

Recomendaciones relativas al

# TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS

Manual  
de Pruebas y Criterios

*Cuarta edición revisada*

*Enmienda 1*



**NACIONES UNIDAS**



Recomendaciones relativas al

# **TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS**

## **Manual de Pruebas y Criterios**

*Cuarta edición revisada*

*Enmienda 1*



**NACIONES UNIDAS**  
Nueva York y Ginebra, 2005

## NOTA

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Secretaría de las Naciones Unidas, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

ST/SG/AC.10/11/Rev.4/Amend.1

Copyright © Naciones Unidas, 2005

*Quedan reservados todos los derechos*

*Prohibidos la reproducción, el almacenamiento en un sistema de recuperación de información o la transmisión de cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, electrostático, mecánico, de grabación magnética, de fotocopia o por otros métodos, de esta publicación o de alguna de sus partes, para la venta, sin el permiso previo y por escrito de las Naciones Unidas.*

PUBLICACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS

Número de venta: S.05.VIII.4

ISBN 92-1-339035-1

## PRÓLOGO

El Manual de Pruebas y Criterios contiene los criterios, métodos y procedimientos de prueba que se deben utilizar para la clasificación de mercancías peligrosas de acuerdo con las disposiciones de las partes 2 y 3 de las *Recomendaciones de las Naciones Unidas para el Transporte de Mercancías Peligrosas, Reglamentación Modelo*<sup>1</sup> y para la clasificación de los productos químicos que presentan peligros físicos conforme a lo dispuesto en el *Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de productos químicos (SGA)*<sup>2</sup>.

Por tanto, el Manual complementa los reglamentos nacionales e internacionales desarrollados a partir de la Reglamentación Modelo o del SGA.

Desde su primera versión, elaborada y posteriormente adoptada por el Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas del Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas (ECOSOC) en 1984, el Manual se ha ido modificando y actualizando cada dos años. Dicha actualización se lleva a cabo bajo los auspicios del Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas y del Sistema Globalmente Armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos, que reemplaza al comité original. La cuarta edición revisada, publicada en 2003, tiene en cuenta las recomendaciones del nuevo comité de expertos en su primer período de sesiones (11 y 12 de diciembre de 2002).

Las enmiendas que figuran en la presente publicación fueron adoptadas por el Comité durante su segunda sesión (10 diciembre 2004)<sup>3</sup> y comprenden:

- Modificaciones en los criterios relativos a la clasificación de mezclas de sustancias comburentes que contienen materia orgánica combustible;
- Una nueva cuarta parte, que extiende el campo de aplicación del Manual a las pruebas sobre el equipo de transporte, con una sección relativa al ensayo dinámico de resistencia a los impactos longitudinales para cisternas portátiles y contenedores de gas de elementos múltiples (CGEM);
- La revisión del apéndice 5 (Ejemplo de método de prueba para el dimensionado de los dispositivos de descompresión)

---

<sup>1</sup> *ST/SG/AC.10/1/Rev.14; Publicación de las Naciones Unidas, número de venta: 05.VIII.1.*

<sup>2</sup> *ST/SG/AC.10/30/Rev.1; Publicación de las Naciones Unidas, número de venta: 05.II.E.13.*

<sup>3</sup> *ST/SG/AC.10/32/Add.2.*



## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>ENMIENDAS A LA SECCIÓN 1</b> .....	<b>1</b>
<b>ENMIENDAS A LA SECCIÓN 20</b> .....	<b>1</b>
<b>NUEVA PARTE IV: Métodos de prueba aplicables al equipo de transporte</b> .....	<b>2</b>
<b>ENMIENDAS AL APÉNDICE 5</b> .....	<b>9</b>



## ENMIENDAS A LA CUARTA EDICIÓN REVISADA DEL MANUAL DE PRUEBAS Y CRITERIOS

### SECCIÓN 1

Insértese la siguiente NOTA después de "INTRODUCCIÓN GENERAL":

**"NOTA:** *La presente introducción general se aplica únicamente a las partes I a III del Manual de Pruebas y Criterios y a sus apéndices 1 a 6. En su segundo período de sesiones (10 de diciembre de 2004), el Comité de Expertos en Transporte de Mercaderías Peligrosas y en el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos decidió añadir una nueva parte IV relativa a los métodos de prueba en relación con el equipo de transporte."*

### PARTE II

### SECCIÓN 20

20.2.1 b) Enmiéndese como sigue:

"b) Sean comburentes conforme al procedimiento de clasificación relativo a la división 5.1 (véase la sección 34) salvo que se trate de mezclas de sustancias comburentes que contengan por lo menos un 5,0% de sustancias orgánicas combustibles en cuyo caso se someterán al procedimiento de clasificación definido en la NOTA siguiente;"

Añádase una nueva NOTA como sigue:

**"NOTA:** *Las mezclas de sustancias comburentes que satisfagan los criterios de la división 5.1 que contengan por lo menos un 5,0% de sustancias orgánicas combustibles, pero que no satisfagan los criterios mencionados en a), c), d) o e) supra, deberán someterse al procedimiento de clasificación de las sustancias de reacción espontánea.*

*Las mezclas que presenten las propiedades de una sustancia de reacción espontánea, de los tipos B a F, se clasificarán como sustancias de reacción espontánea de la división 4.1.*

*Las mezclas que presenten las propiedades de una sustancia de reacción espontánea del tipo G, de conformidad con el principio enunciado en 20.4.2 g), se considerarán a efectos de clasificación como sustancias de la división 5.1 (véase la sección 34)."*

## **PARTE IV**

Añádase una nueva parte IV como sigue:

### **"PARTE IV**

#### **MÉTODOS DE PRUEBA RELATIVOS AL EQUIPO DE TRANSPORTE**

##### **SECCIÓN 40**

###### **INTRODUCCIÓN A LA PARTE IV**

###### **40.1 Objetivo**

40.1.1 En la parte IV del Manual de Pruebas se exponen los sistemas de las Naciones Unidas para la prueba dinámica de resistencia a los impactos longitudinales para cisternas portátiles y CGEM (véase la sección 41 del presente Manual y párrafos 6.7.2.19.1, 6.7.3.15.1, 6.7.4.14.1 y 6.7.5.12.1 de la Reglamentación Modelo).

###### **40.2 Ámbito de aplicación**

40.2.1 Se aplicarán los métodos de prueba de la presente parte cuando así se estipule en la Reglamentación Modelo.

##### **SECCIÓN 41**

#### **PRUEBA DINÁMICA DE RESISTENCIA A LOS CHOQUES LONGITUDINALES PARA CISTERNAS PORTÁTILES Y CONTENEDORES DE GAS DE ELEMENTOS MÚLTIPLES (CGEM)**

###### **41.1 Generalidades**

41.1.1 Esta prueba tiene por objeto determinar la capacidad de las cisternas portátiles y CGEM de resistir a los efectos de un choque longitudinal, como se estipula en 6.7.2.19.1, 6.7.3.15.1, 6.7.4.14.1 y 6.7.5.12.1 de la Reglamentación Modelo.

41.1.2 Un prototipo de cada modelo de cisterna portátil y de cada CGEM que responda a la definición de "contenedor" dada en el Convenio internacional sobre la seguridad de los contenedores (CSC), de 1972, en su forma enmendada, deberá someterse a la prueba dinámica de resistencia a los choques longitudinales, y satisfacer las exigencias de esta prueba. Las pruebas estarán a cargo de servicios reconocidos para este propósito por la autoridad competente.

###### **41.2 Variantes autorizadas de los modelos existentes**

Se autorizarán, sin que sea necesario efectuar pruebas adicionales, las siguientes variantes en el diseño de los contenedores, en relación con prototipos ya probados:

- a) Una disminución de la temperatura de cálculo inicial máxima, sin variación del espesor;
- b) Un aumento de la temperatura de cálculo inicial mínima, sin variación del espesor;
- c) Una disminución de la masa bruta máxima;
- d) Una reducción de la capacidad, no superior al 10%, resultante únicamente de variaciones en el diámetro o la longitud;

- e) Un cambio de emplazamiento o una modificación de las toberas y bocas de hombre siempre que:
  - i) se mantenga un nivel equivalente de protección; y
  - ii) se use la configuración menos favorable para los cálculos de resistencia de la cisterna;
- f) Un aumento del número de deflectores y rompeolas;
- g) Un aumento de espesor de las paredes, siempre que éste se mantenga dentro de los límites tolerados por las especificaciones relativas a los procedimientos de soldadura;
- h) Una disminución de la presión de servicio máxima autorizada, o de la presión máxima de servicio, sin variación del espesor;
- i) Un aumento de la eficacia del sistema de aislamiento gracias al uso de:
  - i) un mayor espesor del mismo material de aislamiento; o
  - ii) el mismo espesor de otro material de aislamiento con mejores propiedades de aislamiento;
- j) Un cambio en el equipo de servicio siempre que el equipo de servicio no probado:
  - i) esté ubicado en el mismo lugar y satisfaga o supere las mismas especificaciones relativas al comportamiento del equipo actual; y
  - ii) sea de tamaño y masa aproximadamente similares a los del equipo existente; y
- k) El uso de un material del mismo tipo pero de calidad diferente para la construcción del mismo depósito o estructura, siempre que:
  - i) los resultados de los cálculos de diseño para este material de calidad diferente, usando los valores de resistencia mecánica menos favorables para esa calidad, sean equivalentes o superiores a los resultados de los cálculos de diseño para el material existente; y
  - ii) las especificaciones relativas a los procedimientos de soldadura admitan el uso de este material de calidad diferente.

### **41.3 Aparatos de prueba**

#### **41.3.1 *Plataforma de prueba***

La plataforma de prueba puede ser cualquier estructura adecuada capaz de absorber sin sufrir daños significativos un choque de la intensidad prescrita, estando el contenedor sometido a prueba firmemente montado en su lugar. La plataforma de prueba deberá estar:

- a) configurada de manera que el contenedor sometido a prueba pueda montarse lo más cerca posible del extremo de choque;
- b) dotada de cuatro dispositivos de fijación, en buenas condiciones, para fijar el contenedor sometido a prueba conforme a lo dispuesto en la norma ISO 1161:1984 (Contenedores de la serie 1 - Cantoneras - Especificaciones); y

- c) dotada de un dispositivo amortiguador que permita que la duración del choque sea adecuada.

#### **41.3.2**      *Producción del choque*

41.3.2.1      El choque se producirá por:

- a)    percusión de la plataforma de prueba contra una masa estacionaria; o
- b)    percusión de una masa en movimiento contra la plataforma de prueba.

41.3.2.2      Cuando la masa estacionaria esté constituida por dos o más vehículos ferroviarios acoplados, cada uno de ellos deberá estar dotado de dispositivos de amortiguamiento. Se eliminará la holgura entre los vehículos y se ajustarán los frenos de cada uno.

#### **41.3.3**      *Sistema de medición y registro*

41.3.3.1      Salvo que se especifique otra cosa, el sistema de medición y registro será el especificado en la norma ISO 6487:2002 (Vehículos de carretera - Técnicas de medición para las pruebas de choque - Instrumentación).

41.3.3.2      Se dispondrá del equipo siguiente para la prueba:

- a)    Dos acelerómetros con una gama de amplitud mínima de 200 g, un límite inferior de frecuencia máximo de 1 Hz y un límite superior de frecuencia mínimo de 3.000 Hz. Cada acelerómetro se ajustará rígidamente al contenedor sometido a prueba en el extremo exterior o en la superficie lateral de las dos cantoneras inferiores adyacentes más cercanas a la fuente de los choques. Los acelerómetros se alinearán para medir la aceleración en el eje longitudinal del contenedor. El método preferido consiste en fijar cada acelerómetro a una placa de fijación plana mediante pernos y sujetar las placas de fijación a las cantoneras;
- b)    Un medio que permita medir la velocidad de la plataforma de prueba en movimiento o de la masa en movimiento en el momento del impacto;
- c)    Un sistema de toma de datos analógico-numérico capaz de registrar las perturbaciones causadas por el choque como un registro de la aceleración en función del tiempo a una frecuencia de muestreo mínima de 1.000 Hz. El sistema de toma de datos deberá incorporar un filtro analógico de paso bajo antialiasing, con una frecuencia ajustada para un mínimo de 200 Hz y un máximo del 20% de la tasa de muestreo, y una tasa de pérdida por decrecimiento de 40 dB/octava; y
- d)    Un medio de registro de los historiales de la aceleración en función del tiempo en formato electrónico, de modo que puedan ser recuperados y analizados ulteriormente.

#### **41.3.4**      *Procedimiento*

41.3.4.1      Podrá llenarse el contenedor que vaya a someterse a prueba antes o después de montarlo en la plataforma de prueba, como sigue:

- a)    Cisternas portátiles: Se llenará la cisterna con agua o cualquier otra sustancia no sometida a presión hasta un 97% de su capacidad volumétrica. No se someterá la cisterna a presión durante la prueba. Si por razones de posible sobrecarga no es conveniente llenar la cisterna hasta el 97% de su capacidad, se llenará la cisterna de manera que la masa del contenedor que vaya a someterse a prueba (tara y producto) se aproxime lo más posible a su masa nominal máxima (R);

- b) CGEM: Cada elemento se llenará con una cantidad igual de agua o de cualquier otra sustancia no sometida a presión. El CGEM se llenará de manera que su masa se aproxime lo más posible a su masa nominal máxima (R) pero en todo caso, sin sobrepasar el 97% de su capacidad volumétrica. No se someterá el CGEM a presión durante la prueba. No es preciso llenar un CGEM cuando su tara sea igual o superior al 90% de R.

41.3.4.2 Se medirá y registrará la masa del contenedor preparado para la prueba.

41.3.4.3 Se orientará el contenedor de prueba de manera que se obtengan las condiciones de prueba más extremas. Se montará el contenedor en la plataforma de prueba, lo más cerca posible del extremo de impacto, asegurando sus cuatro cantoneras para impedir todo movimiento en cualquier dirección. Se reducirá al mínimo toda holgura entre las cantoneras del contenedor que se somete a prueba y los dispositivos de fijación en el extremo de choque de la plataforma de prueba. En particular, las masas de choque deberán poder rebotar libremente tras el impacto.

41.3.4.4 Se producirá un choque (véase 41.3.2) tal que para un impacto único la curva del espectro de respuesta a los choques (ERC, véase 41.3.5.1) en ambas cantoneras del extremo de choque sea igual o superior a la curva ERC mínima de la figura 41.3.5.1 para todas las frecuencias comprendidas entre 3 Hz y 100 Hz. Podrá ser necesaria una sucesión de choques para lograr este resultado, pero se evaluarán individualmente los resultados de cada choque.

41.3.4.5 Inmediatamente después de un choque como el descrito en 41.3.4.4, se examinará el contenedor sometido a prueba y se registrarán los resultados. Para satisfacer la prueba, el contenedor no deberá presentar fugas, deformaciones o daños permanentes que lo descalifiquen para su uso, y deberá satisfacer los requisitos dimensionales en relación con su manipulación, fijación y transferencia de un medio de transporte a otro.

### **41.3.5 *Procesamiento y análisis de los datos***

#### **41.3.5.1 *Sistema de reducción de datos***

- a) Los registros de datos de la aceleración en función del tiempo de cada canal se reducirán al espectro de respuesta a los choques, asegurando que los espectros se presenten en forma de aceleración estática equivalente en función de la frecuencia. Se registrará la aceleración máxima absoluta para cada uno de los puntos de interrupción especificados. Para la reducción de los datos se aplicarán los criterios siguientes:
  - i) Cuando sea necesario, se obtendrán valores corregidos del registro de aceleración de choque en función del tiempo, usando el procedimiento descrito en 41.3.5.2;
  - ii) Los datos del registro aceleración-tiempo abarcarán el período iniciado 0,05 s antes del choque hasta 2,0 s después del choque;
  - iii) El análisis abarcará la gama de frecuencias de 2 a 100 Hz y el cálculo de los puntos de la curva de respuesta a los choques se hará para un mínimo de 30 puntos de interrupción por octava. Cada punto o intervalo de interrupción de la gama constituirá una frecuencia natural; y
  - iv) Se usará en el análisis una razón de amortiguamiento del 5%.
- b) El cálculo de los puntos de la curva de respuesta a los choques de la prueba se hará conforme a lo descrito a continuación. Para cada intervalo de interrupción de frecuencia:

- i) Se calculará una matriz de los valores de desplazamiento relativos usando todos los puntos obtenidos del registro de la aceleración en función del tiempo, usando la ecuación siguiente:

$$\xi_i = -\frac{\Delta t}{\omega_d} \sum_{k=0}^i \ddot{X}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-k)} \sin [\omega_d \Delta t (i-k)]$$

Siendo:

$\Delta t$  = intervalo de tiempo entre los valores de la aceleración;

$\omega_n$  = frecuencia natural no amortiguada (en radianes);

$\omega_d$  = frecuencia natural amortiguada =  $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$  ;

$\ddot{X}_k$  = k-ésimo valor de los datos de entrada de la aceleración;

$\zeta$  = razón de amortiguamiento;

$i$  = número entero, que varía entre 1 y el número de puntos de datos de entrada de la aceleración;

$k$  = Parámetro usado en el sumatorio, que varía entre 0 y el valor actual de  $i$ ;

- ii) Se calculará una matriz de las aceleraciones relativas usando los valores del desplazamiento obtenidos en la etapa i en la ecuación siguiente:

$$\ddot{\xi}_i = 2\zeta \omega_n \Delta t \sum_{k=0}^i \ddot{x}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-k)} \cos [\omega_d \Delta t (i-k)] + \omega_n^2 (2\zeta^2 - 1) \xi_i$$

- iii) Se retendrá el valor de la aceleración máxima absoluta de la matriz generada en la etapa ii para el intervalo de frecuencias de que se trate. Este valor será el punto de la curva ERC para este intervalo de frecuencias. Se repetirá la etapa i para cada frecuencia natural hasta que se hayan evaluado todos los intervalos de frecuencias naturales;

- iv) Se trazará la curva del espectro de respuesta a los choques de la prueba.

#### 41.3.5.2 Método de corrección a escala de los valores medidos del registro aceleración-tiempo para compensar el defecto o exceso de masa de ciertos contenedores

Cuando la suma de la masa útil de prueba más la tara del contenedor sometido a prueba sea inferior a la masa nominal máxima del contenedor sometido a prueba, se aplicará un factor de corrección a los valores de la aceleración medidos en función del tiempo para el contenedor sometido a prueba, como sigue:

Los valores corregidos de la aceleración en función del tiempo,  $\text{Acc}(t)_{(\text{corregido})}$ , se calcularán a partir de los valores medidos de la aceleración en función del tiempo usando la fórmula siguiente:

$$\text{Acc}(t)_{(\text{corregido})} = \text{Acc}(t)_{(\text{medido})} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta M}{M1 + M2}}}$$

Siendo:

$\text{Acc}(t)_{(\text{medido})}$  = valor real medido en función del tiempo;

$M1$  = masa de la plataforma de prueba, sin el contenedor sometido a prueba;

$M2$  = masa real de prueba (incluida la tara) del contenedor sometido a prueba;

$R$  = masa nominal máxima (incluida la tara) del contenedor de prueba;

$\Delta M$  =  $R - M2$ ;

Los valores del ERC de la prueba se generarán a partir de la valores  $Acc(t)$  (corregido).

#### **41.3.6 Instrumentos defectuosos**

Si la señal obtenida de un acelerómetro no es fiable, la prueba podrá ser confirmada usando el ERC de un acelerómetro fiable tras tres choques consecutivos, a condición de que el ERC de cada uno de los tres choques sea igual o superior a la curva ERC mínima.

#### **41.3.7 Método sustitutivo de confirmación de la severidad de la prueba para cisternas portátiles con un armazón de 20 pies (6,1 m) de longitud**

41.3.7.1 Si el diseño de una cisterna o contenedor sometidos a prueba difiere considerablemente del de otros contenedores sometidos con éxito a esta prueba y las curvas ERC obtenidas presentan las características deseadas pero se mantienen por debajo de la curva ERC mínima, podrá considerarse aceptable la severidad de la prueba si se realizan tres choques sucesivos, como sigue:

- a) Un primer choque a una velocidad superior al 90% de la velocidad crítica mencionada en 41.3.7.2; y
- b) Los choques segundo y tercero a una velocidad superior al 95% de la velocidad crítica mencionada en 41.3.7.2.

41.3.7.2 El método de validación sustitutivo descrito en 41.3.7.1 se usará únicamente cuando se haya determinado de antemano la "velocidad crítica" de la plataforma. La velocidad crítica es la velocidad a la cual los dispositivos de amortiguamiento de la plataforma alcanzan sus niveles máximos de desplazamiento y su capacidad de absorción de energía máxima, más allá de los cuales se alcanza o supera normalmente la curva ERC mínima. La velocidad crítica deberá haberse determinado para un mínimo de cinco pruebas bien documentadas en cinco contenedores cisternas diferentes. En cada una de esas pruebas deberá haberse usado el mismo equipo, el mismo sistema de medición y el mismo procedimiento.

#### **41.3.8 Registro de los datos**

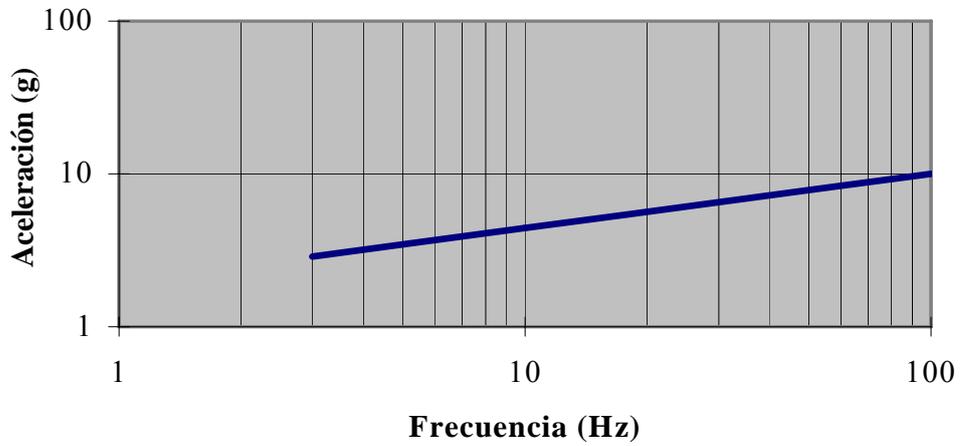
41.3.8.1 En la aplicación de este procedimiento se registrarán como mínimo los datos siguientes:

- a) Fecha, hora, temperatura ambiente y lugar de la prueba;
- b) Tara del contenedor, masa nominal máxima del contenedor y masa útil durante la prueba;
- c) Fabricante del contenedor, tipo de contenedor, número de registro, si procede, y códigos y autorizaciones de diseño certificados, si procede;
- d) Masa de la plataforma de prueba;
- e) Velocidad de choque;
- f) Dirección del choque respecto del contenedor; y
- g) Para cada choque, un registro de la aceleración en función del tiempo para cada cantonera provista de instrumentos de medición.

**Figura 41.3.5.1**

**Curva ERC mínima**

**ERC MÍNIMA (AMORTIGUAMIENTO 5%)**



Ecuación para generar la curva ERC mínima arriba indicada:  $ACCEL = 1,95 \text{ FREQ}^{0,355}$

**Cuadro 41.3.5.1**

**Representación tabular de algunos puntos de la curva ERC mínima arriba indicada**

<b>FRECUENCIA (Hz)</b>	<b>ACELERACIÓN (g)</b>
3	2,88
10	4,42
100	10,0

”

## APÉNDICES

### APÉNDICE 5

Enmiéndese como sigue:

#### "APÉNDICE 5

#### **EJEMPLO DE MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS SISTEMAS DE DESCOMPRESIÓN**

##### **1. Introducción**

Este ejemplo de método de dimensionamiento de las aberturas de emergencia se utiliza para determinar la capacidad del sistema de descompresión que debe montarse en determinado RIG o cisterna para determinado peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea del Tipo F, o un preparado de éstos. El método se basa en datos experimentales que indican que, en el caso de los preparados de peróxidos orgánicos o sustancias de reacción espontánea, la relación entre la superficie mínima de ventilación de emergencia y la capacidad del RIG o de la cisterna es constante y puede determinarse utilizando una cisterna a escala reducida, con una capacidad de 10 litros. En las pruebas, se calienta la cisterna de escala reducida a intensidades equivalentes a la necesaria para que la muestra quede totalmente envuelta en llamas o, en el caso de los RIG o cisternas portátiles provistos de aislamiento, a la transmisión de calor a través del aislamiento, en el supuesto de que falte el 1% del aislamiento (véanse los párrafos 4.2.1.13.8 y 4.2.1.13.9 de la Reglamentación Modelo). Pueden utilizarse otros métodos, a condición de que permitan calcular correctamente las dimensiones del o de los dispositivos de descompresión de emergencia en un RIG o una cisterna portátil a fin de expulsar todos los materiales emitidos durante la descomposición autoacelerada o en un período mínimo de una hora durante el cual la muestra queda totalmente envuelta en llamas.

***Advertencia: En este método no se tiene en cuenta la posibilidad de iniciación de una deflagración. Si existe esta posibilidad, especialmente si la iniciación o cebado de la fase vapor puede propagarse a la fase líquida, deben efectuarse pruebas que lo tengan en cuenta.***

##### **2. Aparatos y materiales**

La cisterna a escala reducida consiste en un recipiente de acero inoxidable, de un volumen aproximado de 10 litros. La parte superior de la cisterna está provista de una abertura de 1 mm de diámetro, que actúa de válvula descompresión del RIG o de la cisterna portátil, o de una verdadera válvula de descompresión con un diámetro reducido a escala con arreglo a la relación entre la superficie de purga y el volumen del recipiente. Hay una segunda abertura, que actúa como abertura de descompresión de emergencia, cerrada por un disco de ruptura. El diámetro de esta abertura puede modificarse utilizando discos perforados de distintos diámetros. La presión de rotura de la cápsula sujeta al recipiente de 10 litros debe ser igual a la presión máxima de rotura de los discos de ruptura que deben montarse en el RIG o la cisterna portátil. Esta presión debe ser inferior a la presión de prueba de la cisterna de que se trate. En general, la presión de rotura se fija a un nivel que permita hacer frente a las presiones que se encuentran en las condiciones normales de transporte, tal como la presión hidrostática del líquido como consecuencia del vuelco de la cisterna, del derrame de su contenido, etc. El recipiente de 10 litros debe estar dotado de un disco de ruptura ajustado para una presión correspondiente al disco o discos montados en la cisterna o el RIG durante el transporte. Por razones de seguridad, se recomienda que el recipiente de prueba esté provisto de un disco de ruptura adicional (con una presión de rotura equivalente al 80%, aproximadamente, de la presión de diseño del recipiente de 10 litros) con una abertura de gran tamaño que sirva como medio adicional de purga de urgencia en caso de que el diámetro elegido resulte demasiado pequeño.

La superficie exterior del recipiente de prueba, por debajo del nivel del líquido, va provista de un serpentín de calentamiento eléctrico o cartuchos calefactores, conectados a una fuente de energía. El contenido del recipiente debe calentarse a una velocidad constante, independientemente del calor que genera el peróxido orgánico o la sustancia de reacción espontánea. La resistencia del serpentín debe ser tal que, con la energía disponible, se pueda alcanzar la velocidad de calentamiento prevista (véase la sección 3). Debe aislarse todo el recipiente con lana mineral, vidrio celular o fibra cerámica.

La temperatura en el interior de la cisterna se mide por medio de tres termopares, dos colocados en la fase líquida (cerca del extremo superior y del fondo) y el tercero en la fase gaseosa. Los dos primeros se utilizan en la fase líquida para verificar la homogeneidad del calentamiento. Se mide la presión mediante uno o varios transductores de presión capaces de registrar cambios lentos y rápidos de presión (por lo menos 1.000 puntos/segundo). En la figura A5.1 se representan ejemplos de recipientes objeto de la prueba. Puede obtenerse información adicional si la cisterna se monta sobre una bandeja destinada a recoger las sustancias sólidas y líquidas expulsadas.

Las pruebas deben efectuarse en un lugar que disponga de las distancias de seguridad apropiadas. También pueden efectuarse en un recinto de hormigón provisto de aberturas de ventilación y de descompresión para impedir que se produzca un aumento excesivo de la presión. Debe emplearse equipo eléctrico a prueba de explosión en el recinto de hormigón a fin de reducir al mínimo el riesgo de inflamación. **No obstante, las pruebas deben efectuarse partiendo del supuesto de que los productos de descomposición van a inflamarse.**

### 3. Cálculo de la velocidad de calentamiento que ha de utilizarse en la prueba

Si un RIG o una cisterna no tiene aislamiento, debe aplicarse al depósito una carga térmica tal como se indica en el párrafo 4.2.1.13.8 de la Reglamentación Modelo. Para un RIG o una cisterna con aislamiento, la Reglamentación Modelo prescribe que la carga térmica aplicada al depósito sea equivalente a la transmisión de calor a través del aislamiento más la carga térmica aplicada al depósito en el supuesto de que falte el 1% del aislamiento.

Para calcular la velocidad de calentamiento se precisa de la información siguiente sobre el RIG o la cisterna portátil y el peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea:

$F_r$	=	Parte de la cisterna calentada directamente (1 si no tiene aislamiento; 0,01 si lo tiene)	[-]
$M_t$	=	Masa total del peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea y el diluyente	[kg]
$K$	=	Conductividad térmica de la capa aislante	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$L$	=	Espesor de la capa aislante	[m]
$U$	=	$K/L$ = coeficiente de transmisión de calor	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$A$	=	Superficie del RIG o de la cisterna portátil en contacto con el líquido	[m <sup>2</sup> ]
$C_p$	=	Calor específico del preparado de peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$T_{po}$	=	Temperatura del preparado de peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea en el momento de la descompresión	[K]
$q_i$	=	Calor por exposición indirecta	[W]
$q_d$	=	Calor por exposición directa	[W]
$F$	=	Factor de aislamiento	[-]

El consumo calorífico,  $q_i$  (W), a través de la superficie indirectamente expuesta (parte aislada) se calcula mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$q_i = 70961 \times F \times [(1 - F_r) \times A]^{0,82} \quad (1)$$

donde:

F = Factor de aislamiento;  
F = 1 para los depósitos no aislados, o

$$F = 2 \times \frac{U(923 - T_{po})}{47032} \text{ para los depósitos aislados} \quad (2)$$

En el cálculo de F se introduce un factor multiplicador de 2 para tener en cuenta una pérdida de eficiencia del aislamiento del 50% en caso de accidente.

El consumo calorífico,  $q_d$  (W) a través de la superficie directamente expuesta (parte sin aislamiento) se calcula por la ecuación (3):

$$q_d = 70961 \times F \times [F_r \times A]^{0,82} \quad (3)$$

donde:

F = Factor de aislamiento = 1 (sin aislamiento)

La velocidad global de calentamiento,  $dT/dt$  (en K/min), cuando la cisterna queda envuelta en llamas, se calcula mediante la ecuación (4):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(q_i + q_d)}{M_i C_p} 60 \quad (4)$$

### **Ejemplo 1: cisterna aislada**

Para una cisterna corriente de 20 m<sup>3</sup>, con aislamiento:

$F_r$	=	Parte de la cisterna calentada directamente	=	0,01
$M_i$	=	Masa total del peróxido orgánico o de la sustancia de reacción espontánea y del diluyente	=	16.268 kg
K	=	Conductividad térmica de la capa aislante	=	0,031 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
L	=	Espesor de la capa aislante	=	0,075 m
U	=	Coefficiente de transmisión de calor	=	0,4 W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
A	=	Superficie de la cisterna portátil en contacto con el líquido	=	40 m <sup>2</sup>
$C_p$	=	Calor específico del preparado de peróxido orgánico	=	2.000 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$T_{po}$	=	Temperatura del peróxido orgánico en el momento de la descompresión	=	100°C

y

$$q_i = 70961 \times 2 \times \frac{0,4 \times (923 - 373)}{47032} \times [(1 - 0,01) \times 40]^{0,82} = 13558 \text{ W}$$

$$q_d = 70961 \times 1 \times [0,01 \times 40]^{0,82} = 33474 \text{ W}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(13558 + 33474)}{16268 \times 2000} \times 60 = 0,086 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$$

**Ejemplo 2: RIG no aislado**

Para un RIG típico de acero inoxidable no aislado de 1,2 m<sup>3</sup> (calor directo únicamente, q<sub>d</sub>):

F <sub>r</sub>	=	Parte de la cisterna calentada directamente	=	1
M <sub>t</sub>	=	Masa total de peróxido orgánico y diluyente	=	1.012 kg
A	=	Superficie del RIG en contacto con el líquido	=	5,04 m <sup>2</sup>
C <sub>p</sub>	=	Calor específico del preparado de peróxido orgánico	=	2.190 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>

y

$$q_d = 70961 \times 1 \times [1 \times 5,04]^{0,82} = 267308 \text{ W}$$

$$q_d = 0$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(0 + 267308)}{1012 \times 2190} \times 60 = 7,2 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$$

**4. Procedimiento**

Se llena el depósito del recipiente objeto de la prueba con la cantidad de peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea necesaria para dar la misma tasa de llenado (en volumen del depósito) que la que se utiliza en la cisterna (tasa máxima de llenado 90%, en volumen) y se instalan la placa perforada prescrita<sup>1</sup> y el disco de ruptura. Normalmente, para una cisterna de 20 toneladas se emplean cuatro discos de ruptura de 250 mm, que corresponden a un diámetro de orificio de unos 11 mm en el recipiente de prueba.

Se calienta el recipiente a la velocidad deseada aplicando una corriente superior a la calculada al serpentín de calentamiento hasta que se alcance una temperatura que esté 5 °C por encima de la temperatura de descomposición autoacelerada (para un bulto de 50 kg) del peróxido orgánico o de la sustancia de reacción espontánea. La velocidad de calentamiento calculada debe aplicarse desde el momento en que se alcanza esta temperatura. Se registran la temperatura y la presión del recipiente durante toda la prueba. Tras la rotura del disco de ruptura, se continúa aplicando calor durante unos 30 min más para estar seguro de que se miden todos los efectos peligrosos. **Una vez terminada la prueba, no hay que acercarse al recipiente hasta que se haya enfriado su contenido.**

El diámetro del orificio debe variarse (en caso necesario) hasta que se determine la abertura apropiada en la que la presión máxima registrada no sea superior a la presión especificada en la sección 5, *Criterios de prueba y método de evaluación de los resultados*. Las dimensiones escalonadas que se utilicen deben guardar relación con las opciones de que se disponga en la práctica para las cisternas, es decir, utilizando aberturas de diámetro mayor o un mayor número de ellas. De ser necesario puede reducirse la concentración de peróxido orgánico o sustancia de reacción espontánea. La prueba debe efectuarse por duplicado al nivel en el cual la superficie total de purga tenga una capacidad suficiente.

**5. Criterios de prueba y método de evaluación de los resultados**

La superficie mínima o adecuada (si se admite la utilización de una abertura de tamaño superior al mínimo) de purga de un RIG o de una cisterna (A<sub>RIG</sub> o A<sub>cisterna</sub>, en m<sup>2</sup>) puede calcularse utilizando la superficie mínima o adecuada de orificio determinada en la prueba de la cisterna de 10 l en que la presión máxima durante la apertura es:

<sup>1</sup> Se recomienda que, antes de someter a prueba el recipiente de 10 litros, se efectúen ensayos con recipientes pequeños (100 a 200 ml) o muy resistentes (presión superior a 100 bar) a fin de obtener información acerca de la presión máxima que puede soportar la sustancia que se somete a prueba y el diámetro de abertura que debe utilizarse en el primer ensayo con dicho recipiente.

- para las cisternas, inferior o igual a la presión de prueba de la cisterna (de acuerdo con lo dispuesto en 4.2.1.13.4 de la Reglamentación Modelo la cisterna se diseñará para una presión de prueba de por lo menos 0,4 MPa),
- para los RIG, una presión manométrica inferior o igual a 200 kPa, medida durante la prueba de acuerdo con lo dispuesto en 6.5.4.8.4 de la Reglamentación Modelo, o superior a esta presión, con sujeción a la aprobación de la autoridad competente,

y los volúmenes del recipiente de prueba y del RIG o cisterna.

La superficie total mínima de las aberturas de descompresión de un RIG o de una cisterna viene dada por las ecuaciones siguientes:

$$\text{Para RIG: } A_{\text{RIG}} = V_{\text{RIG}} \times \left( \frac{A_{\text{recipiente de prueba}}}{V_{\text{recipiente de prueba}}} \right)$$

$$\text{Para cisternas: } A_{\text{cisterna}} = V_{\text{cisterna}} \times \left( \frac{A_{\text{recipiente de prueba}}}{V_{\text{recipiente de prueba}}} \right)$$

Siendo:

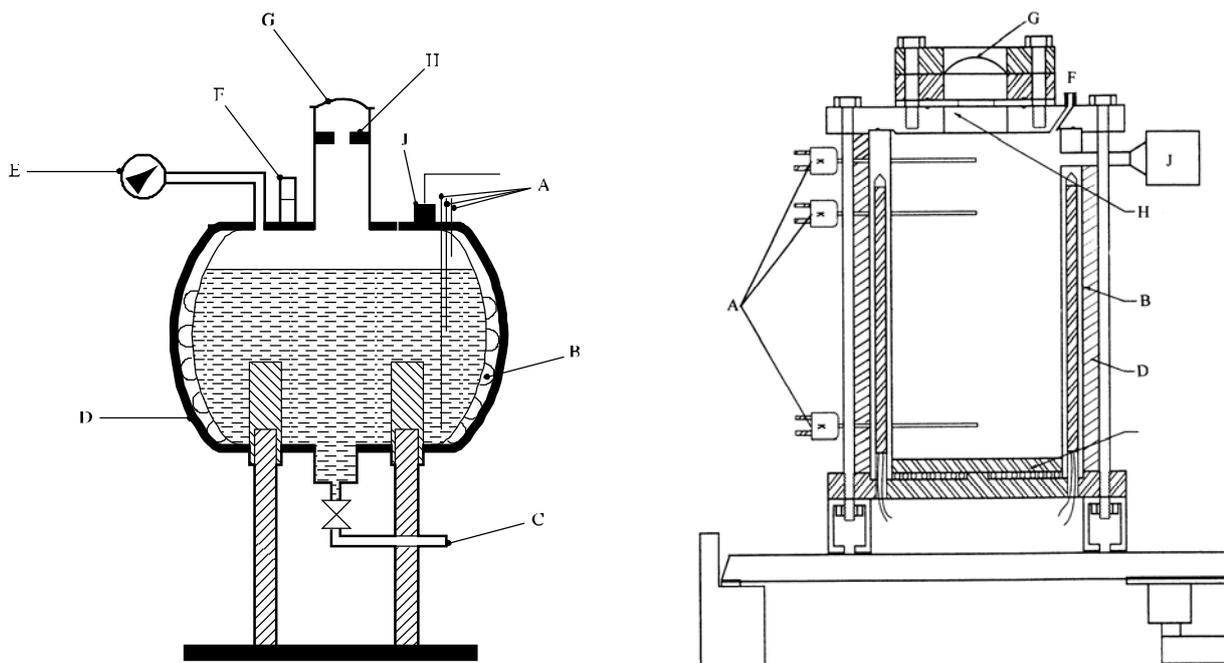
$A_{\text{recipiente de prueba}}$	=	Superficie de abertura de un recipiente de prueba de 10 l	=	$[m^2]$
$A_{\text{RIG}}$	=	Superficie de abertura de un RIG	=	$[m^2]$
$A_{\text{cisterna}}$	=	Superficie de abertura de una cisterna	=	$[m^2]$
$V_{\text{recipiente de prueba}}$	=	Volumen de un recipiente de 10 l	=	$[m^3]$
$V_{\text{RIG}}$	=	Volumen de un RIG	=	$[m^3]$
$V_{\text{cisterna}}$	=	Volumen de una cisterna	=	$[m^3]$

*Ejemplo:*

Para un peróxido orgánico corriente en una cisterna de 20 m<sup>3</sup>, con aislamiento:

$A_{\text{recipiente de prueba}}$	=	Superficie mínima suficiente de la abertura de descompresión determinada en la prueba	=	$9,5 \times 10^{-5} m^2$
$V_{\text{cisterna}}$	=	Volumen de la cisterna	=	$20 m^3$
$V_{\text{recipiente de prueba}}$	=	Volumen del recipiente de prueba	=	$0,01 m^3$

$$A_{\text{cisterna}} = 20 \times \left( 9,5 \times \frac{10^{-5}}{0,01} \right) = 0,19 m^2$$



- 
- (A) Termopares (dos en la fase líquida y uno en la fase vapor)
  - (B) Serpentín/cartucho calefactor
  - (C) Conducto de drenaje (facultativo)
  - (D) Aislamiento
  - (E) Manómetro, facultativo
  - (F) Válvula de reducción de la presión (facultativo)
  - (G) Disco de ruptura
  - (H) Placa perforada
  - (J) Transductor de presión o válvula de reducción de la presión y transductor montado en T
- 

**Figura A5.1 RECIPIENTES DE 10 LITROS PARA LAS PRUEBAS DE LOS SISTEMAS DE DESCOMPRESIÓN"**