 × 10 ⁵	9,063 × 10 ¹⁵
Au 199		3,139 d	2,712 × 10 ⁵	7,745 × 10 ¹⁵
Ba 131	Bario (56)	11,8 d	1,020 × 10 ⁶	3,130 × 10 ¹⁵
Ba 133		10,74 a	3,387 × 10 ⁸	9,279 × 10 ¹²
Ba 133m		38,9 h	1,400 × 10 ⁵	2,244 × 10 ¹⁶
Ba 135m		28,7 h	1,033 × 10 ⁵	2,995 × 10 ¹⁶
Ba 140		12,74 d	1,101 × 10 ⁶	2,712 × 10 ¹⁵
Be 7	Berilio (4)	53,3 d	4,605 × 10 ⁶	1,297 × 10 ¹⁶
Be 10		1,6 × 10 ⁶ a	5,046 × 10 ¹³	8,284 × 10 ⁸
Bi 205	Bismuto (83)	15,31 d	1,323 × 10 ⁶	1,541 × 10 ¹⁵
Bi 206		6,243 d	5,394 × 10 ⁵	3,762 × 10 ¹⁵

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Bi 207		38 a	1,198 × 10 ⁹	1,685 × 10 ¹²
Bi 210		5,012 d	4,330 × 10 ⁵	4,597 × 10 ¹⁵
Bi 210m		3,0 × 10 ⁶ a	9,461 × 10 ¹³	2,104 × 10 ⁷
Bi 212		60,55 min	3,633 × 10 ³	5,427 × 10 ¹⁷
Bk 247	Berkelio (97)	1380 a	4,352 × 10 ¹⁰	3,889 × 10 ¹⁰
Bk 249		320 d	2,765 × 10 ⁷	6,072 × 10 ¹³
Br 76	Bromo (35)	16,2 h	5,832 × 10 ⁴	9,431 × 10 ¹⁶
Br 77		56 h	2,016 × 10 ⁵	2,693 × 10 ¹⁶
Br 82		35,3 h	1,271 × 10 ⁵	4,011 × 10 ¹⁶
C 11	Carbono (6)	20,38 min	1,223 × 10 ³	3,108 × 10 ¹⁹
C 14		5730 a	1,807 × 10 ¹¹	1,652 × 10 ¹¹
Ca 41	Calcio (20)	1,4 × 10 ⁵ a	4,415 × 10 ¹²	2,309 × 10 ⁹
Ca 45		163 d	1,408 × 10 ⁷	6,596 × 10 ¹⁴
Ca 47		4,53 d	3,914 × 10 ⁵	2,272 × 10 ¹⁶
Cd 109	Cadmio (48)	464 d	4,009 × 10 ⁷	9,566 × 10 ¹³

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Cd 113m		13,6 a	4,289 × 10 ⁸	8,625 × 10 ¹²
Cd 115		53,46 h	1,925 × 10 ⁵	1,889 × 10 ¹⁶
Cd 115m		44,6 d	3,853 × 10 ⁶	9,433 × 10 ¹⁴
Ce 139	Cerio (58)	137,66 d	1,189 × 10 ⁷	2,528 × 10 ¹⁴
Ce 141		32,501 d	2,808 × 10 ⁶	1,056 × 10 ¹⁵
Ce 143		33 h	1,188 × 10 ⁵	2,461 × 10 ¹⁶
Ce 144		284,3 d	2,456 × 10 ⁷	1,182 × 10 ¹⁴
Cf 248	Californio (98)	333,5 d	2,881 × 10 ⁷	5,849 × 10 ¹³
Cf 249		350,6 a	1,106 × 10 ¹⁰	1,518 × 10 ¹¹
Cf 250		13,08 a	4,125 × 10 ⁸	4,053 × 10 ¹²
Cf 251		898 a	2,832 × 10 ¹⁰	5,881 × 10 ¹⁰
Cf 252		2,638 a	8,319 × 10 ⁷	1,994 × 10 ¹³
Cf 253		17,81 d	1,539 × 10 ⁶	1,074 × 10 ¹⁵
Cf 254		60,5 d	5,227 × 10 ⁶	3,148 × 10 ¹⁴
Cl 36	Cloro (17)	3,01 × 10 ⁵ a	9,492 × 10 ¹²	1,223 × 10 ⁹
Cl 38		37,21 min	2,233 × 10 ³	4,927 × 10 ¹⁸

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Cm 240	Curio (96)	27 d	2,333 × 10 ⁶	7,466 × 10 ¹⁴
Cm 241		32,8 d	2,834 × 10 ⁶	6,120 × 10 ¹⁴
Cm 242		162,8 d	1,407 × 10 ⁷	1,228 × 10 ¹⁴
Cm 243		28,5 a	8,988 × 10 ⁸	1,914 × 10 ¹²
Cm 244		18,11 a	5,711 × 10 ⁸	3,000 × 10 ¹²
Cm 245		8500 a	2,681 × 10 ¹¹	6,365 × 10 ⁹
Cm 246		4730 a	1,492 × 10 ¹¹	1,139 × 10 ¹⁰
Cm 247		1,56 × 10 ⁷ a	4,920 × 10 ¹⁴	3,440 × 10 ⁶
Cm 248		3,39 × 10 ⁵ a	1,069 × 10 ¹³	1,577 × 10 ⁸
Co 55		Cobalto (27)	17,54 h	6,314 × 10 ⁴
Co 56	78,76 d		6,805 × 10 ⁶	1,097 × 10 ¹⁵
Co 57	270,9 d		2,341 × 10 ⁷	3,133 × 10 ¹⁴
Co 58	70,8 d		6,117 × 10 ⁶	1,178 × 10 ¹⁵
Co 58m	9,15 h		3,294 × 10 ⁴	2,188 × 10 ¹⁷
Co 60	5,271 a		1,662 × 10 ⁸	4,191 × 10 ¹³
Cr 51	Cromo (24)		27,704 d	2,394 × 10 ⁶
Cs 129		Cesio (55)	32,06 h	1,154 × 10 ⁵

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Cs 131		9,69 d	8,372 × 10 ⁵	3,811 × 10 ¹⁵
Cs 132		6,475 d	5,594 × 10 ⁵	5,660 × 10 ¹⁵
Cs 134		2,062 a	6,503 × 10 ⁷	4,797 × 10 ¹³
Cs 134m		2,9 h	1,044 × 10 ⁴	2,988 × 10 ¹⁷
Cs 135		2,3 × 10 ⁶ a	7,253 × 10 ¹³	4,269 × 10 ⁷
Cs 136		13,1 d	1,132 × 10 ⁶	2,716 × 10 ¹⁵
Cs 137		30 a	9,461 × 10 ⁸	3,225 × 10 ¹²
Cu 64	Cobre (29)	12,701 h	4,572 × 10 ⁴	1,428 × 10 ¹⁷
Cu 67		61,86 h	2,227 × 10 ⁵	2,801 × 10 ¹⁶
Dy 159	Disproσιο (66)	144,4 d	1,248 × 10 ⁷	2,107 × 10 ¹⁴
Dy 165		2,334 h	8,402 × 10 ³	3,015 × 10 ¹⁷
Dy 166		81,6 h	2,938 × 10 ⁵	8,572 × 10 ¹⁵
Er 169	Erbio (68)	9,3 d	8,035 × 10 ⁵	3,078 × 10 ¹⁵
Er 171		7,52 h	2,707 × 10 ⁴	9,029 × 10 ¹⁶
Eu 147	Europio (63)	24 d	2,074 × 10 ⁶	1,371 × 10 ¹⁵
Eu 148		54,5 d	4,709 × 10 ⁶	5,998 × 10 ¹⁴

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Eu 149		93,1 d	8,044 × 10 ⁶	3,488 × 10 ¹⁴
Eu 150m		12,8 h	4,608 × 10 ⁴	6,134 × 10 ¹⁶
Eu 150		36,9 a	1,164 × 10 ⁹	2,584 × 10 ¹²
Eu 152		13,33 a	4,204 × 10 ⁸	6,542 × 10 ¹²
Eu 152m		9,32 h	3,355 × 10 ⁴	8,196 × 10 ¹⁶
Eu 154		8,8 a	2,775 × 10 ⁸	9,781 × 10 ¹²
Eu 155		4,96 a	1,564 × 10 ⁸	1,724 × 10 ¹³
Eu 156		15,19 d	1,312 × 10 ⁶	2,042 × 10 ¹⁵
F 18	Flúor (9)	109,77 min	6,586 × 10 ³	3,526 × 10 ¹⁸
Fe 52	Hierro (26)	8,275 h	2,979 × 10 ⁴	2,698 × 10 ¹⁷
Fe 55		2,7 a	8,515 × 10 ⁷	8,926 × 10 ¹³
Fe 59		44,529 d	3,847 × 10 ⁶	1,841 × 10 ¹⁵
Fe 60		1,0 × 10 ⁵ a	3,154 × 10 ¹²	2,209 × 10 ⁹
Ga 67	Galio 68	78,26 h	2,817 × 10 ⁵	2,214 × 10 ¹⁶
Ga 68		68 min	4,080 × 10 ³	1,507 × 10 ¹⁸
Ga 72		14,1 h	5,076 × 10 ⁴	1,144 × 10 ¹⁷

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Gd 146	Gadolinio (64)	48,3 d	4,173 × 10 ⁶	6,861 × 10 ¹⁴
Gd 148		93 a	2,933 × 10 ⁹	9,630 × 10 ¹¹
Gd 153		242 d	2,091 × 10 ⁷	1,307 × 10 ¹⁴
Gd 159		18,56 h	6,682 × 10 ⁴	3,935 × 10 ¹⁶
Ge 68		Germanio (32)	288 d	2,488 × 10 ⁷
Ge 69	39,05 h		1,406 × 10 ⁵	4,307 × 10 ¹⁶
Ge 71	11,8 d		1,020 × 10 ⁶	5,775 × 10 ¹⁵
Ge 77	11,3 h		4,068 × 10 ⁴	1,334 × 10 ¹⁷
Hf 172	Hafnio (72)		1,87 a	5,897 × 10 ⁷
Hf 175		70 d	6,048 × 10 ⁶	3,949 × 10 ¹⁴
Hf 181		42,4 d	3,663 × 10 ⁶	6,304 × 10 ¹⁴
Hf 182		9,0 × 10 ⁶ a	2,838 × 10 ¹⁴	8,092 × 10 ⁶
Hg 194		Mercurio (80)	260 a	8,199 × 10 ⁹
Hg 195m	41,6 h		1,498 × 10 ⁵	1,431 × 10 ¹⁶
Hg 197	64,1 h		2,308 × 10 ⁵	9,195 × 10 ¹⁵
Hg 197m	23,8 h		8,568 × 10 ⁴	2,476 × 10 ¹⁶
Hg 203	46,6 d		4,026 × 10 ⁶	5,114 × 10 ¹⁴

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)	
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)		
Ho 166	Holmio (67)	26,8 h	9,648 × 10 ⁴	2,610 × 10 ¹⁶	
Ho 166m		1200 a	3,784 × 10 ¹⁰	6,655 × 10 ¹⁰	
I 123	Yodo (53)	13,2 h	4,752 × 10 ⁴	7,151 × 10 ¹⁶	
I 124		4,18 d	3,612 × 10 ⁵	9,334 × 10 ¹⁵	
I 125		60,14 d	5,196 × 10 ⁶	6,436 × 10 ¹⁴	
I 126		13,02 d	1,125 × 10 ⁶	2,949 × 10 ¹⁵	
I 129		1,57 × 10 ⁷ a	4,951 × 10 ¹⁴	6,545 × 10 ⁶	
I 131		8,04 d	6,947 × 10 ⁵	4,593 × 10 ¹⁵	
I 132		2,3 h	8,280 × 10 ³	3,824 × 10 ¹⁷	
I 133		20,8 h	7,488 × 10 ⁴	4,197 × 10 ¹⁶	
I 134		52,6 min	3,156 × 10 ³	9,884 × 10 ¹⁷	
I 135		6,61 h	2,380 × 10 ⁴	1,301 × 10 ¹⁷	
In 111		Indio (49)	2,83 d	2,445 × 10 ⁵	1,540 × 10 ¹⁶
In 113m			1,658 h	5,969 × 10 ³	6,197 × 10 ¹⁷
In 114m			49,51 d	4,278 × 10 ⁶	8,572 × 10 ¹⁴
In 115m	4,486 h		1,615 × 10 ⁴	2,251 × 10 ¹⁷	
Ir 189	Iridio (77)	13,3 d	1,149 × 10 ⁶	1,925 × 10 ¹⁵	

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Ir 190		12,1 d	1,045 × 10 ⁶	2,104 × 10 ¹⁵
Ir 192		74,02 d	6,395 × 10 ⁶	3,404 × 10 ¹⁴
Ir 193m		10,53 d	9,098 × 10 ⁵	2,378 × 10 ¹⁵
Ir 194		19,15 h	6,894 × 10 ⁴	3,125 × 10 ¹⁶
K 40	Potasio (19)	1,28 × 10 ⁹ a	4,037 × 10 ¹⁶	2,589 × 10 ⁵
K 42		12,36 h	4,450 × 10 ⁴	2,237 × 10 ¹⁷
K 43		22,6 h	8,136 × 10 ⁴	1,195 × 10 ¹⁷
Kr 81	Criptón (36)	2,1 × 10 ⁵ a	6,623 × 10 ¹²	7,792 × 10 ⁸
Kr 85		10,72 a	3,381 × 10 ⁸	1,455 × 10 ¹³
Kr 85m		4,48 h	1,613 × 10 ⁴	3,049 × 10 ¹⁷
Kr 87		76,3 min	4,578 × 10 ³	1,049 × 10 ¹⁸
La 137	Lantano (57)	6,0 × 10 ⁴ a	1,892 × 10 ¹²	1,612 × 10 ⁹
La 140		40,272 h	1,450 × 10 ⁵	2,059 × 10 ¹⁶
Lu 172	Lutecio (71)	6,7 d	5,789 × 10 ⁵	4,198 × 10 ¹⁵
Lu 173		1,37 a	4,320 × 10 ⁷	5,592 × 10 ¹³
Lu 174		3,31 a	1,044 × 10 ⁸	2,301 × 10 ¹³

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Lu 174m		142 d	1,227 × 10 ⁷	1,958 × 10 ¹⁴
Lu 177		6,71 d	5,797 × 10 ⁵	4,073 × 10 ¹⁵
Mg 28	Magnesio (12)	20,91 h	7,528 × 10 ⁴	1,983 × 10 ¹⁷
Mn 52	Manganeso (25)	5,591 d	4,831 × 10 ⁵	1,664 × 10 ¹⁶
Mn 53		3,7 × 10 ⁶ a	1,167 × 10 ¹⁴	6,759 × 10 ⁷
Mn 54		312,5 d	2,700 × 10 ⁷	2,867 × 10 ¹⁴
Mn 56		2,5785 h	9,283 × 10 ³	8,041 × 10 ¹⁷
Mo 93	Molibdeno (42)	3500 a	1,104 × 10 ¹¹	4,072 × 10 ¹⁰
Mo 99		66 h	2,376 × 10 ⁵	1,777 × 10 ¹⁶
N 13	Nitrógeno (7)	9,965 min	5,979 × 10 ²	5,378 × 10 ¹⁹
Na 22	Sodio (11)	2,602 a	8,206 × 10 ⁷	2,315 × 10 ¹⁴
Na 24		15 h	5,400 × 10 ⁴	3,225 × 10 ¹⁷
Nb 93m	Niobio (41)	13,6 a	4,289 × 10 ⁸	1,048 × 10 ¹³
Nb 94		2,03 × 10 ⁴ a	6,402 × 10 ¹¹	6,946 × 10 ⁹
Nb 95		35,15 d	3,037 × 10 ⁶	1,449 × 10 ¹⁵

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)	
Nb 97		72,1 min	$4,326 \times 10^3$	$9,961 \times 10^{17}$
Nd 147	Neodimio (60)	10,98 d	$9,487 \times 10^5$	$2,997 \times 10^{15}$
Nd 149		1,73 h	$6,228 \times 10^3$	$4,504 \times 10^{17}$
Ni 57	Níquel (28)	35,60 h	$1,282 \times 10^5$	$5,718 \times 10^{16}$
Ni 59		$7,5 \times 10^4$ a	$2,365 \times 10^{12}$	$2,995 \times 10^9$
Ni 63		96 a	$3,027 \times 10^9$	$2,192 \times 10^{12}$
Ni 65		2,52 h	$9,072 \times 10^3$	$7,089 \times 10^{17}$
Np 235	Neptunio (93)	396,1 d	$3,422 \times 10^7$	$5,197 \times 10^{13}$
Np 236		$1,54 \times 10^5$ a	$4,857 \times 10^{12}$	$4,884 \times 10^8$
Np 236m		22,5 h	$8,100 \times 10^4$	$2,187 \times 10^{16}$
Np 237		$2,14 \times 10^6$ a	$6,749 \times 10^{13}$	$2,613 \times 10^7$
Np 239		2,355 d	$2,035 \times 10^5$	$8,596 \times 10^{15}$
Os 185		Osmio (76)	94 d	$8,122 \times 10^6$
Os 191	15,4 d		$1,331 \times 10^6$	$1,645 \times 10^{15}$
Os 191m	13,03 h		$4,691 \times 10^4$	$4,665 \times 10^{16}$
Os 193	30 h		$1,080 \times 10^5$	$2,005 \times 10^{16}$

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Os 194		6 a	1,892 × 10 ⁸	1,139 × 10 ¹³
P 32	Fósforo (15)	14,29 d	1,235 × 10 ⁶	1,058 × 10 ¹⁶
P 33		25,4 d	2,195 × 10 ⁶	5,772 × 10 ¹⁵
Pa 230	Protactinio (91)	17,4 d	1,503 × 10 ⁶	1,209 × 10 ¹⁵
Pa 231		32 760 a	1,033 × 10 ¹²	1,752 × 10 ⁹
Pa 233		27 d	2,333 × 10 ⁶	7,690 × 10 ¹⁴
Pb 201	Plomo (82)	9,4 h	3,384 × 10 ⁴	6,145 × 10 ¹⁶
Pb 202		3,0 × 10 ⁵ a	9,461 × 10 ¹²	2,187 × 10 ⁸
Pb 203		52,05 h	1,874 × 10 ⁵	1,099 × 10 ¹⁶
Pb 205		1,43 × 10 ⁷ a	4,510 × 10 ¹⁴	4,521 × 10 ⁶
Pb 210		22,3 a	7,033 × 10 ⁸	2,830 × 10 ¹²
Pb 212		10,64 h	3,830 × 10 ⁴	5,147 × 10 ¹⁶
Pd 103	Paladio (46)	16,96 d	1,465 × 10 ⁶	2,769 × 10 ¹⁵
Pd 107		6,5 × 10 ⁶ a	2,050 × 10 ¹⁴	1,906 × 10 ⁷
Pd 109		13,427 h	4,834 × 10 ⁴	7,934 × 10 ¹⁶

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Periodo de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Pm 143	Prometio (61)	265 d	2,290 × 10 ⁷	1,277 × 10 ¹⁴
Pm 144		363 d	3,136 × 10 ⁷	9,255 × 10 ¹³
Pm 145		17,7 a	5,582 × 10 ⁸	5,165 × 10 ¹²
Pm 147		2,6234 a	8,273 × 10 ⁷	3,437 × 10 ¹³
Pm 148m		41,3 d	3,568 × 10 ⁶	7,915 × 10 ¹⁴
Pm 149		53,08 h	1,911 × 10 ⁵	1,468 × 10 ¹⁶
Pm 151		28,4 h	1,022 × 10 ⁵	2,708 × 10 ¹⁶
Po 210	Polonio (84)	138,38 d	1,196 × 10 ⁷	1,665 × 10 ¹⁴
Pr 142	Praseodimio (59)	19,13 h	6,887 × 10 ⁴	4,274 × 10 ¹⁶
Pr 143		13,56 d	1,172 × 10 ⁶	2,495 × 10 ¹⁵
Pt 188	Platino (78)	10,2 d	8,813 × 10 ⁵	2,523 × 10 ¹⁵
Pt 191		2,8 d	2,419 × 10 ⁵	9,046 × 10 ¹⁵
Pt 193		50 a	1,577 × 10 ⁹	1,374 × 10 ¹²
Pt 193m		4,33 d	3,741 × 10 ⁵	5,789 × 10 ¹⁵
Pt 195m		4,02 d	3,473 × 10 ⁵	6,172 × 10 ¹⁵
Pt 197		18,3 h	6,588 × 10 ⁴	3,221 × 10 ¹⁶
Pt 197m		94,4 min	5,664 × 10 ³	3,746 × 10 ¹⁷

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)	
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)		
Pu 236	Plutonio (94)	2,851 a	$8,991 \times 10^7$	$1,970 \times 10^{13}$	
Pu 237		45,3 d	$3,914 \times 10^6$	$4,506 \times 10^{14}$	
Pu 238		87,74 a	$2,767 \times 10^9$	$6,347 \times 10^{11}$	
Pu 239		24 065 a	$7,589 \times 10^{11}$	$2,305 \times 10^9$	
Pu 240		6537 a	$2,062 \times 10^{11}$	$8,449 \times 10^9$	
Pu 241		14,4 a	$4,541 \times 10^8$	$3,819 \times 10^{12}$	
Pu 242		$3,763 \times 10^5$ a	$1,187 \times 10^{13}$	$1,456 \times 10^8$	
Pu 244		$8,26 \times 10^7$ a	$2,605 \times 10^{15}$	$6,577 \times 10^5$	
Ra 223		Radio (88)	11,434 d	$9,879 \times 10^5$	$1,897 \times 10^{15}$
Ra 224			3,66 d	$3,162 \times 10^5$	$5,901 \times 10^{15}$
Ra 225	14,8 d		$1,279 \times 10^6$	$1,453 \times 10^{15}$	
Ra 226	1600 a		$5,046 \times 10^{10}$	$3,666 \times 10^{10}$	
Ra 228	5,75 a		$1,813 \times 10^8$	$1,011 \times 10^{13}$	
Rb 81	Rubidio (37)		4,58 h	$1,649 \times 10^4$	$3,130 \times 10^{17}$
Rb 83		86,2 d	$7,448 \times 10^6$	$6,762 \times 10^{14}$	
Rb 84		32,77 d	$2,831 \times 10^6$	$1,758 \times 10^{15}$	
Rb 86		18,66 d	$1,612 \times 10^6$	$3,015 \times 10^{15}$	

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)	
Rb 87		$4,7 \times 10^{10}$ a	$1,482 \times 10^{18}$	$3,242 \times 10^3$
Re 184	Renio (75)	38 d	$3,283 \times 10^6$	$6,919 \times 10^{14}$
Re 184m		165 d	$1,426 \times 10^7$	$1,594 \times 10^{14}$
Re 186		90,64 h	$3,263 \times 10^5$	$6,887 \times 10^{15}$
Re 187		$5,0 \times 10^{10}$ a	$1,577 \times 10^{18}$	$1,418 \times 10^3$
Re 188		16,98 h	$6,113 \times 10^4$	$3,637 \times 10^{16}$
Re 189		24,3 h	$8,748 \times 10^4$	$2,528 \times 10^{16}$
Rh 99	Rodio (45)	16 d	$1,382 \times 10^6$	$3,054 \times 10^{15}$
Rh 101		3,2 a	$1,009 \times 10^8$	$4,101 \times 10^{13}$
Rh 102		2,9 a	$9,145 \times 10^7$	$4,481 \times 10^{13}$
Rh 102m		207 d	$1,788 \times 10^7$	$2,291 \times 10^{14}$
Rh 103m		56,12 min	$3,367 \times 10^3$	$1,205 \times 10^{18}$
Rh 105		35,36 h	$1,273 \times 10^5$	$3,127 \times 10^{16}$
Rn 222	Radón (86)	3,8235 d	$3,304 \times 10^5$	$5,700 \times 10^{15}$
Ru 97	Rutenio (44)	2,9 d	$2,506 \times 10^5$	$1,720 \times 10^{16}$
Ru 103		39,28 d	$3,394 \times 10^6$	$1,196 \times 10^{15}$

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Ru 105		4,44 h	1,598 × 10 ⁴	2,491 × 10 ¹⁷
Ru 106		368,2 d	3,181 × 10 ⁷	1,240 × 10 ¹⁴
S 35	Azufre (16)	87,44 d	7,555 × 10 ⁶	1,581 × 10 ¹⁵
Sb 122	Antimonio (51)	2,7 d	2,333 × 10 ⁵	1,469 × 10 ¹⁶
Sb 124		60,2 d	5,201 × 10 ⁶	6,481 × 10 ¹⁴
Sb 125		2,77 a	8,735 × 10 ⁷	3,828 × 10 ¹³
Sb 126		12,4 d	1,071 × 10 ⁶	3,096 × 10 ¹⁵
Sc 44	Escandio (21)	3,927 h	1,414 × 10 ⁴	6,720 × 10 ¹⁷
Sc 46		83,83 d	7,243 × 10 ⁶	1,255 × 10 ¹⁵
Sc 47		3,351 d	2,895 × 10 ⁵	3,072 × 10 ¹⁶
Sc 48		43,7 h	1,573 × 10 ⁵	5,535 × 10 ¹⁶
Se 75	Selenio (34)	119,8 d	1,035 × 10 ⁷	5,384 × 10 ¹⁴
Se 79		6,5 × 10 ⁴ a	2,050 × 10 ¹²	2,581 × 10 ⁹
Si 31	Silicio (14)	157,3 min	9,438 × 10 ³	1,429 × 10 ¹⁸
Si 32		450 a	1,419 × 10 ¹⁰	9,205 × 10 ¹¹

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)	
Sm 145	Samario (62)	340 d	$2,938 \times 10^7$	$9,813 \times 10^{13}$
Sm 147		$1,06 \times 10^{11}$ a	$3,343 \times 10^{18}$	$8,506 \times 10^2$
Sm 151		90 a	$2,838 \times 10^9$	$9,753 \times 10^{11}$
Sm 153		46,7 h	$1,681 \times 10^5$	$1,625 \times 10^{16}$
Sn 113	Estaño (50)	115,1 d	$9,945 \times 10^6$	$3,720 \times 10^{14}$
Sn 117m		13,61 d	$1,176 \times 10^6$	$3,038 \times 10^{15}$
Sn 119m		293 d	$2,532 \times 10^7$	$1,388 \times 10^{14}$
Sn 121m		55 a	$1,734 \times 10^9$	$1,992 \times 10^{12}$
Sn 123		129,2 d	$1,116 \times 10^7$	$3,044 \times 10^{14}$
Sn 125		9,64 d	$8,329 \times 10^5$	$4,015 \times 10^{15}$
Sn 126		$1,0 \times 10^5$ a	$3,154 \times 10^{12}$	$1,052 \times 10^9$
Sr 82		Estroncio (38)	25 d	$2,160 \times 10^6$
Sr 83	32,41 h		$1,167 \times 10^5$	$4,314 \times 10^{16}$
Sr 85	64,84 d		$5,602 \times 10^6$	$8,778 \times 10^{14}$
Sr 85m	69,5 min		$4,170 \times 10^3$	$1,179 \times 10^{18}$
Sr 87m	2,805 h		$1,010 \times 10^4$	$4,758 \times 10^{17}$
Sr 89	50,5 d		$4,363 \times 10^6$	$1,076 \times 10^{15}$

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)	
Sr 90		29,12 a	$9,183 \times 10^8$	$5,057 \times 10^{12}$
Sr 91		9,5 h	$3,420 \times 10^4$	$1,343 \times 10^{17}$
Sr 92		2,71 h	$9,756 \times 10^3$	$4,657 \times 10^{17}$
T(H 3)	Tritio (1)	12,35 a	$3,895 \times 10^8$	$3,578 \times 10^{14}$
Ta 178m	Tántalo (73)	2,2 h	$7,920 \times 10^3$	$2,965 \times 10^{17}$
Ta 179		664,9 d	$5,745 \times 10^7$	$4,065 \times 10^{13}$
Ta 182		115 d	$9,936 \times 10^6$	$2,311 \times 10^{14}$
Tb 149	Terbio (65)	4,12 h	$1,483 \times 10^4$	$1,889 \times 10^{17}$
Tb 157		150 a	$4,730 \times 10^9$	$5,628 \times 10^{11}$
Tb 158		150 a	$4,730 \times 10^9$	$5,593 \times 10^{11}$
Tb 160		72,3 d	$6,247 \times 10^6$	$4,182 \times 10^{14}$
Tb 161		6,91 d	$5,970 \times 10^5$	$4,340 \times 10^{15}$
Tc 95m	Tecnecio (43)	61 d	$5,270 \times 10^6$	$8,349 \times 10^{14}$
Tc 96		4,28 d	$3,698 \times 10^5$	$1,177 \times 10^{16}$
Tc 96m		51,5 min	$3,090 \times 10^3$	$1,409 \times 10^{18}$
Tc 97		$2,6 \times 10^6$ a	$8,199 \times 10^{13}$	$5,256 \times 10^7$

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Tc 97m		87 d	7,517 × 10 ⁶	5,733 × 10 ¹⁴
Tc 98		4,2 × 10 ⁶ a	1,325 × 10 ¹⁴	3,220 × 10 ⁷
Tc 99		2,13 × 10 ⁵ a	6,717 × 10 ¹²	6,286 × 10 ⁸
Tc 99m		6,02 h	2,167 × 10 ⁴	1,948 × 10 ¹⁷
Te 121	Telurio (52)	17 d	1,469 × 10 ⁶	2,352 × 10 ¹⁵
Te 121m		154 d	1,331 × 10 ⁷	2,596 × 10 ¹⁴
Te 123m		119,7 d	1,034 × 10 ⁷	3,286 × 10 ¹⁴
Te 125m		58 d	5,011 × 10 ⁶	6,673 × 10 ¹⁴
Te 127		9,35 h	3,366 × 10 ⁴	9,778 × 10 ¹⁶
Te 127m		109 d	9,418 × 10 ⁶	3,495 × 10 ¹⁴
Te 129		69,6 min	4,176 × 10 ³	7,759 × 10 ¹⁷
Te 129m		33,6 d	2,903 × 10 ⁶	1,116 × 10 ¹⁵
Te 131m		30 h	1,080 × 10 ⁵	2,954 × 10 ¹⁶
Te 132		78,2 h	2,815 × 10 ⁵	1,125 × 10 ¹⁶
Th 227	Torio (90)	18,718 d	1,617 × 10 ⁶	1,139 × 10 ¹⁵
Th 228		1,9131 a	6,033 × 10 ⁷	3,039 × 10 ¹³
Th 229		7340 a	2,315 × 10 ¹¹	7,886 × 10 ⁹

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)	
Th 230		$7,7 \times 10^4$ a	$2,428 \times 10^{12}$	$7,484 \times 10^8$
Th 231		25,52 h	$9,187 \times 10^4$	$1,970 \times 10^{16}$
Th 232		$1,405 \times 10^{10}$ a	$4,431 \times 10^{17}$	$4,066 \times 10^3$
Th 234		24,1 d	$2,082 \times 10^6$	$8,579 \times 10^{14}$
Ti 44	Titanio (22)	47,3 a	$1,492 \times 10^9$	$6,369 \times 10^{12}$
Tl 200	Talio (81)	26,1 h	$9,396 \times 10^4$	$2,224 \times 10^{16}$
Tl 201		3,044 d	$2,630 \times 10^5$	$7,907 \times 10^{15}$
Tl 202		12,23 d	$1,057 \times 10^6$	$1,958 \times 10^{15}$
Tl 204		3,779 a	$1,192 \times 10^8$	$1,719 \times 10^{13}$
Tm 167	Tulio (69)	9,24 d	$7,983 \times 10^5$	$3,135 \times 10^{15}$
Tm 170		128,6 d	$1,111 \times 10^7$	$2,213 \times 10^{14}$
Tm 171		1,92 a	$6,055 \times 10^7$	$4,037 \times 10^{13}$
U 230	Uranio (92)	20,8 d	$1,797 \times 10^6$	$1,011 \times 10^{15}$
U 232		72 a	$2,271 \times 10^9$	$7,935 \times 10^{11}$
U 233		$1,585 \times 10^5$ a	$4,998 \times 10^{12}$	$3,589 \times 10^8$
U 234		$2,445 \times 10^5$ a	$7,711 \times 10^{12}$	$2,317 \times 10^8$

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		$T_{1/2}$ (a, d, h, min)	$T_{1/2}$ (s)	
U 235		$7,038 \times 10^8$ a	$2,220 \times 10^{16}$	$8,014 \times 10^4$
U 236		$2,3415 \times 10^7$ a	$7,384 \times 10^{14}$	$2,399 \times 10^6$
U 238		$4,468 \times 10^9$ a	$1,409 \times 10^{17}$	$1,246 \times 10^4$
V 48	Vanadio (23)	16,238 d	$1,403 \times 10^6$	$6,207 \times 10^{15}$
V 49		330 d	$2,851 \times 10^7$	$2,992 \times 10^{14}$
W 178	Tungsteno (74)	21,7 d	$1,875 \times 10^6$	$1,253 \times 10^{15}$
W 181		121,2 d	$1,047 \times 10^7$	$2,205 \times 10^{14}$
W 185		75,1 d	$6,489 \times 10^6$	$3,482 \times 10^{14}$
W 187		23,9 h	$8,604 \times 10^4$	$2,598 \times 10^{16}$
W 188		69,4 d	$5,996 \times 10^6$	$3,708 \times 10^{14}$
Xe 122	Xenón (54)	20,1 h	$7,236 \times 10^4$	$4,735 \times 10^{16}$
Xe 123		2,08 h	$7,488 \times 10^3$	$4,538 \times 10^{17}$
Xe 127		36,41 d	$3,146 \times 10^6$	$1,046 \times 10^{15}$
Xe 131m		11,9 d	$1,028 \times 10^6$	$3,103 \times 10^{15}$
Xe 133		5,245 d	$4,532 \times 10^5$	$6,935 \times 10^{15}$
Xe 135		9,09 h	$3,272 \times 10^4$	$9,462 \times 10^{16}$

CUADRO II.1. PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	Elemento y número atómico	Período de semidesintegración		Actividad específica (Bq/g)
		T _{1/2} (a, d, h, min)	T _{1/2} (s)	
Y 87	Itrio (39)	80,3 h	2,891 × 10 ⁵	1,662 × 10 ¹⁶
Y 88		106,64 d	9,214 × 10 ⁶	5,155 × 10 ¹⁴
Y 90		64 h	2,304 × 10 ⁵	2,016 × 10 ¹⁶
Y 91		58,51 d	5,055 × 10 ⁶	9,086 × 10 ¹⁴
Y 91m		49,71 min	2,983 × 10 ³	1,540 × 10 ¹⁸
Y 92		3,54 h	1,274 × 10 ⁴	3,565 × 10 ¹⁷
Y 93		10,1 h	3,636 × 10 ⁴	1,236 × 10 ¹⁷
Yb 169	Iterbio (70)	32,01 d	2,766 × 10 ⁶	8,943 × 10 ¹⁴
Yb 175		4,19 d	3,620 × 10 ⁵	6,598 × 10 ¹⁵
Zn 65	Zinc (30)	243,9 d	2,107 × 10 ⁷	3,052 × 10 ¹⁴
Zn 69		57 min	3,420 × 10 ³	1,771 × 10 ¹⁸
Zn 69m		13,76 h	4,954 × 10 ⁴	1,223 × 10 ¹⁷
Zr 88	Circonio (40)	83,4 d	7,206 × 10 ⁶	6,592 × 10 ¹⁴
Zr 93		1,53 × 10 ⁶ a	4,825 × 10 ¹³	9,315 × 10 ⁷
Zr 95		63,98 d	5,528 × 10 ⁶	7,960 × 10 ¹⁴
Zr 97		16,9 h	6,084 × 10 ⁴	7,083 × 10 ¹

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Ac 225	$2,0 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$7,9 \times 10^{-06}$	$9,3 \times 10^{-02}$
Ac 227	$9,6 \times 10^{-17}$	$7,7 \times 10^{-15}$	$5,4 \times 10^{-04}$	$7,6 \times 10^{-04}$
Ac 228	$8,3 \times 10^{-14}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$2,5 \times 10^{-08}$	$5,3 \times 10^{-02}$
Ag 105	$5,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,8 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-03}$
Ag 108m	$1,5 \times 10^{-13}$	$1,7 \times 10^{-13}$	$3,5 \times 10^{-08}$	$4,7 \times 10^{-03}$
Ag 110m	$2,4 \times 10^{-13}$	$5,3 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-08}$	$1,4 \times 10^{-02}$
Ag 111	$2,4 \times 10^{-15}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$1,7 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Al 26	$2,3 \times 10^{-13}$	$7,1 \times 10^{-12}$	$1,8 \times 10^{-08}$	$3,9 \times 10^{-02}$
Am 241	$3,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,9 \times 10^{-05}$	$7,4 \times 10^{-05}$
Am 242m	$2,5 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-14}$	$3,5 \times 10^{-05}$	$3,3 \times 10^{-02}$
Am 243	$2,0 \times 10^{-14}$	$3,8 \times 10^{-15}$	$3,9 \times 10^{-05}$	$6,8 \times 10^{-02}$
Ar 37	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	$2,8 \times 10^{-05}$
Ar 39	(*) —	$1,4 \times 10^{-14}$	—	—
Ar 41	(*) $1,1 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-12}$	—	—
As 72	$1,6 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-12}$	$9,2 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-02}$
As 73	$1,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,3 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-05}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
As 74	$7,1 \times 10^{-14}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$2,1 \times 10^{-09}$	$2,9 \times 10^{-02}$
As 76	$4,0 \times 10^{-14}$	$4,0 \times 10^{-12}$	$7,4 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
As 77	$7,7 \times 10^{-16}$	$5,6 \times 10^{-14}$	$3,8 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-02}$
At 211	$4,0 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,8 \times 10^{-08}$	$6,3 \times 10^{-05}$
Au 193	$1,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-02}$
Au 194	$9,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,5 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-03}$
Au 195	$7,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,6 \times 10^{-09}$	$5,0 \times 10^{-03}$
Au 198	$3,8 \times 10^{-14}$	$9,1 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Au 199	$7,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,5 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Ba 131	$6,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,6 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-02}$
Ba 133	$3,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-09}$	$2,7 \times 10^{-03}$
Ba 133m	$6,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Ba 135m	$6,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Ba 140	$1,6 \times 10^{-13}$	$2,2 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-09}$	$9,0 \times 10^{-02}$
Be 7	$4,8 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,2 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Be 10	—	$1,7 \times 10^{-14}$	$3,2 \times 10^{-08}$	$1,5 \times 10^{-0}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Bi 205	$1,4 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,2 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-03}$
Bi 206	$2,9 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,7 \times 10^{-09}$	$2,4 \times 10^{-02}$
Bi 207	$1,4 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,2 \times 10^{-09}$	$5,5 \times 10^{-03}$
Bi 210	—	$7,7 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-08}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Bi 210m	$2,3 \times 10^{-14}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$3,1 \times 10^{-06}$	$5,7 \times 10^{-02}$
Bi 212	$1,0 \times 10^{-13}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$3,0 \times 10^{-08}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Bk 247	$9,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,5 \times 10^{-05}$	$2,0 \times 10^{-02}$
Bk 249	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-07}$	$2,3 \times 10^{-03}$
Br 76	$2,3 \times 10^{-13}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$4,2 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-02}$
Br 77	$2,9 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,7 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-03}$
Br 82	$2,4 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,4 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-02}$
C 11	$1,0 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$4,8 \times 10^{-02}$
C 14	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,8 \times 10^{-10}$	$8,8 \times 10^{-03}$
Ca 41	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Ca 45	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,7 \times 10^{-09}$	$2,3 \times 10^{-02}$
Ca 47	$3,7 \times 10^{-14}$	$2,7 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-09}$	$8,4 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Cd 109	$3,4 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,1 \times 10^{-09}$	$1,4 \times 10^{-02}$
Cd 113m	—	$1,1 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-07}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Cd 115	$2,6 \times 10^{-14}$	$3,0 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$7,1 \times 10^{-02}$
Cd 115m	$2,0 \times 10^{-15}$	$1,9 \times 10^{-12}$	$7,3 \times 10^{-09}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Ce 139	$1,5 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,8 \times 10^{-09}$	$1,3 \times 10^{-02}$
Ce 141	$6,3 \times 10^{-15}$	$3,1 \times 10^{-15}$	$3,6 \times 10^{-09}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Ce 143	$2,7 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$8,1 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Ce 144	$4,5 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-12}$	$4,9 \times 10^{-08}$	$7,3 \times 10^{-02}$
Cf 248	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,2 \times 10^{-06}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cf 249	$3,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,6 \times 10^{-05}$	$6,1 \times 10^{-03}$
Cf 250	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,2 \times 10^{-05}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cf 251	$1,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,7 \times 10^{-05}$	$5,4 \times 10^{-02}$
Cf 252	$7,5 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,8 \times 10^{-05}$	$5,4 \times 10^{-05}$
Cf 253	$8,1 \times 10^{-18}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-06}$	$2,3 \times 10^{-02}$
Cf 254	$7,1 \times 10^{-11}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,7 \times 10^{-05}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cl 36	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-13}$	$6,9 \times 10^{-09}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Cl 38	$1,2 \times 10^{-13}$	$4,5 \times 10^{-12}$	$4,7 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Cm 240	$2,2 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,9 \times 10^{-06}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cm 241	$4,5 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,8 \times 10^{-08}$	$1,9 \times 10^{-02}$
Cm 242	$2,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,8 \times 10^{-06}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cm 243	$1,2 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,8 \times 10^{-05}$	$3,4 \times 10^{-02}$
Cm 244	$1,9 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,1 \times 10^{-05}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cm 245	$7,9 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,5 \times 10^{-05}$	$1,0 \times 10^{-02}$
Cm 246	$1,7 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,5 \times 10^{-05}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cm 247	$3,1 \times 10^{-14}$	$6,3 \times 10^{-15}$	$5,1 \times 10^{-05}$	—
Cm 248	$5,6 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-04}$	—
Co 55	$1,9 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-12}$	$5,5 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-02}$
Co 56	$3,0 \times 10^{-13}$	$6,7 \times 10^{-14}$	$6,3 \times 10^{-09}$	$9,5 \times 10^{-03}$
Co 57	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,4 \times 10^{-10}$	$2,1 \times 10^{-03}$
Co 58	$9,1 \times 10^{-14}$	$1,3 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-09}$	$7,4 \times 10^{-03}$
Co 58m	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Co 60	$2,2 \times 10^{-13}$	$1,4 \times 10^{-15}$	$2,9 \times 10^{-08}$	$2,9 \times 10^{-02}$
Cr 51	$2,9 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cs 129	$2,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$7,4 \times 10^{-04}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Cs 131	$3,2 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Cs 132	$6,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,4 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-03}$
Cs 134	$1,4 \times 10^{-13}$	$2,8 \times 10^{-13}$	$6,8 \times 10^{-09}$	$3,0 \times 10^{-02}$
Cs 134m	$2,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Cs 135	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	$1,9 \times 10^{-02}$
Cs 136	$2,0 \times 10^{-13}$	$1,2 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-09}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Cs 137	$5,6 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$4,8 \times 10^{-09}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Cu 64	$1,8 \times 10^{-14}$	$9,1 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$2,4 \times 10^{-02}$
Cu 67	$1,0 \times 10^{-14}$	$2,4 \times 10^{-15}$	$5,8 \times 10^{-10}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Dy 159	$5,0 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,5 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Dy 165	$2,4 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$6,1 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Dy 166	$2,9 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$2,5 \times 10^{-09}$	$8,1 \times 10^{-02}$
Er 169	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,8 \times 10^{-10}$	$2,9 \times 10^{-02}$
Er 171	$3,4 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$5,5 \times 10^{-02}$
Eu 147	$4,5 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-09}$	$7,4 \times 10^{-03}$
Eu 148	$2,0 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,7 \times 10^{-09}$	$1,4 \times 10^{-03}$
Eu 149	$6,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,7 \times 10^{-10}$	$3,8 \times 10^{-04}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Eu 150	$1,4 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-08}$	$3,9 \times 10^{-03}$
Eu 150m	$4,3 \times 10^{-15}$	$6,7 \times 10^{-13}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Eu 152	$1,0 \times 10^{-13}$	$5,9 \times 10^{-15}$	$3,9 \times 10^{-08}$	$2,1 \times 10^{-02}$
Eu 152m	$2,7 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-02}$
Eu 154	$1,1 \times 10^{-13}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-08}$	$5,0 \times 10^{-02}$
Eu 155	$5,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,5 \times 10^{-09}$	$8,7 \times 10^{-03}$
Eu 156	$1,1 \times 10^{-13}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$3,3 \times 10^{-09}$	$4,2 \times 10^{-02}$
F 18	$1,0 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-14}$	$6,0 \times 10^{-11}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Fe 52	$2,4 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-12}$	$6,3 \times 10^{-10}$	$7,4 \times 10^{-02}$
Fe 55	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,7 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Fe 59	$1,1 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-14}$	$3,5 \times 10^{-09}$	$3,1 \times 10^{-02}$
Fe 60	$5,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,4 \times 10^{-07}$	$7,6 \times 10^{-03}$
Ga 67	$1,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$8,6 \times 10^{-03}$
Ga 68	$9,1 \times 10^{-14}$	$2,2 \times 10^{-12}$	$5,1 \times 10^{-11}$	$4,2 \times 10^{-02}$
Ga 72	$2,3 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-12}$	$5,5 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Gd 146	$1,9 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-15}$	$6,8 \times 10^{-09}$	$2,7 \times 10^{-02}$
Gd 148	—	—	$2,5 \times 10^{-05}$	—

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Gd 153	$1,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,1 \times 10^{-09}$	$3,1 \times 10^{-03}$
Gd 159	$4,8 \times 10^{-15}$	$3,2 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Ge 68	$9,1 \times 10^{-14}$	$2,2 \times 10^{-12}$	$1,3 \times 10^{-08}$	$4,2 \times 10^{-02}$
Ge 69	$9,1 \times 10^{-14}$	$4,5 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-10}$	$1,6 \times 10^{-02}$
Ge 71	$1,9 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Ge 77	$9,1 \times 10^{-14}$	$3,0 \times 10^{-12}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Hf 172	$1,7 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,2 \times 10^{-08}$	$1,6 \times 10^{-02}$
Hf 175	$3,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$5,9 \times 10^{-03}$
Hf 181	$5,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,7 \times 10^{-09}$	$5,6 \times 10^{-02}$
Hf 182	$2,2 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Hg 194	$9,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-08}$	$4,6 \times 10^{-03}$
Hg 195m	$3,2 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,4 \times 10^{-09}$	$3,8 \times 10^{-02}$
Hg 197	$6,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,4 \times 10^{-09}$	$1,8 \times 10^{-03}$
Hg 197m	$7,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,2 \times 10^{-09}$	$7,9 \times 10^{-02}$
Hg 203	$2,2 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,5 \times 10^{-09}$	$2,5 \times 10^{-02}$
Ho 166	$2,6 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$6,6 \times 10^{-10}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Ho 166m	$1,6 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-07}$	$2,2 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
I 123	$1,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,1 \times 10^{-10}$	$9,5 \times 10^{-03}$
I 124	$9,1 \times 10^{-14}$	$1,7 \times 10^{-13}$	$1,2 \times 10^{-08}$	$1,1 \times 10^{-02}$
I 125	$6,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-08}$	$2,8 \times 10^{-05}$
I 126	$4,3 \times 10^{-14}$	$1,6 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-08}$	$2,1 \times 10^{-02}$
I 129	$3,4 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
I 131	$3,6 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-08}$	$4,0 \times 10^{-02}$
I 132	$2,1 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$2,8 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
I 133	$5,6 \times 10^{-14}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$4,5 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$
I 134	$2,4 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-12}$	$7,2 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-02}$
I 135	$1,2 \times 10^{-13}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$9,6 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
In 111	$3,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$9,3 \times 10^{-03}$
In 113m	$2,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$1,7 \times 10^{-02}$
In 114m	$9,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,3 \times 10^{-09}$	$5,8 \times 10^{-02}$
In 115m	$1,5 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,0 \times 10^{-11}$	$2,7 \times 10^{-02}$
Ir 189	$7,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,5 \times 10^{-10}$	$1,6 \times 10^{-03}$
Ir 190	$1,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-09}$	$3,7 \times 10^{-02}$
Ir 192	$7,7 \times 10^{-14}$	$2,2 \times 10^{-14}$	$6,2 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Ir 193m	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-09}$	$9,3 \times 10^{-03}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Ir 194	$8,3 \times 10^{-15}$	$3,0 \times 10^{-12}$	$5,6 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
K 40	$1,4 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-12}$	—	—
K 42	$2,4 \times 10^{-14}$	$4,5 \times 10^{-12}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$4,9 \times 10^{-02}$
K 43	$9,1 \times 10^{-14}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Kr 81	(*) $9,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Kr 85	(*) $2,1 \times 10^{-16}$	$7,1 \times 10^{-14}$	—	—
Kr 85m	(*) $1,3 \times 10^{-14}$	$1,3 \times 10^{-13}$	—	—
Kr 87	(*) $6,7 \times 10^{-14}$	$4,8 \times 10^{-12}$	—	—
La 137	$3,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,6 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
La 140	$2,0 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Lu 172	$1,7 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-09}$	$1,3 \times 10^{-02}$
Lu 173	$1,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-09}$	$1,6 \times 10^{-03}$
Lu 174	$1,2 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-09}$	$9,6 \times 10^{-04}$
Lu 174m	$6,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,8 \times 10^{-09}$	$7,5 \times 10^{-04}$
Lu 177	$3,0 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$3,8 \times 10^{-02}$
Mg 28	$2,7 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-09}$	$8,7 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Mn 52	$3,1 \times 10^{-13}$	$1,4 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-09}$	$1,5 \times 10^{-02}$
Mn 53	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Mn 54	$7,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Mn 56	$1,5 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-12}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Mo 93	$1,2 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,2 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Mo 99	$1,6 \times 10^{-14}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$9,7 \times 10^{-10}$	$5,1 \times 10^{-02}$
N 13	$1,0 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-12}$	—	$4,8 \times 10^{-02}$
Na 22	$2,0 \times 10^{-13}$	$2,6 \times 10^{-13}$	$1,3 \times 10^{-09}$	$4,2 \times 10^{-02}$
Na 24	$3,3 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-12}$	$2,9 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Nb 93m	$2,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,6 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Nb 94	$1,5 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,5 \times 10^{-08}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Nb 95	$7,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,6 \times 10^{-09}$	$7,0 \times 10^{-03}$
Nb 97	$6,3 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$4,7 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Nd 147	$1,4 \times 10^{-14}$	$1,8 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-09}$	$4,3 \times 10^{-02}$
Nd 149	$3,4 \times 10^{-14}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$9,0 \times 10^{-11}$	$5,4 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Ni 57	$1,7 \times 10^{-13}$	$1,5 \times 10^{-13}$	$5,1 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-02}$
Ni 59	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Ni 63	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,7 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Ni 65	$4,8 \times 10^{-14}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$8,7 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Np 235	$7,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Np 236	$1,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,0 \times 10^{-06}$	$5,6 \times 10^{-02}$
Np 236m	$4,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-09}$	$1,9 \times 10^{-02}$
Np 237	$3,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,1 \times 10^{-05}$	—
Np 239	$1,5 \times 10^{-14}$	$3,8 \times 10^{-15}$	$9,0 \times 10^{-10}$	$6,7 \times 10^{-02}$
Os 185	$6,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-09}$	$1,2 \times 10^{-03}$
Os 191	$6,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,8 \times 10^{-09}$	$1,2 \times 10^{-02}$
Os 191m	$7,7 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-03}$
Os 193	$6,7 \times 10^{-15}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$5,1 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Os 194	$8,3 \times 10^{-15}$	$3,2 \times 10^{-12}$	$7,9 \times 10^{-08}$	$4,7 \times 10^{-02}$
P 32	—	$2,2 \times 10^{-12}$	$3,2 \times 10^{-09}$	$4,7 \times 10^{-02}$
P 33	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-09}$	$2,3 \times 10^{-02}$
Pa 230	$6,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,6 \times 10^{-07}$	$1,3 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Pa 231	$1,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-04}$	$1,5 \times 10^{-03}$
Pa 233	$1,9 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,7 \times 10^{-09}$	$4,2 \times 10^{-02}$
Pb 201	$6,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,5 \times 10^{-11}$	$8,4 \times 10^{-03}$
Pb 202	$1,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	$1,7 \times 10^{-03}$
Pb 203	$2,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,1 \times 10^{-11}$	$1,1 \times 10^{-02}$
Pb 205	$1,2 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Pb 210	$4,2 \times 10^{-16}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$9,8 \times 10^{-07}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Pb 212	$1,0 \times 10^{-13}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$2,3 \times 10^{-07}$	$1,0 \times 10^{-01}$
Pd 103	$2,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Pd 107	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Pd 109	$1,4 \times 10^{-15}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$5,9 \times 10^{-02}$
Pm 143	$3,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-09}$	$7,7 \times 10^{-05}$
Pm 144	$1,5 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,8 \times 10^{-09}$	$8,2 \times 10^{-04}$
Pm 145	$3,8 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,4 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Pm 147	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,7 \times 10^{-09}$	$1,6 \times 10^{-02}$
Pm 148m	$1,2 \times 10^{-13}$	$1,3 \times 10^{-13}$	$5,4 \times 10^{-09}$	$3,9 \times 10^{-02}$
Pm 149	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$7,2 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Pm 151	$3,0 \times 10^{-14}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$4,5 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Po 210	$7,9 \times 10^{-19}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,0 \times 10^{-06}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Pr 142	$5,0 \times 10^{-15}$	$2,8 \times 10^{-12}$	$5,6 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Pr 143	$1,0 \times 10^{-16}$	$3,3 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-09}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Pt 188	$1,0 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,8 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-02}$
Pt 191	$2,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$7,9 \times 10^{-03}$
Pt 193	$1,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Pt 193m	$1,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$5,1 \times 10^{-02}$
Pt 195m	$6,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$5,7 \times 10^{-02}$
Pt 197	$2,1 \times 10^{-15}$	$4,2 \times 10^{-14}$	$9,1 \times 10^{-11}$	$4,4 \times 10^{-02}$
Pt 197m	$7,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Pu 236	$2,2 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,8 \times 10^{-05}$	$4,3 \times 10^{-05}$
Pu 237	$4,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-04}$
Pu 238	$1,9 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,3 \times 10^{-05}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Pu 239	$7,5 \times 10^{-17}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,7 \times 10^{-05}$	—
Pu 240	$1,8 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,7 \times 10^{-05}$	—
Pu 241	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,5 \times 10^{-07}$	$2,8 \times 10^{-05}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Pu 242	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,4 \times 10^{-05}$	—
Pu 244	$3,2 \times 10^{-14}$	$2,6 \times 10^{-12}$	$4,4 \times 10^{-05}$	—
Ra 223	$2,6 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-12}$	$6,9 \times 10^{-06}$	$1,1 \times 10^{-01}$
Ra 224	$9,1 \times 10^{-14}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$3,1 \times 10^{-06}$	$1,0 \times 10^{-01}$
Ra 225	$8,3 \times 10^{-15}$	$4,5 \times 10^{-12}$	$1,4 \times 10^{-05}$	$1,2 \times 10^{-01}$
Ra 226	$1,5 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-05}$	$1,0 \times 10^{-01}$
Ra 228	$8,3 \times 10^{-14}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$2,6 \times 10^{-06}$	$5,3 \times 10^{-02}$
Rb 81	$5,9 \times 10^{-14}$	$6,7 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-02}$
Rb 83	$4,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,1 \times 10^{-10}$	$6,4 \times 10^{-05}$
Rb 84	$8,3 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$1,2 \times 10^{-02}$
Rb 86	$8,3 \times 10^{-15}$	$2,1 \times 10^{-12}$	$9,6 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Rb 87	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Rb(nat)	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Re 184	$8,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,8 \times 10^{-09}$	$1,6 \times 10^{-02}$
Re 184m	$3,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,1 \times 10^{-09}$	$2,2 \times 10^{-02}$
Re 186	$1,7 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Re 187	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Re 188	$5,0 \times 10^{-15}$	$2,9 \times 10^{-12}$	$5,5 \times 10^{-10}$	$5,2 \times 10^{-02}$
Re 189	$3,1 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-13}$	$4,3 \times 10^{-10}$	$4,9 \times 10^{-02}$
Re(nat)	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Rh 99	$5,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,3 \times 10^{-10}$	$3,7 \times 10^{-03}$
Rh 101	$2,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-09}$	$1,1 \times 10^{-02}$
Rh 102	$2,0 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,6 \times 10^{-08}$	$5,1 \times 10^{-04}$
Rh 102m	$4,5 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-13}$	$6,7 \times 10^{-09}$	$1,5 \times 10^{-02}$
Rh 103m	$2,2 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Rh 105	$7,1 \times 10^{-15}$	$5,6 \times 10^{-15}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$3,5 \times 10^{-02}$
Rn 222	$1,5 \times 10^{-13}$	$3,8 \times 10^{-12}$	—	—
Ru 97	$2,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$2,1 \times 10^{-03}$
Ru 103	$4,5 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-15}$	$2,8 \times 10^{-09}$	$1,8 \times 10^{-02}$
Ru 105	$7,1 \times 10^{-14}$	$8,3 \times 10^{-13}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Ru 106	$1,9 \times 10^{-14}$	$4,5 \times 10^{-12}$	$6,2 \times 10^{-08}$	$4,9 \times 10^{-02}$
S 35	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-09}$	$9,4 \times 10^{-03}$
Sb 122	$4,2 \times 10^{-14}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Sb 124	$1,6 \times 10^{-13}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$6,1 \times 10^{-09}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Sb 125	$4,2 \times 10^{-14}$	$4,0 \times 10^{-15}$	$4,5 \times 10^{-09}$	$2,1 \times 10^{-02}$
Sb 126	$2,6 \times 10^{-13}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-09}$	$3,9 \times 10^{-02}$
Sc 44	$2,0 \times 10^{-13}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Sc 46	$1,9 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,4 \times 10^{-09}$	$3,3 \times 10^{-02}$
Sc 47	$9,1 \times 10^{-15}$	$5,9 \times 10^{-15}$	$7,0 \times 10^{-10}$	$3,9 \times 10^{-02}$
Sc 48	$3,0 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$4,3 \times 10^{-02}$
Se 75	$3,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-03}$
Se 79	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,9 \times 10^{-09}$	$1,2 \times 10^{-02}$
Si 31	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$8,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Si 32	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-07}$	$1,7 \times 10^{-02}$
Sm 145	$7,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Sm 147	—	—	—	—
Sm 151	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,7 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Sm 153	$5,9 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-13}$	$6,1 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Sn 113	$2,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,5 \times 10^{-09}$	$1,7 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Sn 117m	$1,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-09}$	$7,0 \times 10^{-02}$
Sn 119m	$1,6 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Sn 121m	$7,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,2 \times 10^{-09}$	$3,3 \times 10^{-02}$
Sn 123	$6,3 \times 10^{-16}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$7,7 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Sn 125	$2,8 \times 10^{-14}$	$2,7 \times 10^{-12}$	$3,0 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Sn 126	$1,5 \times 10^{-13}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$2,7 \times 10^{-08}$	$7,7 \times 10^{-02}$
Sr 82	$1,0 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-08}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Sr 83	$7,7 \times 10^{-14}$	$3,7 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-02}$
Sr 85	$4,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,7 \times 10^{-10}$	$3,3 \times 10^{-04}$
Sr 85m	$1,9 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-03}$
Sr 87m	$3,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$8,5 \times 10^{-03}$
Sr 89	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$7,5 \times 10^{-09}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Sr 90	$1,0 \times 10^{-16}$	$3,1 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-07}$	$8,8 \times 10^{-02}$
Sr 91	$6,6 \times 10^{-14}$	$3,3 \times 10^{-12}$	$4,1 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Sr 92	$1,2 \times 10^{-14}$	$9,1 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-10}$	$8,9 \times 10^{-02}$
T(H 3)	—	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	—
Ta 178m	$9,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$6,9 \times 10^{-11}$	$3,4 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Ta 179	$3,2 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,2 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Ta 182	$1,1 \times 10^{-13}$	$7,7 \times 10^{-14}$	$9,7 \times 10^{-09}$	$5,2 \times 10^{-02}$
Tb 149	$1,2 \times 10^{-13}$	$2,2 \times 10^{-14}$	$4,3 \times 10^{-09}$	$1,3 \times 10^{-02}$
Tb 157	$3,2 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$2,8 \times 10^{-05}$
Tb 158	$7,1 \times 10^{-14}$	$6,3 \times 10^{-15}$	$4,3 \times 10^{-08}$	$1,5 \times 10^{-02}$
Tb 160	$1,0 \times 10^{-13}$	$4,3 \times 10^{-13}$	$6,6 \times 10^{-09}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Tb 161	$4,0 \times 10^{-15}$	$4,2 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-09}$	$3,9 \times 10^{-02}$
Tc 95m	$6,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,7 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-03}$
Tc 96	$2,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,1 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-04}$
Tc 96m	$2,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,0 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-04}$
Tc 97	$1,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Tc 97m	$1,2 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,1 \times 10^{-09}$	$1,9 \times 10^{-02}$
Tc 98	$1,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	$4,1 \times 10^{-02}$
Tc 99	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	$3,1 \times 10^{-02}$
Tc 99m	$1,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$6,5 \times 10^{-03}$
Te 121	$5,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,9 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-04}$
Te 121m	$2,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,2 \times 10^{-09}$	$1,1 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Te 123m	$1,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,9 \times 10^{-09}$	$2,4 \times 10^{-02}$
Te 125m	$5,0 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,3 \times 10^{-09}$	$3,1 \times 10^{-02}$
Te 127	$4,5 \times 10^{-16}$	$5,3 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-02}$
Te 127m	$2,0 \times 10^{-15}$	$5,3 \times 10^{-14}$	$7,2 \times 10^{-09}$	$5,6 \times 10^{-02}$
Te 129	$5,9 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Te 129m	$7,7 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$6,3 \times 10^{-09}$	$6,3 \times 10^{-02}$
Te 131m	$1,3 \times 10^{-13}$	$8,3 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$5,7 \times 10^{-02}$
Te 132	$2,0 \times 10^{-13}$	$2,0 \times 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{-09}$	$6,6 \times 10^{-02}$
Th 227	$9,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,6 \times 10^{-06}$	$5,9 \times 10^{-03}$
Th 228	$1,3 \times 10^{-13}$	$1,9 \times 10^{-12}$	$3,9 \times 10^{-05}$	$1,0 \times 10^{-01}$
Th 229	$8,1 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$9,9 \times 10^{-05}$	$1,6 \times 10^{-02}$
Th 230	$1,4 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-05}$	—
Th 231	$2,6 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,1 \times 10^{-06}$	$2,3 \times 10^{-02}$
Th 232	$8,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Th 234	$2,4 \times 10^{-15}$	$3,3 \times 10^{-12}$	$7,3 \times 10^{-09}$	$5,6 \times 10^{-02}$
Th(nat)	$2,2 \times 10^{-13}$	$3,7 \times 10^{-12}$	—	—
Ti 44	$2,1 \times 10^{-13}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-07}$	$4,5 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Tl 200	$1,2 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$3,9 \times 10^{-03}$
Tl 201	$8,3 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,7 \times 10^{-11}$	$7,0 \times 10^{-03}$
Tl 202	$4,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-03}$
Tl 204	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-10}$	$4,0 \times 10^{-02}$
Tm 167	$1,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$3,4 \times 10^{-02}$
Tm 170	$5,0 \times 10^{-16}$	$3,8 \times 10^{-13}$	$6,6 \times 10^{-09}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Tm 171	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-09}$	$2,7 \times 10^{-04}$
U 230 (F)	$1,9 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,6 \times 10^{-07}$	$9,0 \times 10^{-03}$
U 230 (M)	$1,9 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-05}$	$9,0 \times 10^{-03}$
U 230 (S)	$1,9 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-05}$	$9,0 \times 10^{-03}$
U 232 (F)	$2,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-06}$	$1,5 \times 10^{-04}$
U 232 (M)	$2,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,2 \times 10^{-06}$	$1,5 \times 10^{-04}$
U 232 (S)	$2,1 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,5 \times 10^{-05}$	$1,5 \times 10^{-04}$
U 233 (F)	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,7 \times 10^{-07}$	—
U 233 (M)	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,2 \times 10^{-06}$	—
U 233 (S)	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,7 \times 10^{-06}$	—
U 234 (F)	$1,7 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,5 \times 10^{-07}$	—
U 234 (M)	$1,7 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,1 \times 10^{-06}$	—

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	$\dot{e}_{pt} \text{ (a)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$\dot{e}_{\beta} \text{ (b)}$ (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	$e_{inh} \text{ (c)}$ (Sv·Bq ⁻¹)	$\dot{h}_{skin} \text{ (d)}$ (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
U 234 (S)	$1,7 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$8,5 \times 10^{-06}$	—
U 235 (F)	$1,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U 235 (M)	$1,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U 235 (S)	$1,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U 236 (F)	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U 236 (M)	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,9 \times 10^{-06}$	—
U 236 (S)	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,9 \times 10^{-06}$	—
U 238 (F)	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U 238 (M)	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U 238 (S)	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
U(nat)	$1,6 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-12}$	—	—
U(dep)	$2,2 \times 10^{-15}$	$3,1 \times 10^{-12}$	—	—
V 48	$2,6 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-09}$	$2,5 \times 10^{-02}$
V 49	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-05}$
W 178	$1,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,6 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-03}$
W 181	$3,8 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$5,2 \times 10^{-05}$
W 185	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$3,4 \times 10^{-02}$
W 187	$4,5 \times 10^{-14}$	$4,8 \times 10^{-13}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-02}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
W 188	$5,0 \times 10^{-15}$	$2,7 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{-09}$	$7,9 \times 10^{-02}$
Xe 122	(*) $9,1 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-12}$	—	—
Xe 123	(*) $5,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-13}$	—	—
Xe 127	(*) $2,6 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Xe 131m	(*) $2,6 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Xe 133	(*) $4,8 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Xe 135	(*) $2,2 \times 10^{-14}$	$2,9 \times 10^{-13}$	—	—
Y 87	$7,1 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,0 \times 10^{-10}$	$8,7 \times 10^{-03}$
Y 88	$2,3 \times 10^{-13}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$4,1 \times 10^{-09}$	$1,3 \times 10^{-04}$
Y 90	$1,0 \times 10^{-16}$	$3,1 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-09}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Y 91	$3,2 \times 10^{-16}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$8,4 \times 10^{-09}$	$4,6 \times 10^{-02}$
Y 91m	$5,0 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$2,3 \times 10^{-03}$
Y 92	$2,3 \times 10^{-14}$	$4,5 \times 10^{-12}$	$2,0 \times 10^{-10}$	$4,9 \times 10^{-02}$
Y 93	$7,7 \times 10^{-15}$	$3,8 \times 10^{-12}$	$4,3 \times 10^{-10}$	$4,8 \times 10^{-02}$
Yb 169	$2,9 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,8 \times 10^{-09}$	$2,7 \times 10^{-02}$
Yb 175	$3,7 \times 10^{-15}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$7,0 \times 10^{-10}$	$3,2 \times 10^{-02}$
Zn 65	$5,3 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$2,9 \times 10^{-09}$	$6,7 \times 10^{-04}$

CUADRO II.2. COEFICIENTES DE DOSIS Y DE TASA DE DOSIS DE LOS RADIONUCLEIDOS (cont.)

Radionucleido	\dot{e}_{pt} (a) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	\dot{e}_{β} (b) (Sv·Bq ⁻¹ ·h ⁻¹)	e_{inh} (c) (Sv·Bq ⁻¹)	\dot{h}_{skin} (d) (Sv·m ² ·TBq ⁻¹ ·s ⁻¹)
Zn 69	$1,0 \times 10^{-16}$	$3,1 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$4,5 \times 10^{-02}$
Zn 69m	$2,9 \times 10^{-14}$	$2,5 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-02}$
Zr 88	$3,8 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-15}$	$3,5 \times 10^{-09}$	$1,3 \times 10^{-03}$
Zr 93	—	$1,0 \times 10^{-15}$	—	—
Zr 95	$5,6 \times 10^{-14}$	$2,2 \times 10^{-15}$	$5,5 \times 10^{-09}$	$3,3 \times 10^{-02}$
Zr 97	$1,1 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-09}$	$4,9 \times 10^{-02}$

NOTAS EXPLICATIVAS

- (a) Coeficiente de tasa de dosis efectiva para la dosis externa debida a los fotones calculado a 1 m.
- (b) Coeficiente de tasa de dosis equivalente en piel para la dosis externa debida a la emisión beta calculado a 1 m.
- (c) Coeficiente de dosis efectiva por inhalación.
- (d) Coeficiente de dosis equivalente en piel para la contaminación por dosis en piel.
- (*) En lo que respecta al coeficiente de dosis efectiva y el coeficiente de dosis equivalente en piel para la dosis de inmersión debida a isótopos gaseosos, véase el cuadro I.1 del apéndice I.

CUADRO II.3. VALORES DE ACTIVIDAD ESPECÍFICA DEL URANIO CON DISTINTOS NIVELES DE ENRIQUECIMIENTO

Porcentaje en masa de U 235 presente en la mezcla de uranio	Actividad específica ^{a,b}	
	Bq/g	Ci/g
0,45	$1,8 \times 10^4$	$5,0 \times 10^{-7}$
0,72 (natural)	$2,6 \times 10^4$	$7,06 \times 10^{-7}$

CUADRO II.3. VALORES DE ACTIVIDAD ESPECÍFICA DEL URANIO CON DISTINTOS NIVELES DE ENRIQUECIMIENTO (cont.)

Porcentaje en masa de U 235 presente en la mezcla de uranio	Actividad específica ^{a,b}	
	Bq/g	Ci/g
1,0	$2,8 \times 10^4$	$7,6 \times 10^{-7}$
1,5	$3,7 \times 10^4$	$1,0 \times 10^{-6}$
5,0	$1,0 \times 10^5$	$2,7 \times 10^{-6}$
10,0	$1,8 \times 10^5$	$4,8 \times 10^{-6}$
20,0	$3,7 \times 10^5$	$1,0 \times 10^{-5}$
35,0	$7,4 \times 10^5$	$2,0 \times 10^{-5}$
50,0	$9,3 \times 10^5$	$2,5 \times 10^{-5}$
90,0	$2,2 \times 10^6$	$5,8 \times 10^{-5}$
93,0	$2,6 \times 10^6$	$7,0 \times 10^{-5}$
95,0	$3,4 \times 10^6$	$9,1 \times 10^{-5}$

^a Los valores de la actividad específica incluyen la actividad del U 234, que se concentra durante el proceso de enriquecimiento; estos valores no incluyen ninguna contribución de los productos de desintegración. Los valores corresponden al material procedente de uranio natural enriquecido por un método de difusión gaseosa.

^b Si no se conoce el origen del material, la actividad específica debería medirse o calcularse utilizando datos de relación isotópica.

REFERENCIA DEL APÉNDICE II

[II.1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38, 2008.

Apéndice III

EJEMPLOS DE CÁLCULOS PARA ESTABLECER DISTANCIAS MÍNIMAS DE SEPARACIÓN

INTRODUCCIÓN

III.1. En el Reglamento de Transporte las distancias de separación se emplean con tres finalidades para el transporte y el almacenamiento en tránsito:

- a) para separar los bultos de materiales radiactivos de los lugares normalmente ocupados por personas a fin de brindar la adecuada protección radiológica (párr. 562 a) y b));
- b) para separar los bultos de materiales radiactivos de bultos que contengan películas fotográficas sin revelar a fin de proteger dichas películas de la exposición accidental o el “velado” (párr. 562 c);
- c) para separar los bultos de materiales radiactivos de bultos que contengan otras mercancías peligrosas (párrs. 506 y 562 d)).

III.2. En el presente apéndice se proporciona orientación sobre una forma de elaborar criterios con objeto de separar los bultos de materiales radiactivos de los lugares normalmente ocupados por trabajadores y por miembros del público. Se puede aplicar un procedimiento similar para elaborar criterios relativos a la protección de las películas fotográficas sin revelar. En el párrafo 562.10 se resume un método para separar los bultos que contienen materiales radiactivos de otras mercancías peligrosas.

III.3. En general, las autoridades de transporte modal realizan la separación con fines de protección radiológica estableciendo cuadros de distancias de separación mínimas que se basan en los criterios de dosis establecidos en el párrafo 562 del Reglamento de Transporte (véanse también las notas b y c del cuadro 11 del Reglamento de Transporte relativas a las distancias de separación para fines de seguridad con respecto a la criticidad).

III.4. El procedimiento que se expone a continuación para establecer las distancias de separación es conservador en muchos aspectos. Por ejemplo, los criterios de dosis del párrafo 562 del Reglamento de Transporte se aplican en el perímetro de una zona habitualmente ocupada. Dado que las personas se desplazarán de un lugar a otro dentro de la zona ocupada durante el período en que estén presentes los bultos de materiales radiactivos, la exposición resultante

será inferior a la de estos criterios de dosis [III.1]. Las tasas de dosis utilizadas en los cálculos se basan en el IT de un bulto o en la suma de los IT de un conjunto de bultos. Así pues, en los conjuntos de bultos no se considera el autoblandaje de uno con respecto a los otros y, por lo tanto, las tasas de dosis reales serán inferiores a las que sirven de base para los cálculos.

III.5. Para establecer distancias mínimas de separación por este método es necesario, en primer lugar, elaborar un modelo de las condiciones de transporte para una determinada modalidad de transporte. En la elaboración de este modelo hay que considerar numerosas variables. Estos criterios son bien conocidos y ya han sido documentados en cálculos elaborados anteriormente para el transporte aéreo [III.2, III.3] y el marítimo [III.2]. Parámetros importantes de este modelo son, entre otros, los siguientes:

- a) el período anual máximo de viaje (PAMV) correspondientes a la tripulación y el público (es decir, la persona representativa);
- b) el factor de tráfico radiactivo (FTR), definido como la proporción del número de viajes anuales realizado con bultos de material radiactivo de la categoría II-AMARILLA y III-AMARILLA con respecto al número total anual de viajes³;
- c) el tiempo anual máximo de exposición (TAME), tanto para la tripulación como para el público, cuyo valor es el PAMV apropiado multiplicado por FTR correspondiente, es decir:

$$\text{TAME (h/año)} = \text{PAMV (h/año)} \times \text{FTR} \quad (\text{III.1})$$

- d) Los valores de dosis (VD) aplicables según lo dispuesto en el párrafo 562 del Reglamento de Transporte para la tripulación y el público;
- e) Las tasas de dosis de referencia (TDR) para la tripulación y el público, que se utilizan como base para establecer las distancias mínimas de separación y que se obtienen dividiendo los valores de dosis por el tiempo anual máximo de exposición aplicable; es decir:

$$\text{TDR (mSv/h)} = \text{VD (mSv/año)} / \text{TAME (h/año)} \quad (\text{III.2})$$

³ Los bultos de la categoría I-BLANCA están excluidos, puesto que, en lo esencial, no presentan ningún peligro de exposición radiológica.

III.6. A continuación se presenta un ejemplo de cómo determinar las distancias de separación para aeronaves de pasajeros y aeronaves de carga. Este ejemplo se basa en un conjunto determinado de hipótesis y técnicas de cálculo; también son factibles otras técnicas de cálculo. Se contemplan las siguientes tres configuraciones posibles:

- a) estiba de bultos de materiales radiactivos en un único grupo debajo de la cubierta principal de una aeronave de pasajeros;
- b) estiba de bultos de materiales radiactivos debajo de la cubierta principal de una aeronave de pasajeros, en grupos múltiples y con distancias de separación establecidas entre los grupos;
- c) estiba en la cubierta principal de una aeronave combinada de carga y de pasajeros (denominadas aeronaves “combi” en la industria aeronáutica) o en una aeronave de carga.

III.7. En los cálculos siguientes todos los bultos y grupos de bultos se tratan como fuentes puntuales únicas cuyos niveles de radiación pueden describirse mediante la relación de la inversa del cuadrado. La consideración de detalles relativos a las dimensiones del bulto y a la configuración de la estiba redundará generalmente en una ligera disminución de la distancia de separación requerida. Así pues, el tratamiento de todos los grupos de bultos como fuentes puntuales únicas representa un método conservador.

ESTIBA DE UN GRUPO DE BULTOS DEBAJO DE LA CUBIERTA PRINCIPAL DE AERONAVES DE PASAJEROS

III.8. En una aeronave de pasajeros típica los bultos se cargan en un compartimento de carga emplazado directamente debajo de la cabina de pasajeros. La máxima tasa de dosis la recibiría un pasajero localizado en un asiento directamente encima de un bulto o de un grupo de bultos de materiales radiactivos. Los demás pasajeros estarían expuestos a niveles inferiores. Esta situación se representa en la figura III.1.

III.9. La distancia mínima real de separación (DMR) que se requiere entre una fuente situada dentro de un bulto (o grupo de bultos) y el punto de interés (que representa al pasajero) en una aeronave típica será la suma de las distancias de separación requeridas (S , en metros) entre el bulto y el perímetro de la cabina de pasajeros, la altura del asiento (aunque la altura real de asiento en la mayoría de

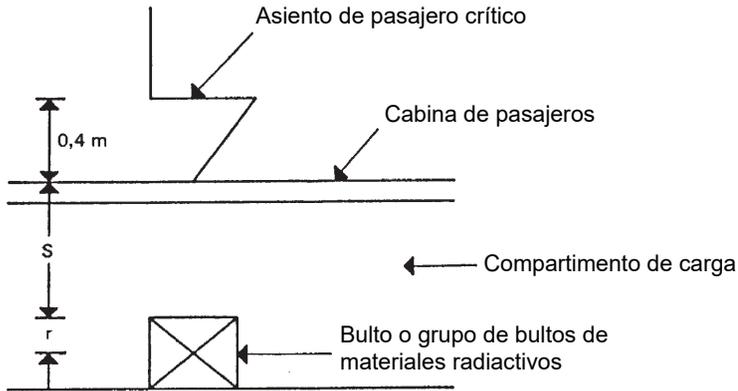


Fig. III.1. Configuración típica de pasajeros y carga en aeronaves de pasajeros utilizada para determinar la distancia de separación, S

las aeronaves sería aproximadamente de 0,5 m, para este cálculo se supone que sea de 0,4 m, con criterio conservador) y el radio del bulto (r , en metros):

$$\text{DMR} = S + 0,4 + r \quad (\text{III.3})$$

III.10. El IT representa una medida exacta de la tasa de dosis máxima a 1 m de la superficie del bulto. Para obtener la tasa de dosis en mSv/h el IT debe dividirse por un factor de 100. Así pues, aplicando la ley de la inversa del cuadrado se obtiene:

$$\text{TDR} = (\text{IT}/100)(\text{FT}_f)(1,0 + r)^2/(\text{DMR})^2 \quad \text{III.4.}$$

donde

TDR es la tasa de dosis de referencia a la altura del asiento (mSv/h);

IT es el índice de transporte;

FT_f es el factor de transmisión del piso de la cabina de pasajeros, es decir, la fracción de radiación que atraviesa las estructuras de la aeronave entre la fuente y el pasajero (adimensional);

r es el radio del bulto o del conjunto de bultos (la mitad de la dimensión mínima) (m);

DMR es la distancia mínima real hasta el punto donde se recibe la dosis (m).

III.11. Sustituyendo la ecuación (III.3) dentro de la ecuación (III.4) se obtiene:

$$\text{TDR} = (\text{IT}/100)(\text{FT}_f)(1,0 + r)^2 / (\text{S} + 0,4 + r)^2 \quad (\text{III.5})$$

III.12. Resolviendo para S, se obtiene:

$$\text{S} = [(\text{IT} \times \text{FT}_f) / (100 \times \text{TDR})]^{1/2} (1,0 + r) - (r + 0,4) \quad (\text{III.6})$$

III.13. El factor de transmisión (FT_f) varía según la energía de la radiación que se emite desde el bulto y la construcción del piso de la aeronave. Los factores de transmisión habituales están comprendidos entre 0,7 y 1,0. Las combinaciones del IT, el factor de transmisión y el tamaño del bulto que se indican en el cuadro III.1 de la presente guía de seguridad se seleccionaron como modelos conservadores aunque realistas.

III.14. La tasa de dosis de referencia (TDR) se determina a partir de las ecuaciones (III.1, III.2). Se supone que el FTR es 1 de 10 [III.4]. Se calcula que los viajeros habituales podrían volar 500 h cada año; por lo tanto, se entiende que el PAMV de la persona representativa equivale a 500 h/año. Así, de la ecuación (III.1) se obtiene:

$$\text{TAME} = (500 \text{ h/año}) \times (0,1) = 50 \text{ h/año} \quad (\text{III.7})$$

CUADRO III.1. FACTORES DE TRANSMISIÓN

Índice de transporte (IT)	Factor de transmisión (FT_f)	Radio del bulto (r) (m)
0 a 1,0	1,0	0,05
1,1 a 2,0	0,8	0,1
2,1 a 50	0,7	0,4

III.15. El VD aplicable a un pasajero, según el párrafo 562 b) del Reglamento de Transporte, es de 1 mSv/año y, en consecuencia, la TDR aplicable, según la ecuación (III.2), es:

$$TDR = (1 \text{ mSv/año}) / (50 \text{ h/año}) = 0,02 \text{ mSv/h} \quad (\text{III.8})$$

III.16. En el caso de la estiba debajo de la cubierta principal de las aeronaves de pasajeros, la exposición de los pilotos debería ser mínima debido a la ubicación de la cabina en relación con las zonas de carga.

III.17. Con estas hipótesis se utiliza la ecuación (III.6) para calcular las distancias de separación indicadas en la segunda columna del cuadro III.2 de la presente guía de seguridad. También se muestran, con fines comparativos, los valores de separación utilizados en las Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea de la OACI [III.5]. Por conveniencia práctica, estos valores se redondean frecuentemente para aplicarlos en los reglamentos de las organizaciones internacionales de transporte.

ESTIBA DE BULTOS EN GRUPOS MÚLTIPLES DEBAJO DE LA CUBIERTA PRINCIPAL DE AERONAVES DE PASAJEROS

III.18. Cabe señalar que en la mayoría de las aeronaves puede obtenerse la distancia de separación vertical calculada de 1,05 m para un único bulto o grupo de bultos con un IT de 5, pero en otras muchas aeronaves sería imposible alcanzar una distancia de separación vertical mayor de 1,6 m. Esto limitaría el IT total de un grupo de bultos que pueda ubicarse en una aeronave de pasajeros. Para aumentar el IT total que puede ser transportado en una aeronave de pasajeros, sería necesario separar los bultos o grupos de bultos dentro de la bodega de carga de la aeronave. En la figura III.2 se ilustra una configuración de cinco grupos de bultos, cada uno con un valor de IT total diferente y con la misma distancia de espaciado S' entre los grupos. La tasa de dosis más alta para los pasajeros se encontraría en el asiento ubicado directamente encima del grupo central de bultos.

III.19. Para una configuración semejante a la que se muestra en la figura III.2, aplicando la ley de la inversa del cuadrado se obtiene:

$$TDR = FT_f \sum_{i=1}^5 (IT_i / 100) (1,0 + r_i)^2 / (DMR_i)^2 \quad (\text{III.9})$$

CUADRO III.2. VARIACIÓN DE LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE TRANSPORTE DE UN ÚNICO GRUPO DE BULTOS ESTIBADO DEBAJO DE LA CUBIERTA PRINCIPAL DE UNA AERONAVE DE PASAJEROS

Total de índices de transporte (IT) para los bultos del grupo	Distancia de separación vertical (desde la parte superior del grupo de bultos hasta el piso de la cubierta principal (m))	
	Calculado en el presente apéndice ^a	En las Instrucciones Técnicas de la OACI de 2017-2018 ^b
1,0	0,29	0,30
2,0	0,48	0,50
3,0	0,63	0,70
4,0	0,86	0,85
5,0	1,05	1,00
6,0	1,23	1,15
7,0	1,39	1,30
8,0	1,54	1,45
9,0	1,68	1,55
10,0	1,82	1,65

^a Calculado aplicando la ecuación (III.6) y las hipótesis expuestas en el presente apéndice.

^b Referencia [III.5].

III.20. Si se supone que:

$$IT_i = 4, i = 1 \text{ a } 5$$

$$ri = 0,4 \text{ m}, i = 1 \text{ a } 5$$

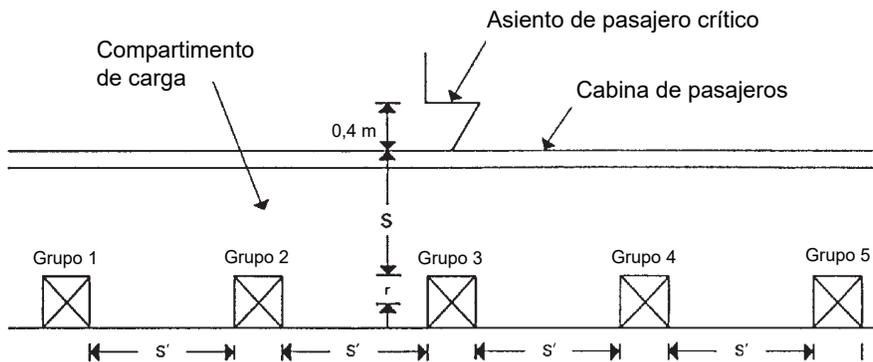


Fig. III.2. Configuración típica de pasajeros y carga especial en aeronaves de pasajeros utilizada para determinar la distancia de separación S y la distancia de espaciado S'

$$FT_f = 0,7$$

Entonces $TDR = 0,02$ mSv/h. Cabe señalar que:

$$DMR_1 = DMR_5 = \sqrt{(r + S + 0,4)^2 + (4r + 2S')^2} \quad (III.10)$$

$$DMR_2 = DMR_4 = \sqrt{(r + S + 0,4)^2 + (2r + S')^2} \quad (III.11)$$

$$DMR_3 = r + S + 0,4 \quad (III.12)$$

III.21. Las ecuaciones (III.9) a (III.12) se combinan para obtener una ecuación con dos incógnitas, S y S' . Diversas combinaciones de S y S' posibilitarían que una remesa de bultos que tuviera un IT total de 20 se transportara con una distancia de separación S inferior a 2,9 m. Por ejemplo, la colocación de los cinco grupos, cada uno con un IT total de 4, como se observa en la figura III.2, a una distancia de separación S de 1,6 m con una distancia de espaciado S' de 2,11 m produciría una tasa de dosis máxima a la altura del asiento de 0,02 mSv/h. Así, varias combinaciones de separación y espaciado controlarían con seguridad la exposición a la radiación de los pasajeros en relación con el IT de remesas grandes.

ESTIBA EN LA CUBIERTA PRINCIPAL DE AERONAVES COMBI O DE CARGA

III.22. Para esta situación se utilizan todos los parámetros previamente supuestos, excepto si se supone que el FT_w (factor de transmisión de la pared de un compartimento ocupado) es superior o igual a 0,8.

III.23. Para la tripulación se establecen las siguientes hipótesis⁴:

$$PAMV = 1000 \text{ h/año}$$

$$FTR = 1/4$$

$$TAME = (1000 \text{ h/año}) \times (1/4) = 250 \text{ h/año}$$

$$VD = 5 \text{ mSv/año (según el párr. 562 a) del Reglamento de Transporte)}$$

$$TDR = (5 \text{ mSv/año})/(250 \text{ h/año}) = 0,02 \text{ mSv/h}$$

III.24. En el presente caso también se han aplicado los valores PAMV y TAME que se utilizaron para los pasajeros en la aeronave de pasajeros. Con estas hipótesis, los cálculos correspondientes a los pasajeros en aeronaves combi y para la tripulación en aeronaves de carga darán las mismas distancias de separación.

III.25. En la figura III.3 se representa la situación correspondiente a aeronaves combi o de carga. La distancia horizontal mínima entre el respaldo del asiento de una persona sentada y la pared interior del compartimento ocupado también se supone que sea de 0,4 m. Probablemente, este sea un valor conservador porque si la carga está ubicada delante, los pies del pasajero se situarán contra la mampara divisoria; y si la carga está situada detrás, lo normal es que entre la mampara y el asiento posterior haya instrumentos, una cocina de a bordo, aseos o, por lo menos, el equipaje o el espacio necesario para reclinar el asiento. En este caso se aplica la ecuación (III.3) para la DMR, y S puede obtenerse como:

$$S = [(IT \times FT_w)/(100 \times TDR)]^{1/2} (1 + r) - (r + 0,4) \quad (\text{III.13})$$

III.26. Las distancias de separación calculadas para las aeronaves combi y de carga se indican en el cuadro III.3 de la presente guía de seguridad.

⁴ Los valores de PMAV y de FTR que se suponen en este caso para los miembros de la tripulación no se han verificado en relación con situaciones reales de vuelo.

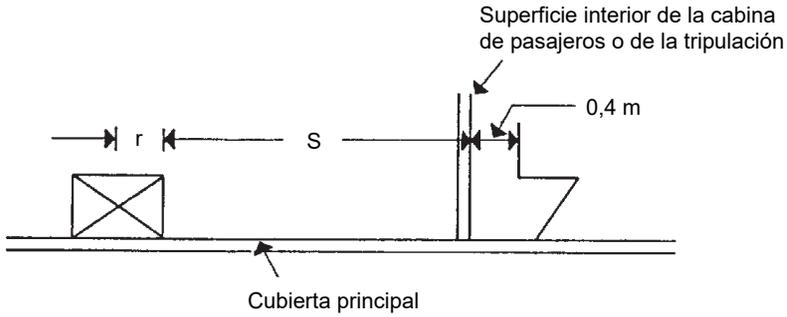


Fig. III.3. Configuración característica de la estiba en la cubierta principal de una aeronave combi o de carga

CUADRO III.3 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE TRANSPORTE PARA LA ESTIBA EN LA CUBIERTA PRINCIPAL DE AERONAVES COMBI O DE CARGA

Total de IT para bultos del grupo	Distancia de separación horizontal (desde la cara anterior del grupo de bultos hasta la pared interior del compartimento ocupado (m))
1,0	0,29
2,0	0,48
5,0	1,18
10,0	2,00
20,0	3,16
30,0	4,05
40,0	4,80
50,0	5,46
100,0	8,05
150,0	10,04

CUADRO III.3 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE TRANSPORTE PARA LA ESTIBA EN LA CUBIERTA PRINCIPAL DE AERONAVES COMBI O DE CARGA (cont.)

Total de IT para bultos del grupo	Distancia de separación horizontal (desde la cara anterior del grupo de bultos hasta la pared interior del compartimento ocupado (m))
200,0	11,72

REFERENCIAS DEL APÉNDICE III

- [III.1] WILSON, C.K., The air transport of radioactive materials, *Radiat. Prot. Dosim.* 48 1 (1993) 129–133.
- [III.2] GIBSON, R., *The Safe Transport of Radioactive Materials*, Pergamon Press, Oxford and New York (1966).
- [III.3] UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION, *Recommendations for Revising Regulations Governing the Transportation of Radioactive Material in Passenger Aircraft* (July 1994) (available at the Nuclear Regulatory Commission’s Public Document Room, Washington, DC).
- [III.4] GELDER, R., *Radiological Impact of the Normal Transport of Radioactive Materials by Air*, Rep. NRPB M219, National Radiological Protection Board, Chilton, UK (1990).
- [III.5] ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, *Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea*, edición de 2021-2022, ICAO, Montreal, 2020.

Apéndice IV

ESTIBA Y SUJECIÓN DE BULTOS DURANTE EL TRANSPORTE

INTRODUCCIÓN

IV.1. Según los requisitos del Reglamento de Transporte, para que los bultos que contienen materiales radiactivos se transporten con seguridad deberían tener restringido el movimiento dentro o sobre el medio de transporte durante la operación de transporte. Los requisitos pertinentes del Reglamento de Transporte son aplicables como se indica a continuación:

- Párrafo 564: asegurar la estiba de las remesas, lo que se puede garantizar por medio de una variedad de sistemas de sujeción (véase infra).
- Párrafo 607: el bulto se diseñará considerando debidamente sus sistemas de sujeción respecto de cada una de las modalidades de transporte que se prevea utilizar.
- Párrafo 612: los sistemas de sujeción que no forman parte del bulto no deberán menoscabar su seguridad.
- Párrafo 613: los componentes del bulto, su contenido y sus respectivos sistemas de sujeción se diseñarán de forma que la integridad del bulto no se vea afectada en las condiciones de transporte rutinarias.
- Párrafo 638: en las condiciones de transporte normales o en las de accidente la integridad del bulto no deberá verse afectada a consecuencia de las tensiones que se apliquen al bulto o a sus puntos de enganche por los elementos tensores u otros sistemas de sujeción, tanto en condiciones de transporte normales como en condiciones de accidente durante el transporte.

Algunos aspectos referentes a estos párrafos se indican en los respectivos párrafos de consulta que figuran en el texto principal de esta publicación, si bien en el presente apéndice y en las referencias [IV.1 a IV.36] se recogen detalles suplementarios.

IV.2. En el presente apéndice se brindan orientaciones para considerar los efectos de las cargas del sistema de sujeción aplicadas al bulto en las condiciones de transporte rutinarias. Se describen posibles métodos para demostrar el cumplimiento de los requisitos de diseño del bulto. El bulto incluirá los puntos de enganche, pero no los demás componentes del sistema de sujeción. Otros componentes del sistema de sujeción, que no forman parte del bulto, se abordan en los requisitos nacionales y los relativos a las modalidades.

IV.3. Las fuerzas inerciales que actúan sobre los bultos en las condiciones de transporte rutinarias (véase el párr. 106 del Reglamento de Transporte) pueden deberse a distintos factores, por ejemplo:

- a) irregularidades en la carretera o la vía de ferrocarril;
- b) vibraciones;
- c) aceleraciones lineales y frenado;
- d) cambios de dirección;
- e) maniobras ferroviarias (cuando están permitidas);
- f) movimientos de una embarcación en mares agitados, y
- g) turbulencias en el transporte aéreo.

Las fuerzas inerciales que actúan sobre los bultos en las siguientes circunstancias no se consideran condiciones de transporte rutinarias y no se abordan en este apéndice:

- a) impactos secundarios con vehículos y obstáculos;
- b) maniobras ferroviarias (cuando no están permitidas);
- c) mares en condiciones muy excepcionales, y
- d) aterrizajes de emergencia en el transporte aéreo.

IV.4. Los sistemas de sujeción de bultos tienen que diseñarse para que funcionen de manera previsible en todas las condiciones de transporte. No obstante, en las condiciones normales o de accidente durante el transporte (véase el párr. 106 del Reglamento de Transporte), está permitido, y quizás se exija como parte del diseño, que el bulto se separe del medio de transporte mediante la rotura o liberación de su sistema de sujeción con el fin de preservar la integridad del bulto.

DEFINICIONES Y OBSERVACIONES GENERALES

IV.5. Los sistemas de sujeción típicos pueden consistir, entre otros elementos, en tensores o eslingas, redes, muñones en el bulto fijados a soportes en un almacén de transporte o en el medio de transporte (o bridas atornilladas a estos), cierres giratorios ISO, calzos o soportes. Algunos de estos métodos de sujeción pueden combinarse. La figura IV.1 muestra ejemplos de componentes de los sistemas de sujeción.

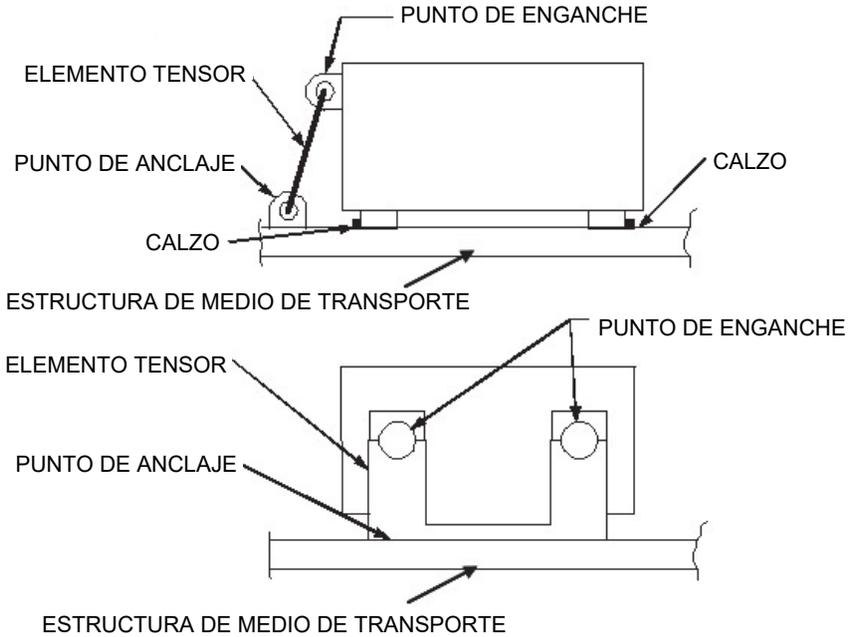


Fig. IV.1. Componentes del sistema de sujeción

IV.6. A los efectos de las orientaciones del presente apéndice, se aplicarán las siguientes definiciones:

Calzo: Accesorio fijado al medio de transporte para resistir las fuerzas inerciales horizontales.

Elemento de sujeción: Dispositivo mecánico, como material de estiba, una abrazadera, un bloque, un accesorio sujetador, un soporte o una red para elevar la carga, utilizado como componente de un sistema de sujeción.

Elemento tensor: Un tipo de elemento de sujeción (por ejemplo, un cable metálico, una cadena o una barra de acoplamiento) que conecta uno o más puntos de enganche a uno o más puntos de anclaje.

Estiba:	Colocación en el interior o en la superficie de un medio de transporte de un bulto de material radiactivo en relación con otras cargas (tanto radiactivas como no radiactivas).
Material de estiba:	Material suelto utilizado para proteger la carga en la bodega de un barco o como relleno en un contenedor de transporte.
Punto de anclaje:	Accesorio del medio de transporte al que se fija un elemento de sujeción.
Punto de enganche:	Accesorio del bulto al que se fija un elemento de sujeción.
Sistema de amarre:	Un tipo de sistema de sujeción que consta de uno o más puntos de enganche, elementos tensores y puntos de anclaje.
Sistema de sujeción:	Conjunto o disposición de elementos de sujeción, puntos de enganche y puntos de anclaje, según proceda, diseñados para la sujeción de bultos.
Soporte:	Armazón instalado en un medio de transporte para transportar bultos carentes de protección.
Sujeción:	El uso de dispositivos mecánicos para sujetar un bulto y evitar que se desplace en el interior o en la superficie del medio de transporte durante el transporte rutinario.

IV.7. Los puntos de enganche forman parte integrante del bulto. Todas las demás partes del sistema de sujeción, como los elementos tensores (por ejemplo, ataduras, cuerdas, cadenas o correas), los puntos de anclaje y los calzos, no forman parte del bulto.

IV.8. Los métodos de sujeción en las condiciones de transporte rutinarias no deberían producir daños en el bulto o incluso sobretensión en sus componentes o en sus puntos de enganche que superen el límite elástico de los materiales constitutivos.

IV.9. El remitente y el transportista tienen la responsabilidad de garantizar que el transporte del bulto se realice de conformidad con los requisitos reglamentarios

y los relativos a las modalidades de transporte. Las personas encargadas de las operaciones de amarre deberían estar debidamente capacitadas y calificadas en proporción con sus responsabilidades. Debido a su diseño, algunos elementos de amarre deben tensionarse previamente para evitar que se aflojen durante el uso. En este caso, la tensión en los elementos tensores debería mantenerse durante todo el trayecto (por ejemplo, comprobando y ajustando los accesorios según sea necesario). Debería tomarse en consideración que los accesorios podrían aflojarse por las vibraciones durante el viaje (por ejemplo, podrían utilizarse acoplamientos resistentes a las vibraciones). Con frecuencia, los bultos más grandes y pesados se sujetan al medio de transporte mediante un método de sujeción específico. Estos elementos de sujeción deberían ser compatibles con el diseño del bulto. Deberían elaborarse instrucciones de funcionamiento, manipulación y mantenimiento para el uso de cualquier elemento de sujeción específico.

IV.10. La capacitación de las personas encargadas de las operaciones de sujeción de bultos de material radiactivo debería ser acorde a sus tareas. Los programas de capacitación típicos deberían comprender:

- las responsabilidades legales de las partes interesadas (por ejemplo, remitentes, transportistas) en las operaciones de sujeción con respecto a las modalidades de transporte previstas;
- los peligros específicos que presentan los bultos de material radiactivo en lo que atañe a las operaciones de sujeción (véase el párr. 311 del Reglamento de Transporte);
- las fuerzas inducidas en los bultos por el transporte en relación con las modalidades de transporte previstas;
- los requisitos para la sujeción de bultos específicos de cada modalidad de transporte prevista;
- la descripción del medio de transporte y del equipo (por ejemplo, puntos de anclaje) con respecto a las modalidades de transporte previstas;
- los métodos de sujeción, el equipo conexo, el diseño y la justificación de la sujeción de un bulto de conformidad con las normas aplicables;
- las instrucciones de estiba;
- las comprobaciones y los controles de los elementos de sujeción, los puntos de enganche y los puntos de anclaje del bulto y del medio de transporte, respectivamente, con antelación a las operaciones de sujeción, así como los criterios de aceptación conexos;
- la aplicación de los distintos métodos de sujeción y aseguramiento (aplicación práctica), y
- la verificación de la correcta estiba antes del transporte y en el curso de este.

IV.11. El presente apéndice no se centra en la manipulación de cargas. No obstante, cuando un punto de enganche se utiliza tanto para izar como para sujetar el bulto, las cargas de la operación de izado, incluidas las cargas de izado brusco (véase el párr. 608 del Reglamento de Transporte), deberían tenerse en cuenta en el diseño.

VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO MEDIANTE ENSAYOS

IV.12. El análisis estructural de los puntos de enganche en condiciones de transporte rutinarias debería incluir el análisis de resistencia mecánica y el análisis de fatiga de los componentes pertinentes. De ser necesario, deberían considerarse cuestiones como la fractura frágil y la estabilidad estructural. Habría que tener en cuenta el intervalo de temperaturas de los puntos de enganche en condiciones de transporte rutinarias.

IV.13. El análisis estructural de los puntos de enganche generalmente puede realizarse por métodos analíticos (teoría de vigas) o numéricos (análisis de elementos finitos). Los métodos numéricos permiten obtener resultados más detallados de las tensiones y deformaciones en el caso de estructuras complejas. La exactitud del análisis de elementos finitos depende de la exactitud de los datos de entrada (mallas, condiciones de contorno, comportamiento y propiedades de los materiales). Así pues, el análisis de elementos finitos debería verificarse para lograr que el resultado ofrezca la confianza necesaria en el producto. La interpretación de estos resultados detallados depende de la técnica de evaluación (por ejemplo, la tensión nominal, la tensión local o la linealización de la tensión). Los métodos de análisis, las técnicas de evaluación y los criterios de diseño deberían ser aceptables para las autoridades competentes pertinentes. En las referencias [IV.25, IV.28, IV.30] se ofrecen ejemplos de distintos enfoques.

IV.14. Debido a las diferencias en infraestructuras y prácticas de transporte, es necesario consultar a las autoridades nacionales competentes, así como las normas y los reglamentos nacionales e internacionales sobre las modalidades de transporte, para confirmar las cargas obligatorias o recomendadas de los bultos, además de las condiciones especiales de transporte que deberían tomarse en consideración en el diseño de los bultos. Estas cargas suelen especificarse con valores de aceleración que representan los efectos inerciales del bulto para el análisis estructural y suelen aplicarse en el centro de gravedad del bulto como fuerzas cuasiestáticas equivalentes. Los datos de los casos de carga pueden variar en función del tipo de análisis estructural (análisis de resistencia mecánica o análisis de fatiga).

IV.15. Si el diseño tiene más de dos puntos de enganche, habría que tener debidamente en cuenta la repartición de la carga entre ellos.

IV.16. Para el análisis de resistencia mecánica de los puntos de enganche, en el cuadro IV.1 de la presente guía de seguridad se recogen los valores de aceleración que representan las condiciones de transporte rutinarias. Los valores que figuran en el cuadro IV.1 se derivan de diferentes normas y directrices nacionales e internacionales (refs. [IV.1 a IV.3, IV.6, IV.8, IV.14, IV.27, IV.29, IV.31]) y se ha aplicado un factor de 1,25, lo cual aumenta la confianza en que no se superará el intervalo de carga propuesto. Aunque el uso de estos valores de aceleración suele ser apropiado, otros valores podrían ser pertinentes para el transporte terrestre en algunas instalaciones de tránsito (por ejemplo, la manipulación de bultos en un aeropuerto). Si en el análisis se utiliza un código de diseño específico, tal vez sea necesario un factor de seguridad adicional coherente con el código aplicado. Si no se utiliza un código de diseño específico, el factor de seguridad debería tomarse en consideración y justificarse en el análisis (por ejemplo, véase la ref. [IV.36]). Las fuerzas impuestas al bulto se determinan multiplicando los valores de aceleración que figuran en el cuadro IV.1 por la masa del bulto y se aplican en su centro de gravedad. El análisis debería considerar, en primer lugar, la aplicación de cada valor de aceleración direccional por separado y posteriormente todas las combinaciones correspondientes a cada línea del cuadro IV.1 para la modalidad de transporte correspondiente.

CUADRO IV.1. VALORES DE ACELERACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA

Modalidad	Longitudinal	Lateral	Vertical ^a
Por carretera	1 g	-	1 g hacia abajo ± 0,3 g ^b
	-	0,7 g	1 g hacia abajo ± 0,3 g ^b
Por ferrocarril	1,3 g/5 g ^c	-	1 g hacia abajo ± 0,4 g
	-	0,7 g	1 g hacia abajo ± 0,4 g

CUADRO IV.1. VALORES DE ACELERACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA (cont.)

Modalidad	Longitudinal	Lateral	Vertical ^a
Por vía marítima/ acuática	0,5 g	-	1 g hacia abajo ± 1 g
	0,3 g	1 g	1 g hacia abajo ± 0,6 g
Por vía aérea	1,3 g	-	1 g hacia abajo
	-	1,3 g	1 g hacia abajo
	-	-	2,5 g hacia arriba, 2,5 g hacia abajo

^a Se incluye el efecto de la gravedad.

^b Para los bultos transportados en vehículos de menos de 3500 kg, deberían considerarse valores de aceleración más elevados (ref. [IV.29]). Actualmente no se puede proponer ningún valor preciso debido a la falta de datos.

^c Si los vagones están dotados de amortiguadores de choque de largo recorrido o si se excluyen explícitamente las maniobras por lanzamiento o lomo de asno, debería utilizarse un valor de 1,3 g.

IV.17. El diseñador del bulto es responsable de garantizar que los puntos de enganche del bulto se diseñen de conformidad con los valores aceptables para las autoridades competentes pertinentes y definidos en los requisitos relativos a las modalidades. En el cuadro IV.2 de la presente guía de seguridad figuran valores de aceleración para aplicaciones específicas. En algunos diseños específicos de bultos ya se han concertado acuerdos con muchas autoridades competentes y organizaciones de transporte modal para que se puedan utilizar diferentes valores de aceleración. En el cuadro IV.2 se presenta un número limitado de esos bultos y en las referencias [IV.1 a IV.36], en particular en las referencias [IV.10 a IV.12], pueden encontrarse otros ejemplos. Los valores de aceleración que figuran en el cuadro IV.2 se han tomado de las referencias citadas y pueden no coincidir con los del cuadro IV.1 de la presente guía de seguridad. Deberían consultarse las referencias originales para obtener aclaraciones cuando sea necesario.

CUADRO IV.2. VALORES DE ACELERACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE BULTOS ESPECÍFICOS

Tipo de bulto	Longitudinal	Lateral	Vertical
Bultos de material fisible y bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M) certificados en los Estados Unidos de América (todas las modalidades de transporte) [IV.7]	10 g	5 g	2 g
Transporte de combustible nuclear irradiado, plutonio y desechos radiactivos de actividad alta (Código CNI) en embarcaciones de navegación marítima [IV.9]	1,5 g	1,5 g	1 g hacia arriba, 2 g hacia abajo
Cisternas portátiles (por carretera, por ferrocarril, por vías de navegación interior y por vía marítima) [IV.32, IV.33]	2 g	2 g	1 g hacia arriba, 2 g hacia abajo

IV.18. Además del análisis de resistencia mecánica, el diseñador del bulto también debería tener en cuenta los efectos de las cargas cíclicas en las condiciones de transporte rutinarias que podrían conducir a un fallo de los componentes del bulto. Para el análisis de fatiga, es preferible diseñar el punto de enganche de manera que tenga una resistencia infinita pero, como alternativa, también es aceptable determinar la longevidad a la fatiga del punto de enganche y controlarlo mientras esté en servicio (por ejemplo, cambiar el componente tras un tiempo de servicio definido). Quizás no sea necesario realizar un análisis de fatiga detallado si el número de ciclos de carga aplicado al punto de enganche no supera un umbral especificado en el código de diseño correspondiente. Los valores de aceleración para el análisis de fatiga [IV.31] representados por vagones de ferrocarril se reproducen en el cuadro IV.3 de la presente guía de seguridad. Estos valores se pueden utilizar si las condiciones y los criterios indicados en la referencia [IV.31] son pertinentes. En la referencia [IV.3] se pueden encontrar otros valores de aceleración para el análisis de fatiga correspondientes a diferentes modalidades de transporte. En las referencias [IV.18, IV.19, IV.22] se indican las mediciones de carga cíclica realizadas durante el transporte. Si los datos de las referencias no son aplicables, el diseñador del bulto debería proporcionar los datos de medición adecuados. Los valores de aceleración, el número de ciclos, los niveles de tensión admisibles y los criterios de diseño aceptables para la evaluación de la fatiga deberían acordarse con las autoridades competentes

pertinentes. En el caso de los puntos de enganche que también se utilizan para el izado, los ciclos de izado deberían incluirse en el análisis de fatiga. El análisis de fatiga no sustituye la inspección y el mantenimiento.

CUADRO IV.3. VALORES DE ACELERACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE FATIGA

Modalidad de transporte	Longitudinal	Lateral	Vertical
Por ferrocarril	± 0,3 g	± 0,4 g	1 g hacia abajo ± 0,3 g

IV.19. Si el bulto puede sujetarse al medio de transporte en más de una orientación, en el análisis deberían utilizarse los valores de aceleración en las direcciones apropiadas (por ejemplo, la aceleración longitudinal podría pasar a ser lateral).

DEMOSTRACIÓN DEL CUMPLIMIENTO MEDIANTE ENSAYOS

IV.20. Cuando se utilicen los datos medidos por sensores de aceleración, la frecuencia de corte debería considerarse en función de las cargas cuasiestáticas equivalentes. La frecuencia de corte debería seleccionarse según la masa, la forma y las dimensiones del bulto y el medio de transporte en cuestión. Como primera consideración, para el transporte terrestre de un bulto de una masa de 100 toneladas, la frecuencia de corte podría ser del orden de 10 a 20 Hz [IV.8]. Para bultos más pequeños, la frecuencia de corte indicada anteriormente debería multiplicarse por $(100/m)^{1/3}$, donde m es la masa del bulto en toneladas. Esta primera consideración debería verificarse.

REFERENCIAS DEL APÉNDICE IV

- [IV.1] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, *Código de prácticas OMI/OIT/CEPE-Naciones Unidas sobre la arrumazón de las unidades de transporte* (Código CTU), OMI, Londres, 2014.

- [IV.2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Air cargo equipment – Restraint straps – Part 2: Utilization guidelines and lashing calculations, ISO 16049-2:2013 (2013).
- [IV.3] TRANSPORT CONTAINER STANDARDISATION COMMITTEE, Transport of Radioactive Material Code of Practice, Guide to the Securing/Retention of Radioactive Material Payloads and Packages During Transport, Rep. TCSC 1006 (2014).
- [IV.4] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Fuel Shipping Containers Tie-Down for Truck Transport, RTD Standard F8-11T, USDOE, Washington, DC (1975).
- [IV.5] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Structure Analysis of Shipping Casks, Vol. 7, Cask Tie-down Design Manual, Technical Report, Rep. ORNL-TM-1312, Oak Ridge Natl Lab., TN (1969).
- [IV.6] NATIONAL TRANSPORT COMMISSION & ROADS & TRAFFIC AUTHORITY NSW - LOAD RESTRAINT GUIDE - Guidelines and Performance Standards for the Safe Carriage of Loads on Road Vehicles – Second Edition – 2004.
- [IV.7] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Lifting and Tie-down Standards for All Packages, 10 CFR 71.45, US Government Printing Office, Washington, DC (2014).
- [IV.8] UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER, Railway Technical Publications, Appendix II, Vol. 1 — Loading Guidelines, UIC, Paris (2015).
- [IV.9] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on Board Ships (INF Code), Resolution MSC.178(79), IMO, London (2009).
- [IV.10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Series 1 Freight Containers — Specification and Testing — Part 3: Tank Containers for Liquids, Gases, and Pressurized Dry Bulk, ISO 1496-3:1995, ISO, Geneva (1995) and subsequent Amendment 1:2006.
- [IV.11] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VDI 2700 Part 2, Securing of loads on road vehicles – Calculation of tie-down forces – Fundamentals, Beuth Verlag, Berlin (2014).
- [IV.12] UNITED STATES OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER, Title 49, US Code of Federal Regulations, Part 393.100-102, US Government Printing Office, Washington, DC (1990).
- [IV.13] DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS, Guide to an Application for UK Competent Authority Approval for Radioactive Material in Transport, DETR/RMTD/0003 (2001).
- [IV.14] UNITED NATIONS, Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations, Twenty-second revised edition, ST/SG/AC.10/1/Rev. 22, 2 vols, UN, New York and Geneva (2021).
- [IV.15] SHAPPERT, L.B., RATLEDGE, J.E., MOORE, R.S., DORSEY, E.A., “Computed calculation of wire rope tiedown designs for radioactive material packages”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 95 (Proc. Int. Symp. Las Vegas, 1995), United States Department of Energy, Washington, DC (1995).

- [IV.16] GWINN, K.W., GLASS, R.E., EDWARDS, K.R., Over-the-Road Tests of Nuclear Materials Package Response to Normal Environments, Rep. SAND 91-0079, Sandia Natl Labs, Albuquerque, NM (1991).
- [IV.17] TRANSPORT CONTAINER STANDARDISATION COMMITTEE, Tie-down Systems Proofs of Design Calculations, Rep. TCSP(93)P1072 (1994).
- [IV.18] CORY, A.R., Flask Tie-down Design and Experience of Monitoring Forces, RAMTRANS Vol. 2 No. 1–3 pp. 15–22 (1991).
- [IV.19] PUJET, D., MALESYS, P., Measurement of the Acceleration Undergone by the Trunnions of Irradiated Fuel Transport Flasks During Normal Use, Proceedings of PATRAM 1989, Washington, USA (1989).
- [IV.20] RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD, Guidance on the Structural Design of Rail Wagons including Rail Tank Wagons, GM/GN2688 Issue 1, RSSB, London (2010).
- [IV.21] DEPARTMENT OF TRANSPORT, Safety of Loads on Vehicles, HMSO, London (2002).
- [IV.22] DIXON, P., Package Tie-downs — A Programme of Measurement and Assessment, RAMTRANS Vol 8 Nos 3-4, pp. 339-344 (1997), Nuclear Technology Publishing.
- [IV.23] GILLES, P., et al., Stowing of Packages Containing Radioactive Materials During their Road Transportation with Trucks for Loads up to 38 Tonnes, Rep. TNB 8601-02, Transnubel SA, Brussels (1985).
- [IV.24] DRAULANS, J., et al., Stowing of Packages Containing Radioactive Materials on Conveyances, Rep. N/Ref:23.906/85D-JoD/IP, Transnubel SA, Brussels (1985).
- [IV.25] KERntechnischer Ausschuss, Load Attaching Points on Loads in Nuclear Power Plants, KTA Safety Standard KTA 3905 (2012-11), KTA Geschäftsstelle, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Germany (2012).
- [IV.26] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Series 1 Freight Containers — Specification and Testing — Part 1: General Cargo Containers for General Purposes, ISO 1496-1:2013/AMD 1:2016, ISO, Geneva (2013).
- [IV.27] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, IMO/ILO/UNECE Guidelines for Packing of Cargo Transport Units (CTUs), IMDG Code Supplement (Amdt. 33 06), IMO, London (2006).
- [IV.28] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Nuclear Energy — Fuel Technology — Trunnion Systems for Packages Used to Transport Radioactive Material, ISO 10276:2019, ISO, Geneva (2019).
- [IV.29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Load restraining on road vehicles – Safety — Part 1: Calculation of securing forces, DIN EN 12195-1:2021-01, DIN, Berlin (2011).
- [IV.30] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG, Guideline on Design Assessment of Lid Systems and Load Attachment Systems of Transport Packages for Radioactive Materials, BAM-GGR 012 Edition 2020-12, BAM, Berlin (2020).
- [IV.31] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Railway applications — Structural requirements of railway vehicle bodies — Part 2: Freight wagons, EN 12663-2:2010-07, CEN, Brussels (2010).

- [IV.32] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, COMITÉ DE TRANSPORTES INTERIORES, *Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)*, edición de 2021, CEPE, Nueva York y Ginebra (2020).
- [IV.33] INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION FOR INTERNATIONAL CARRIAGE BY RAIL (OTIF), Regulations Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID), 2021 Edition, OTIF, Bern (2020).
- [IV.34] STERTHAUS, J.; BALLHEIMER, V.; WILLE, F.: Analysis Methodology and Assessment Criteria for Bolted Trunnion Systems of Type B Packages for Radioactive Materials. Proceedings of PATRAM 2010, London, UK (2010).
- [IV.35] STERTHAUS, J.; BALLHEIMER, V.; KUSCHKE C.; WILLE, F.: Numerical Analysis of Bolted Trunnion Systems of Packages for Radioactive Materials. Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Division Conference (PVP2012), Toronto, Canada (2012).
- [IV.36] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Boiler and Pressure Vessel Code, ASME, New York (2015).

Apéndice V

DIRECTRICES PARA EL DISEÑO SEGURO DE LOS BULTOS CONTRA LA FRACTURA FRÁGIL

INTRODUCCIÓN

V.1. El presente apéndice se basa en un texto publicado en el capítulo 2 del documento IAEA-TECDOC-717 [V.1] que fue revisado en una serie de reuniones de consultores posteriores. La publicación contiene información adicional sobre el estudio de la resistencia a la fractura basado en la evaluación del diseño mediante la mecánica de fractura.

V.2. Los bultos para el transporte de materiales radiactivos tienen que satisfacer lo estipulado en el Reglamento de Transporte. Los bultos tienen que cumplir requisitos rigurosos para limitar la tasa de dosis, asegurar la contención de los materiales radiactivos y prevenir la criticidad nuclear. El cumplimiento de estos requisitos debe mantenerse en condiciones de accidente muy grave. Así, en el diseño de tales bultos tiene que prestarse especial atención a la prevención de todos los modos de fallo del bulto que podrían dar lugar al incumplimiento de estos requisitos. Los requisitos que figuran en el párrafo 701 d) del Reglamento de Transporte son siempre aplicables (es decir, los procedimientos y parámetros de cálculo deben ser fiables o conservadores).

V.3 En el presente apéndice se formulan orientaciones para evaluar los diseños y prevenir la fractura frágil de componentes estructurales en los bultos de materiales radiactivos. Se examinan tres métodos:

- Método 1: evaluación y utilización de materiales que siguen siendo dúctiles y resistentes en todo el intervalo requerido de temperaturas de servicio, incluidas las inferiores a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Método 2: evaluación de aceros ferríticos con el empleo de mediciones de temperatura de transición de ductilidad nula (TTDN) correlacionadas con la resistencia a la fractura.
- Método 3: estudio de la resistencia a la fractura basado en una evaluación del diseño mediante la mecánica de fractura.

V.4. El método 1 se incluye para abarcar el concepto por el que se procura asegurar que, ante cualquier condición de carga susceptible de causar un fallo, ese fallo siempre entrañe un alto grado de plasticidad o rotura dúctil, y nunca ocurra

la fractura frágil inestable. El método 2 tiene por objeto lograr la coherencia con la práctica generalmente aceptada para evaluar los aceros ferríticos. El método 3 constituye un método de evaluación de la fractura frágil adecuado para una amplia gama de materiales. Estas orientaciones no impiden la aplicación de otros métodos debidamente justificados por el diseñador del bulto y aceptados por la autoridad competente.

CONSIDERACIÓN GENERAL DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN

V.5. Se sabe que muchos materiales son menos dúctiles a bajas temperaturas, o a altas tasas de carga, que a temperaturas moderadas y en condiciones de carga estáticas. Por ejemplo, la capacidad de los aceros ferríticos para absorber energía cuando están sometidos a una fuerte tensión, con defectos parecidos a fisuras, presenta acusados cambios en un estrecho intervalo de temperaturas. La tenacidad a la fractura en los aceros ferríticos cambia notablemente en el intervalo de temperaturas de transición. La tenacidad aumenta rápidamente en un intervalo relativamente estrecho de temperaturas desde un “peldaño inferior” o región de deformación frágil plana con fractura por clivaje, pasando por una región elastoplástica, hasta un “peldaño superior” o región con fractura por rotura dúctil y plasticidad, donde la tenacidad por lo general es suficientemente alta para imposibilitar la fractura frágil. La temperatura a la cual la tenacidad comienza a incrementarse rápidamente al aumentar la temperatura coincide con la TTDN. Este tipo de comportamiento de la temperatura de transición ocurre solamente en presencia de defectos parecidos a fisuras, que producen un estado de tensión triaxial, y cuando los materiales muestran un aumento del límite elástico con la disminución de la temperatura. Los mismos materiales demuestran a menudo un incremento del límite elástico con el aumento de la tasa de carga y, por lo tanto, la temperatura de transición también puede depender de la tasa de carga. En todos estos casos, cuando el material está sin lugar a dudas en un estado frágil, la carga de tracción sobre el material puede originar la propagación inestable de la fisura, con la ulterior fractura frágil, incluso cuando las tensiones nominales son menores que el límite elástico del material. Pequeños defectos parecidos a fisuras en el material pueden ser suficientes para el inicio de este crecimiento inestable.

V.6. Los criterios para prevenir el inicio de la fractura y la posible propagación inestable de la fractura en componentes de aceros ferríticos, como vasijas de presión y tuberías utilizadas en las industrias de la energía, el petróleo y los procesos químicos, están bien desarrollados y se han codificado en diversas

normas nacionales e internacionales. Estos criterios pueden clasificarse dentro de dos categorías generales:

- i) Criterios basados solamente en requisitos de ensayos de materiales. Generalmente están destinados a demostrar que alguna propiedad del material (por ejemplo, la energía de impacto), a través de experiencias anteriores o mediante ensayos de prototipos a escala real, ha registrado un comportamiento satisfactorio, o puede correlacionarse con la tenacidad a la fractura para proporcionar un margen adecuado con respecto a la fractura frágil.
- ii) Criterios basados en una combinación de ensayos de materiales, cálculos de tensiones aplicadas y normas de trabajo/inspección. Están concebidos para demostrar que existe suficiente margen entre el diseño calculado y la respuesta medida del material.

V.7. Los métodos 1 y 2 del párrafo V.3 se basan en los criterios del párrafo V.6 i), mientras que el método 3 sigue el enfoque de la mecánica básica de fractura o las ampliaciones de la mecánica de fractura elastoplástica que se describen más adelante. Aunque puede utilizarse la mecánica de fractura elástica lineal a condición de que prevalezcan límites de deformación de pequeña escala, si se produce una deformación mayor deberían utilizarse métodos de mecánica de fractura elastoplástica. Son posibles otros métodos de evaluación. Cualquier enfoque que sugiera el diseñador del bulto debería someterse a la aprobación de la autoridad competente.

Método 1

V.8. La fractura frágil puede producirse de forma repentina, sin previo aviso, y tener consecuencias desastrosas para el embalaje. Por lo tanto, el enfoque del método 1 se basa en el principio de que el embalaje se debería construir con materiales que, cuando se vean sometidos a las condiciones normales y de accidente especificadas en el Reglamento de Transporte, no estén sujetos al fallo frágil antes de que se produzca el fallo dúctil.

V.9. Un ejemplo del método 1 es el uso de aceros inoxidable austeníticos para material de cofres. Estos materiales no presentan un comportamiento de tenacidad a la fractura sensible a la temperatura por encima del intervalo de interés en los diseños de bultos y generalmente tienen buen comportamiento con relación a la ductilidad y tenacidad. Con todo, los aceros austeníticos fundidos no siempre tienen buenas propiedades, y quizás se requiera algún tipo de ensayo mecánico que confirme el comportamiento dúctil y la alta tenacidad a la fractura.

V.10. El método 1 también ofrece la ventaja de no tener que depender de niveles de tensión limitantes, de tamaños de defecto ni de la tenacidad a la fractura frágil, aunque tendrán que aplicarse los procedimientos normales de diseño para el fallo dúctil u otros modos de fallo.

Método 2

V.11. La base para determinar la TTDN es la temperatura más alta a la cual no ocurre la fractura frágil en el material primario de un cordón de soldadura frágil tras sufrir el ensayo estándar por caída libre [V.2]. Esto puede considerarse como el mínimo de la curva de temperatura de transición para la detención de la propagación/agrietamiento o para la iniciación dinámica desde pequeñas fisuras iniciales.

V.12. Ejemplos del uso del enfoque de la TTDN del método 2 son, entre otros, las referencias [V.3 a V.6]. En estos métodos se consideran, por ejemplo, los aceros ferríticos, para los que hay importantes bases de datos que relacionan la energía del impacto (ensayo de Charpy) con la tenacidad a la fractura. En tales casos, la energía del impacto de Charpy puede utilizarse como indicador indirecto de la tenacidad del material. Este método puede utilizarse para una variedad de aceros ferríticos al carbono y al carbonomanganeso de alta calidad. El criterio básico de aceptación que figura en las referencias [V.3 a V.5] es el requisito de una energía mínima de impacto (o expansión lateral) de un ensayo Charpy con muesca en V a una temperatura establecida, aunque la justificación fundamental se basa en los enfoques de la TTDN.

V.13. Otros ejemplos del método 2 se encuentran en las referencias [V.7 y V.8]. En ellos se establecen los niveles de TTDN que deben alcanzarse para los aceros ferríticos, en función del espesor y temperatura de la sección. Requieren una diferencia mínima de temperatura entre la TTDN del material y la temperatura más baja que se ha de considerar para las condiciones de accidente (tomada como $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$) en función del espesor de la sección. Esta diferencia de temperaturas se basa en correlaciones entre la TTDN y la tenacidad a la fractura. Aunque estas guías reglamentarias tratan específicamente de los aceros ferríticos, podría considerarse el mismo enfoque para otros materiales que muestren comportamientos de temperatura de transición y para los cuales pueda demostrarse una correlación entre la TTDN y la resistencia a la fractura. El método de ensayo normalizado que aparece en la referencia [V.9] solo es aplicable a los aceros ferríticos. No hay métodos de ensayo normalizados para medir la TTDN de otros materiales. Sin embargo, existe la posibilidad de utilizar el ensayo dinámico de desgarramiento para obtener la TTDN, o al menos una

indicación de la resistencia al desgarramiento con respecto a otros materiales [V.10]. Este ensayo arrojará valores más rigurosos (conservadores) que los derivados de los ensayos de Charpy.

V.14. En las referencias [V.7 y V.8], se contemplan diversos márgenes de seguridad para diversos tipos de bultos y contenidos y también se tiene en cuenta el comportamiento con respecto a la detención de la fisura de los materiales. Esto se obtiene especificando una TTDN máxima permisible basada en informes técnicos de las referencias [V.11 y V.12] y la ecuación siguiente:

$$\beta = \frac{1}{B} \left(\frac{K_{ID}}{\sigma_{yd}} \right)^2 \quad (V.1)$$

donde

β es un parámetro adimensional;

σ_{yd} es el límite elástico dinámico (ksi);

K_{ID} es la tenacidad dinámica crítica frente a fracturas ($\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$);

B es el espesor de la sección (pulgadas).

V.15. Para los bultos de combustible gastado, de desechos de actividad alta y de plutonio, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos procura obtener suficiente tenacidad a la fractura para prevenir la ampliación de una fisura pasante en el nivel del límite elástico dinámico, lo que representa un criterio de reducción de fisura —con respecto a la ecuación (V.1)— que establece un valor de β no inferior a 1,0. Esto equivale a estipular un tamaño nominal de zona plástica tal que no se prevea que las condiciones de deformación del plano se mantengan, de modo que la tenacidad a la fractura se sitúe hacia la región del peldaño superior dúctil. Para otros bultos del Tipo B(U) o del Tipo B(M), el valor requerido de β no debería ser inferior a 0,6. Esto equivale a estipular que la tenacidad a la fractura esté fuera del peldaño inferior y en la región de transición, en que se prevé que domine el fallo elastoplástico. Para bultos que contengan solamente materiales de baja actividad específica o una actividad inferior a $30A_1$ o $30A_2$, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos está dispuesta a considerar el uso de enfoques de mecánica de fractura elástica lineal para prevenir la iniciación de la fractura. Esto se puede alcanzar estipulando que β no sea inferior a 0,4. En estos casos, para espesores inferiores a 0,1 m, puede considerarse el uso de aceros normalizados de grano fino sin análisis ni ensayos suplementarios. Para todos estos enfoques la tenacidad que se requiera frente a la fractura puede especificarse

por medio de la máxima TTDN. Estos métodos también poseen la ventaja de que no tienen que depender de niveles de tensión limitantes, ni de tamaños de defectos. Sin embargo, también tienen que seguirse aplicando procedimientos de ensayo habituales para el fallo dúctil u otros modos de fallo.

Método 3

V.16. Para el transporte de material radiactivo, los métodos 1 y 2 no tienen en cuenta la capacidad de limitar las tensiones mediante dispositivos de limitación de impactos y con ensayos no destructivos suficientes para detectar y evaluar los defectos previstos. Además, la correlación entre la energía de impacto y la tenacidad a la fractura tal vez no sea aplicable a una amplia gama de materiales, lo que limita el uso de materiales con otros límites de contención.

V.17. Se pueden mencionar numerosos ejemplos del método 3 que son válidos para componentes de las centrales nucleares. Tales ejemplos, aunque no son directamente aplicables a la evaluación del diseño de bultos de transporte, pueden ser instructivos en lo que respecta a la aplicación de los principios de la mecánica de fractura. Esos ejemplos incluyen las referencias [V.13 a V.18]. Además, dan cierta flexibilidad en el diseño en lo relativo a la selección de los materiales y la capacidad para determinar las tensiones y los requisitos de los ensayos no destructivos, de manera que se evite la iniciación de la fractura y la fractura frágil. En todos estos casos se aplica el enfoque fundamental de la mecánica de fractura elástica lineal, aunque se presentan diferencias en la aplicación de los factores de seguridad. Estos ejemplos se refieren sobre todo a cargas aplicadas lentamente, que pueden fluctuar. Para la aplicación de estos principios en las cargas que se producen en los ensayos de caída libre o de penetración debe tenerse en cuenta tanto la magnitud de las tensiones resultantes como la respuesta de los materiales a la tasa de carga.

ASPECTOS RELATIVOS A LA MECÁNICA DE FRACTURA

V.18. La propiedad mecánica que caracteriza la resistencia de los materiales a la iniciación de fisuras, a partir de defectos preexistentes parecidos a fisuras, es su tenacidad frente a la iniciación de fracturas. La curva con los resultados de las mediciones de esta propiedad, en función de la temperatura y de la tasa de carga, define la transición del comportamiento frágil al dúctil en los materiales que muestran un comportamiento frente a la temperatura de transición. Según el estado localizado de la tensión alrededor del defecto y grado de plasticidad, la tenacidad a la fractura se mide en función del nivel crítico del factor de intensidad de la

tensión (K_I), si las condiciones de tensión-deformación son lineales-elásticas; o, si las condiciones de tensión-deformación son elastoplásticas, la tenacidad puede representarse por el nivel crítico de la integral de la isolínea de energía, J_I , o por el nivel crítico del desplazamiento de la abertura del extremo de la fisura (DAEF), δ . Según la teoría básica de la mecánica de fractura, el nivel de la fuerza impulsora del extremo de la fisura (representado por el factor de intensidad de la tensión K_I , la integral de la isolínea J_I o el DAEF δ_I), debe ser menor que el valor crítico de la tenacidad a la fractura del material (en la misma forma, $K_{I(mat)}$, $J_{I(mat)}$ o $\delta_{I(mat)}$) para imposibilitar la iniciación de la fractura y la posterior fractura frágil. En las referencias [V.19 a V.24] pueden encontrarse métodos normalizados de ensayo para valores críticos de K_I . En la referencia [V.25] se proporciona un conjunto de recomendaciones que abarcan los distintos parámetros de la tenacidad a la fractura. El valor $K_{I(mat)}$, $J_{I(mat)}$ o $\delta_{I(mat)}$, necesario para evitar la iniciación de la fractura, depende de la carga y de las combinaciones ambientales de interés. En condiciones de deformación plana, apropiadas para altos espesores y a menudo necesarias para los bultos de tipo B(U) o de tipo B(M), la tenacidad crítica para la carga estática muestra un valor mínimo que se simboliza con K_{Ic} , J_{Ic} o δ_{Ic} . En algunos materiales, la tenacidad a la fractura bajo incrementos de tasa de carga o en condiciones de impacto, que se representa con K_{Id} para cargas dinámicas, en algunos materiales puede ser notablemente inferior al valor estático correspondiente a la misma temperatura, K_{Ic} . Si la profundidad inicial del defecto, en combinación con la carga que se aplique, da como resultado un factor aplicado de intensidad de tensión que iguala la tenacidad del material, se iniciará la fisura y la profundidad del defecto se denominará “profundidad crítica”. En estas condiciones puede producirse una propagación continua que provoque la inestabilidad y el fallo.

V.19. Para algunos materiales los resultados de los ensayos de tenacidad a la fractura, que son válidos conforme a la referencia [V.19] no pueden obtenerse en los ensayos normalizados debido a una excesiva plasticidad. Además, tal vez algunos materiales no muestren una propagación inestable de la fractura en su inicio, sino que para la posterior ampliación de la fisura requieran un aumento en la fuerza impulsora de la fisura (es decir, en los primeros momentos se requiere un aumento de la carga para causar mayor crecimiento de la fisura). Ambos procesos (es decir, la plasticidad y el desgarramiento dúctil estable) absorben energía y son cualidades claramente deseables en los materiales que se precisan para cumplir los requisitos exigidos para el diseño de cofres de transporte. Debería tenerse en cuenta que los efectos geométricos y metalúrgicos de los espesores de sección grandes que a menudo se emplean en los diseños de bultos hacen difícil asegurarse de la respuesta al desgarramiento dúctil en servicio, en comparación con las geometrías utilizadas en los ensayos normalizados.

V.20. El enfoque que se recomienda para la evaluación de la mecánica de fractura en los diseños de bultos de transporte se basa en la “prevención de la iniciación de la fractura” y, por lo tanto, en la prevención de la propagación (el crecimiento) de la fisura inestable en presencia de defectos parecidos a fisuras. A veces pueden ser suficientes los principios de la mecánica de fractura lineal-elástica. En algunas condiciones, que justifique el diseñador del bulto y acepte la autoridad competente, pueden ser apropiados los principios de la mecánica de fractura elastoplástica. En tales casos, la prevención de la iniciación de la fisura sigue siendo el criterio predominante y el diseño no debería basarse en ninguna previsión de resistencia al desgarramiento dúctil. En los párrafos V.21 a V.46 se proporciona orientación adicional en relación con el diseño contra la iniciación de la fractura en bultos sometidos a los ensayos mecánicos estipulados en los párrafos 722, 725 y 727 del Reglamento de Transporte.

V.21. La adopción de un enfoque basado en la mecánica de fractura entraña la necesidad de realizar un análisis cuantitativo. El análisis debería abarcar la interacción entre los defectos postulados del bulto, los niveles de tensión que puedan producirse y las propiedades de los materiales, particularmente la tenacidad a la fractura y el límite elástico. Así, debería tenerse en cuenta la posible presencia de defectos en la etapa de fabricación y el método de diseño tiene que postular los tamaños máximos de defecto que probablemente podrían ocurrir y mantenerse después de cualquier programa de inspección y reparación. Esto a su vez significa que también hay que considerar el tipo de métodos de inspección y su capacidad para detectar y valorar tales defectos en localizaciones geométricas críticas. Esta es la base del concepto de defecto de referencia en este apéndice. Es probable que sea necesaria una combinación de métodos de ensayo no destructivos. La combinación apropiada que habrá de especificar el diseñador del bulto debería incluir las zonas que se examinarán por cada método y los niveles de aceptación de los defectos que se encuentren. La capacidad de inspección de la geometría en relación con el tamaño y la localización de los defectos que podrían pasar inadvertidos es un elemento importante de cualquier enfoque de diseño que aplique los principios de la mecánica de fractura. Estos conceptos se examinan con más detalle en este apéndice. Asimismo, debería ser posible determinar los niveles de tensión que podrían ocurrir en distintas partes del bulto, en las diversas condiciones de accidente y tener en tales determinaciones alguna estimación de las incertidumbres. Finalmente, debe conocerse la tenacidad a la fractura de los materiales empleados en el bulto, en el intervalo completo de temperaturas de las condiciones de operación, sobre la base de los resultados de ensayos, de estimaciones del límite inferior o de curvas de referencia, e incluirse los efectos del incremento de las tasas de carga que se producirían en los accidentes de impacto.

V.22. La ecuación fundamental de la mecánica de fractura lineal elástica que describe el comportamiento estructural desde el punto de vista de la fuerza impulsora del extremo de la fisura en función de la tensión aplicada y la profundidad del defecto es la siguiente:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (V.2)$$

donde

K_I es el factor de intensidad de tensión aplicado (MPa \sqrt{m});

Y es la constante basada en el tamaño, la orientación y la geometría del defecto y de la estructura;

σ es la tensión nominal aplicada (MPa);

A es la profundidad del defecto (m).

V.23. Además, para evitar la fractura frágil, el factor de intensidad de tensión aplicado debería satisfacer la relación:

$$K_I < K_{I(mat)} \quad (V.3)$$

donde $K_{I(mat)}$ define la tenacidad a la fractura.

V.24. Este valor tiene que obtenerse mediante ensayos a la tasa de carga apropiada, aplicable a la que será experimentada por el bulto, teniendo en cuenta los efectos de los limitadores de tensiones que se incluyan en el diseño.

V.25. Para

$$K_I = K_{I(mat)} \quad (V.4)$$

la ecuación (V.2) puede combinarse con la ecuación (V.4) para dar la expresión de la profundidad crítica del defecto a_{cr} siguiente:

$$a_{cr} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{I(mat)}}{Y\sigma} \right)^2 \quad (V.5)$$

V.26. El propósito del proceso de evaluación de la fractura frágil es asegurar que los tres parámetros de esta caracterización (tenacidad a la fractura del

material, tensión aplicada y tamaño del defecto) satisfagan las ecuaciones (V.2) y (V.3) o los tratamientos elastoplásticos correspondientes, previniendo así la iniciación de la fractura.

V.27. El efecto de la plasticidad y de la deformación local en el extremo de una fisura es que se incrementa la intensidad del extremo de la fisura por encima de la prevista para el mismo tamaño de fisura y nivel de tensión solo en condiciones de tensión lineal elástica. En la mecánica de fractura elastoplástica hay varias maneras de considerar la interacción entre la plasticidad y la intensidad del extremo de la fisura. Por ejemplo, se han codificado dos de estos enfoques en diversos documentos nacionales —la integral J aplicada [V.26] y el diagrama de evaluación de fallos (DEF) [V.17, V.27]— y su uso puede estar justificado para las evaluaciones de embalajes. Los criterios de aceptación de estos métodos elastoplásticos suelen ser más complejos que el simple límite que proporciona la ecuación (V.3). Para el caso del método de la integral J aplicada, los criterios de aceptación deberían incluir un límite para la propia integral J aplicada en la definición de iniciación establecida. En el método del DEF, la evaluación coordina L_r y K_r para el colapso plástico y la fractura frágil puede calcularse para las tensiones y las profundidades de defecto que se postulen, con el requisito de que tales puntos de la evaluación se encuentren dentro de la superficie del DEF (véase la fig. V.1). Es importante reconocer que el uso de la mecánica de fractura lineal-elástica, cuando ocurre una deformación significativa, quizás no sea de carácter conservador si el factor de intensidad de tensión se estima solamente partiendo del nivel de tensión y del tamaño de la fisura sin tener en cuenta la deformación. Para obtener más detalles se deberían consultar las referencias [V.18, V.26, V.27].

V.28. No debería considerarse inaceptable la deformación de los componentes que no forman parte de la contención y que están específicamente diseñados para absorber energía por flujo plástico.

FACTORES DE SEGURIDAD PARA EL MÉTODO 3

V.29. Los factores de seguridad que podrían aplicarse a la ecuación (V.3), o a los parámetros que componen la ecuación (V.3) y sus extensiones elastoplásticas deberían dar cuenta de las incertidumbres en el cálculo o la medición de estos parámetros. Estas incertidumbres podrían ser, entre otras, las asociadas al cálculo del estado de tensiones en el bulto, la inspección del bulto para buscar defectos y la medición de la tenacidad de los materiales frente a la fractura. Así, el factor de seguridad total depende de que los valores empleados para los distintos

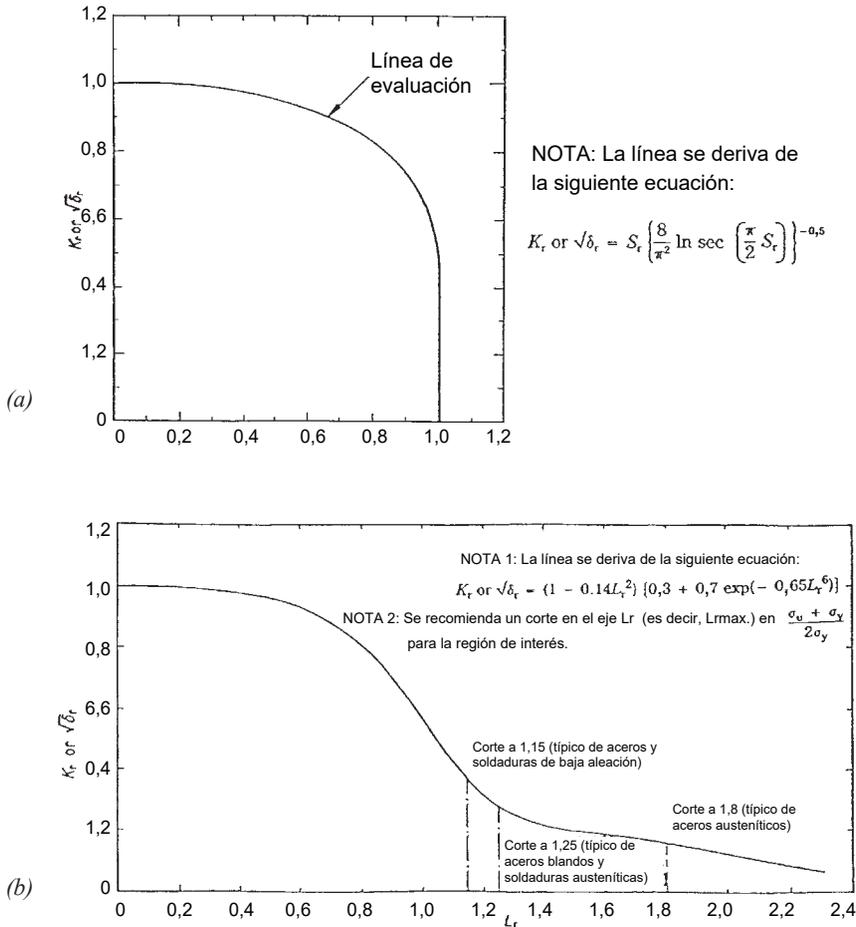


Fig. V.1. Diagramas de evaluación de fallos para tratamientos de mecánica de fractura elastoplástica [V.17]. a) diagrama de evaluación - nivel 2; b) diagrama de evaluación - nivel 3

parámetros introducidos sean los valores mejor estimados (media) o los límites superiores para los parámetros de carga y los tamaños de defectos postulados y los límites inferiores para la tenacidad a la fractura. En particular, la preocupación por la incertidumbre en el ensayo no destructivo se puede atender aplicando un conservadurismo apropiado en la selección del defecto de referencia.

V.30. Con el fin de prevenir el inicio de la fractura en los materiales del bulto, los factores de seguridad para condiciones de transporte normales y para condiciones de accidente deberían estar en consonancia en general con los factores de seguridad formulados para condiciones de carga similares en las

aplicaciones referenciadas del enfoque de la mecánica de fractura lineal elástica. Por ejemplo, para las condiciones de carga que se prevé que ocurran en operación normal durante el período de servicio, la referencia [V.28] relativa a la inspección en servicio de componentes de centrales nucleares proporciona un factor general de seguridad mínima de $\sqrt{10}$ (aproximadamente 3) para la tenacidad a la fractura que habrá de aplicarse a la ecuación (V.3). Con respecto a las condiciones de carga imprevistas (pero dentro de las bases de diseño), como las condiciones de accidente, la referencia [V.28] proporciona un factor de seguridad total mínimo de $\sqrt{2}$ (aproximadamente 1,4) para la tenacidad a la fractura que ha de aplicarse a la ecuación (V.3). Esos factores de seguridad mínima de la ecuación (V.3) deberían utilizar límites superiores para los parámetros de carga y los tamaños de defectos postulados y límites inferiores para la tenacidad a la fractura mediante evaluaciones estadísticas, si fuera apropiado. El diseñador del bulto debería seleccionar y justificar los factores de seguridad, con la aceptación de la autoridad competente, teniendo en cuenta la confianza en la validación de los métodos empleados en el análisis de tensiones (por ejemplo, códigos de análisis de elementos finitos), la dispersión en las propiedades de los materiales y las incertidumbres en la detección y evaluación por ensayos no destructivos del defecto.

PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN PARA EL MÉTODO 3

V.31. Las medidas generales que han de seguirse deberían ser las siguientes:

- a) postular un defecto de referencia o defecto de base de diseño en el lugar más crítico del embalaje y en la orientación más crítica;
- b) calcular las tensiones debidas a los ensayos mecánicos descritos en los párrafos 722, 725 y 727 del Reglamento de Transporte, y verificar que se consideran las combinaciones de carga requeridas;
- c) calcular el factor de intensidad de tensión aplicada en el extremo del defecto base de diseño;
- d) determinar o estimar el límite inferior de tenacidad a la fractura del material para las tasas de carga a las que puede someterse el bulto;
- e) calcular la relación entre la tensión aplicada para una sección neta y el límite elástico en las condiciones de carga correspondientes, y
- f) cumplir con los márgenes de seguridad entre el factor de intensidad de tensión neta aplicada y el valor aceptado de tenacidad a la fractura del material y entre la tensión aplicada y el límite elástico.

De este modo se garantizará que el defecto no se inicie ni crezca como resultado de los ensayos mecánicos especificados en el Reglamento de Transporte y, por lo tanto, que no desemboque en la propagación inestable de la fisura ni en una fractura frágil. La tensión neta es la tensión evaluada que tiene en cuenta la sección reducida debida a la presencia de la fisura.

V.32. Existe una variación en la secuencia del párrafo V.31 para que los ensayos mecánicos sean utilizados directamente para demostrar la resistencia a la fractura frágil. En este caso, las mediciones de los ensayos se podrían utilizar para lo siguiente: i) facilitar la inferencia del campo de tensión en los cálculos de los factores de intensidad de tensión aplicados; o ii) proporcionar una confirmación directa del margen recomendado contra el inicio de fractura. Para esta segunda finalidad, se ubica una fisura en un lugar del prototipo del embalaje de ensayo que sea más vulnerable a la iniciación del defecto y a su crecimiento debido a las cargas del ensayo mecánico a una temperatura mínima de -40° C. La forma del defecto de referencia debería ser semielíptica y tener una relación dimensional (longitud frente a profundidad) de 6:1 o mayor. La extremidad de este defecto artificial debería ser tan parecida como sea posible a una fisura y presentar una agudeza del defecto de referencia que sea justificada por el diseñador del bulto y aceptada por la autoridad competente. Para el hierro dúctil [V.29] se ha recomendado una agudeza del radio en el borde del extremo de la fisura no mayor de 0,1 mm. La profundidad de este defecto se determina usando tensiones calculadas previamente o deducidas de mediciones de la deformación y también debería considerarse un factor de seguridad apropiado al estimar la profundidad artificial del defecto.

V.33. En los párrafos V.34 a V.46 se formulan recomendaciones para cada una de estas medidas de procedimiento.

Criterios relativos al defecto

V.34. En este apéndice se tratan tres diferentes tamaños de defectos. El “tamaño de defecto de referencia” es un tamaño de defecto postulado que se emplea para fines de análisis. El “tamaño de defecto de rechazo” es un tamaño de defecto que, si se descubre durante la inspección previa al inicio del servicio, no cumpliría los requisitos de control de calidad. El “tamaño de defecto crítico” es el tamaño que potencialmente sería inestable en las condiciones de carga base de diseño.

V.35. En lo referente a la demostración por análisis o por ensayo, el defecto de referencia en la superficie de la pared de contención del embalaje debería situarse en el lugar en que la tensión que se aplique sea más alta. Debería

considerarse la posibilidad de que se desarrollen fisuras de fatiga durante el servicio cuando el bulto esté sujeto a cargas cíclicas o fluctuantes. Cuando no esté claro cuál es el punto en que la tensión aplicada sea más alta, pueden requerirse demostraciones múltiples. La orientación del defecto de referencia debería ser tal que la componente más alta de la tensión superficial, determinada por cálculos o mediciones experimentales, sea normal en relación con el plano del defecto. En este criterio debería tenerse en cuenta la presencia de regiones de concentración de tensión. La profundidad del defecto de referencia debería ser tal que se justifique su relación con la sensibilidad del examen volumétrico, la incertidumbre de la detección, el tamaño de defecto de rechazo y el tamaño de defecto crítico. La profundidad del defecto de referencia debería ser tal que, en asociación con la sensibilidad demostrada del examen volumétrico y superficial, se asegure que la probabilidad de que no llegue a ser detectado sea suficientemente reducida, como lo haya justificado el diseñador del bulto. Se podría elegir una profundidad limitante mínima para el tamaño en que se pueda demostrar que la probabilidad de que no se produzca la detección sea estadísticamente insignificante, considerando el correspondiente margen para las incertidumbres en el método de ensayo.

V.36. El defecto de referencia con una relación entre dimensiones de 6:1 debería tener un área normal con respecto a la dirección de la tensión máxima, mayor que las indicaciones típicas de la inspección previa a la puesta en servicio que podrían ser causa de rechazo o de reparación de una pared de contención del embalaje durante la fabricación. Sin embargo, puesto que el defecto de referencia es un defecto superficial parecido a una fisura, más que un típico defecto real (por ejemplo, una imperfección porosa por debajo de la superficie o una oclusión de escoria), la selección de este defecto es sumamente conservadora en relación con las normas de fabricación.

Consideraciones sobre los sistemas de gestión y los ensayos no destructivos

V.37. Para el comportamiento satisfactorio de cualquier bulto de transporte, este debería diseñarse y fabricarse según normas adecuadas, con materiales apropiados y sin grandes defectos, independientemente de que se haya utilizado o no en el diseño un enfoque basado en la mecánica de fractura. Por lo tanto, las etapas de diseño y fabricación deberían estar sujetas a los principios del sistema de gestión y los materiales deberían estar sometidos a controles de calidad para asegurar que se encuentren dentro de los requisitos especificados. En los bultos metálicos se deberían tomar muestras con objeto de comprobar que los análisis químicos, el tratamiento térmico y la microestructura son satisfactorios y no presentan defectos inherentes. Los bultos metálicos deberían someterse a

ensayos no destructivos mediante una combinación de ensayos superficiales y volumétricos de detección de fisuras. La detección de fisuras superficiales debería hacerse por medios apropiados, como la detección magnética de fisuras y los ensayos por tintas penetrantes o por corrientes de Foucault, de conformidad con los procedimientos normalizados.

V.38. Los ensayos volumétricos deberían realizarse habitualmente por radiografía o por ultrasonido, y también con arreglo a procedimientos normalizados. El diseño del bulto debería ser adecuado para realizar un ensayo no destructivo. Cuando se aplique un enfoque basado en la mecánica de fractura con el concepto de defecto de referencia, el diseñador del bulto debería demostrar que los métodos especificados de ensayo no destructivo pueden detectar cualquier defecto y que estos métodos de ensayo no destructivo se llevan a cabo en la práctica.

V.39. El diseñador debería considerar la posibilidad de desarrollo o crecimiento de los defectos y la posible degradación del material en servicio. Los requisitos relativos a los ensayos no destructivos repetidos o periódicos deberían ser especificados por el diseñador y aprobados por la autoridad competente.

Aspectos relativos a la tenacidad a la fractura

V.40. Debería demostrarse que el factor de intensidad de tensión calculado es inferior al valor de tenacidad a la fractura del material en la ecuación (V.3), teniendo debidamente en cuenta un margen adecuado para los efectos de plasticidad y los factores de seguridad. El método para determinar la tenacidad del material a la fractura debería seleccionarse a partir de las tres opciones que se ilustran en la figura V.2. Cada una de estas opciones incluye la generalización de una base de datos estadísticamente significativa de valores de tenacidad a la fractura de los materiales, obtenidos de tipos de productos representativos de los suministradores de los materiales y de las aplicaciones del bulto. Las dos primeras opciones deberían incluir los valores de tenacidad a la fractura de los materiales que sean representativos de la tasa de deformación, la temperatura y las condiciones restrictivas (por ejemplo, el espesor) del uso real del bulto. Estos mismos criterios se aplican a las mediciones de tenacidad a la fractura de materiales que se utilizan para apoyar una evaluación de fractura elastoplástica.

V.41. La opción 1 debería basarse en la determinación de un valor mínimo de tenacidad a la fractura a una temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para un material concreto. El valor mínimo se muestra en la figura V.2 como representación de un conjunto de datos estadísticamente significativos, para un número limitado de muestras de un

número limitado de suministradores de materiales, obtenido a una tasa de carga apropiada y en condiciones geométricas restrictivas. Las muestras deberían ser representativas de tipos de productos adecuados para el uso específico del bulto.

V.42. La opción 2 debería basarse en la determinación de un límite inferior, o un valor cercano a un límite inferior de tenacidad del material, $K_{I(mat)} = K_{Ib}$, como se indica en la figura V.2. Esta opción abarcaría, como caso limitativo, la determinación de la tenacidad del material de referencia para aceros ferríticos que se establece, por ejemplo, en la referencia [V.4]. El límite inferior, o el valor cercano al límite inferior, puede basarse en una composición de datos de tenacidad estática, dinámica y de detención de la fisura. Una ventaja de esta opción es la posible reducción del programa de ensayos de los materiales que pueden referenciarse con el límite inferior o valores próximos al límite inferior en la curva. Un número relativamente pequeño, aunque conveniente, de puntos de referencia puede ser suficiente para demostrar la aplicabilidad de la curva a calores, clases o tipos específicos de materiales.

V.43. La opción 3 debería basarse bien en el valor mínimo de un conjunto de datos de tenacidad a la fractura estadísticamente significativos que satisfaga la tasa de carga estática y los requisitos de restricción del extremo de la fisura que se señalan en la referencia [V.19] o en métodos elastoplásticos de medición de

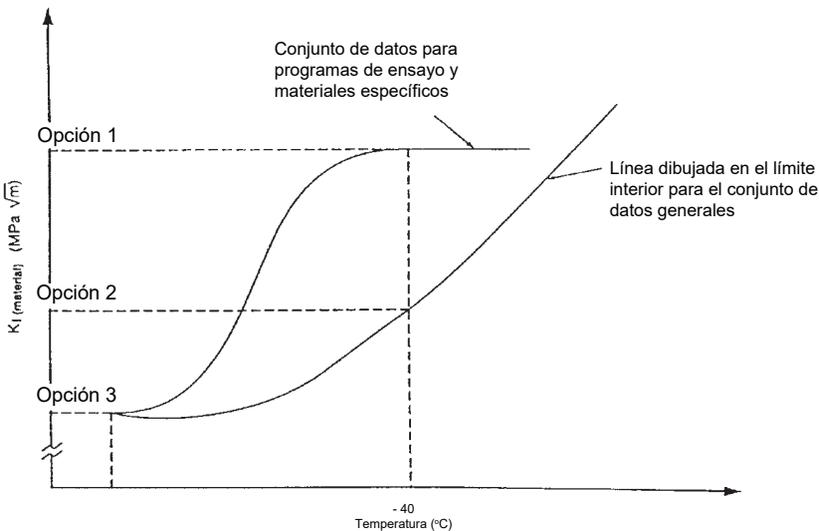


Fig. V.2 Valores relativos de mediciones de $K_{I(material)}$ basados en la selección de las opciones 1, 2 o 3 [V.1]

la tenacidad a la fractura [V.3, V.4]. De conformidad con la referencia [V.19], la temperatura de ensayo para los ensayos de mecánica de fractura lineal elástica debería ser al menos de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, aunque quizás tenga que ser más baja con objeto de satisfacer las condiciones de la referencia [V.19], como se muestra en la figura V.2. Los ensayos de tenacidad a la fractura en que se emplean métodos elastoplásticos deberían realizarse a la temperatura mínima de diseño. El conservadurismo de esta opción, en particular si los ensayos se llevan a cabo a temperaturas inferiores a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, puede ser tal que podría utilizarse un factor de seguridad inferior, siempre que sea justificado por el diseñador del bulto y aceptado por la autoridad competente.

Criterios relativos a la tensión

V.44. Con respecto a la demostración mediante ensayo o análisis, el cálculo del factor de intensidad de tensión aplicado en la extremidad del defecto de referencia debería basarse en las tensiones de tracción máximas en los componentes críticos de fractura que sean justificadas por el diseñador del bulto y aceptadas por la autoridad competente. Los componentes críticos de fractura se definen como aquellos en que un fallo por fractura podría provocar la penetración o la ruptura del sistema de contención. Las tensiones pueden determinarse mediante cálculos sobre un bulto sin defectos. Entre los métodos que se aplican comúnmente se incluyen cálculos directos de la tensión mediante códigos de elementos finitos especializados para el análisis dinámico, o el cálculo indirecto de la tensión a partir de los resultados de los ensayos. Con el análisis por elementos finitos, el enfoque sobre la carga de impacto puede realizarse por el modelo de efectos de inercia o el cuasi estático, a condición de que pueda distinguirse la respuesta de los limitadores de impacto y la del cuerpo del embalaje. El uso de códigos informáticos de elementos finitos debería limitarse a quienes sean capaces de realizar un análisis de impacto y a los diseñadores que demuestren satisfactoriamente su cualificación ante la autoridad competente. El modelo informático tiene que ajustarse de manera que se obtengan resultados exactos en las zonas críticas para cada punto de impacto y para las orientaciones que se examinen. Cuando el campo de tensión se infiera a partir de mediciones de tensión de superficie, bien en un modelo de escala o en un ensayo de comportamiento del bulto a escala completa, también se debería justificar el campo de tensión deducido. Cuando se utilicen extensómetros en regiones con concentración de tensión localizada deberían considerarse los posibles errores en las mediciones de las tensiones debidos a errores en la colocación del extensómetro a los efectos de su longitud. El factor aplicado de intensidad de tensión puede calcularse directamente mediante el análisis de tensiones o conservadoramente por medio

de fórmulas de manuales que tengan en cuenta la forma del defecto y otros factores geométricos y materiales.

V.45. Puesto que los campos de la tensión calculados pueden depender del comportamiento de los limitadores de impacto, de las distribuciones de masa y de las características estructurales del propio bulto, la justificación de las tensiones dependerá, a su vez, de la justificación de los modelos analíticos. Cuando se dé crédito a los limitadores de impacto para asegurar que no se superen los niveles de tensión de diseño utilizados, así como los defectos de referencia y la tenacidad mínima a la fractura supuesta, el diseñador debería proporcionar a la autoridad competente una validación del análisis, incluida una justificación de los factores de seguridad tenidos en cuenta ante las incertidumbres. La experiencia en el uso de análisis por elementos finitos dinámicos ha demostrado que se pueden obtener valores de la tensión máxima suficientemente fiables o conservadores a condición de que i) el código informático sea capaz de analizar los acontecimientos de impacto, ii) se empleen datos fiables o conservadores sobre las propiedades, iii) el modelo que se utilice sea exacto o tenga simplificaciones conservadoras y iv) el análisis lo realice personal cualificado. La justificación de los campos de tensión deducidos mediante ensayos de comportamiento dependerá de la justificación que se haga de las características de la instrumentación de ensayo, de los lugares y de la interpretación de los datos. La evaluación de los campos de tensión calculados o deducidos también puede requerir un conocimiento adecuado de la dinámica del material y de sus características estructurales.

V.46. Pueden obtenerse más orientaciones sobre la utilización de la opción 3 en las referencias [V.30 a V.32].

REFERENCIAS DEL APÉNDICE V

- [V.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Safe Design of Shipping Packages Against Brittle Fracture, IAEA-TECDOC-717, IAEA, Vienna (1993).
- [V.2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Annual Book of ASTM Standards: Standard Test Method for Drop Weight Test to Determine Nil Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels, Vol. 03.01, ASTM E208-87^a, ASTM, Philadelphia, PA (1987).
- [V.3] BRITISH STANDARDS INSTITUTION, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels, BS 5500, BSI, London (1991).

- [V.4] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Rules for the Construction of Nuclear Power Plant Components, ASME, New York (1992).
- [V.5] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Rules for the Construction of Pressure Vessels, ASME, New York (1992).
- [V.6] ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LES RÈGLES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES ÉLECTRONUCLÉAIRES (AFCEN), French Nuclear Construction Code, RCCM: Design and Construction Rules For Mechanical Components of PWR Nuclear Facilities, Subsection Z, Appendix ZG, Fast Fracture Resistance, Framatome, Paris (1985).
- [V.7] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Fracture Toughness Criteria for Ferritic Steel Shipping Cask Containment Vessels with a Wall Thickness Greater than 4 Inches (0.1 m) but not Exceeding 12 Inches (0.3 m), Regulatory Guide 7.12, NRC, Washington, DC (1991).
- [V.8] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Fracture Toughness Criteria of Base Material for Ferritic Steel Shipping Cask Containment Vessels with a Maximum Wall Thickness of 4 Inches (0.1 m), Regulatory Guide 7.11, USNRC, Washington, DC (1991).
- [V.9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM A208 Withdrawn 1941: Method of Test for Uniformity of Coating by the Preece Test (Copper Sulfate Dip) on Zinc or Steel Articles, Replaced by ASTM A239, ASTM, Philadelphia, PA (2009).
- [V.10] ROLFE, S.T., BARSOM, J.M., Fracture and fatigue control in structures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1977).
- [V.11] HOLMAN, W.R., LANGLAND, R.T., Recommendations for Protecting Against Failure by Brittle Fracture in Ferritic Steel Shipping Containers up to Four Inches Thick, Rep. NUREG/CR-1815, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1981).
- [V.12] SCHWARTZ, M.W., Recommendations for Protecting Against Failure by Brittle Fracture in Ferritic Steel Shipping Containers Greater than Four Inches Thick, Rep. NUREG/CR-3826, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1984).
- [V.13] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1 — Appendices, Appendix G: Protection Against Nonductile Failure, ASME, New York (1992).
- [V.14] ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LES RÈGLES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES ÉLECTRONUCLÉAIRES (AFCEN), French Nuclear Construction Code, RCC-MR: Design and Construction Rules For Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, Framatome, Paris (1985, with addendum 1987).
- [V.15] MINISTRY FOR INTERNATIONAL TRADE AND INDUSTRY, Technical Criteria for Nuclear Power Structure, Notification No. 501, MITI, Tokyo (1980).

- [V.16] KERntechnischer Ausschuss, Sicherheitstechnische Regeln des KTA, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, KTA 3201.2, Fassung 11/2017, KTA Geschäftsstelle, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Germany (2017).
- [V.17] BRITISH STANDARDS INSTITUTION, Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, PD 6493, BSI, London (1991).
- [V.18] RUSSIAN FEDERATION FOR STANDARDIZATION AND METROLOGY, Determination of Fracture Toughness Characteristics Under Static Loading, Rep. GOST 25.506-85, Moscow (1985); and Determination of Fracture Toughness Characteristics Under Dynamic Loading, Rep. R D-50-344-8, Moscow (1983).
- [V.19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Annual Book of ASTM Standards: Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Vol. 03.01, ASTM E399-83, ASTM, Philadelphia, PA (1983).
- [V.20] JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Standard Test Method for CTOD Fracture Toughness Testing, JSME S001, JSME, Tokyo (1981).
- [V.21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness, ASTM E813, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM, Philadelphia, PA (1991).
- [V.22] BRITISH STANDARDS INSTITUTION, Fracture Mechanics Toughness Tests: Method for Determination of K_{Ic} , Critical CTOD and Critical J Values of Welds in Metallic Materials, BS 7448-2, BSI, London (1997).
- [V.23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, ASTM E1290-93, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, PA (1993).
- [V.24] JAPAN WELDING ENGINEERING SOCIETY, Standard Test Method for CTOD Fracture Toughness Testing, JWES 2805, JWES, Tokyo (1980).
- [V.25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, ISO 12135:2021, Geneva (2021).
- [V.26] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, EPRI Handbook on Elastic Plastic Fracture Mechanics Methods, EPRI, Palo Alto, CA.
- [V.27] CENTRAL ELECTRICITY GENERATING BOARD, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Rep. R/H/R6-Rev. 3, CEGB, London (1986).
- [V.28] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Includes 2011 Addenda Reprint/01-Jul-2010 ASME, New York (2010) 574 pp.
- [V.29] CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY, Research on Quality Assurance of Ductile Cast Iron Casks, Rep. EL 87001, CRIEPI, Tokyo (1988).
- [V.30] DROSTE, B., SORENSON, K. (Eds), Brittle fracture safety assessment, Int. J. Radioact. Mater. Transp. 6 2–3 (1995) 101–223.
- [V.31] SHIRAI, K., et al., Integrity of cast iron cask against free drop test: Verification of brittle failure design criterion, Int. J. Radioact. Mater. Transp. 41 (1993) 5–13.

- [V.32] ARAI, T., et al., Determination of Lower Bound Fracture Toughness for Heavy Section Ductile Cast Iron (DCI) and Small Specimen Tests, ASTM STP No. 1207, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1995) 355–368.

Apéndice VI

EVALUACIONES DE SEGURIDAD CON RESPECTO A LA CRITICIDAD

INTRODUCCIÓN

VI.1. En el presente apéndice se formulan recomendaciones generales para la demostración del cumplimiento de los requisitos aplicables a los bultos que contienen materiales fisibles enunciados en los párrafos 673 a 686 del Reglamento de Transporte. La realización y documentación de una evaluación minuciosa de la seguridad con respecto a la criticidad permite demostrar el cumplimiento de lo estipulado en estos párrafos. La documentación de la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad (que se incluirá en el informe sobre seguridad del diseño del bulto (ISDB)) constituye una parte fundamental de la solicitud de aprobación que se presenta a la autoridad competente. La evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad debe realizarse aplicando procedimientos adecuados del sistema de gestión en todas sus etapas, según lo dispuesto en el párrafo 815 del Reglamento de Transporte.

VI.2. A pesar de que, en ocasiones, las evaluaciones de seguridad con respecto a la criticidad pueden realizarse empleando límites subcríticos seguros para la masa o las dimensiones (pueden encontrarse ejemplos en las refs. [VI.1 a VI.6]), es más frecuente utilizar análisis informáticos para establecer las bases de la evaluación. Así pues, en este apéndice se incluyen recomendaciones acerca de la aproximación analítica que debería aplicarse y la documentación que ha de facilitarse para demostrar el cumplimiento de los requisitos de seguridad con respecto a la criticidad señalados en los párrafos 673 a 686 del Reglamento de Transporte. También se examina la base para la aceptación de los resultados calculados con miras a demostrar la subcriticidad desde el punto de vista de la reglamentación.

DESCRIPCIÓN DEL BULTO

VI.3. La sección del ISDB dedicada a la criticidad en relación con los bultos de transporte debería incluir una descripción del embalaje y su contenido. La descripción debería centrarse en las dimensiones del bulto y en los componentes de los materiales que pueden afectar a la reactividad (por ejemplo, el inventario de materiales fisibles y su colocación, el material absorbente

de neutrones y su ubicación, los materiales reflectores) y no en información estructural como la posición de los tornillos y muñones. Deberían utilizarse planos técnicos y descripciones del diseño para especificar los detalles de los componentes fabricados.

VI.4. En el ISDB debería indicarse claramente todos los elementos del contenido para los que se solicita aprobación. Por tanto, deberían indicarse los valores de los parámetros necesarios (enriquecimiento en U 235, tipos de conjuntos múltiples, diámetro de las pastillas de UO_2) para garantizar que el contenido del embalaje esté dentro de los límites establecidos. Para los bultos que admitan configuraciones de carga múltiples, debería describirse también cada configuración específica, incluida cualquier configuración posible de carga parcial. La descripción del contenido debería incluir lo siguiente:

- a) tipo de materiales (isótopos fisibles y no fisibles, conjuntos combustibles para reactores, materiales de embalaje y absorbentes de neutrones);
- b) forma física y composición química de los materiales (gases, líquidos y sólidos, como metales, aleaciones o compuestos);
- c) cantidades de material (masas, densidades, enriquecimiento en U 235 y distribución isotópica), y
- d) otros parámetros físicos (forma geométrica, configuración, dimensiones, orientación, espaciado y huelgos).

VI.5. En la sección de criticidad del ISDB debería incluirse una descripción del embalaje, con especial atención a los elementos de diseño pertinentes para la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad. Los elementos que deberían resaltarse son:

- a) materiales de construcción y su importancia para la seguridad con respecto a la criticidad;
- b) dimensiones y volúmenes pertinentes (internos y externos);
- c) límites de los elementos de diseño de los que se depende para lograr la seguridad con respecto a la criticidad;
- d) materiales de embalaje que actúan como moderadores de neutrones, incluidos los materiales hidrogenados con una densidad de hidrógeno superior a la del agua (polietileno, envolturas de plástico) o cantidades importantes de berilio, carbono o deuterio, y
- e) otros elementos de diseño que contribuyen a la seguridad con respecto a la criticidad (los que evitan la entrada del agua en el bulto con sujeción a las condiciones estipuladas en los párrafos 680 o 683 b) del Reglamento de Transporte, según corresponda).

VI.6. La parte del embalaje y el contenido que forma el sistema de confinamiento debería describirse cuidadosamente. Debería presentarse una declaración de los ensayos que se han realizado (o analizado), junto con sus resultados o pruebas documentales, con el fin de determinar los efectos en el bulto (y en el sistema de confinamiento) de las condiciones de transporte normales (véase el párr. 684 b) del Reglamento de Transporte) y de las condiciones de accidente durante el transporte (véase el párr. 685 b) del Reglamento de Transporte). Para los bultos transportados por vía aérea, deberían considerarse los efectos de los ensayos estipulados en el párrafo 683 a) del Reglamento de Transporte. Al analizar los resultados de los ensayos, debería contemplarse cualquier cambio potencial en la forma física o química del contenido, así como las contingencias previstas en el párrafo 673 a) del Reglamento de Transporte.

MODELOS DE ANÁLISIS DE SEGURIDAD CON RESPECTO A LA CRITICIDAD

VI.7. La descripción del contenido, el embalaje, el sistema de confinamiento y los resultados de los ensayos debería utilizarse para elaborar los modelos de bultos necesarios para los análisis de seguridad con respecto a la criticidad que demuestren el cumplimiento de los requisitos de los párrafos 673 a 686 del Reglamento de Transporte. Para cada evaluación quizás se deba elaborar uno o más modelos de cálculo. Probablemente no sea necesario elaborar un modelo exacto del bulto, y tal vez sea adecuado un modelo demostrado de caso más extremo. Sin embargo, los modelos de cálculo deberían incluir de forma explícita las características físicas importantes para la seguridad con respecto a la criticidad y deberían ser compatibles con las configuraciones del bulto derivadas de los ensayos establecidos en los párrafos 682 a 685 del Reglamento de Transporte. Las diferencias (en dimensiones, materiales o geometría) entre los modelos de cálculo y la configuración real del bulto deberían definirse y justificarse. Además, en el ISDB se debería examinar y explicar cómo afectan a los análisis las diferencias determinadas.

VI.8. Pueden distinguirse cuatro tipos de modelos de cálculo: modelos del contenido, modelos de un solo bulto, modelos de conjuntos de bultos y modelos de fuga de los materiales. El modelo del contenido debería incluir todas las regiones geométricas y materiales que contiene el sistema de confinamiento definido. Tal vez sean necesarios otros modelos de cálculo para describir la gama de elementos del contenido, las diversas configuraciones de conjuntos, o las configuraciones de daños que deberían analizarse (véanse los párrs. VI.40 a VI.43).

VI.9. Deberían proporcionarse esquemas coherentes que, en la medida en que sea necesario, sean compatibles con los planos técnicos de los modelos, o partes de los modelos, según proceda. Debería determinarse y explicarse cualquier diferencia con los planos técnicos, o con cualquier otra figura de la solicitud. Los esquemas de cada modelo pueden simplificarse limitando las características dimensionales en cada esquema y proporcionando tantos esquemas como sea necesario, cada uno de ellos basado en el anterior.

VI.10. En la sección de criticidad del ISDB deberían considerarse las tolerancias de las dimensiones del embalaje, incluidos los componentes que contengan absorbentes neutrónicos. Al elaborar los modelos de cálculo deberían incluirse las tolerancias que tiendan a aumentar el conservadurismo (es decir, a producir valores de reactividad más altos). La sustracción de la tolerancia del espesor de la pared nominal debería ser conservadora en lo que respecta a los cálculos de conjuntos de bultos y no debería tener ningún efecto significativo en el cálculo de un solo bulto.

VI.11. La diversidad de especificaciones de los materiales (incluidas las incertidumbres) para el embalaje y el contenido debe abordarse en la sección de criticidad del ISDB. Las especificaciones e incertidumbres de todos los materiales fisibles, los materiales absorbentes de neutrones, los materiales de construcción y materiales moderadores deberían ajustarse a los planos de diseño del embalaje y los criterios especificados para el contenido. La diversidad de especificaciones de los materiales y las incertidumbres conexas deberían utilizarse para seleccionar los parámetros que producen la reactividad más elevada, según lo estipulado en el párrafo 676 del Reglamento de Transporte. Por ejemplo, en cada modelo de cálculo, la densidad atómica de cualquier absorbente neutrónico (por ejemplo, boro, cadmio o gadolinio) incluido en el embalaje para el control de la criticidad debería limitarse al valor verificado mediante análisis químico o mediciones de transmisión de neutrones, como se indica en el párrafo 501 del Reglamento de Transporte.

VI.12. El efecto de variaciones pequeñas en las dimensiones o en las especificaciones de los materiales también puede tenerse en cuenta en la práctica determinando un margen de reactividad que abarque el cambio de reactividad debido a estas variaciones. Este margen de reactividad adicional debería ser positivo.

VI.13. Sería útil incluir un cuadro en que se indiquen todas las diferentes regiones de materiales incluidas en los modelos de cálculo de seguridad con

respecto a la criticidad. Ese cuadro debería comprender la siguiente información para cada región:

- el material;
- la densidad del material;
- los componentes del material;
- el peso (porcentaje) y la densidad atómica de cada componente, y
- la masa de la región representada en el modelo y la masa real de la región (compatible con la descripción del contenido y del embalaje analizada en los párrs. VI.3 a VI.6).

MÉTODO DE ANÁLISIS

VI.14. El ISDB debería proporcionar suficiente información o referencias para demostrar que son adecuados el código informático, los datos de secciones eficaces nucleares y la técnica utilizada para realizar las evaluaciones de seguridad con respecto a la criticidad. Los códigos informáticos empleados en la evaluación de seguridad deberían definirse y describirse en el ISDB, o deberían incluirse las referencias apropiadas. La verificación de que el programa informático está funcionando según lo previsto es importante. En el ISDB se deberían indicar o referenciar todos los equipos y programas informáticos (títulos y versiones) utilizados en los cálculos, así como la información pertinente sobre el control de versiones. La instalación y el funcionamiento correctos del código informático y de los datos conexos (por ejemplo, secciones eficaces) deberían demostrarse resolviendo los ejemplos de problemas o los problemas generales de validación que incluya el programa informático y notificando sus resultados. Deberían examinarse los recursos y limitaciones del programa informático que sean pertinentes para los modelos de cálculo, con especial énfasis en las limitaciones que puedan afectar a los cálculos.

VI.15. Los métodos de cálculo preferidos para los análisis de seguridad con respecto a la criticidad son los que resuelven directamente la ecuación de transporte de Boltzmann en alguna de sus formas para obtener el valor k_{eff} . La técnica determinista de ordenadas discretas y el método estadístico de Monte Carlo son las fórmulas típicas de solución utilizadas en la mayoría de los códigos de evaluación de la criticidad. Prevalcen los análisis de Monte Carlo porque estos códigos pueden modelar mejor los detalles geométricos necesarios para la mayoría de los análisis de seguridad con respecto a la criticidad. Los métodos de cálculo bien documentados y validados pueden requerir una descripción más breve que otros de uso limitado o de carácter único. Debería justificarse el uso

de códigos que resuelven aproximaciones de la ecuación de Boltzmann (por ejemplo, teoría de la difusión) o que aplican métodos más simples para estimar el valor k_{eff} .

VI.16. Cuando se utilice un código de Monte Carlo, el evaluador de la seguridad con respecto a la criticidad debería tener en cuenta el carácter impreciso del valor k_{eff} proporcionado por la técnica estadística. Cada valor k_{eff} debería notificarse con una desviación típica, σ . Los códigos Monte Carlo normalizados proporcionan una estimación de la desviación típica del k_{eff} calculado. En algunas situaciones, el analista quizás desee obtener una estimación mejor de la desviación típica repitiendo el cálculo con números aleatorios válidos diferentes y empleando este conjunto de valores k_{eff} para determinar σ . Por otra parte, la índole estadística de los métodos de Monte Carlo dificulta su uso para determinar cambios pequeños en el valor k_{eff} debidos a variaciones en los parámetros del problema. El cambio en el valor k_{eff} debido a una variación en un parámetro debería ser estadísticamente significativo para indicar una tendencia en el valor k_{eff} .

VI.17. Las limitaciones de modelación geométrica de los métodos deterministas de ordenadas discretas restringen su aplicabilidad, en términos generales, al cálculo de modelos extremos y simplificados y a la investigación de la sensibilidad de k_{eff} ante los cambios de los parámetros del sistema. En estos análisis de sensibilidad se puede utilizar el modelo de una región específica del problema completo (por ejemplo, una aguja de combustible o una unidad de material fisible homogeneizado rodeada por un modelo detallado del bastidor) para demostrar los cambios de reactividad debidos a pequeños cambios en las dimensiones del modelo o en las especificaciones de los materiales. Los análisis de este tipo deberían emplearse cuando se deba asegurar o demostrar que en la elaboración del modelo completo del bulto se han utilizado hipótesis conservadoras para el cálculo del valor k_{eff} del sistema. Por ejemplo, puede utilizarse un modelo unidimensional de una aguja de combustible para demostrar el efecto de reactividad de las tolerancias en el espesor de la vaina.

VI.18. El método de cálculo consta del código informático y de los datos de secciones eficaces de neutrones utilizados por el código. La evaluación de seguridad con respecto a la criticidad debería hacerse utilizando datos de secciones eficaces que se hayan derivado de valores medidos para las diferentes interacciones neutrónicas (captura, fisión y dispersión). Las fuentes generales de las que se obtienen este tipo de datos son los valores procesados no modificados a partir de compendios de datos nucleares ya evaluados. En el ISDB debería consignarse la fuente de los datos de secciones eficaces, el proceso realizado para preparar los datos para el análisis y cualquier referencia que documente

el contenido de la biblioteca de secciones eficaces y su margen de aplicación. En particular, deberían examinarse las limitaciones conocidas que puedan afectar al análisis (omisión o insuficiencia de datos de las resonancias, orden limitado o dispersión).

VI.19. En el ISDB se debería efectuar un examen que ayude a asegurar que los valores k_{eff} calculados por el código tengan la precisión adecuada. Algunos ejemplos de los aspectos que el solicitante quizás deba revisar y analizar en el ISDB son el tratamiento adecuado de las secciones eficaces en multigrupos para el problema, el uso de un número suficiente de grupos de energía de secciones eficaces (en multigrupos) o de valores discretos (para secciones eficaces continuas) y la debida convergencia de los resultados numéricos. En la medida en que lo permita el código, el solicitante debería demostrar o explicar las comprobaciones para confirmar que el modelo de cálculo elaborado para el análisis de seguridad con respecto a la criticidad es compatible con la información del código. Por ejemplo, este proceso de confirmación puede basarse en diagramas de los modelos geométricos generados por el código y en las masas calculadas de material en cada región del modelo.

VI.20. La índole estadística de los cálculos de Monte Carlo hace que existan pocas reglas, criterios o pruebas para juzgar cuándo el cálculo ha convergido. Sin embargo, algunos códigos proporcionan orientaciones para determinar si se ha alcanzado la convergencia. En consecuencia, es probable que el analista deba describir los datos de salida del código u otras medidas utilizadas para confirmar la idoneidad de la convergencia. Por ejemplo, muchos códigos de Monte Carlo suministran información de salida que debería revisarse para determinar si la convergencia es adecuada. Asimismo, en el ISDB deberían definirse y examinarse todos los parámetros de entrada u opciones importantes del código que se hayan utilizado para la evaluación de la criticidad. Para el análisis de Monte Carlo, estos parámetros deberían incluir la distribución inicial de neutrones, el número de historiales utilizado (es decir, número de generaciones y de partículas por generación), las condiciones más extremas utilizadas, cualquier tratamiento especial de los reflectores, y cualquier opción especial de sesgado utilizada. Para los análisis basados en el método de ordenadas discretas, debería especificarse la malla espacial utilizada en cada región, la cuadratura angular, el orden de dispersión seleccionado, las condiciones más extremas y el criterio de convergencia establecido sobre el flujo neutrónico o sobre el valor propio.

VI.21. Tanto la documentación del código como las referencias de la bibliografía son fuentes de información para obtener datos prácticos sobre las incertidumbres asociadas a los códigos de Monte Carlo utilizados para calcular el valor k_{eff} y

formular recomendaciones sobre los datos de salida del código y las tendencias que deberían observarse. Si el solicitante encontrase problemas de convergencia, debería incluirse un análisis del problema y de las medidas adoptadas para obtener un valor adecuado de k_{eff} . Por ejemplo, puede alcanzarse la convergencia del cálculo seleccionando una distribución inicial de neutrones diferente o analizando otros historiales neutrónicos. Las computadoras modernas hacen posible dar seguimiento a un número considerable de historiales neutrónicos.

VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO

VI.22. En la solicitud de aprobación de un bulto de transporte debería demostrarse que el método de cálculo (códigos y datos de secciones eficaces) que se ha utilizado para demostrar la seguridad con respecto a la criticidad ha sido validado en relación con datos medidos que pueda demostrarse que son aplicables a las características de diseño del bulto. El proceso de validación debería proporcionar una base de fiabilidad del método de cálculo y justificar el valor que se considere como límite subcrítico para el sistema de embalaje.

VI.23. Las orientaciones disponibles para la realización y documentación del proceso de validación [VI.5, VI.7], indican que:

- a) los sesgos e incertidumbres deberían establecerse por comparación con experimentos críticos que sean aplicables al diseño del bulto;
- b) el margen de aplicabilidad del sesgo y la incertidumbre debería basarse en el margen de variación de los parámetros en los experimentos;
- c) cualquier ampliación del margen de aplicabilidad más allá del correspondiente a los valores experimentales de los parámetros debería basarse en las tendencias del sesgo y la incertidumbre, en función de los parámetros y del uso de métodos independientes de cálculo, y
- d) debe determinarse un límite subcrítico superior para el bulto a partir del sesgo y las incertidumbres establecidas y un margen de subcriticidad.

VI.24. A pesar de que existe abundante material de referencia para demostrar el comportamiento de muchas combinaciones diferentes de códigos de criticidad y de datos de secciones eficaces, en el ISDB debería demostrarse que el método de cálculo específico (por ejemplo, versión del código, biblioteca de secciones eficaces y plataforma informática) utilizado por el solicitante está validado de conformidad con el proceso señalado anteriormente y teniendo en cuenta los requisitos de un sistema de gestión en todas las fases de la evaluación.

VI.25. En la primera fase del proceso de validación debería determinarse un sesgo y una incertidumbre apropiados para el método de cálculo, utilizando experimentos críticos bien definidos que contengan los parámetros característicos (materiales, geometría) del diseño del bulto. Al seleccionar los experimentos críticos para el proceso de validación, deberían tenerse en cuenta la configuración de un solo bulto, el conjunto de bultos y las condiciones normales y de accidente durante el transporte. En condiciones ideales, el conjunto de experimentos debería estar en concordancia con las características del bulto que más influyen en el espectro neutrónico de energías y la reactividad. Estas características son, entre otras, las siguientes:

- a) los isótopos fisibles (U 233, U 235, Pu 239 y Pu 241 según la definición del párr. 222 del Reglamento de Transporte), la forma (homogénea, heterogénea, metal, óxido, fluoruro, etc.) y la composición isotópica de los materiales fisibles;
- b) la moderación en el hidrógeno compatible con las condiciones óptimas dentro de los bultos y entre ellos (si el bulto contiene cantidades importantes de otros moderadores, como carbono o berilio, estos también deberían considerarse);
- c) el tipo de material absorbente neutrónico (por ejemplo, boro, cadmio), su colocación (intercalado, dentro del contenido o fuera de este) y la distribución del material absorbente y de los materiales de construcción;
- d) la configuración del contenido de un solo bulto (homogénea o heterogénea) y del material reflector del embalaje (plomo, acero), y
- e) la configuración de un conjunto de bultos, incluso el espaciado, el material intersticial y el número de bultos.

VI.26. No es probable que pueda encontrarse la combinación completa de características del bulto en los experimentos críticos disponibles y actualmente no existen experimentos críticos para conjuntos grandes de bultos. Por ello es preciso modelar una variedad suficiente de experimentos críticos para demostrar de forma adecuada que el método de cálculo pronostica el valor k_{eff} para cada experimento por separado. Los experimentos seleccionados deberían tener características que se consideren importantes para el valor k_{eff} del bulto (o el conjunto de bultos) en condiciones normales y de accidente.

VI.27. Los experimentos críticos que se seleccionen deberían describirse brevemente en el ISDB, junto con referencias en que aparezca su descripción detallada. Cualquier desviación respecto de la descripción del experimento proporcionada en las referencias debería indicarse en el ISDB, incluida la base de dicha desviación (incluso el motivo de la desviación (deliberaciones con el experimentador, consulta de la documentación original del experimento, etc.).

Dado que la validación y su documentación complementaria pueden constituir un informe voluminoso, es aceptable en general resumir los resultados en el ISDB y hacer referencia al informe de validación.

VI.28. Para la validación mediante experimentos críticos, el sesgo del método de cálculo es la diferencia entre el valor k_{eff} calculado para el experimento crítico y la unidad, aunque pueden tenerse en cuenta los errores experimentales y el uso de la extrapolaciones. En general, se dice que un método de cálculo tiene un sesgo positivo si sobrepronostica la condición crítica (es decir, si el valor k_{eff} calculado es mayor que 1,0) y que tiene un sesgo negativo si subpronostica la condición crítica (es decir, si el valor de k_{eff} calculado es menor que 1,0). El método de cálculo debería tener un sesgo que no dependa de ningún parámetro característico o cuya dependencia sea una función uniforme y un comportamiento correcto con respecto a los parámetros característicos. Cuando sea posible, debería analizarse un número suficiente de experimentos críticos para determinar las tendencias que puedan existir empleando los parámetros de importancia para el proceso de validación (por ejemplo, la relación hidrógeno/material fisible (H/X), el enriquecimiento en U 235, el tipo de material absorbente neutrónico). El sesgo para un conjunto de experimentos críticos debería considerarse como la diferencia entre el mejor ajuste de los datos de k_{eff} calculados y 1,0. Si existen tendencias, el sesgo no será constante en todo el intervalo de parámetros. Si no existen tendencias, el sesgo será constante en todo el margen de aplicabilidad. Para que las tendencias sean reconocibles, estas deben ser estadísticamente significativas, tanto en función de las incertidumbres de cálculo como de las incertidumbres experimentales.

VI.29. El analista de la seguridad con respecto a la criticidad debería considerar tres fuentes generales de incertidumbre: la incertidumbre en los datos experimentales, en el método de cálculo y la debida al propio analista y a los modelos de cálculo. Incertidumbres en los datos experimentales son, por ejemplo, las relativas a los datos sobre los materiales o la fabricación, o las debidas a una descripción inadecuada del dispositivo experimental, o simplemente las debidas a las tolerancias del equipo. Incertidumbres en el método de cálculo pueden ser las asociadas a las aproximaciones utilizadas para resolver las ecuaciones matemáticas y a la convergencia de la solución y las debidas a los datos de secciones eficaces o al procesamiento de los datos. Las técnicas de modelación elegidas, la selección de las opciones de datos de entrada de códigos y la interpretación de los resultados calculados son posibles fuentes de incertidumbre atribuibles al analista o al modelo de cálculo.

VI.30. En general todas estas fuentes de incertidumbre deberían observarse de forma integrada en la variabilidad de los resultados de k_{eff} obtenidos para los experimentos críticos. La variabilidad debería incluir la desviación típica de Monte Carlo en cada valor calculado de k_{eff} del experimento crítico, así como cualquier cambio en cada valor calculado causado por las incertidumbres experimentales. Por lo tanto, estas incertidumbres estarán intrínsecamente incluidas en el sesgo y su incertidumbre. La variación o incertidumbre del sesgo debería establecerse mediante un tratamiento estadístico válido de los valores calculados de k_{eff} para los experimentos críticos. Existen métodos [VI.8] que permiten evaluar el sesgo y la incertidumbre del sesgo en función de la variación de un parámetro característico escogido.

VI.31. Deberían justificarse los modelos de cálculo utilizados para analizar los experimentos críticos o indicarse las referencias adecuadas en que se analicen dichos modelos. Deberían proporcionarse los conjuntos de datos de entrada utilizados para el análisis, e indicarse si han sido elaborados por el solicitante u obtenidos de otras fuentes individualizadas (referencias publicadas, bases de datos, etc.). Deberían definirse las incertidumbres conocidas en los datos experimentales y examinarse cómo (o si) se han tenido en cuenta al establecer el sesgo global y la incertidumbre del método de cálculo. El tratamiento estadístico aplicado para obtener el sesgo y la incertidumbre debería analizarse a fondo en la solicitud, y se deberían incluir referencias cuando proceda.

VI.32. Como parte integrante del esfuerzo de validación del código, es preciso definir el margen de aplicabilidad del sesgo y la incertidumbre que se han determinado. En el ISDB debería demostrarse que, considerando tanto las condiciones normales como las de accidente, el bulto se encuentra dentro de este ámbito de aplicabilidad o debería definirse la ampliación del margen que sería necesaria para incluir el bulto. El margen de aplicabilidad debería definirse identificando el intervalo de parámetros o características importantes para los que el código fue (o no) validado. En la solicitud de aprobación debería describirse y justificarse (o referenciarse) el procedimiento o método utilizado para definir el margen de aplicabilidad. Por ejemplo, en un método [VI.8] se indica como margen de aplicabilidad los límites (superior e inferior) del parámetro característico utilizado para correlacionar el sesgo y las incertidumbres. El parámetro característico puede definirse en función de la razón entre hidrógeno y material fisible (por ejemplo, $H/X = 10$ a 500), la energía media que produce fisión, la relación entre fisiones totales y fisiones térmicas (por ejemplo, $F/F_{\text{th}} = 1,0$ a $5,0$), o el enriquecimiento en $U 235$.

VI.33. El uso del sesgo y la incertidumbre para un bulto con características que trasciendan el margen de aplicabilidad definido está permitido por las directrices aprobadas por consenso [VI.5]. En ellas se indica que la ampliación del margen debería basarse en las tendencias del sesgo en función de los parámetros del sistema y que, si la ampliación es grande, debería confirmarse con métodos de cálculo independientes. No obstante, el solicitante debería considerar que la extrapolación puede llevar a un pronóstico deficiente del comportamiento real. Incluso la interpolación dentro de amplios márgenes sin datos experimentales puede ser engañosa [VI.9]. El solicitante debería además considerar el hecho de que aunque las comparaciones con otros métodos de cálculo pueden revelar una deficiencia o confirmar la coincidencia, una vez que se obtienen resultados discrepantes de métodos independientes no siempre es una tarea fácil determinar cuál es el resultado “correcto” si no se dispone de datos experimentales [VI.10].

VI.34. El analista de seguridad con respecto a la criticidad debería ser consciente de que no hay ninguna directriz de consenso que defina lo que constituye una ampliación “grande”, ni tampoco directrices sobre cómo ampliar las tendencias en el sesgo. De hecho, el evaluador no debería considerar solamente las tendencias en el sesgo, sino en el sesgo y en las incertidumbres. La escasez de datos experimentales cerca de un extremo de un intervalo de parámetros puede hacer que la incertidumbre sea mayor en esa zona⁵. Una extensión adecuada del sesgo y la incertidumbre significa que el evaluador debe determinar y comprender las tendencias del sesgo y la incertidumbre. El evaluador debería tener mucho cuidado al ampliar el margen de aplicabilidad y debería proporcionar una justificación detallada de la necesidad de la ampliación, además de una descripción pormenorizada del método y los procedimientos empleados para estimar el sesgo y la incertidumbre dentro de este margen ampliado.

VI.35. En el capítulo del ISDB relativo a la criticidad debería demostrarse cómo el sesgo y la incertidumbre, determinados mediante la comparación del método de cálculo con los experimentos críticos, se utilizan para establecer un valor k_{eff} mínimo (límite superior subcrítico) de manera que los sistemas similares con valores k_{eff} calculados superiores sean considerados críticos. Se recomienda la siguiente relación general para establecer el criterio de aceptación:

$$k_c - \Delta k_u \geq k_{\text{eff}} + n\sigma + \Delta k_m \quad (\text{VI.1})$$

⁵ Cabe señalar que en cualquier ampliación de la incertidumbre utilizando el método de la referencia [VI.8] no solo debería considerarse el comportamiento funcional de la incertidumbre como función del parámetro, sino también el valor máximo de la incertidumbre.

donde

- k_c es la condición crítica (1,00);
- Δk_u corresponde al sesgo y la incertidumbre del método de cálculo;
- Δk_m es el margen de subcriticidad requerido;
- k_{eff} es el valor de reactividad obtenido para el bulto o conjunto de bultos;
- N es el número de desviaciones típicas considerado (2 o 3 son los valores habituales);
- σ es la desviación típica del valor k_{eff} obtenido con el análisis de Monte Carlo.

Por lo tanto, la relación general se puede reformular como:

$$1,00 - \Delta k_u \geq k_{eff} + n\sigma + \Delta k_m \quad (\text{VI.2})$$

o

$$k_{eff} + n\sigma \leq 1,00 - \Delta k_m - \Delta k_u \quad (\text{VI.3})$$

VI.36. El valor máximo del límite superior subcrítico (LSS) que debería utilizarse en la evaluación de un bulto viene determinado por la expresión siguiente:

$$\text{LSS} = 1,00 - \Delta k_m - \Delta k_u \quad (\text{VI.4})$$

VI.37. Como ya se ha señalado, el sesgo puede ser positivo (se sobrepronostican los experimentos críticos) o negativo (se subpronostican). Sin embargo, la práctica prudente de seguridad con respecto a la criticidad consiste en suponer las incertidumbres como unilaterales en el sentido de que rebajan la estimación de una condición crítica y así, por definición, son siempre nulas o negativas. El término Δk_u utilizado en esta sección representa el valor combinado del sesgo y la incertidumbre y el solicitante debería definir normalmente este término de forma que no haya aumento del valor del LSS. Por tanto: k_u es el valor absoluto combinado del sesgo y la incertidumbre si dicho valor es negativo, o 0 si el valor combinado del sesgo y la incertidumbre es positivo.

VI.38. El valor del margen de subcriticidad Δk_m que se emplee en la evaluación de seguridad es una cuestión de juicio, en que debe tenerse presente la sensibilidad del valor k_{eff} a los cambios físicos o químicos previsibles del bulto y la disponibilidad de un amplio estudio de validación. Por ejemplo, los sistemas de uranio poco enriquecido pueden tener un valor k_{eff} elevado pero mostrar cambios casi insignificantes de este valor en relación con cambios concebibles en las condiciones del bulto o en las cantidades de material fisible. Por el contrario, un sistema de uranio muy enriquecido puede mostrar cambios significativos en el valor k_{eff} con respecto a cambios relativamente pequeños en las condiciones del bulto o en la cantidad de material fisible. Una práctica frecuente para los bultos de transporte es utilizar un valor Δk_m igual a 0,05 Δk . Aunque un valor Δk_m inferior a 0,05 puede ser adecuado para determinados bultos, estos valores inferiores requieren una justificación basada en la validación disponible y en un conocimiento demostrado del sistema y del efecto de los posibles cambios. El método estadístico de la referencia [VI.8] constituye un ejemplo de una técnica que puede ser utilizada para demostrar que el valor seleccionado para Δk_m es adecuado para el conjunto de experimentos críticos utilizado en la validación. La escasez de datos de experimentos críticos o la necesidad de ampliar el margen de aplicabilidad [VI.5] pueden indicar la necesidad de incrementar el margen de subcriticidad por encima del normalmente aplicado.

VI.39. En las referencias [VI.8, VI.11 a VI.19] puede encontrarse información sobre experimentos críticos potencialmente útiles, ejercicios de referencia e informes genéricos de validación de códigos.

CÁLCULOS Y RESULTADOS

Consideraciones generales

VI.40. En esta sección se presenta un enfoque genérico y lógico respecto de las tareas de cálculo que deberían describirse en el ISDB. Deben realizarse al menos dos series de casos de cálculo: i) una serie de casos relacionados con un solo bulto de conformidad con los requisitos de los párrafos 680 a 683 del Reglamento de Transporte, y ii) una serie de casos de conjuntos de bultos con arreglo a los requisitos de los párrafos 684 y 685 del Reglamento de Transporte. Sin embargo, el número de cálculos que deberían realizarse para la evaluación de seguridad dependerá de los diversos cambios de parámetros y condiciones que es preciso considerar, del diseño y las características del embalaje, del contenido y del estado potencial del bulto en condiciones normales y de accidente. Para los efectos de una evaluación de seguridad basada en métodos de cálculo, el

solicitante debería considerar que el término “subcrítico” (véanse los párrs. 673 y 682 a 685) significa que el valor k_{eff} calculado (incluida la desviación típica de Monte Carlo) es menor que el LSS definido en los párrafos VI.21 a VI.39.

VI.41. En el ISDB se deberían incluir los cálculos que representan cada una de las diferentes configuraciones de carga posibles (configuraciones de carga total y parcial). Solamente podrá utilizarse un modelo único de contenido que abarque diferentes configuraciones de carga si la justificación es clara y directa. Se realizarán cálculos suficientes para demostrar que el contenido de materiales fisibles de un bulto se está analizando en la configuración más reactiva que sea compatible con su forma física y química dentro del sistema de confinamiento y con las condiciones de transporte normales o de accidente, según proceda. Si el contenido puede variar dentro de un intervalo de parámetros (masa, enriquecimiento, distribución isotópica, espaciado, etc.), la evaluación de la criticidad debería demostrar que el modelo describe y utiliza la especificación del parámetro que produce el valor máximo de k_{eff} para las condiciones especificadas en los párrafos 673 a 685. Los parámetros o configuraciones del contenido que proporcionan la máxima reactividad pueden variar en la medida en que se analice un solo bulto o un conjunto de bultos.

VI.42. En las mezclas heterogéneas de materiales fisibles debería suponerse un espaciado óptimo entre las unidades fisibles, de forma que se alcance la máxima reactividad, a menos que el embalaje incluya una estructura adecuada para asegurar un espaciado, o un intervalo de espaciados conocido (por ejemplo, las agujas de un conjunto combustible). En los sistemas complejos a menudo hay factores que compiten entre sí y un espaciado uniforme puede no representar el estado más reactivo posible. Los modelos de contenido para bultos que transportan pastillas sueltas deberían asegurar que se consideren variaciones verosímiles en el tamaño de la pastilla y en su separación para determinar la configuración óptima que produzca la máxima reactividad. En el análisis de seguridad de los bultos que transportan desechos que contienen materiales fisibles se debería garantizar el uso de la concentración más limitante de material fisible. Como se estipula en el párrafo 676 del Reglamento de Transporte, las incertidumbres en el contenido deben resolverse ajustando los parámetros pertinentes a su valor más conservador (compatible con el intervalo de valores posibles); en la práctica esto puede lograrse incluyéndolo en el margen reservado para las incertidumbres de cálculo.

VI.43. Dado el número de cálculos que pueden ser necesarios, resulta útil resumir los resultados en un cuadro en que se definan los diferentes casos, se describan brevemente las condiciones de cada caso y se indiquen los resultados.

Debería incluirse información adicional en el cuadro si con ello se apoya y simplifica la descripción verbal en el texto. La referencia [VI.20] incluye un ejemplo de formato recomendado para resumir los resultados de los cálculos de un solo bulto y de un conjunto de bultos. Puede utilizarse un formato similar para resumir los resultados de los casos que demuestran que se aplican debidamente las condiciones más limitantes.

Análisis de un solo bulto

VI.44. Los análisis de bultos por separado utilizados para demostrar la subcriticidad para los fines de los párrafos 682 y 683 del Reglamento de Transporte deberían representar el embalaje y su contenido en la configuración más reactiva que sea compatible con la forma química y física del material y con el requisito de considerar (párr. 682) o excluir (párr. 683 a)) la entrada de agua en el bulto. Quizás sean necesarios otros análisis de un solo bulto a fin de demostrar las configuraciones intermedias analizadas para determinar la configuración más reactiva. En la determinación de la configuración más reactiva debería considerarse lo siguiente:

- a) el cambio en las dimensiones internas y externas debido a impactos;
- b) la pérdida de materiales, como el blindaje neutrónico o el sobreenvasado de madera durante el ensayo de reacción al fuego;
- c) la redistribución del material fisible o del absorbente neutrónico dentro del sistema de confinamiento a causa de impactos, fuego o inmersión, y
- d) los efectos de los cambios de temperatura en los materiales del bulto o en sus propiedades de interacción neutrónica.

VI.45. Si el bulto no dispone de los elementos especiales descritos en el párrafo 680, en los cálculos del bulto por separado deberían investigarse de forma sistemática diversos estados de inundación con agua y de reflexión del bulto (de conformidad con el requisito estipulado en el párr. 681 del Reglamento de Transporte) que sean representativos de las condiciones de transporte normales y de accidente. Si un bulto tiene múltiples regiones vacías, incluidas regiones dentro del sistema de confinamiento o contención, se debe considerar la inundación de cada región (o combinaciones de regiones). El solicitante debería considerar diferentes secuencias de inundación (es decir, inundación parcial, cambios debidos a la orientación horizontal o vertical del bulto, inundación del bulto (moderación) con agua de densidad menor que la nominal, inundación progresiva de las regiones de dentro hacia fuera).

VI.46. En el párrafo 681 del Reglamento de Transporte se dispone que, para realizar la evaluación establecida en el párrafo 682 del Reglamento de Transporte, se refleje por completo el sistema de confinamiento mediante al menos 20 cm de agua de densidad nominal en todas las caras, a menos que los materiales de embalaje que rodean el sistema de confinamiento proporcionen un valor k_{eff} todavía más elevado. Por tanto, deben realizarse análisis que consideren el sistema de confinamiento reflejado por agua y el bulto reflejado por agua en condiciones rutinarias y normales de transporte para determinar la condición que tiene el máximo valor k_{eff} . Si se demuestra que el sistema de confinamiento se mantiene dentro del bulto en condiciones de accidente durante el transporte, puede evitarse el análisis del sistema de confinamiento reflejado por agua, y basta considerar la reflexión del bulto por agua. Un blindaje de plomo alrededor del sistema de confinamiento es un ejemplo de reflector de embalaje que puede proporcionar una reflexión mayor que la del agua.

VI.47. Tal vez se requieran varios análisis de un solo bulto para evaluar el cumplimiento del requisito del párrafo 683 del Reglamento de Transporte en relación con los bultos que vayan a transportarse por vía aérea, en particular si no se realizan los ensayos previstos en los párrafos 733 y 734. A falta de los ensayos correspondientes, estos análisis deberían formularse para demostrar que no puede surgir ninguna disposición en la que el bulto único pueda ser crítico, suponiendo que no se añada agua a los materiales del bulto. Los resultados de los cálculos de un solo bulto pueden influir en el enfoque y en el número de estimaciones necesarias para calcular las series de conjuntos de bultos, sobre todo si hay diferentes configuraciones de carga del contenido.

Evaluación de conjuntos de bultos

VI.48. Los modelos de los conjuntos de bultos deberían representar las configuraciones de bultos utilizadas en los cálculos que son necesarias para cumplir los requisitos de los párrafos 684 y 685 del Reglamento de Transporte. Hacen falta por lo menos modelos de dos conjuntos: i) un conjunto de bultos intactos compatible con las condiciones de transporte normales y ii) un conjunto de bultos dañados que represente las consecuencias de un accidente durante el transporte. El número “N” puede ser menor que 1; en este caso el bulto tendría un ISC mayor que 50. La configuración de los bultos (conforme a las condiciones de transporte normales y de accidente) que se utilice en los modelos de conjuntos de bultos respectivos debería ser compatible, aunque no necesariamente idéntica, con los respectivos modelos de un solo bulto descritos en las secciones VI.44 a VI.47 (es decir, deben minimizarse las fugas en el modelo de un solo bulto pero maximizarse las interacciones en el modelo del conjunto de bultos).

VI.49. El tratamiento de la moderación en un conjunto puede ser fácil o complejo, según la posición de los materiales de construcción y su susceptibilidad a los daños en condiciones de accidente. Para todas estas condiciones y sus combinaciones, el evaluador debería investigar cuidadosamente el grado óptimo de moderación interna e intersticial compatible con la forma física y química del material y del embalaje para condiciones de transporte normales y de accidente, y demostrar que se mantiene la subcriticidad. Deberían considerarse numerosas condiciones de moderación, como por ejemplo:

- a) moderación por los materiales del embalaje que están dentro del sistema primario de contención;
- b) moderación debida a la inundación preferente de diferentes regiones huecas en los bultos;
- c) moderación por los materiales de construcción (por ejemplo, en el aislamiento térmico y el blindaje neutrónico), y
- d) moderación en la región entre bultos dentro de un conjunto ordenado.

VI.50. En condiciones de transporte normales se deberían considerar en el análisis solamente los moderadores presentes en el bulto (apartados a) a c) del párr. VI.49); según lo especificado en el párrafo 684 a) del Reglamento de Transporte, no es preciso considerar la moderación entre bultos (apartado d) del párrafo VI.49) debida a niebla, lluvia, nieve, espuma, inundación, etc. Para determinar el ISC de un conjunto de bultos compatible con el transporte en condiciones de accidente, el solicitante debería considerar cuidadosamente las cuatro condiciones antes citadas, incluso cómo puede variar cada forma de moderación. Como ejemplo, supóngase un bulto con un aislamiento térmicamente degradable y con material veneno de neutrones térmicos. El análisis de las condiciones de transporte normales debería incluir el aislamiento. Para las condiciones de accidente, el solicitante debería investigar los efectos de la reducción de la moderación como resultado del ensayo térmico. Si el sistema de contención interior de este ejemplo no impide la entrada de agua, el solicitante debería evaluar detenidamente los diversos grados de moderación dentro de la contención. El efecto del veneno neutrónico en la reactividad del sistema cambiará también al variar el grado de moderación.

VI.51. Deberían considerarse condiciones de moderación óptima en todos los cálculos, a menos que se demuestre en las condiciones de ensayo apropiadas que no habría entrada de agua a los espacios huecos. La moderación óptima es la condición que proporciona el valor máximo k_{eff} para un conjunto (probablemente será un grado de moderación diferente del correspondiente a la condición óptima de un solo bulto). Para determinar las condiciones de moderación óptima

deberían considerarse condiciones de inundación parcial y preferencial. Si no hay entrada de agua en el sistema, en el modelo del conjunto puede considerarse la moderación interna real que proporcionan los materiales en el bulto. De la misma manera, si el moderador brinda un grado de moderación superior al óptimo y su forma física y química impide su fuga del sistema de contención, entonces en el modelo pueden considerarse sus propiedades de moderación. Por ejemplo, un moderador sólido que se demuestre que modera en exceso el material fisible puede incluirse en el modelo de cálculo si se verifica su presencia. Este criterio de moderación debería ser evaluado y aplicado por separado para las condiciones de transporte normales y de accidente.

VI.52. En cada modelo de conjunto de bultos compatible con las condiciones de transporte normales debería representarse un espacio vacío entre los bultos, en consonancia con lo dispuesto en el párrafo 684 a) del Reglamento de Transporte. Para la evaluación de conjuntos de bultos coherentes con las condiciones de accidente de transporte de conformidad con el párrafo 685 del Reglamento de Transporte, debería determinarse esta condición de moderación óptima intersticial por hidrógeno. Moderación óptima es la condición hidrogenada que proporciona el valor máximo k_{eff} . Moderación intersticial es la que separa un bulto de otro dentro del conjunto y no incluye la moderación interna del bulto. Por tanto, si el embalaje proporciona una moderación intersticial mayor que la óptima, esa mayor cantidad podrá suponerse en el modelo de cálculo.

VI.53. La sensibilidad de la interacción neutrónica entre bultos depende del diseño del bulto. Por ejemplo, los bultos pequeños y ligeros son más susceptibles de tener una interacción neutrónica elevada que los bultos grandes y pesados (por ejemplo, los bultos de combustible nuclear irradiado). Puesto que es preciso considerar variaciones en la moderación interna por agua y en el agua intersticial para cada configuración de bultos, el proceso puede ser complejo si no se tiene experiencia para guiar la selección de los análisis necesarios. Puede ser útil elaborar un gráfico de la variación del valor k_{eff} en función de la densidad del moderador entre los bultos.

VI.54. Para elaborar el gráfico mencionado en el párrafo VI.53, habría que determinar primero la moderación óptima del conjunto de bultos en consonancia con los resultados de los ensayos de accidente. A medida que se añade agua en la región entre bultos, el espaciado de los bultos puede limitar la cantidad de moderador que puede añadirse. Por ello, a veces conviene modelar un conjunto infinito de bultos utilizando como celda unitaria el bulto y un contorno repetitivo bien ajustado. Si la respuesta del valor k_{eff} de este modelo con los bultos en contacto es creciente (pendiente positiva) ante un aumento de la densidad del

moderador intersticial hasta su valor nominal, el solicitante debería aumentar el tamaño de la celda unitaria y volver a calcular el valor k_{eff} en función de la densidad de moderación. El aumento de tamaño de la celda proporciona mayor espaciado entre bordes de bultos y mayor volumen disponible para el moderador intersticial. Este proceso progresivo solo debería detenerse una vez que se haya confirmado que los bultos están aislados y que el agua intersticial añadida solamente proporciona reflexión suplementaria.

VI.55. Deberían considerarse todas las combinaciones verosímiles de densidad y espaciado que puedan causar un aumento del valor k_{eff} calculado, y el ISDB debería incluir un examen que demuestre que se ha determinado el valor máximo k_{eff} . La figura VI.1 representa algunos ejemplos de gráficos de valores k_{eff} frente a la densidad del moderador de agua intersticial para ilustrar las características de moderación, absorción y reflexión que pueden encontrarse en la evaluación de seguridad de un embalaje. Las curvas A, B y C representan conjuntos de bultos sobremoderados, para los que el aumento de la moderación por agua solamente rebaja el valor k_{eff} (curvas B y C) o no tiene ningún efecto en ese valor (curva A). Las curvas D, E y F representan conjuntos submoderados a la densidad de agua cero, y en que el valor k_{eff} aumenta al incrementarse la densidad intersticial del moderador. Posteriormente, a medida que sigue aumentando la densidad del agua, la absorción neutrónica se hace efectiva, la interacción neutrónica entre los bultos disminuye y el valor k_{eff} se estabiliza (curva D) o disminuye (curvas E y F). Estos efectos máximos que se observan en las curvas E y F pueden aparecer a densidades muy bajas del moderador (entre 0,001 y 0,1 fracción de la densidad nominal). En consecuencia, es preciso seleccionar cuidadosamente los valores de densidad intersticial del moderador en el cálculo para obtener el valor máximo k_{eff} . Cabe señalar que el cálculo de un solo bulto nada más requiere 20 cm de reflexión por agua; por lo tanto, para un conjunto de bultos suficientemente espaciado (más de 20 cm), el modelo del conjunto de bultos de la condición de accidente puede producir para un bulto por separado un valor k_{eff} mayor que el modelo de un solo bulto (ello depende de los efectos descritos en los párrs. 680 y 681 del Reglamento de Transporte que hay que tener en cuenta). La curva G representa un conjunto en que no se ha alcanzado la densidad intersticial óptima de moderación ni siquiera con la densidad nominal del agua. En este caso, el solicitante debería aumentar el espaciado entre centros de los bultos del conjunto, y volver a calcular todos los casos.

VI.56. El objetivo de los cálculos de conjuntos de bultos es obtener la información necesaria con el fin de determinar el ISC para el control de la criticidad, como se estipula en el párrafo 686 del Reglamento de Transporte. El evaluador puede considerar la posibilidad de comenzar los cálculos con un modelo

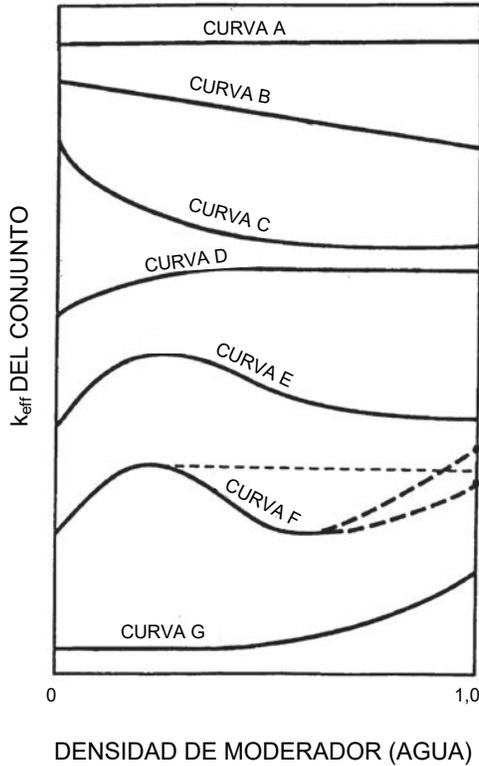


Fig. VI.1. Gráficas típicas de valores k_{eff} de un conjunto de bultos frente a la densidad del moderador de agua intersticial [VI.20]

infinito del conjunto. Quizás sea necesario utilizar sucesivamente modelos finitos más pequeños hasta que los tamaños del conjunto para condiciones normales y de accidente de transporte estén por debajo del LSS. Otra opción sería que el solicitante comenzara los análisis partiendo de un tamaño arbitrario de conjunto — por ejemplo, uno basado en el número de bultos que se prevea transportar a la vez en un vehículo.

VI.57. Debería garantizarse que se ha tenido en cuenta la configuración más reactiva de un conjunto de bultos en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad. En el análisis de las diferentes configuraciones deberían considerarse los efectos opuestos de las fugas neutrónicas del conjunto y de la interacción neutrónica entre los bultos. Las configuraciones en que se minimiza la relación entre la superficie y el volumen tienen menores fugas y deberían, en términos generales, maximizar el valor k_{eff} . Debería considerarse preferentemente la

disposición geométrica de los bultos en el conjunto. Por ejemplo, en algunos bultos (aquellos en los que las sustancias fisibles no están cargadas en posición centrada), la necesidad de optimizar la interacción puede provocar que el conjunto sea más reactivo cuando los bultos se agrupan en una o dos capas. También hay que tener en cuenta el efecto del reflector de agua externo. En algunos casos puede haber poco moderador presente dentro del conjunto de bultos, por lo que un incremento de la superficie puede propiciar mayor moderación, y, posiblemente, mayor reactividad. La configuración exacta del conjunto puede representarse de forma simplificada si se proporciona una justificación adecuada. Por ejemplo, está demostrado que una configuración de bultos en red triangular puede representarse en algunos casos simples utilizando un modelo de bulto modificado de forma apropiada dentro de una configuración de red cuadrada [VI.20]. En casos más complejos (incluso para bultos con forma de cuboides), el efecto de la red triangular puede ser importante porque la interacción neutrónica entre tres bultos dispuestos en triángulo puede ser un factor dominante. Dado que hay tantos efectos contrapuestos, es preciso justificar cualquier simplificación que se haga en la evaluación; algo que puede ser obvio desde el punto de vista de las fugas neutrónicas del conjunto puede no serlo tanto desde el punto de vista de la interacción neutrónica entre los bultos. Todos los conjuntos finitos de bultos deberían estar reflejados en todas las caras por una capa de agua de densidad nominal con un espesor mínimo de 20 cm en contacto con el borde del conjunto.

VI.58. El ISC debería determinarse aplicando lo establecido en el párrafo 686 del Reglamento de Transporte y la información de los análisis de conjuntos de bultos en cuanto al número de bultos que permanecerán subcríticos (por debajo del LSS) en condiciones normales y de accidente.

CUESTIONES ESPECIALES

VI.59. Los diseñadores que procuren reducir el conservadurismo en las cuestiones de seguridad con respecto a la criticidad de los bultos de transporte deben considerar cuidadosamente la criticidad a lo largo de todo el proceso de diseño. El gran número de variables que pueden ser importantes puede originar un gran número de cálculos. El evaluador, por su propio interés, debe interactuar eficazmente con los otros miembros de los grupos de diseño y fabricación del bulto para reducir las variables que deban considerarse en la evaluación y asegurar una información adecuada sobre los aspectos de criticidad. A la hora de confirmar el comportamiento del bulto en condiciones de accidente y demostrar el efecto que tendría este comportamiento en la seguridad con respecto a la criticidad, se presenta a menudo la dificultad para reducir el conservadurismo

delimitador que tradicionalmente se ha aplicado en las evaluaciones de la criticidad. Es indispensable la interacción con los miembros del grupo encargados del diseño estructural, de los materiales y de la contención para que el analista de criticidad obtenga el conocimiento necesario para formular hipótesis defendibles en el modelo de cálculo. La experiencia y el conocimiento del evaluador de la seguridad con respecto a la criticidad son también cruciales para garantizar que se realice, y se documente, una evaluación eficaz e incluso completa.

VI.60. A menudo se requieren opciones de diseño basadas en la limitación de la masa, las dimensiones o la concentración para garantizar la seguridad, pero se tiende generalmente a evitarlas debido a la reducción de la carga útil que esto entraña. De la misma forma, el control de la criticidad mediante la separación del material fisible consume demasiado espacio valioso en el bulto. La opción de incluir en el diseño elementos especiales para prevenir la entrada de agua resulta atractiva para eliminar la consideración del agua en la evaluación de la criticidad, pero el diseño y la justificación de estos elementos especiales pueden ser muy difíciles y desembocar en un proceso de revisión prolongado. Por todo ello, el uso de venenos neutrónicos fijos sigue siendo la opción principal para garantizar la seguridad con respecto a la criticidad. Para incrementar la capacidad de los bultos de transporte de grandes cantidades de combustible nuclear irradiado, puede utilizarse la composición isotópica del combustible tras la irradiación como alternativa de los valores isotópicos del combustible sin irradiar que se utilizan en el método tradicional del caso más extremo para la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad de los bultos de combustible nuclear irradiado.

Crédito del historial de irradiación (crédito de quemado)

VI.61. Para el transporte de combustible nuclear irradiado (por ejemplo, hasta valores próximos a su quemado de diseño), la base de diseño tradicional ha consistido en utilizar la composición isotópica del combustible sin irradiar en la evaluación de seguridad con respecto a la criticidad. Esta es una forma directa de actuar, relativamente fácil de defender y proporciona un margen conservador que generalmente excluye la mayor parte de las preocupaciones acerca de los sucesos de carga errónea.

VI.62. El transporte de combustible nuclear irradiado con tiempos de enfriamiento más largos y la necesidad de considerar enriquecimientos iniciales más altos han hecho que la seguridad con respecto a la criticidad se haya convertido en un aspecto limitante en el diseño de los bultos de combustible nuclear irradiado. Por ello, para incrementar la capacidad de carga de combustible nuclear irradiado en los nuevos diseños y permitir enriquecimientos

iniciales más altos en los bultos existentes, el concepto de dar crédito a la reducción de reactividad causada por la irradiación o quemado del combustible nuclear irradiado se convierte en una alternativa de diseño atractiva frente a la hipótesis del combustible sin irradiar. El concepto que considera el cambio en la composición isotópica del combustible y, por tanto, la reducción de la reactividad como resultado del quemado del combustible nuclear irradiado, se denomina “crédito de quemado”. Sin embargo, hay que considerar y resolver varias cuestiones antes de utilizar la composición isotópica del combustible irradiado en los análisis base de diseño para la evaluación de la seguridad con respecto a la criticidad. Algunas de estas cuestiones son las siguientes:

- a) validación de los instrumentos de cálculo y de los datos nucleares conexos para demostrar su aplicabilidad en lo referente al crédito de quemado;
- b) especificación de los análisis base de diseño para asegurar el pronóstico de un valor límite k_{eff} y
- c) controles operacionales y administrativos que aseguren que el combustible nuclear irradiado cargado en el bulto se haya verificado en cumplimiento de los requisitos de carga especificados para ese diseño de bulto.

VI.63. El uso de la composición isotópica del combustible nuclear irradiado en la evaluación de la criticidad entraña la necesidad de validar cualquier método de cálculo que se utilice para pronosticar esta composición, preferiblemente en relación con los datos medidos. La reducción de reactividad del combustible nuclear irradiado se debe a la disminución del inventario de material fisible y al aumento de nucleidos absorbentes neutrónicos (actínidos no fisibles y productos de fisión) que se producen durante el quemado. Las referencias [VI.21, VI.22] suministran información que ayuda a definir los nucleidos importantes que afectan a la reactividad del combustible irradiado de reactores de agua a presión. Los nucleidos del combustible nuclear irradiado que pueden ser omitidos en el análisis de seguridad son los absorbentes neutrónicos que, si se incluyen en el análisis, solamente pueden reducir todavía más el valor k_{eff} . Los absorbentes neutrónicos que no son un componente intrínseco de la matriz del combustible (gases, etc.) deberían ser eliminados igualmente.

VI.64. Después de seleccionar los nucleidos que se utilizarán en el análisis de seguridad, es preciso proceder a la validación. Se han publicado compendios de datos isotópicos medidos [VI.23 a VI.25] y se ha hecho todo lo posible para validar los métodos de cálculo utilizando datos seleccionados de estos compendios [VI.25 a VI.27]. Los datos isotópicos medidos que están disponibles para la validación son limitados. Otro motivo de preocupación es el hecho de que la base de datos de mediciones de productos de fisión es un pequeño subconjunto

de mediciones de actínidos. Asimismo, los datos de secciones eficaces para los productos de fisión se han examinado mucho menos en intervalos amplios de energía que la mayoría de los actínidos importantes presentes en el combustible nuclear irradiado. Los productos de fisión responden del 20 % al 30 % de la reactividad negativa debida al quemado, a pesar de lo cual las incertidumbres en sus secciones eficaces y en las previsiones isotópicas reducen su eficacia en las evaluaciones de seguridad con crédito de quemado.

VI.65. El uso de la composición isotópica del combustible nuclear irradiado plantea también problemas de validación en relación con el comportamiento de los métodos de cálculo de valores k_{eff} . La preocupación tiene su origen en el hecho de que no se ha comunicado ningún experimento crítico con combustible irradiado en las condiciones de un bulto de transporte. Los datos experimentales obtenidos utilizando combustible irradiado son necesarios para demostrar que:

- a) los datos de las secciones eficaces de todos los nucleidos, incluidos los que no están presentes en el combustible sin irradiar, son adecuados para pronosticar el valor k_{eff} ;
- b) la variación en la composición isotópica y su influencia en el valor k_{eff} puede representarse en modelo adecuadamente, y
- c) la física de la interacción de partículas en el combustible nuclear irradiado se trata adecuadamente en la metodología de análisis.

Debería considerarse una cantidad suficiente de datos experimentales [VI.28 a VI.31] que proporcione una base de validación de los métodos de cálculo aplicados en el ISDB de un bulto que utilice el crédito de quemado como hipótesis base de diseño. Otra ayuda valiosa para entender las cuestiones técnicas y determinar las posibles causas de las diferencias entre los datos pronosticados y medidos son los ejercicios de referencia de cálculo [VI.32 a VI.34], en los que se comparan métodos de cálculo independientes.

VI.66. La comprensión de las incertidumbres en los modelos y en los parámetros, junto con la incorporación correcta de estas incertidumbres en las hipótesis del análisis, es necesaria para calcular en el ISDB un valor límite k_{eff} de un embalaje en que se aplica el crédito de quemado. Muchas de estas incertidumbres deberían examinarse como parte del proceso de validación. Por ejemplo, la referencia [VI.22] aborda un procedimiento para incorporar la variabilidad en el análisis de los datos isotópicos medidos y el número de datos en un “factor de corrección” que ajusta la composición isotópica del combustible nuclear irradiado de forma que pueda calcularse una estimación conservadora del valor k_{eff} .

VI.67. La composición isotópica de un conjunto combustible concreto en un reactor depende, en grado variable, de la abundancia isotópica inicial, de la potencia específica, del historial de operación del reactor (incluso la temperatura del moderador, la concentración de boro soluble y la posición del elemento en el reactor), de la presencia de venenos quemables o barras de control y del tiempo de enfriamiento después de la descarga. El analista de seguridad difícilmente conoce todos los parámetros de la irradiación, si es que puede llegar a conocerlos alguna vez; típicamente, el analista tiene que demostrar la seguridad con respecto a la criticidad de un bulto desde el punto de vista del enriquecimiento inicial especificado, el quemado, el tiempo de enfriamiento y el tipo de combustible. Es preciso seleccionar datos sobre la potencia específica, el historial de operación, la distribución axial del quemado y la presencia de venenos quemables para garantizar que las composiciones calculadas para el combustible nuclear irradiado produzcan estimaciones conservadoras de k_{eff} . La definición de los parámetros más importantes del historial de operación y su efecto en la reactividad del combustible nuclear irradiado se analizan en las referencias [VI.22, VI.35, VI.36]. De la misma forma, las referencias [VI.22, VI.35] estudian el efecto de la incertidumbre en el perfil axial de quemado y presentan información sobre el grado de detalle requerido tanto en la distribución isotópica axial como en los parámetros numéricos de entrada (número de historiales de neutrones, etc.) para pronosticar un valor k_{eff} fiable.

VI.68. El uso de incertidumbres extremas en el proceso de validación y en las hipótesis del análisis debería dar garantías de que el análisis de seguridad es conservador para el intervalo considerado de enriquecimiento inicial, quemado, tiempo de enfriamiento y tipo de combustible. Para un tipo determinado de combustible y un tiempo de enfriamiento mínimo (la reactividad disminuye con el tiempo de enfriamiento durante los primeros 100 años aproximadamente), el análisis de seguridad puede proporcionar una curva de carga (véase la fig. VI.2) que indique la región de quemado y enriquecimiento inicial que garantiza la subcriticidad.

ASPECTOS DE DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO

Uso de venenos neutrónicos

VI.69. Los materiales absorbentes neutrónicos se han dividido tradicionalmente en dos categorías: materiales de construcción y venenos neutrónicos. La presencia de los materiales de construcción está normalmente garantizada debido a su propia función. Por ello, el evaluador de la criticidad debería asegurarse de que

la evaluación esté en conformidad con los datos reales de fabricación del bulto y que las modificaciones futuras se revisen para determinar posibles cuestiones de criticidad. Los venenos neutrónicos fijos se añaden de manera deliberada con el fin de absorber neutrones, reducir la reactividad o limitar los incrementos de reactividad en condiciones anormales de operación. La preocupación principal cuando se recurre a la absorción neutrónica por los venenos (y no a la absorción por los materiales de construcción) es asegurar su presencia. En consecuencia, se requiere siempre una atención especial para garantizar tanto su presencia como la correcta distribución del material absorbente neutrónico durante la vida útil supuesta del bulto. Los procesos físicos, químicos y de corrosión deben considerarse como mecanismos que pueden producir la pérdida del absorbente. En general, la pérdida de material absorbente por absorción directa de neutrones (y, por tanto, la transmutación a un isótopo no absorbente) no tiene consecuencias importantes debido a que la consecución de cualquier grado mensurable de empobrecimiento llevaría millones de años de operación normal por ser sumamente bajos los niveles de flujo en los sistemas subcríticos.

VI.70. Cuando son necesarios los venenos neutrónicos, es aconsejable incorporarlos a los materiales normales de construcción de la manera más intrínseca posible y verificar su presencia con una medición. Por ejemplo, podría utilizarse boro incluido en una matriz de aluminio o acero en el contenedor interior (bastidor) para reducir la interacción neutrónica entre bultos (siempre que ello sea aceptable desde el punto de vista estructural y térmico) o podría incluirse un revestimiento de cadmio en la cara interna del contenedor interior. Sin embargo, en el ISDB se debe atender al requisito (véanse los párrs. 501 y 503 del Reglamento de Transporte) de verificar (y quizás, volver a verificar con alguna frecuencia) que los absorbentes están realmente presentes en la cantidad y distribución establecidas.

VI.71. Si la subcriticidad del envío depende de la presencia de materiales absorbentes de neutrones que forman parte integrante del contenido (por ejemplo, residuos fisibles con absorbentes conocidos o barras de control en un elemento combustible), la carga de la prueba de que los materiales están presentes en condiciones normales y de accidente es una cuestión de seguridad importante.

Mediciones previas a la expedición

VI.72. Cuando en la evaluación de un bulto se utiliza el crédito de quemado, se requieren controles operacionales y administrativos para determinar que el combustible nuclear irradiado que se carga en el bulto queda dentro de las características utilizadas para realizar la evaluación de seguridad. En el

párrafo 677 b) del Reglamento de Transporte se estipula una medición y se considera apropiado asociar la evaluación con esta medición. La evaluación debería demostrar que la medición es adecuada para el fin previsto, teniendo en cuenta los márgenes de seguridad y la probabilidad de error (véanse los párrs. 677.1 a 677.4). La técnica de medición debería depender de la probabilidad de cargar el combustible erróneamente y del margen de subcriticidad disponible como resultado de la irradiación.

VI.73. En la referencia [VI.37] se expone un ejemplo de la variabilidad de la técnica de medición, que especifica el uso de una medición simple con detector gamma para verificar los créditos de quemado permitidos para menos de 5600 MW·d/MTU, pero una medición más directa del quemado del combustible para un margen de irradiación superior. Esta segunda medición depende de dos instrumentos que verifican los registros de quemado del reactor basándose en mediciones pasivas y activas de neutrones. En las referencias [VI.38, VI.39], se ha demostrado que un dispositivo de medición similar es un método práctico para determinar si un conjunto combustible queda dentro de la “región de combustible aceptable” de la figura VI.2. Si se determina que el perfil axial de quemado es una característica importante del combustible nuclear gastado de la que se depende en el análisis de seguridad, también podrían utilizarse dispositivos de medición semejantes para cerciorarse de que el perfil de quemado está dentro de los límites definidos.

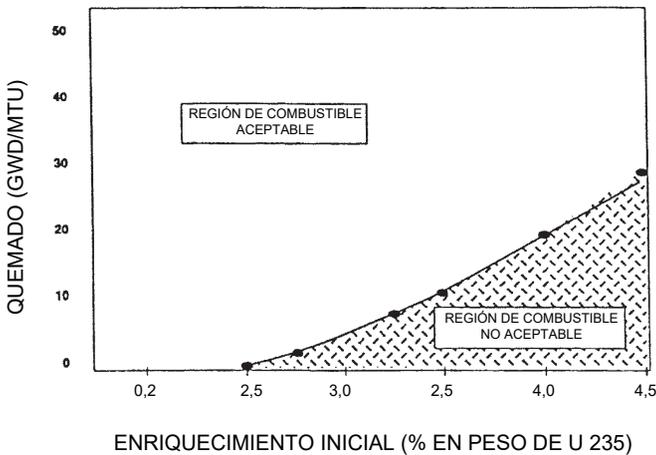


Fig. VI.2. Curva de carga que indica la región de quemado y enriquecimiento inicial que garantiza la subcriticidad [VI.40]

REFERENCIAS DEL APÉNDICE VI

- [VI.1] PRUVOST, N.L., PAXTON, H.C., Nuclear Criticality Safety Guide, Rep. LA-12808, Los Alamos Natl Lab., Los Alamos, NM (1996).
- [VI.2] THOMAS, J.T. (Ed.), Nuclear Safety Guide TID-7016, Rev. 2, Rep. NUREG/CR-0095 (ORNL/NUREG/CSD-6), Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1978).
- [VI.3] PAXTON, H.C., PRUVOST, N.L., Critical Dimensions of Systems Containing 235 U, 239 Pu, and 233 U, Rep. LA-10860-MS, Los Alamos Natl Lab., Los Alamos, NM (1987).
- [VI.4] JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE, Nuclear Criticality Safety Handbook (English Translation), JAERI-Review-95-013, JAERI, Tokyo (1995).
- [VI.5] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, Nuclear Criticality Safety in Operations with Fissionable Materials Outside Reactors, ANSI/ANS-8.1-1998, R2007 (R = Reaffirmed): American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2007).
- [VI.6] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, Nuclear Criticality Control of Special Actinide Elements, ANSI/ANS-8.15-1981, R1987, R1995, R2005 (R = Reaffirmed), American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2005).
- [VI.7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Nuclear Energy — Fissile Materials — Principles of Criticality Safety in Storing, Handling and Processing, ISO 1709:2018, ISO, Geneva (2018).
- [VI.8] LICHTENWALTER, J.J., BOWMAN, S.M., DeHART, M.D., Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages, Rep. NUREG/CR-6361 (ORNL/TM-13211), Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1997).
- [VI.9] PARKS, C.V., WRIGHT, R.W., JORDAN, W.C., Adequacy of the 123-Group Cross-Section Library for Criticality Analyses of Water-moderated Uranium Systems, Rep. NUREG/CR-6328 (ORNL/TM-12970), Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1995).
- [VI.10] PARKS, C.V., JORDAN, W.C., PETRIE, L.M., WRIGHT, R.Q., Use of metal/uranium mixtures to explore data uncertainties, Trans. Am. Nucl. Soc. 73 (1995) 217.
- [VI.11] KOPONEN, B.L., WILCOX, T.P., HAMPEL, V.E., Nuclear Criticality Experiments from 1943 to 1978, an Annotated Bibliography: Vol. 1, Main Listing, Rep. UCRL-52769, Vol. 1, Lawrence Livermore Lab., CA (1979).
- [VI.12] BIERMAN, S.R., Existing Experimental Criticality Data Applicable to Nuclear Fuel Transportation Systems, Rep. PNL-4118, Battelle Pacific Northwest Lab., Richland, WA (1983).
- [VI.13] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, Rep. NEA/NSC/DOC(95)03, Vols I–VI, OECD, Paris (1995).
- [VI.14] DURST, B.M., BIERMAN, S.R., CLAYTON, E.D., Handbook of Critical Experiments Benchmarks, Rep. PNL-2700, Battelle Pacific Northwest Lab., Richland, WA (1978).

- [VI.15] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, Standard Problem Exercise on Criticality Codes for Spent LWR Fuel Transport Containers, CSNI Rep. No. 71 (Restricted), OECD, Paris (1982).
- [VI.16] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, Standard Problem Exercise on Criticality Codes for Large Arrays of Packages of Fissile Materials, CSNI Rep. No. 78 (Restricted), OECD, Paris (1984).
- [VI.17] JORDAN, W.C., LANDERS, N.F., PETRIE, L.M., Validation of KENO V. A Comparison with Critical Experiments, Rep. ORNL/CSD/TM-238, Martin Marietta Energy Systems, Inc., Oak Ridge Natl Lab., TN (1994).
- [VI.18] Nuclear Criticality Safety, ICNC '91 (Proc. Conf. Oxford, 1991), 3 vols (1991).
- [VI.19] Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. Conf. Albuquerque, 1995), 2 vols, Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995).
- [VI.20] DYER, H.R., PARKS, C.V., ODEGAARDEN, R.H., Recommendations for Preparing the Criticality Safety Evaluation of Transportation Packages, Rep. NUREG/CR-5661 (ORNL/TM-11936), Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1997).
- [VI.21] BROADHEAD, B.L., et al., Investigation of Nuclide Importance to Functional Requirements Related to Transport and Long-Term Storage of LWR Spent Fuel, Rep. ORNL/TM-12742, Oak Ridge Natl Lab., TN (1995).
- [VI.22] DeHART, M.D., Sensitivity and Parametric Evaluations of Significant Aspects of Burnup Credit for PWR Spent Fuel Packages, Rep. ORNL/TM-12973, Martin Marietta Energy Systems, Inc., Oak Ridge Natl Lab., TN (1996).
- [VI.23] NAITO, Y., KUROSAWA, M., KANEKO, T., Data Book of the Isotopic Composition of Spent Fuel in Light Water Reactors, Rep. JAERI-M 94-034, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokyo (1994).
- [VI.24] BIERMAN, S.R., TALBERT, R.J., Benchmark Data for Validating Irradiated Fuel Compositions Used in Criticality Calculations, Rep. PNL-10045, Battelle Pacific Northwest Lab., Richland, WA (1994).
- [VI.25] KUROSAWA, M., NAITO, Y., KANEKO, T., "Isotopic composition of spent fuels for criticality safety evaluation and isotopic composition database (SFCOMPO)", Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, 1995), Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995) 2.11–15.
- [VI.26] HERMANN, O.W., BOWMAN, S.M., BRADY, M.C., PARKS, C.V., Validation of the SCALE System for PWR Spent Fuel Isotopic Composition Analyses, Rep. ORNL/TM-12667, Oak Ridge Natl Lab., TN (1995).
- [VI.27] MITAKE, S., SATO, O., YOSHIZAWA, N., "An analysis of PWR fuel post irradiation examination data for the burnup credit study", Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, 1995), Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995) 5.18–25.
- [VI.28] BOWMAN, S.M., DeHART, M.D., PARKS, C.V., Validation of SCALE-4 for burnup credit applications, Nucl. Technol. 110 (1995) 53.

- [VI.29] GULLIFORD, J., HANLON, D., MURPHY, M., “Experimental validation of calculational methods and data for burnup credit”, Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, 1995), Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995).
- [VI.30] SANTAMARINA, A., et al., “Experimental validation of burnup credit calculations by reactivity worth measurements in the MINERVE Reactor”, *ibid*, 1b.19–25.
- [VI.31] ANNO, J., FOUILLAUD, P., GRIVOT, P., POULLOT, G., “Description and exploitation of benchmarks involving ^{149}Sm , a fission product taking part in the burnup credit in spent fuels”, *ibid*, 5.10–17.
- [VI.32] TAKANO, M., OKUNO, H., OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark, Result of Phase II A, Rep. NEA/NSC/DOC(96)01, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokyo (1996).
- [VI.33] TAKANO, M., OECD/NEA Burnup Credit Criticality Benchmark, Results of Phase-IA, Rep. NEA/NSC/DOC(93)22, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokyo (1994).
- [VI.34] DeHART, M.D., BRADY, M.C., PARKS, C.V., OECD/NEA Burnup Credit Calculational Criticality Benchmark — Phase IB Results, Rep. NEA/NSC/DOC(96)-06 (ORNL-6901), Oak Ridge Natl Lab., TN (1996).
- [VI.35] DeHART, M.D., PARKS, C.V., “Issues related to criticality safety analysis for burnup credit applications”, Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, 1995), Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995) pp. 1b.26–36.
- [VI.36] BOWDEN, R.L., THORNE, P.R., STRAFFORD, P.I., “The methodology adopted by British Nuclear Fuels plc in claiming credit for reactor fuel burnup in criticality safety assessments”, *ibid*, 1b.3–10.
- [VI.37] ZACHAR, M., PRETESACQUE, P., Burnup credit in spent fuel transport to COGEMA La Hague reprocessing plant, Int. J. Radioact. Mater. Transp. 5 2–4 (1994) 273–278.
- [VI.38] EWING, R.I., “Burnup verification measurements at US nuclear utilities using the fork system”, Nuclear Criticality Safety, ICNC '95 (Proc. 5th Int. Conf. Albuquerque, 1995), Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM (1995) 11.64–70.
- [VI.39] EWING, R.I., “Application of a burnup verification meter to actinide-only burnup credit for spent PWR fuel”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 95 (Proc. Int. Symp. Las Vegas, 1995), United States Department of Energy, Washington, DC (1995).
- [VI.40] PARKS, C. V., DYER, H. R. and WHITESIDES, G. E. “Chapter 10, Criticality Safety”, The Radioactive Materials Packaging Handbook: Description, Operations, and Maintenance, L. B. Shappert, Editor, ORNL/M-5003, Oak Ridge National Laboratory, TN (1998).

Apéndice VII

ORIENTACIONES PARA CALCULAR LA INCORPORACIÓN DE ACTIVIDAD EN EL TRANSPORTE DE OCS-III

VII.1. En un accidente relacionado con un OCS-III, la máxima incorporación de actividad de radionucleidos de una persona que se halle en las proximidades del accidente debería ser aproximadamente la misma que la especificada para los bultos del Tipo A (véase el párr. 522.3), es decir, de un valor de $10^{-6}A_2$ o una dosis de inhalación correspondiente de 50 mSv.

INCORPORACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE RADIONUCLEIDOS

VII.2. La incorporación de la actividad de radionucleidos en el caso de una persona que se halle en las proximidades de un accidente de transporte de OCS-III, Q , se calcula de la manera siguiente:

$$Q = Q_{\text{INT_FIX}} + Q_{\text{INT_NF}} + Q_{\text{EXT_FIX}} \quad (\text{VII.1})$$

donde

$Q_{\text{INT_FIX}}$ es la incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija presente en la superficie interior del objeto;

$Q_{\text{INT_NF}}$ es la incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación transitoria presente en la superficie interior del objeto;

$Q_{\text{EXT_FIX}}$ es la incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija presente en la superficie externa del objeto.

Obsérvese que la contaminación transitoria presente en la superficie externa de un OCS-III no ha de superar los límites especificados en el párrafo 508 del Reglamento de Transporte y la incorporación potencial de actividad procedente de la contaminación transitoria presente en la superficie externa se considera, por tanto, intrascendente en comparación con las incorporaciones de actividad $Q_{\text{INT_FIX}}$, $Q_{\text{INT_NF}}$ y $Q_{\text{EXT_FIX}}$ antes señaladas.

VII.3. La incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija presente en la superficie interior del objeto, Q_{INT_FIX} , se puede calcular de la manera siguiente:

$$Q_{INT_FIX} = Q_{INV,INT_FIX} \times F_{SCR,INT_FIX} \times F_{REL,INT_FIX} \times F_{AER,INT_FIX} \times F_{NTK} \quad (VII.2)$$

donde

Q_{INV,INT_FIX} es el inventario de contaminación fija en la superficie interior del objeto que, en el caso de objetos con una contaminación superficial homogénea, puede determinarse a base de lo siguiente:

$$Q_{INV,INT_FIX} = C_{INT_FIX} \times A_{INT} \quad (VII.3)$$

donde

C_{INT_FIX} es el nivel de contaminación superficial fija en la superficie interior por área unitaria;

A_{INT} es el área de la superficie interior del objeto;

F_{SCR,INT_FIX} es la fracción de contaminación fija raspada de la superficie interior en un accidente;

F_{REL,INT_FIX} es la fracción de contaminación fija raspada de la superficie interior que se libera y desprende del objeto en un accidente;

F_{AER,INT_FIX} es la fracción de actividad emitida de la contaminación fija raspada de la superficie interior en forma de aerosol respirable;

F_{NTK} es la fracción de actividad emitida respirable incorporada por una persona en las proximidades del accidente.

VII.4. La incorporación de la actividad de radionucleidos debida a la contaminación transitoria en la superficie interior del objeto, Q_{INT_NF} , puede calcularse de forma parecida, salvo que debería suponerse que puede liberarse el 100 % de la contaminación transitoria presente en el objeto sin que tengan que raspase las superficies; la fórmula de cálculo sería la siguiente:

$$Q_{INT_NF} = Q_{INV,INT_NF} \times F_{REL,INT_NF} \times F_{AER,INT_NF} \times F_{NTK} \quad (VII.4)$$

donde

Q_{INV,INT_NF} es el inventario de la contaminación transitoria en la superficie interior del objeto que, en el caso de objetos con una contaminación superficial homogénea, puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$Q_{INV,INT_NF} = C_{INT_NF} \times A_{INT} \quad (VII.5)$$

donde

C_{INT_NF} es el nivel de contaminación superficial transitoria en la superficie interior por área unitaria;

A_{INT} es el área de la superficie interior del objeto;

F_{REL,INT_NF} es la fracción de la contaminación transitoria en la superficie interior del objeto que se libera y escapa del objeto en un accidente (la función F_{REL,INT_NF} debería tomarse como una unidad (100 %), salvo que pueda justificarse el uso de una fracción de emisión inferior);

F_{AER,INT_NF} es la fracción de actividad emitida procedente de la contaminación transitoria en la superficie interior del objeto en forma de aerosol respirable;

F_{NTK} es la fracción de actividad emitida respirable incorporada por una persona en las proximidades del accidente.

VII.5. La incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija en la superficie externa del objeto, Q_{EXT_FIX} , puede calcularse de forma parecida que la presente en la superficie interior, sustituyendo el subíndice INT por el subíndice EXT en la ecuación (VII.2), de la siguiente manera:

$$Q_{EXT_FIX} = Q_{INV,EXT_FIX} \times F_{SCR,EXT_FIX} \times F_{REL,EXT_FIX} \times F_{AER,EXT_FIX} \times F_{NTK} \quad (VII.6)$$

donde

Q_{INV,EXT_FIX} es el inventario de contaminación fija en la superficie externa del objeto que, cuando se trata de objetos con una contaminación superficial homogénea, puede determinarse como sigue:

$$Q_{INV,EXT_FIX} = C_{EXT_FIX} \times A_{EXT} \quad (VII.7)$$

donde

C_{EXT_FIX} es el nivel de contaminación superficial fija presente en la superficie externa por área unitaria;

A_{EXT} es el área de la superficie externa del objeto;

F_{SCR,EXT_FIX} es la fracción de contaminación fija raspada de la superficie externa en un accidente;

F_{REL,EXT_FIX} es la fracción de contaminación fija raspada de la superficie externa que se libera y escapa del objeto en un accidente;

F_{AER,EXT_FIX} es la fracción de la actividad emitida de la contaminación fija raspada de la superficie externa que se encuentra en forma de aerosol respirable;

F_{NTK} es la fracción de la actividad emitida respirable que recibe una persona en las proximidades del accidente.

EJEMPLOS DE CÁLCULOS

Niveles de contaminación

VII.6. Puesto que la superficie interior de un OCS-III se considera una superficie inaccesible, el límite de contaminación es 8×10^5 Bq/cm² para la contaminación fija más la contaminación transitoria presente en la superficie interior. En el ejemplo siguiente se ha elegido un valor cercano a este límite para el nivel de la contaminación fija en la superficie interior.

$$C_{INT_FIX} = 7 \times 10^5 \text{ Bq/cm}^2 \quad (VII.8)$$

VII.7. En este ejemplo se utiliza un valor de 400 Bq/cm^2 para el nivel de contaminación transitoria presente en la superficie interior.

$$C_{\text{INT_NF}} = 400 \text{ Bq/cm}^2 \quad (\text{VII.9})$$

VII.8. En el Reglamento de Transporte no existe límite para la contaminación fija en la superficie externa de un OCS-III (véase el párr. 413.13). En este ejemplo se utiliza un valor de $4 \times 10^4 \text{ Bq/cm}^2$.

$$C_{\text{EXT_FIX}} = 4 \times 10^4 \text{ Bq/cm}^2 \quad (\text{VII.10})$$

Áreas superficiales

VII.9. En este ejemplo se utilizan valores de 10 m^2 (10^5 cm^2), tanto para las áreas de la superficie interior como de la superficie externa.

$$A_{\text{INT}} = A_{\text{EXT}} = 10 \text{ m}^2 = 10^5 \text{ cm}^2 \quad (\text{VII.11})$$

Fracción de la superficie que se raspa en un accidente

VII.10. Al igual que en el modelo de un OCS-I (véase el párr. 413.4), en este ejemplo se considera que durante un accidente se raspa el 20 % de las superficies interiores y exteriores.

$$F_{\text{SCR, INT_FIX}} = F_{\text{SCR, EXT_FIX}} = 0,2 \quad (\text{VII.12})$$

Fracción de la contaminación procedente de la superficie raspada que se libera

VII.11. En este ejemplo se considera que en un accidente se liberan del objeto el 1 % de la contaminación fija procedente de la superficie interior raspada, el 100 % de la contaminación transitoria en la superficie interior y el 20 % de la contaminación fija procedente de la superficie externa raspada.

$$F_{\text{REL, INT_FIX}} = 0,01 \quad (\text{VII.13})$$

$$F_{\text{REL, INT_NF}} = 1 \quad (\text{VII.14})$$

$$F_{\text{REL, EXT_FIX}} = 0,2 \quad (\text{VII.15})$$

Fracción de la actividad emitida en forma de aerosol respirable y fracción de actividad respirable incorporada por una persona en las proximidades del accidente

VII.12. Para que coincida con el supuesto básico del sistema Q formulado para los bultos del Tipo A (véase el apéndice I), en este ejemplo se considera que el 100 % de la actividad emitida se encuentra en forma de aerosol respirable y que una persona en las proximidades del accidente inhala el 0,01 % de la actividad respirable emitida.

$$F_{AER, INT_FIX} = F_{AER, INT_NF} = F_{AER, EXT_FIX} = 1 \quad (VII.16)$$

$$F_{NTK} = 10^{-4} \quad (VII.17)$$

Incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija en la superficie interior

VII.13. El inventario de la contaminación fija en la superficie interior del objeto se calcula en primer lugar mediante la ecuación (VII.3) siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{INV, INT_FIX} &= C_{INT_FIX} \times A_{INT} = 7 \times 10^5 \text{ Bq/cm}^2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \\ &= 7 \times 10^{10} \text{ Bq} \end{aligned} \quad (VII.18)$$

VII.14. A continuación, la incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija en la superficie interior se calcula mediante la ecuación (VII.2) siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{INT_FIX} &= Q_{INV, INT_FIX} \times F_{SCR, INT_FIX} \times F_{REL, INT_FIX} \\ &\quad \times F_{AER, INT_FIX} \times F_{NTK} \\ &= 7 \times 10^{10} \text{ Bq} \times 0,2 \times 0,01 \times 1 \times 10^{-4} = 14 \times 10^3 \text{ Bq} = 14 \text{ kBq} \end{aligned} \quad (VII.19)$$

Incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación transitoria en la superficie interior

VII.15. El inventario de contaminación transitoria presente en la superficie interior del objeto se calcula en primer lugar mediante la ecuación (VII.5) siguiente:

$$Q_{INV, INT_NF} = C_{INT_NF} \times A_{INT} = 400 \text{ Bq/cm}^2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \quad (VII.20)$$

$$= 4 \times 10^7 \text{ Bq}$$

VII.16. A continuación, la incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación transitoria presente en la superficie interior se calcula mediante la ecuación (VII.4) siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{\text{INT_NF}} &= Q_{\text{INV, INT_NF}} \times F_{\text{REL, INT_NF}} \times F_{\text{AER, INT_NF}} \times F_{\text{NTK}} & (\text{VII.21}) \\ &= 4 \times 10^7 \text{ Bq} \times 1 \times 1 \times 10^{-4} = 4 \times 10^3 \text{ Bq} = 4 \text{ kBq} \end{aligned}$$

Incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija en la superficie externa

VII.17. El inventario de contaminación fija en la superficie externa del objeto se calcula en primer lugar mediante la ecuación (VII.7) siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{\text{INV, EXT_FIX}} &= C_{\text{EXT_FIX}} \times A_{\text{EXT}} & (\text{VII.22}) \\ &= 4 \times 10^4 \text{ Bq/cm}^2 \times 10^5 \text{ cm}^2 = 4 \times 10^9 \text{ Bq} \end{aligned}$$

VII.18. A continuación, la incorporación de actividad de radionucleidos debida a la contaminación fija en la superficie externa se calcula mediante la ecuación (VII.6) siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{\text{EXT_FIX}} &= Q_{\text{INV, EXT_FIX}} \times F_{\text{SCR, EXT_FIX}} \times F_{\text{REL, EXT_FIX}} & (\text{VII.23}) \\ &\quad \times F_{\text{AER, EXT_FIX}} \times F_{\text{NTK}} \\ Q_{\text{EXT_FIX}} &= 4 \times 10^9 \text{ Bq} \times 0,2 \times 0,2 \times 1 \times 10^{-4} = 16 \times 10^3 \text{ Bq} = 16 \text{ kBq} \end{aligned}$$

Incorporación de actividad total de radionucleidos del objeto

VII.19. La incorporación de actividad total de radionucleidos del objeto se calcula finalmente mediante la ecuación (VII.1) siguiente:

$$\begin{aligned} Q &= Q_{\text{INT_FIX}} + Q_{\text{INT_NF}} + Q_{\text{EXT_FIX}} \\ &= 14 \text{ kBq} + 4 \text{ kBq} + 16 \text{ kBq} = 34 \text{ kBq} & (\text{VII.24}) \end{aligned}$$

Conclusión del ejemplo

VII.20. Suponiendo que $A_2 = 0,04 \text{ TBq}$ ($4 \times 10^7 \text{ kBq}$), la incorporación de actividad en función de A_2 sería:

$$Q = \frac{34 \text{ kBq}}{4 \times 10^7 \text{ kBq}} A_2 = 0,85 \times 10^{-6} A_2 \quad (\text{VII.25})$$

Un OCS-III, con los supuestos anteriores, ofrece un nivel de seguridad equivalente a un bulto del Tipo A en relación con la incorporación de actividad de una persona presente en las proximidades del accidente, según se señala en el párrafo VII.1.

VII.21. En las autorizaciones de expedición de OCS-III se deberían examinar y justificar todos los parámetros que se indican en los párrafos VII.2 a VII.5. Los parámetros A_{INT} y A_{EXT} pueden calcularse a partir de las ilustraciones del diseño de los componentes. La distribución y composición de radionucleidos de los parámetros $C_{\text{INT_FIX}}$, $C_{\text{INT_NF}}$ y $C_{\text{EXT_FIX}}$, que llevan a los parámetros Q_{INV} , $Q_{\text{INT_FIX}}$, $Q_{\text{INT_NF}}$ y $Q_{\text{INV_EXT_FIX}}$ de todo el componente pueden medirse, o modelarse correctamente para una serie de componentes, junto con una medición de verificación de los elementos representativos de cada componente. Los parámetros $F_{\text{SCR_INT}}$, $F_{\text{SCR_EXT}}$, F_{AER} y F_{NTK} son sensibles y se debería demostrar su idoneidad con referencias bibliográficas (por ejemplo, las refs. [VII.1, VII.2]), ensayos o una argumentación razonada. El parámetro F_{NTK} puede tener un valor de 10^{-4} – 10^{-3} , según se señala en el párrafo I.37 en relación con el sistema Q.

VII.22. Se debería prestar atención a la composición de los radionucleidos del inventario. Por ejemplo, en el caso de radionucleidos desconocidos emisores β y γ , un límite de inventario de $10A_2$ corresponde a $0,2 \text{ TBq}$, que equivale a $4 \times 10^3 \text{ Bq/cm}^2$ si se supone un área superficial de 5000 m^2 (un área típica de la superficie interior de un generador de vapor). Se trata de dos órdenes de magnitud inferiores al límite del nivel de contaminación superficial inaccesible de un OCS-III, que es $8 \times 10^5 \text{ Bq/cm}^2$. En cambio, cuando el Co 60 es el único radionucleido presente, el nivel permisible de contaminación superficial inaccesible es de 4 TBq y $8 \times 10^4 \text{ Bq/cm}^2$.

REFERENCIAS DEL APÉNDICE VII

- [VII.1] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fraction for Nonreactor Nuclear Facilities, DOE-HDBK-3010-94, USDOE, Washington, DC (1994).
- [VII.2] GRAY, I., “Development of an improved radiological basis and revised requirements for the transport of LSA/SCO materials”, Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2004 (Proc. Int. Symp. Berlin 2004), Ramtrans Publishing, Ashford, UK (2004).

Apéndice VIII

TRANSPORTE EN DETERMINADAS SITUACIONES

INTRODUCCIÓN

VIII.1. Las presentes orientaciones se formulan a los efectos de prever determinadas situaciones en que pueda garantizarse un transporte sin riesgos, aun cuando no esté claramente definido el marco reglamentario. Por ejemplo, quizás no exista una autoridad reguladora en un país para atender las cuestiones de la seguridad del transporte de materiales radiactivos o no se hayan aplicado reglamentaciones para el transporte seguro de materiales radiactivos. Aun cuando esté establecida la infraestructura reglamentaria, se requieren algunas orientaciones para determinadas situaciones especiales, como por ejemplo:

- a) el transporte de fuentes huérfanas que hayan sido descubiertas;
- b) el transporte ulterior de un bulto que haya sufrido graves daños en un accidente, y
- c) el transporte en situaciones de emergencia.

TRANSPORTE DE FUENTES HUÉRFANAS

VIII.2. Tras el descubrimiento de fuentes huérfanas se procederá de inmediato a su transporte a un lugar más seguro, por ejemplo, al proveedor original de la fuente o a un emplazamiento de disposición final autorizado. El remitente debe tratar la fuente huérfana de la misma manera que cualquier otro material radiactivo que vaya a ser transportado en conformidad con el Reglamento de Transporte.

Materiales radiactivos

VIII.3. En la preparación para su transporte la fuente huérfana debería caracterizarse (por ejemplo, mediante la individualización de los radionucleidos, la evaluación de la actividad y la comprobación de fugas o contaminación). Si la fuente se ha de transportar como material radiactivo en forma especial, tal vez sea necesario su reencapsulado cuando no se disponga de un certificado para materiales en forma especial o este requisito no sea aplicable (es decir, cuando la fuente supere su vida útil o no existan suficientes datos sobre su origen). Una vez que sea reencapsulada, la fuente debería cumplir los requisitos aplicables a

los materiales radiactivos en forma especial. Si no es posible el reencapsulado, debería proveerse un bulto apropiado.

Bulto

VIII.4. La caracterización de los materiales radiactivos determina el tipo de bulto requerido y define a su vez la elección del diseño del bulto.

VIII.5. Un experto cualificado debería medir las tasas de dosis y los niveles de contaminación para que no se superen los límites reglamentarios. (Véanse en los párrs. VIII.10 a VIII.12 las orientaciones para los casos en que no exista un órgano regulador o las reglamentaciones correspondientes).

Expedición en virtud de arreglos especiales

VIII.6. En muchas situaciones relacionadas con el transporte de fuentes huérfanas tal vez tenga que recurrirse a envíos en virtud de arreglos especiales. Antes de la expedición del bulto el remitente debería obtener las aprobaciones multilaterales necesarias.

TRANSPORTE DE UN BULTO QUE HAYA SUFRIDO GRAVES DAÑOS

VIII.7. Es posible que un bulto de materiales radiactivos sufra graves daños en un accidente. En tales casos el bulto tendrá que ser retirado del dominio público a un lugar seguro. Cuando el bulto dañado no cumpla las reglamentaciones aplicables es probable que tenga que ser transportado en mal estado.

VIII.8. Deberían realizarse operaciones de recuperación y podrían requerirse medidas apropiadas para garantizar la contención permanente y la integridad del blindaje durante el transporte. El bulto tendría que ser transportado en virtud de arreglos especiales (con su posterior marcado y etiquetado), obtener la aprobación multilateral e ir acompañado de los documentos de transporte aplicables.

TRANSPORTE EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

VIII.9. Cabe señalar que en los reglamentos nacionales e internacionales algunas operaciones de transporte podrían declararse exentas de la aplicación

de los requisitos del Reglamento de Transporte. Por ejemplo, en la referencia [VIII.1] se incluyen exenciones para lo siguiente:

- a) El transporte a cargo de las autoridades competentes para la respuesta a emergencias o bajo su supervisión, en tanto que ese transporte sea necesario para dar respuesta a una emergencia, en particular, el transporte:
 - por vehículos de remolque que acarreen vehículos que hayan intervenido en accidentes o que se hayan averiado y contengan mercancías peligrosas, o
 - para acarrear y recuperar las mercancías peligrosas relacionadas con un incidente o accidente y trasladarlas al lugar seguro más cercano.
- b) El transporte de emergencia destinado a salvar vidas humanas o proteger el medio ambiente, siempre que se adopten todas las medidas para asegurar que ese transporte se lleve a cabo con un nivel de seguridad aceptable.

TRANSPORTE DENTRO/A TRAVÉS/HACIA/DESDE UN PAÍS EN QUE NO EXISTA UN ÓRGANO REGULADOR O LAS REGLAMENTACIONES NECESARIAS PARA EL TRANSPORTE SEGURO DE MATERIALES RADIATIVOS

VIII.10. Algunos países no han establecido una infraestructura de reglamentación para el transporte seguro de materiales radiactivos. Para esas situaciones, el remitente/destinatario debería dirigirse a la División de Seguridad Radiológica, del Transporte y de los Desechos del OIEA para obtener orientación en cuanto al procedimiento que ha de seguirse.

VIII.11. Si no se aplican reglamentaciones para el transporte seguro de materiales radiactivos en un país, debería aplicarse el Reglamento de Transporte (es decir, la edición de 2018) para el transporte dentro o a través de ese país o hacia y desde su territorio.

VIII.12. Si no se ha designado un órgano regulador para el transporte seguro de materiales radiactivos en un país, el primer certificado de aprobación (arreglo especial), que debería ser aprobado por todos los países en relación con la expedición podrá ser expedido por el órgano regulador nacional de protección radiológica establecido en el país. La División de Seguridad Radiológica, del Transporte y de los Desechos del OIEA puede proporcionar orientación con respecto a la aplicación de las reglamentaciones internacionales sobre seguridad del transporte.

Cumplimentación del envío

VIII.13. En tales situaciones especiales la autoridad competente o el órgano regulador de seguridad interesado debería continuar dando seguimiento a la expedición hasta su despacho en condiciones de seguridad. El remitente debería informar a la autoridad competente sobre el despacho de la expedición en condiciones de seguridad.

REFERENCIA DEL APÉNDICE VIII

[VIII.1] COMISIÓN ECONÓMICA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EUROPA, COMITÉ DE TRANSPORTES INTERIORES, *Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)*, edición de 2021, CEPE, Nueva York y Ginebra, 2020.

COLABORADORES EN LA PREPARACIÓN Y REVISIÓN

Aceña Moreno, M. V.	Consejo de Seguridad Nuclear (España)
Alvano, P.	Instituto Nacional para la Protección e Investigación del Medio Ambiente (Italia)
Ben Ouaghrem, K.	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Francia)
Börst, F.-M.	Bundesamt für Strahlenschutz (Alemania)
Boyle, R.	Departamento de Transporte de los Estados Unidos (Estados Unidos de América)
Buchelnikov, A.	Corporación Estatal de Energía Atómica (Federación de Rusia)
Cabianca, T.	Agencia de Protección de la Salud (Reino Unido)
Capadona, N.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Charette, M. A.	Cameco Corporation (Canadá)
Chrupek, T.	Autorité de Sûreté Nucléaire (Francia)
Debruyne, M.	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Francia)
Desnoyers, B.	Organización Internacional de Normalización
Elechosa, C.	Autoridad Regulatoria Nuclear (Argentina)
Ershov, V. N.	Centro de Respuesta a Emergencias (Federación de Rusia)
Faille, S.	Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (Canadá)
Fasten, C.	Bundesamt für Kerntechnische Entsorgungssicherheit (Alemania)
Ferran, G.	Autorité de Sûreté Nucléaire (Francia)

Fukuda, T.	Secretaría del Organismo de Reglamentación Nuclear (Japón)
Gauthier, F.	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Francia)
Hellsten, S.	Organismo de Seguridad Radiológica y Nuclear (Finlandia)
Hirose, M.	Secretaría del Organismo de Reglamentación Nuclear (Japón)
Ito, D.	Nuclear Fuel Transport Co. (Japón)
Kervella, O.	Comisión Económica para Europa
Kirchnawy, F.	Ministerio Federal de Transporte, Innovación y Tecnología (Austria)
Koch, F.	Inspección Federal de Seguridad Nuclear (Suiza)
Komann, S.-M.	Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung (Alemania)
Konnai, A.	Instituto Nacional de Investigación Marítima (Japón)
Krochmaluk, J.	Autorité de Sûreté Nucléaire (Francia)
Lizot, M.-T.	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Francia)
Malesys, P.	Instituto Mundial de Transporte Nuclear
Moutarde, M.	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Francia)
Muneeer, M.	Autoridad Reguladora Nucleara del Pakistán (Pakistán)
Patko, A. L.	NAC Atlanta Corporate Headquarters (Estados Unidos de América)
Presta, A.	Instituto Mundial de Transporte Nuclear
Pstrak, D.	Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (Estados Unidos de América)

Rainer, N.	Gesellschaft für Nuklear-Service (Alemania)
Ramsay, J.	Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (Canadá)
Reiche, I.	Bundesamt für Kerntechnische Entsorgungssicherheit (Alemania)
Rooney, K.	Organización de Aviación Civil Internacional
Sampson, M.	Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (Estados Unidos de América)
Sert, G.	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Francia)
Tremblay, I.	Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (Canadá)
Trivelloni, S.	Instituto Nacional de Protección e Investigación del Medio Ambiente (Italia)
van Aarle, J.	AXPO Power AG/Nuclear Energy (Suiza)
Vogiatzi, S.	Comisión Griega de Energía Atómica (Grecia)
Wallin, M.	Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica (Suecia)
Whittingham, S.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Zamora Martin, F.	Consejo de Seguridad Nuclear (España)
Zika, H.	Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica (Suecia)



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 27

PEDIDOS DE PUBLICACIONES

Las publicaciones de pago del OIEA pueden adquirirse a través de nuestro distribuidor principal o en las principales librerías locales.

Los pedidos de publicaciones gratuitas deben hacerse directamente al OIEA.

Pedidos de publicaciones de pago

Póngase en contacto con su proveedor local de preferencia o con nuestro distribuidor principal:

Eurospan

1 Bedford Row
Londres WC1R 4BU
Reino Unido

Pedidos comerciales y consultas:

Teléfono: +44 (0)1235 465576
Correo electrónico: trade.orders@marston.co.uk

Pedidos individuales:

Teléfono: +44 (0)1235 465577
Correo electrónico: direct.orders@marston.co.uk
www.eurospanbookstore.com/iaea

Para más información:

Teléfono: +44 (0) 207 240 0856
Correo electrónico: info@eurospan.co.uk
www.eurospan.co.uk

Los pedidos de publicaciones, tanto de pago como gratuitas, pueden enviarse directamente a:

Sección Editorial
Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Viena (Austria)
Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530
Correo electrónico: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/es/publicaciones

Seguridad mediante las normas internacionales

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA