

ANEXO 18

RESOLUCIÓN MSC.420(97) (adoptada el 25 de noviembre de 2016)

RECOMENDACIONES PROVISIONALES PARA EL TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LICUADO A GRANEL

EL COMITÉ DE SEGURIDAD MARÍTIMA,

RECORDANDO el artículo 28 b) del Convenio constitutivo de la Organización Marítima Internacional, artículo que trata de las funciones del Comité,

TOMANDO NOTA de que el Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar ("el Convenio"), 1974, y el Código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel ("el Código CIG") no contienen actualmente prescripciones específicas para el transporte por mar de hidrógeno licuado a granel,

TOMANDO NOTA TAMBIÉN de que en el párrafo 5 del preámbulo del Código CIG se estipula que las prescripciones relativas a nuevos productos y a las condiciones de su transporte se distribuirán en forma de recomendaciones y con carácter provisional, antes de la entrada en vigor de las enmiendas correspondientes,

RECONOCIENDO la necesidad de elaborar recomendaciones provisionales para el transporte de hidrógeno licuado a granel,

RECONOCIENDO que, en el ínterin, existe la necesidad urgente de proporcionar a las Administraciones recomendaciones sobre el transporte de hidrógeno licuado a granel en condiciones de seguridad,

RECONOCIENDO ASIMISMO que el objetivo de las Recomendaciones provisionales es facilitar el establecimiento de un acuerdo tripartito para un buque piloto que se concertará para la investigación y la demostración del transporte internacional de larga distancia de hidrógeno licuado a granel en condiciones de seguridad,

HABIENDO EXAMINADO las Recomendaciones provisionales elaboradas por el Subcomité de transporte de cargas y contenedores en su 3º periodo de sesiones,

1 ADOPTA las Recomendaciones provisionales para el transporte de hidrógeno licuado a granel, cuyo texto se presenta en el anexo de la presente resolución;

2 INVITA a los Estados Miembros a que apliquen las Recomendaciones provisionales al buque piloto para el transporte de hidrógeno licuado a granel teniendo en cuenta las notas explicativas;

3 ACUERDA adquirir información sobre el transporte de hidrógeno licuado a granel en condiciones de seguridad antes de proceder a enmendar el Código CIG para incluir el hidrógeno licuado;

4 ACUERDA ASIMISMO que es posible que estas Recomendaciones provisionales se tengan que examinar si van a aplicarse a otros buques distintos del buque piloto;

5 INSTA a los Estados Miembros y al sector a que presenten información, observaciones, comentarios y recomendaciones basados en la experiencia práctica adquirida con la aplicación de las Recomendaciones provisionales y a que presenten un análisis de seguridad pertinente sobre los buques que transportan hidrógeno licuado a granel.

ANEXO

RECOMENDACIONES PROVISIONALES PARA EL TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LICUADO A GRANDEL

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Para el transporte de gases licuados a granel, los buques deberían cumplir las prescripciones pertinentes del Código CIG ("el Código"), enmendado por la resolución MSC.370(93). El ámbito de aplicación del Código, que se indica en el párrafo 1.1.1, es el siguiente:

"El Código se aplica a los buques con independencia de su tamaño, incluidos los de arqueo bruto inferior a 500, que se dediquen al transporte a granel de gases licuados con una presión de vapor absoluta superior a 0,28 MPa a una temperatura de 37,8 °C y de otros productos, cuya lista figura en el capítulo 19."

1.2 Un buque que transporte hidrógeno licuado a granel (en adelante, "buque para el transporte de hidrógeno licuado") debería cumplir lo dispuesto en el Código.

1.3 El Código exige que un gasero cumpla las prescripciones mínimas sobre la carga que se enumeran en el capítulo 19. Sin embargo, las prescripciones sobre el hidrógeno licuado no se especifican en el Código.

1.4 En el presente anexo figuran las recomendaciones provisionales para el transporte de hidrógeno licuado a granel a las que se hace referencia en el párrafo 5 del preámbulo del Código, cuyo objetivo es servir de base para las prescripciones mínimas futuras sobre el transporte de dicha carga.

1.5 Las presentes recomendaciones se han elaborado partiendo del supuesto de que un buque para el transporte de hidrógeno licuado no lleva gases licuados distintos del hidrógeno licuado. Por consiguiente, las presentes recomendaciones no son aplicables a los buques para el transporte de hidrógeno licuado que lleven gases distintos del hidrógeno licuado.

1.6 En el Código se hace referencia al párrafo 5 del preámbulo, al párrafo 1.1.6.1 y a la instrucción nº 8 para cumplimentar el certificado en el "Modelo de formulario del Certificado internacional de aptitud para el transporte de gases licuados a granel" en el apéndice 2 del Código.

2 RECOMENDACIONES PROVISIONALES PARA EL TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LICUADO A GRANDEL

2.1 Las Recomendaciones provisionales para el transporte de hidrógeno licuado a granel se han elaborado a partir de los resultados de un estudio comparativo de cargas similares que se enumeran en el capítulo 19 del Código, por ejemplo, gas natural licuado.

2.2 El capítulo 19 del Código rige la aplicación de prescripciones generales para las cargas respectivas. La selección de las prescripciones generales de las distintas cargas se indica en las columnas "c" a "g". Además de las prescripciones generales, podrán aplicarse prescripciones especiales a cargas específicas en función de las propiedades/peligros de las cargas.

2.3 En los cuadros 1 y 2 se especifica la selección propuesta de las prescripciones generales y de las prescripciones especiales, respectivamente, para el hidrógeno licuado.

Cuadro 1: Recomendaciones provisionales para el transporte de hidrógeno licuado a granel

<i>A</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
Nombre del producto		Tipo de buque	Tanque de tipo C independiente prescrito	Control del espacio de vapor dentro de los espacios de carga	Detección de vapor	Dispositivos de medición		Prescripciones especiales
Hidrógeno		2G	-	-	F	C		Véase el cuadro 2

Cuadro 2: Prescripciones especiales para el transporte de hidrógeno licuado a granel

Nº	Prescripción especial	Peligro conexo
1	Las prescripciones sobre los materiales cuya temperatura de proyecto sea inferior a -165 °C deberían acordarse con la Administración teniendo en cuenta las normas adecuadas. Cuando la temperatura de proyecto mínima sea inferior a -196 °C, las propiedades de los materiales de aislamiento deberían someterse a prueba con el medio adecuado, para la gama de temperaturas prevista en el servicio.	Baja temperatura (véase 4.2.1)
2	Los materiales de construcción y el equipo auxiliar, por ejemplo, el aislamiento, deberían ser resistentes a los efectos de las grandes concentraciones de oxígeno provocadas por la condensación y el enriquecimiento a las bajas temperaturas que se alcanzan en algunas partes del sistema de la carga. (Véase la prescripción sobre el nitrógeno).	Baja temperatura (véase 4.2.2)
3	Para las tuberías de carga que contengan hidrógeno líquido y vapor de hidrógeno frío deberían adoptarse medidas a fin de evitar que las superficies expuestas alcancen una temperatura de -183 °C. En los lugares en los que las medidas preventivas contra las bajas temperaturas no sean lo suficientemente eficaces, por ejemplo, los colectores de la carga, podrán permitirse otras medidas adecuadas distintas de las preventivas, como una ventilación que evite la formación de oxígeno muy enriquecido y la instalación de bandejas que recojan el aire líquido. El aislamiento de los sistemas de tuberías para el hidrógeno líquido que estén expuestas a la atmósfera debería ser de material incombustible y debería estar proyectado de manera que cuente con un cierre en su recubrimiento externo para evitar la condensación del aire y el posterior enriquecimiento con oxígeno dentro del aislamiento.	Baja temperatura (véase 4.2.2)
4	Los sistemas de las tuberías de la carga deberían estar provistos de medios adecuados, por ejemplo, filtros, para eliminar las sustancias impuras condensadas a una temperatura baja.	Baja temperatura (véase 4.2.3)
5	Los sistemas de alivio de la presión deberían estar correctamente proyectados y construidos para evitar su bloqueo como consecuencia de la acumulación de agua o hielo.	Baja temperatura (véase 4.2.4)
6	En los lugares en los que esté previsto el contacto con el hidrógeno deberían utilizarse materiales adecuados para evitar cualquier deterioro debido a la fragilidad producida por el hidrógeno, según proceda.	Fragilidad producida por el hidrógeno (véase 4.3)

7	Todas las juntas soldadas de los fondos de los tanques de carga deberían ser del tipo de soldadura a tope en el plano con penetración total. Para las conexiones de la bóveda al forro solamente se podrán utilizar juntas soldadas en T del tipo de penetración total, en función de los resultados de las pruebas realizadas en el momento del refrendo del procedimiento de soldadura.	Permeabilidad (véase 4.4.1)
8	Los lugares en los que puedan producirse fugas de hidrógeno, por ejemplo, válvulas de las cargas, bridas y cierres, deberían estar provistos de estructuras de tubos dobles que garanticen que no se produzcan fugas, o detectores de hidrógeno fijos que puedan detectar fugas de este gas.	Permeabilidad (véase 4.4.2)
9	Debería utilizarse helio o una mezcla de 5 % de hidrógeno y 95 % de nitrógeno como medio de prueba de estanquidad para los tanques de carga y las tuberías de la carga.	Permeabilidad (véase 4.4.3)
10	La cantidad de dióxido de carbono transportada para un sistema de extinción de incendios a base de dicho compuesto debería bastar para facilitar una cantidad de gas libre igual, como mínimo, al 75 % del volumen bruto del compresor de la carga y las cámaras de las bombas en todos los casos.	Incendio producido por hidrógeno (véase 4.7.3) Gama amplia de límites de inflamabilidad (véase 4.10)
11	Cuando sea posible el deterioro de la capacidad de aislamiento como consecuencia de una avería única, deberían adoptarse las medidas de seguridad adecuadas teniendo en cuenta dicho deterioro.	Alta presión (véase 4.8)
12	Cuando se utilice el aislamiento por vacío para un sistema de contención de la carga, el rendimiento del aislamiento debería evaluarse a satisfacción de la Administración mediante experimentos, si es necesario.	General (véase 4.1)
13	Deberían adoptarse las medidas adecuadas para evitar que los respiraderos se bloqueen como consecuencia de la acumulación de hielo formado a partir de la humedad del aire.	Baja temperatura (véase 4.2.2)
14	Debería prestarse la consideración debida a los medios para la manipulación del gas de evaporación.	Alta presión (véase 4.8)
15	Debería prestarse la consideración debida a la electricidad estática asociada con la maquinaria giratoria o alternativa, incluida la instalación de cintas conductoras para la maquinaria y las medidas preventivas incorporadas en los procedimientos de funcionamiento y mantenimiento. Deberían facilitarse indumentaria y calzado antiestáticos y un detector de hidrógeno portátil a cada miembro de la tripulación que trabaje en la zona de carga.	Electricidad estática (véase 4.9.2)
16	El manual de operaciones de un buque para el transporte de hidrógeno licuado debería incluir las limitaciones de las distintas operaciones en relación con las condiciones ambientales.	Gama amplia de límites de inflamabilidad (véase 4.10)
17	Debería establecerse un procedimiento adecuado para el calentamiento, la purga del gas inerte, la desgasificación, la purga del hidrógeno y el preenfriamiento. El procedimiento debería incluir lo siguiente: <ul style="list-style-type: none"> .1 la selección del gas inerte en relación con el límite de temperatura; .2 la medición de la concentración de gas; .3 la medición de la temperatura; .4 los índices de suministro de los gases; .5 las condiciones para el inicio, la interrupción, la reanudación y la terminación de cada operación; .6 el tratamiento de los gases de retorno; y .7 la descarga de gases. 	Prevención de una operación de purga peligrosa (véase 4.11)

18	Sólo debería cargarse parahidrógeno casi puro (es decir, de más del 95 % de pureza) a fin de evitar un calentamiento excesivo por la conversión de ortohidrógeno en parahidrógeno.	General (véase 4.1)
19	Los detectores de incendios de hidrógeno deberían seleccionarse tras las deliberaciones correspondientes teniendo en cuenta las características de dichos incendios, a satisfacción de la Administración.	Características de un incendio de hidrógeno (véase 4.7.4)
20	En la etapa de proyecto debería analizarse la dispersión del hidrógeno en las salidas de los respiraderos a fin de reducir al mínimo el riesgo de entrada de gas inflamable en los espacios de alojamiento, espacios de servicio, espacios de máquinas y puestos de control. La extensión de las zonas peligrosas debería examinarse a partir de los resultados del análisis.	Baja densidad y alta difusividad (véase 4.5)
21	Debería prestarse la consideración debida a las medidas de seguridad adecuadas para evitar la formación de una mezcla explosiva en caso de que se produzca una fuga de hidrógeno, incluidas las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> .1 la instalación de detectores de hidrógeno para revelar el posible desplazamiento por el fondo de gas hidrógeno a baja temperatura, y en puntos elevados en espacios en los que pueda haber gas hidrógeno caliente atrapado; y .2 la aplicación de las "mejores prácticas" para el almacenamiento de hidrógeno líquido en tierra, teniendo en cuenta las orientaciones oportunas, por ejemplo, el "<i>Cryogenics Safety Manual – Cuarta edición (1998)</i>"⁽⁸⁾. 	General (véase 4.1)
22	En el caso de que se utilicen elementos fusibles como medio de detección de incendios, tal como se prescribe en el párrafo 18.10.3.2 del Código CIG, deberían facilitarse además detectores de llamas adecuados para las llamas de hidrógeno en los mismos lugares. Deberían adoptarse medidas adecuadas para impedir la activación del sistema ESD como consecuencia de una falsa alarma de los detectores de llamas, por ejemplo, evitando la activación del sistema ESD por un único sensor (método de activación por señal múltiple).	Peligro de incendio (véase 4.7.4)
23	Debería examinarse la mejora de la capacidad de ventilación de los espacios cerrados susceptibles de fugas de hidrógeno licuado, teniendo en cuenta el calor latente de vaporización, el calor específico y el volumen del gas hidrógeno en relación con la temperatura y la capacidad calorífica de los espacios adyacentes.	Baja densidad y alta difusividad (véase 4.5)
24	Las tuberías de hidrógeno líquido y gaseoso no deberían atravesar espacios cerrados distintos de los mencionados en el párrafo 5.2.2.1.2 del Código CIG, salvo en las condiciones siguientes: <ul style="list-style-type: none"> .1.1 los espacios están provistos de sistemas de detección de gas que activan la alarma a un nivel no superior al 30 % del límite inferior de inflamabilidad y cierran las válvulas de aislamiento oportunas a un nivel no superior al 60 % del límite inferior de inflamabilidad (véanse las secciones 16.4.2 y 16.4.8 del Código CIG); y .1.2 los espacios están ventilados de manera adecuada; o .2 los espacios se mantienen en una condición inerte. <p>Esta prescripción no es aplicable a los espacios que formen parte de un sistema de contención de la carga que utilice un aislamiento por vacío en el que se vigile el nivel de vacío.</p>	Permeabilidad (véase 4.4)

25	Debería llevarse a cabo una evaluación del riesgo para garantizar que se aborden los peligros que plantea una carga de hidrógeno licuado para las personas a bordo, el medio ambiente, la resistencia estructural o la integridad del buque. Deberían examinarse los peligros relacionados con las propiedades del hidrógeno licuado y del gas hidrógeno, la distribución física, el funcionamiento y el mantenimiento, después de que se produzca cualquier fallo razonablemente previsible. Para la evaluación del riesgo, deberían adoptarse métodos adecuados, por ejemplo, los análisis HAZID, HAZOP, FMEA/FMECA o de posibles eventualidades, teniendo en cuenta las normas IEC/ISO 31010:2009: <i>Risk management – Risk assessment techniques</i> y SAE ARP 5580-2001 <i>"Recommended failure modes and effects analysis (FMEA) practices for non-automobile applications"</i> ⁹⁾ .	General (véase 4.1)
26	El dimensionamiento de la válvula de alivio debería llevarse a cabo para el supuesto más oneroso. Debería evaluarse si este supuesto se materializa debido a un incendio o a la pérdida de vacío del sistema de aislamiento general, y debería examinarse en cada caso la magnitud resultante del flujo de calor en el sistema de contención.	Peligro de alta presión (véase 4.8)
27	No debería permitirse un límite de llenado superior al 98 % a la temperatura de referencia.	Peligro de alta presión (véase 4.8)
28	Deberían evitarse las conexiones de bridas empernadas de las tuberías de hidrógeno cuando sean viables las conexiones soldadas	Permeabilidad (véase 4.4.2)
29	Debería prestarse la consideración debida al carácter invisible de los incendios de hidrógeno	Peligro de incendio (véase 4.7.1)

3 EXPLICACIÓN SOBRE LAS PRESCRIPCIONES GENERALES

3.1 Propiedades del hidrógeno licuado

Se ha examinado la aplicación de las prescripciones generales del Código para el hidrógeno licuado a partir de un estudio comparativo de las propiedades físicas del hidrógeno licuado y el GNL. El GNL y el hidrógeno licuado son líquidos criogénicos y no tóxicos, y generan un gas inflamable a alta presión. Como referencia, en el cuadro 3 se indican las propiedades físicas del hidrógeno y el metano, el componente principal del GNL.

Cuadro 3: Comparación de las propiedades físicas del hidrógeno y el metano

	Hidrógeno	Metano	Referencias
Temperatura de ebullición (°K)*	20,3	111,6	ISO ⁽¹⁾ , anexo A, cuadro A.3
Densidad del líquido (kg/m ³)*	70,8	422,5	ISO ⁽¹⁾ , anexo A, cuadro A.3
Densidad del gas (kg/m ³)** (aire: 1,198)	0,084	0,668	NIST RefProp ⁽¹⁰⁾
Viscosidad (g/cm•s x 10 ⁻⁶)			
Gas	8,8	10,91	NIST RefProp ⁽¹⁰⁾
Líquido	13,49	116,79	NIST RefProp ⁽¹⁰⁾
Temperatura de la llama en el aire (°C)	2 396	2 230	Calculado utilizando Cantera y el mecanismo GRI 3.0
Velocidad de combustión máxima (m/s)	3,15	0,385	Calculado utilizando Cantera y el mecanismo GRI 3.0
Calor de vaporización (J/g)*	448,7	510,4	ISO ⁽¹⁾ , anexo A, cuadro A.3
Límite inferior de inflamabilidad (% en volumen)***	4,0	5,3	ISO ⁽¹⁾ , anexo B, cuadro B.2
Límite superior de inflamabilidad (% en volumen)***	75,0	17,0	ISO ⁽¹⁾ , anexo B, cuadro B.2
Límite inferior de detonación (% en volumen)***	18,3	6,3	ISO ⁽¹⁾ , anexo B, cuadro B.2
Límite superior de detonación (% en volumen)***	59,0	13,5	ISO ⁽¹⁾ , anexo B, cuadro B.2
Energía mínima de ignición (mJ)***	0,017	0,274	ISO ⁽¹⁾ , anexo B, cuadro B.2
Temperatura de autoignición (°C)***	585	537	ISO ⁽¹⁾ , anexo B, cuadro B.2
Toxicidad	No	No	Libro naranja ⁽⁵⁾
Temperatura en el punto crítico (°K)	33,19****	190,55	Hidrógeno: ISO ⁽¹⁾ , anexo A, cuadro A.1 Metano: Japan Society of Mechanical Engineers, Data Book, Thermophysical Properties of Fluids (1983)
Presión en el punto crítico (kPaA)	1 297****	4 595	Hidrógeno: ISO ⁽¹⁾ , anexo A, cuadro A.1 Metano: Japan Society of Mechanical Engineers, Data Book, Thermophysical Properties of Fluids (1983)

Observaciones: * A sus puntos de ebullición normales, a efectos comparativos.
 ** A una temperatura y una presión normales.
 *** Propiedades en cuanto a ignición y combustión para las mezclas de aire, a 25 °C y 101,3 kPaA.
 **** Hidrógeno normal.

3.2 Explicación sobre las prescripciones respectivas

3.2.1 Tipo de buque (columna "c")

3.2.1.1 Como resultado de los estudios, se tomó nota de los aspectos siguientes en relación con el tipo de buque asignado en el Código CIG:

- .1 el tipo 1G se asigna únicamente a las mercancías peligrosas de clase 2.3* en el Código marítimo internacional de mercancías peligrosas, pero no a las de clase 2.2 y 2.1;

* Los gases tóxicos e inflamables están comprendidos en la clase 2.3 y la clase secundaria 2.1.

- .2 los tipos 2G y 2PG se asignan principalmente a los gases inflamables no tóxicos de clase 2.1; y
- .3 el tipo 3G se asigna únicamente a los gases no inflamables y no tóxicos de clase 2.2.

3.2.1.2 El "tipo 2PG" no es aplicable al hidrógeno licuado porque la temperatura de proyecto es inferior a -55 °C. Teniendo en cuenta que el hidrógeno licuado es una mercancía peligrosa de clase 2.1, resulta oportuno asignarle el "tipo 2G".

3.2.2 Tanque de tipo C independiente prescrito (columna "d")

Sólo se asigna un tanque de tipo C independiente a las mercancías peligrosas de la clase 2.3 cuya densidad de vapor sea mayor que la del aire. No se considera que un tanque de tipo C independiente sea necesario para el hidrógeno licuado.

3.2.3 Control del espacio de vapor dentro de los tanques de carga (columna "e")

Suelen exigirse controles ambientales especiales como el secado y la inertización para los productos químicos líquidos, dada la reactividad del vapor de la carga y el aire. Tal como sucede con el GNL, se considera innecesario aplicar dichas prescripciones al hidrógeno licuado.

3.2.4 Detección de vapor (columna "f")

Dado que el hidrógeno es inflamable y no es tóxico, resulta oportuno prescribir "inflamable" (F) como detección de vapor para el hidrógeno licuado.

3.2.5 Dispositivos de medición (columna "g")

Dado que se prescriben dispositivos de medición cerrados (C), en principio, para las cargas inflamables o tóxicas como el metano, se considera oportuno prescribir dispositivos de medición cerrados (C) para el hidrógeno, teniendo en cuenta que este elemento presenta una inflamabilidad alta y una gama de inflamabilidad amplia en el aire y que los dispositivos de medición cerrados son eficaces para evitar la fuga de gases al aire.

4 PRESCRIPCIONES ESPECIALES CONTRA LOS PELIGROS DEL HIDRÓGENO LICUADO

4.1 Peligros del hidrógeno licuado que deben examinarse

4.1.1 Los peligros relacionados con el hidrógeno licuado son una energía de ignición baja, una gama amplia de límites de inflamabilidad, una visibilidad baja de las llamas en caso de incendio, una velocidad de las llamas alta, que puede traducirse en una detonación con ondas de choque, una temperatura baja y la licuefacción/solidificación del gas inerte y los componentes del aire, que pueden traducirse en una atmósfera rica en oxígeno, una permeabilidad alta, una viscosidad baja y una fragilidad producida por el hidrógeno, incluidos los metales depositados. Cuando se adopte el aislamiento por vacío, debería prestarse la consideración debida a la posibilidad de un deterioro inoportuno de las propiedades del aislamiento a las temperaturas de transporte previstas del hidrógeno líquido. Debería especificarse la evaluación del aislamiento por vacío para la gama normal o el límite superior de la presión de vacío en frío (CVP), y la pérdida de vacío debería determinarse con respecto a este valor. En consecuencia, debería tenerse en cuenta el efecto de la presión de vacío cuando se proyecten y sometan a prueba los sistemas de contención de la carga y las

tuberías. La estructura de apoyo y la estructura del casco adyacente deberían proyectarse teniendo en cuenta el enfriamiento debido a la pérdida de aislamiento por vacío.

4.1.2 El hidrógeno es fundamentalmente una mezcla de ortohidrógeno y parahidrógeno, con una concentración en equilibrio del 75 % de ortohidrógeno y el 25 % de parahidrógeno a temperatura ambiente. Cuando se licúa a 20 °K, se produce una transformación lenta pero continua de ortohidrógeno en parahidrógeno. Puede producirse la conversión exotérmica de los isómeros de espín nuclear de hidrógeno (ortohidrógeno en parahidrógeno), y la conversión puede repercutir en la capacidad de enfriamiento y la capacidad de la válvula de alivio del equipo del buque.

4.1.3 A fin de examinar las prescripciones especiales destinadas a los buques para el transporte de hidrógeno licuado, se realizaron estudios bibliográficos utilizando las referencias que figuran al final del presente documento, en particular, la norma ISO/TR 15916, la ley sobre seguridad de los gases a alta presión¹⁾ del Japón, la norma sobre seguridad para el hidrógeno y los sistemas de hidrógeno del AIAA²⁾ y el NFPA 2: código sobre tecnologías del hidrógeno⁶⁾. Las prescripciones especiales destinadas a los buques para el transporte de hidrógeno licuado se basan en su mayoría en la norma ISO/TR 15916. Esta norma hace referencia a las instalaciones en tierra para el almacenamiento en tanques del hidrógeno licuado, los camiones cisterna, etc., e incluye opiniones básicas cuando se examinan las propiedades del hidrógeno licuado.

4.1.4 Las cantidades residuales de aire se condensarán o solidificarán en un medio en el que haya hidrógeno líquido, lo cual puede originar una mezcla inestable y explosiva. Deberían adoptarse precauciones para garantizar que se tenga en cuenta la posibilidad de aire condensado en las zonas protegidas adecuadamente contra los peligros.

4.2 Peligro de baja temperatura

4.2.1 Selección de material adecuado

4.2.1.1 Los cuadros 6.3 y 6.4 del Código prescriben la selección de material para las tuberías o los tanques de carga cuya temperatura de proyecto es igual o superior a -165 °C. De conformidad con la nota 2 del cuadro 6.3 y la nota 3 del cuadro 6.4 del Código, las prescripciones para los materiales cuya temperatura de proyecto sea inferior a -165 °C deberían acordarse en particular con la Administración. A este respecto, la publicación del AIAA²⁾ introduce algunos materiales adecuados de acuerdo con la temperatura de proyecto, y la Administración debería tener en cuenta dichas referencias para la selección del material.

4.2.1.2 Si bien el párrafo 4.19.3 del Código prescribe las pruebas de los materiales utilizados para el aislamiento térmico respecto de diversas propiedades pertinentes para la temperatura de servicio prevista, la temperatura de prueba mínima es igual a -196 °C. Las prescripciones del Código no hacen referencia al punto de ebullición normal del hidrógeno, que es igual a -253 °C. En el caso de que se transporte hidrógeno licuado, debería facilitarse una prescripción especial para tener en cuenta la temperatura de proyecto inferior.

4.2.2 Medidas para el aire condensado

4.2.2.1 En el caso del nitrógeno, cuyo punto de ebullición normal es -196 °C y para el cual la condensación del aire y el enriquecimiento con oxígeno son problemáticos, se ha incluido la siguiente prescripción especial en el párrafo 17.17 del Código:

"Los materiales de construcción y los elementos auxiliares, como el aislamiento, deberán ser resistentes a los efectos de las grandes concentraciones de oxígeno

provocadas por la condensación y el enriquecimiento a las bajas temperaturas que se alcanzan en algunas partes del sistema de la carga. Se prestará la debida atención a la ventilación en zonas en que podría producirse condensación, a fin de evitar la estratificación de la atmósfera enriquecida con oxígeno."

Una prescripción especial parecida es aplicable al hidrógeno.

4.2.2.2 Es posible que un respiradero se bloquee por la acumulación del hielo que se forme a partir de la humedad del aire, lo cual puede traducirse en una presión excesiva que cause la ruptura del respiradero y de las tuberías correspondientes (véase el párrafo 4.2.4).

4.2.3 Eliminación de las sustancias impuras condensadas

La eliminación de sustancias impuras como las que aparecen condensadas en las tuberías debería examinarse por separado. La instalación de filtros puede ser una medida adecuada y debería estipularse como prescripción especial.

4.2.4 Prevención del bloqueo debido a la formación de agua o hielo

Los sistemas de alivio de la presión pueden bloquearse por la formación de agua o hielo en función de la temperatura y la humedad del aire, resultado de la baja temperatura de la carga y su vapor (véase el párrafo 4.2.2). Deberían facilitarse los medios adecuados para evitar dicho fenómeno.

4.3 Fragilidad producida por el hidrógeno

4.3.1 Debería prescribirse la selección de materiales adecuados para evitar fallos debidos a la fragilidad producida por el hidrógeno. La publicación del AIAA²⁾ presenta algunos materiales adecuados que son resistentes a la fragilidad producida por el hidrógeno y concluye que el aluminio es el material menos afectado.

4.3.2 Para la selección de materiales deberían cumplirse las normas internacionales o nacionales sobre el proyecto de instalaciones de hidrógeno licuado y gaseoso en el medio marino.

4.4 Permeabilidad

4.4.1 Prevención de fugas de los tanques de carga

A fin de mitigar las fugas de hidrógeno, se considera adecuado exigir tipos de "soldadura a tope con penetración total" con independencia de los tipos de tanque, teniendo en cuenta la alta permeabilidad del hidrógeno. Además, las soldaduras de conexión de la bóveda al forro y las soldaduras de las boquillas deberían proyectarse con una penetración total, con independencia de los tipos de tanque, teniendo en cuenta los párrafos 4.20.1.1 y 4.20.1.2 del Código.

4.4.2 Prevención de fugas de las tuberías

A fin de mitigar la acumulación no detectada de hidrógeno en un espacio confinado, deberían adoptarse medidas eficaces para reducir la posibilidad de fugas de hidrógeno, teniendo en cuenta su alta permeabilidad. Las medidas eficaces pueden ser estructuras de tubos dobles o detectores fijos de fugas de hidrógeno en zonas consideradas como muy peligrosas en lo que respecta a las fugas de hidrógeno. Las fugas de hidrógeno a través de soldaduras, juntas y cierres constituyen un factor importante para el proyecto de los sistemas de hidrógeno y una cuestión operacional significativa.

4.4.3 Implantación de una prueba de estanquidad eficaz

4.4.3.1 Las pruebas de estanquidad para los tanques de carga y las tuberías de carga/válvulas se prescriben en los párrafos 4.20.3.2, 5.13.1 y 5.13.2.3 del Código, respectivamente. Debería utilizarse helio o una mezcla de 5 % de hidrógeno y 95 % de nitrógeno como medio para las pruebas de estanquidad en lugar de aire, porque la permeabilidad del hidrógeno es alta.

4.4.3.2 Para una instalación de hidrógeno, las tuberías deberían someterse a pruebas de presión a su presión de proyecto. Debería examinarse la posibilidad de utilizar nitrógeno libre de oxígeno con un gas trazador de molécula pequeña, por ejemplo, el helio, como medio de la prueba, y un detector de fugas electrónico para determinar las fugas.

4.4.4 Confirmación de que el procedimiento de operación es adecuado

Deberían facilitarse instrucciones/manuales que contengan los procedimientos de operación para la prevención de las fugas durante el transporte, los métodos para la detección temprana de fugas y las medidas adecuadas posteriores a estos sucesos. A este respecto, el párrafo 18.3 del Código prescribe que haya información a bordo disponible para todos los afectados, en la que se indiquen los datos necesarios para el transporte seguro de la carga. Más en detalle, el Código exige información sobre las medidas que deben adoptarse en caso de derrame o fuga, las contramedidas en caso de contacto personal accidental, los procedimientos para el trasvase de la carga y los procedimientos de emergencia que debe haber a bordo. En lo que respecta a los manuales sobre los procedimientos para el hidrógeno licuado durante el transporte y las operaciones de trasvase, son aplicables las prescripciones del Código y no es necesaria ninguna prescripción especial.

4.5 Baja densidad y alta difusividad

Si bien la baja densidad y la alta difusividad del hidrógeno pueden reducir la probabilidad de que se forme una atmósfera inflamable en los espacios abiertos, es necesaria una ventilación adecuada para los espacios cerrados en las zonas de la carga en las que puedan formarse mezclas de hidrógeno-oxígeno/aire. El párrafo 12.2 del Código exige sistemas de ventilación fijos o una ventilación mecánica portátil para dichos espacios cerrados. Estas prescripciones del Código son aplicables a los buques para el transporte de hidrógeno licuado y no es necesaria ninguna prescripción especial al respecto.

4.6 Inflamabilidad

4.6.1 El Código exige la puesta a masa de las tuberías y los tanques de carga en el párrafo 5.7.4, la exclusión de todas las fuentes de ignición en el párrafo 11.1.2, instalaciones eléctricas que reduzcan al mínimo el riesgo de incendio y explosión debido a la presencia de productos inflamables en el párrafo 10.2.1, etcétera, a fin de evitar la ignición de las cargas inflamables.

4.6.2 El Código exige el cumplimiento de las normas pertinentes publicadas por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), en las que se especifican los detalles de dichas medidas de seguridad en función de las propiedades respectivas de los gases inflamables, incluido el hidrógeno. No es necesaria ninguna prescripción especial con respecto a la inflamabilidad del hidrógeno.*

* El equipo eléctrico utilizado en la mezcla de hidrógeno/aire debería ser, como mínimo, del tipo "II-C" y "T-1" como grupo basado en el margen de seguridad experimental máximo para las envolventes antideflagrantes y la clase de temperatura basada en la temperatura de superficie máxima, respectivamente, de conformidad con la norma IEC 60079-20-1⁴).

4.7 Peligro de incendio

4.7.1 Seguridad del personal en caso de incendio

Para evitar los efectos de las llamas y de la radiación ultravioleta producidos por un incendio de hidrógeno, resulta eficaz utilizar equipos de bombero y equipo protector. El Código ya prescribe equipos de bombero para los buques que transportan productos inflamables en el párrafo 11.6.1 y equipo de seguridad en el párrafo 14.3. Esta cuestión debería examinarse en el ámbito de la información sobre la carga prescrita por el párrafo 18.3 del Código. Debería prestarse la consideración debida al carácter invisible de los incendios de hidrógeno.

4.7.2 Compatibilidad de los sistemas de extinción de incendios

Se considera que los sistemas de extinción de incendios a base de polvo químico seco o de dióxido de carbono son eficaces en el caso de un incendio de hidrógeno, y dichos sistemas de extinción de incendios ya se prescriben en los párrafos 11.4 y 11.5 del Código. Se consideran innecesarias las prescripciones especiales para la instalación de otros tipos de sistemas de extinción de incendios, salvo en lo que respecta al aumento de la cantidad de dióxido de carbono prescrita, tal como se indica en el párrafo siguiente del presente documento.

4.7.3 Aumento de la cantidad de gas para los sistemas de extinción de incendios a base de dióxido de carbono

4.7.3.1 El párrafo 11.5.1 del Código prescribe lo siguiente:

"Los espacios cerrados que cumplan los criterios para los espacios de máquinas de carga establecidos en 1.2.10 y las cámaras de máquinas de carga situadas en la zona de la carga del buque estarán provistos de un sistema fijo de extinción de incendios que cumpla lo dispuesto en el Código SSCI y que tenga en cuenta los volúmenes de concentración y aplicación prescritos para extinguir incendios provocados por gas."

4.7.3.2 En el párrafo 2.2.1.1 del capítulo 5 del Código SSCI (Sistemas fijos de extinción de incendios por gas) se prescribe que en los espacios de carga, la cantidad disponible de anhídrido carbónico será suficiente, salvo que se disponga otra cosa, para liberar un volumen mínimo de gas igual al 30 % del volumen bruto del mayor de los espacios de carga que se deba proteger en el buque.

4.7.3.3 No obstante, en la norma NFPA 12³⁾ se exige que la cantidad de proyecto del dióxido de carbono para un incendio de hidrógeno sea como mínimo el 75 % del volumen bruto del espacio protegido. Debería facilitarse una prescripción especial para una cantidad mayor de dióxido de carbono en el caso de los sistemas de extinción de incendios a base de dióxido de carbono.

4.7.4 Características de un incendio de hidrógeno

El hidrógeno se quema a una temperatura elevada, pero suele irradiar menos calor que el propano u otros hidrocarburos (sólo un 10 % aproximadamente del calor irradiado por una llama de propano del mismo tamaño). Si bien el calor irradiado por una llama de hidrógeno también es relativamente bajo en comparación con las de los hidrocarburos, es importante tener en cuenta las diferencias en cuanto al calor de combustión, el índice de combustión y el tamaño de la llama. Las llamas de hidrógeno son incoloras o prácticamente incoloras. Estas características complican la detección de un incendio de hidrógeno. Incluso los incendios de

hidrógeno relativamente pequeños son muy difíciles de extinguir. La única manera fiable de extinguir un incendio es cerrar la fuente del suministro de hidrógeno.

4.8 Peligro de alta presión

4.8.1 La alta presión es un peligro común para el hidrógeno y otros gases inflamables que se enumeran en el Código. A fin de evitar una presión excesiva, el Código exige diversas medidas, por ejemplo, el control de la presión y la consideración de la presión en el proyecto. En particular, en el párrafo 8.2 se exige la instalación de válvulas aliviadoras de la presión en los tanques de carga, en lo que respecta a la provisión de control de la presión en estos últimos. Además, el párrafo 7.1.1 prescribe el control de la temperatura mediante una refrigeración mecánica y/o el proyecto para resistir posibles aumentos de la temperatura y la presión. Asimismo, el párrafo 15.2 especifica el límite de llenado de los tanques de carga, teniendo en cuenta el aumento del volumen de la carga por su expansión térmica. Estas prescripciones son aplicables al hidrógeno y no se considera necesaria ninguna prescripción especial a este respecto.

4.8.2 Es probable que los sistemas de aislamiento por vacío se utilicen para los sistemas de contención del hidrógeno licuado, y la capacidad de aislamiento de aquellos sistemas puede verse afectada negativamente por los daños que sufran, en función de su proyecto. Si se produjera un deterioro rápido del sistema de aislamiento, la temperatura en el tanque de carga aumentaría rápidamente y/o el índice de evaporación del hidrógeno licuado podría exceder la capacidad de las válvulas aliviadoras de la presión. Deberían adoptarse medidas de seguridad adecuadas para evitar dicho deterioro peligroso del aislamiento.

4.8.3 La evaporación puede ser un problema mayor para el hidrógeno que para el GNL, en particular, cuando el aislamiento se haya deteriorado. Los medios para la manipulación del gas de evaporación deberían examinarse con cuidado, teniendo en cuenta las cuestiones siguientes:

- .1 la relicuefacción del hidrógeno requiere equipo muy específico y costoso. El enfriamiento de la carga para evitar la evaporación presenta el mismo tipo de problemas; y
- .2 no obstante lo dispuesto en el párrafo 7.4.1 del Código, se podrá permitir la oxidación térmica del hidrógeno de conformidad con lo dispuesto en el párrafo 1.3 del Código.

4.8.4 Se considera necesario disponer de prescripciones especiales sobre estos aspectos.

4.9 Peligro para la salud

4.9.1 Preocupación sobre la seguridad humana a baja temperatura

Un equipo protector adecuado es eficaz para hacer frente a los efectos del hidrógeno frío en los organismos de las personas. A este respecto, el párrafo 14.1 del Código prescribe un equipo protector adecuado teniendo en cuenta el carácter de los productos, por lo que no se considera necesaria ninguna prescripción especial.

4.9.2 Electricidad estática

La energía de ignición del hidrógeno es muy baja, por lo que dicho gas puede inflamarse muy fácilmente como consecuencia de la electricidad estática y debería prestarse la consideración debida a esta cuestión, de conformidad con la prescripción del Código sobre el equipo de protección adecuado.

4.9.3 Agotamiento del oxígeno y asfixia

Una fuga de hidrógeno puede traducirse en un nivel bajo de oxígeno y en la consiguiente asfixia.

4.10 Gama amplia de límites de inflamabilidad

4.10.1 Extinción de un incendio de hidrógeno

4.10.1.1 Tal como se indica en el párrafo 4.6, el Código ya prescribe para los productos inflamables la eliminación de las fuentes de ignición, incluida la utilización de instalaciones eléctricas de los tipos adecuados a fin de reducir al mínimo el riesgo de incendio y explosión. No se considera necesaria ninguna prescripción especial con respecto a la inflamabilidad del hidrógeno.

4.10.1.2 Además, en cuanto a la gama amplia de límites de inflamabilidad del hidrógeno, deberían especificarse las mayores cantidades de dióxido de carbono como medio de extinción de incendios, tal como se indica en el párrafo 4.7. No se considera necesaria ninguna prescripción especial adicional en cuanto a la gama amplia de límites de inflamabilidad del hidrógeno.

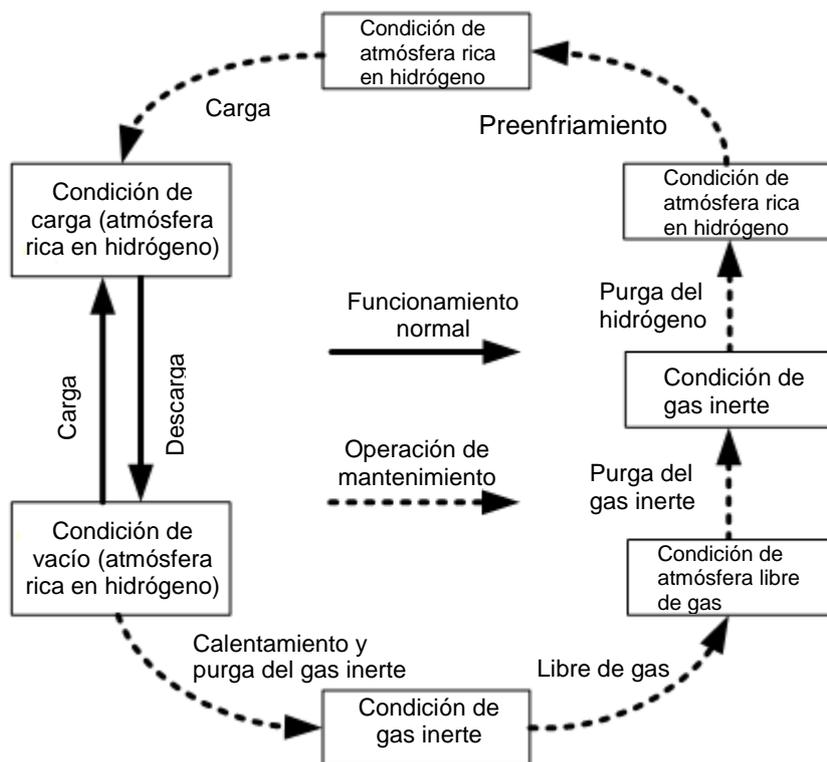
4.10.2 Eliminación del gas hidrógeno frío

La eliminación del gas hidrógeno frío constituye un peligro importante como consecuencia de la amplitud de la gama de inflamabilidad. La existencia de penachos de humo fríos en la dirección del viento y una dilución inadecuada por debajo del 4 % hacen posible la retrogresión de la llama hasta el respiradero desde focos de ignición alejados que se encuentren fuera de zonas de seguridad controladas. Una energía de ignición baja y una gama amplia de inflamabilidad pueden constituir retos significativos.

4.11 Prevención de una operación de purga peligrosa

4.11.1 Durante las operaciones de carga para el mantenimiento, las tuberías y los tanques deberían purgarse mediante uno o varios gases inertes, tal como se ilustra en la figura incluida *infra*. Por motivos de seguridad, debería prestarse la consideración debida a la temperatura y los puntos de ebullición de los gases inertes. En el recinto seguirá habiendo restos del hidrógeno o del gas de purga si el índice o la duración de la purga o el grado de la mezcla son demasiado bajos. De ahí que deban obtenerse mediciones fiables de la concentración del gas en varios lugares distintos del sistema para que las purgas sean adecuadas. La temperatura debería medirse también en varios lugares. Puede haber agentes oxidantes en un equipo que contiene hidrógeno, en particular: aire, atmósferas de caja fría que contengan aire diluido con nitrógeno, o aire enriquecido con oxígeno que pueda condensarse en tuberías dentro de la caja fría en circunstancias especiales.

4.11.2 Es posible que haya que adoptar medidas especiales para reducir los peligros, por ejemplo, el aire debería eliminarse mediante una purga del nitrógeno antes de la introducción del hidrógeno en las tuberías de la carga o el equipo de procesamiento. A continuación debería eliminarse el nitrógeno mediante una purga del hidrógeno, cuando exista la posibilidad de que se solidifique en el proceso posterior.



Referencias

- 1) ISO/TR 15916, Basic consideration for the safety of hydrogen systems (ISO)
- 2) American Institute of Aeronautics and Astronautics, "Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems (Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems)", 2005 (AIAA)
- 3) NFPA 12: Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems, edición de 2005 (NFPA)
- 4) IEC 60079-20-1 Ed. 1.0:2010 (b) Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data
- 5) Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas, de las Naciones Unidas: Reglamentación modelo, 19ª edición revisada
- 6) NFPA 2: Hydrogen Technologies Code, edición de 2016 (NFPA)
- 7) IEC/ISO 31010:2009 Risk management – Risk assessment techniques
- 8) Cryogenics Safety Manual – cuarta edición (1998)
- 9) SAE ARP 5580-2001 "Recommended failure modes and effects analysis (FMEA) practices for non-automobile applications"
- 10) National Institute of Standards and Technology (NIST) RefProp database
