

Ana M. Lacasta

Doctora en Ciencias Físicas. Catedrática del Departamento de Tecnología de la Arquitectura, EPSEB - UPC.

Laia Haurie

Doctora en Ciencias Químicas. Profesora agregada en la EPSEB, miembro del Departamento de Tecnología en la Arquitectura de la UPC.

La toxicidad es una problemática de vital importancia en caso de incendio. Como ha podido verse por casos como el de la Torre Grenfell de Londres, siniestro que motiva la elaboración del presente documento, la inhalación de humos es la principal causa de muerte en estos casos. Pese a ello, las normativas reguladoras en el sector de la construcción no contemplan este factor ni ofrecen soluciones al respecto, como sí ocurre en otros sectores industriales.

Debido a esto, en el siguiente capítulo se analizan los diferentes aspectos a tener en cuenta para entender la toxicidad en caso de incendio, además de revisarse la regulación que diferentes países realizan sobre la toxicidad de los humos de los materiales de construcción.

3.1. Peligrosidad de los humos en un incendio

Los humos generados en un incendio son una combinación de aire caliente, partículas en suspensión que no han quemado (hollín), y diversas concentraciones de gases más o menos tóxicos,

que pueden ser irritantes y/o asfixiantes. La concentración de oxígeno (O₂) es más baja que en condiciones normales. Los gases más comunes generados son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO). Dependiendo del material y de las condiciones del incendio se pueden desprender otros gases como cloruro de hidrógeno o cianuro de hidrógeno. En condiciones de poca ventilación suelen producirse humos más oscuros, que contienen mayor cantidad de hollín, menor porcentaje de CO₂ y mayor porcentaje de CO.

Los humos generados en un incendio son una combinación de aire caliente, partículas en suspensión que no han quemado (hollín), y diversas concentraciones de gases más o menos tóxicos, que pueden ser irritantes y/o asfixiantes.

Son varios los motivos por los que los humos de un incendio son potencialmente peligrosos:

- Difunden de una manera muy rápida de manera que, en pocos minutos, los humos generados en un fuego localizado pueden alcanzar grandes espacios. Tienden a desplazarse verticalmente hacia arriba, acumulándose en la parte superior de los recintos y ascendiendo por fachada, por cajas de escaleras y por conductos.

TOXICIDAD

- Son gases calientes, lo que dificulta la respiración y puede producir quemaduras.
- Pueden producir asfixia, ya que contienen una menor concentración de O₂ y mayor de CO₂, y además gases asfixiantes como CO.
- Pueden producirse gases irritantes. Inhalar estas sustancias puede producir quemaduras en los pulmones y en el tracto respiratorio.
- Contienen partículas en suspensión que tienen efectos irritantes sobre las mucosas. Provocan lagrimeo y dificultan la respiración.
- El humo, sobre todo si es denso, disminuye drásticamente la visibilidad.
- Tanto la disminución de la visibilidad como los efectos incapacitantes del humo y los gases asfixiantes e irritantes dificultan la salida de las personas y el acceso de los bomberos y, en consecuencia, muchas de las muertes por incendios se deben a la inhalación de humos.

Los productos tóxicos de los incendios comenzaron a ser reconocidos como una gran amenaza en las décadas de 1970 y 1980, y desde entonces se han realizado numerosas investigaciones en este campo (A. A. Alarifi, 2016). Un caso de gran impacto fue el incendio en el MGM Grand Hotel de Las Vegas, en 1980, en el que la mayoría de las víctimas mortales y heridos lo fueron por inhalación de humos. El incendio se inició en el casino, en la planta baja, y el fuego se limitó únicamente, a un nivel horizontal. Sin embargo, los humos se propagaron verticalmente (ver Figura 3.1), alcanzando a las

personas situadas en lo alto del hotel de 26 plantas.

Los incendios ocurridos en las salas de las discotecas The Station, el 2003, en EE. UU., y la República Cromañón, el 2004, en Argentina, también despertaron las alarmas sobre la producción de gases tóxicos por parte de determinados materiales. Tanto el National Institute of Standards and Technology de EE. UU. (NIST) como el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina realizaron estudios sobre estos dos casos analizando diferentes aspectos, entre ellos la evolución de la concentración de cianuro de hidrógeno liberada por la espuma de poliuretano presente en ambas salas como revestimiento visto. Los resultados indicaron que las concentraciones de cianuro de hidrógeno generadas durante el incendio habían sido muy superiores a los valores considerados letales para ratas de laboratorio.

Los productos tóxicos de los incendios comenzaron a ser reconocidos como una gran amenaza en las décadas de los setenta y ochenta.

Más recientemente (junio de 2017), la inhalación de los gases liberados por la combustión del sistema de aislamiento térmico exterior de la Torre Grenfell de Londres puede haber sido la causa de una buena parte de los fallecidos y heridos en el incendio (D. Boyle, 2017). La espuma de poliisocianurato (PIR) utiliza-

da, cuando quema, emite gases tóxicos, incluyendo cianuro de hidrógeno y monóxido de carbono, que causan incapacidad rápida cuando se inhala. Muchas personas en la torre podrían haber tenido las ventanas abiertas, propiciando la exposición a dichos gases incapacitantes.

Diversas investigaciones a nivel internacional, especialmente las realizadas en EE. UU. y Reino Unido, muestran que la inhalación de los gases generados en un incendio es la causa más frecuente de muerte. Los estudios coinciden en que, si bien desde la introducción en los años 80 de nuevas normativas de seguridad en caso de incendio el número global de víctimas causadas por incendios se ha reducido, el porcentaje de muertes producidas por la inhalación de humo y gases tóxicos ha aumentado. Este cambio está relacionado con la entrada en el mercado de nuevos materiales, sobre todo polímeros sintéticos, con una mayor tendencia a producir gases tóxicos o irritantes —como el cloruro de hidrógeno o el cianuro de hidrógeno—. La presencia de niveles elevados de gases tóxicos en las víctimas de incendios se ha detectado también en otros países como Polonia, en los cuales el número de víctimas en incendios no ha sufrido la reducción mencionada para EE. UU. y el Reino Unido (J. R. Hall, 2011; A. A. Stec, 2017; J. Giebultowicz, 2017). En el caso de España, los datos de los últimos años, recogidos en los informes anuales “Víctimas de incendios en España” publicados por la Fundación Mapfre también muestran esta tendencia (ver Figura 3.2).

3.2. Generación de gases tóxicos en un incendio

En un incendio se generan diversos gases, tóxicos y no tóxicos, resultado de la pirólisis y combustión de los materiales y que pueden resultar en una mezcla compleja de muchos compuestos diferentes. La pirólisis es la descomposición química del material, por acción del calor, y la emisión de gases combustibles. Estos gases combustibles se mezclan con el oxígeno del aire y, si se dan las condiciones adecuadas, tiene lugar una reacción química —la combustión— con una gran liberación de calor. En la reacción de combustión se consume oxígeno y se libera vapor de agua y CO₂. Cuando la combustión no es completa, quedan sustancias combustibles (inquemados) en los humos, principalmente partículas en suspensión y CO.

La potencial toxicidad de dichos gases no solo depende de la composición de los materiales de los cuales se liberan, sino también de las condiciones en las que se desarrolla el incendio, en particular de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno en la zona de fuego. Estos factores varían significativamente durante un incendio y entre diferentes incendios y, como consecuencia, los gases producidos en diferentes etapas de un incendio pueden variar significativamente (T. R. Hull, 2016).

Por ejemplo, los compuestos nitrogenados generados por la descomposición térmica de espumas de poliuretano a aproximadamente 400 °C pueden comprender isocianatos y órgano-nitrilos,

TOXICIDAD

pero a medida que la temperatura aumenta, predominará el cianuro de hidrógeno hasta que, en condiciones de temperaturas mayores (aproximadamente 800 °C) y alta ventilación, los componentes principales serán los óxidos de nitrógeno (T. R. Hull, 2007).

A fin de caracterizar correctamente los gases generados, suelen considerarse diferentes etapas de incendios: combustión sin llamas (non-flaming), combustión con llamas bien ventilada (well-ventilated) y combustión con llama infraventilada (under-ventilated). Esos estadios pueden clasificarse en térmicos de flujo

de calor, temperatura, disponibilidad de O₂, proporción de CO₂ a CO o relación de equivalencia (T. R. Hull, 2007). La relación de equivalencia, ϕ , se define en términos de la cantidad de combustible presente respecto al oxígeno necesario para combustionar completamente, y por tanto es una medida del grado de ventilación existente. Valores de ϕ bajos ($\phi < 1$) indican la existencia de más oxígeno del necesario, y por tanto corresponden a condiciones con buena ventilación. En cambio, valores de ϕ grandes ($\phi \sim 2$) corresponden a los bajos niveles de oxígeno característicos de condiciones de infraventilación.

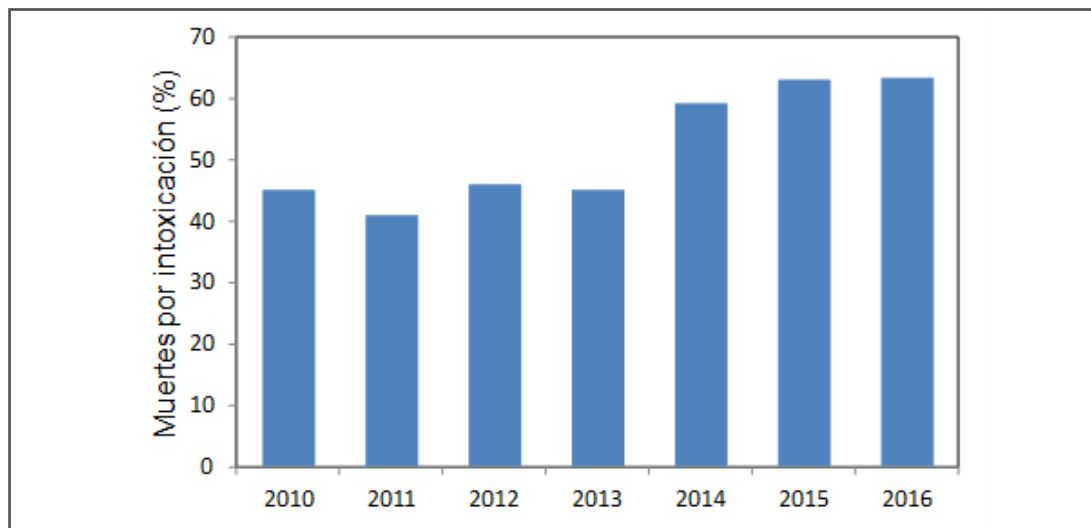


Figura 3.2. Fallecidos en incendio por inhalación de gases en España (porcentaje respecto del total de fallecidos en incendios)

Fuente: A. M. Lacasta e I. Haurie a partir de los datos que aparecen en los informes anuales "Víctimas de incendios en España" publicados por la Fundación Mapfre (MAPFRE, 2010-2017), que a su vez proceden de Servicios de Bomberos y del Instituto de Medicina Legal (IML).

3.3. Principales gases tóxicos generados en un incendio y su efecto en las personas

Los materiales utilizados en edificación que pueden generar gases tóxicos en caso de incendio son, en general, cualquier compuesto orgánico que contenga carbono: madera, papel, lana de oveja, algodón, aceite, hidrocarburos combustibles, etc. Hay que tener en cuenta, especialmente, los denominados compuestos nitrogenados que se dan en numerosos plásticos y pinturas que contienen nitrógeno en su estructura, como poliamida, poliuretano o melamina. La presencia de nitrógeno en las moléculas orgánicas da lugar a la producción de cianuro de hidrógeno que no se da en otro tipo de compuestos orgánicos.

Los gases generados incluyen:

- Gases irritantes de la vía aérea. Los más comunes son: acroleína, ácido clorhídrico, amoníaco, benceno, formaldehído y aldehído, y óxidos de azufre y de nitrógeno.
- Gases asfixiantes simples: dióxido de carbono (CO₂).
- Gases asfixiantes (tóxicos celulares): monóxido de carbono (CO) y cianuro de hidrógeno (HCN). El HCN se produce, sobre todo, en la combustión de compuestos nitrogenados.

A continuación, se describen los efectos en el organismo de los principales gases involucrados en un incendio.

Disminución de oxígeno. Tal como se ha explicado antes, el fuego es, básicamente, una reacción de combustión en-

tre los gases combustibles generados en la pirólisis del material y el oxígeno del aire. Por tanto, en un escenario de incendio tendremos una disminución de los niveles de oxígeno, lo que afectará a las personas. Una baja concentración de oxígeno en el aire conduce a una deficiencia de oxígeno en la sangre, las células y los tejidos (hipoxia) con consecuencias que pueden llegar a ser mortales. En condiciones normales, la concentración de oxígeno es del 21 %; en concentraciones inferiores al 14 % puede producirse la muerte.

Dióxido de carbono. El CO₂ compete con el oxígeno en el proceso respiratorio, y por ello se dice que es un gas asfixiante simple. El aire normal contiene aproximadamente 300 ppm de CO₂ (0,03 %) por volumen de aire. A partir de un 10 % de CO₂ se produce ahogo o dificultad en la respiración (disnea). Además, la presencia de CO₂ en la sangre estimula la hiperventilación, aumenta la velocidad de respiración y, por tanto, el peligro de inhalación de los demás componentes tóxicos del humo del incendio.

Monóxido de carbono. El CO es uno de los componentes más significativos, ya que es el principal causante de las intoxicaciones y muertes producidas durante los incendios. El CO se combina con la hemoglobina de la sangre, en lugar del oxígeno, formando carboxihemoglobina. Por lo tanto, el CO dificulta el transporte de oxígeno a las células (asfixia celular). La guía NTP 65: Toxicología de compuestos de pirólisis y combustión (D. T. Mayol, 1983) señala que, para una exposición de

TOXICIDAD

una hora a una concentración de CO del 0,4 % los efectos fisiológicos son mortales. Se produce en la combustión incompleta de cualquier material orgánico.

Cianuro de hidrógeno. El HCN impide la absorción de oxígeno por parte de las células, ya que deja inoperativas determinadas enzimas esenciales para su funcionamiento (asfixia celular). Los efectos son mortales en concentraciones de 120-150 mg/m³ en exposiciones de entre 30 minutos y 1 hora, y mortales instantáneamente para concentraciones de 300 mg/m³ (D. T. Mayol, 1983). El cianuro de hidrógeno se puede generar en la combustión de cualquier material que contenga nitrógeno, como por ejemplo poliuretano, poliamida, resinas acrílicas o lana de oveja (H. Tuovinen, 2004). **Cloruro de hidrógeno.** El HCl, al igual que otros ácidos halogenados (HBr, HF) es un gas irritante de las vías respiratorias. Los valores límites para exposiciones de 30 minutos están entre 100 y 1000 ppm (A. A. Stec, 2017). Este tipo de gases se generan en la combustión de PVC y en los materiales que contienen retardantes de llama halogenados.

Óxidos de nitrógeno. Los óxidos NO y NO₂ son irritantes del tracto respiratorio y de las membranas mucosas. Se producen por la combustión de compuestos nitrogenados a alta temperatura. El valor límite de exposición a 30 minutos es de 170 ppm (A. A. Stec, 2017).

Acroleína. Es un compuesto orgánico que pertenece a los aldehídos insaturados. Algunas de las principales

fuentes de exposición son el humo de los cigarrillos y los vehículos de combustión. Asimismo, la acroleína se puede formar en la pirólisis de la madera y la combustión incompleta de aceites y combustibles fósiles. La acroleína es un irritante de las membranas mucosas y es absorbida en pulmones e intestino y metabolizada en el hígado. Parte de los metabolitos que no son eliminados por la orina pasan a la sangre y pueden causar daños orgánicos (J. Herrera-Martínez, 2006).

Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. Las mezclas complejas de VOC/SVOC se generan como productos de combustión incompletos durante los incendios y se sabe que muchos de ellos son dañinos para la salud humana y el medio ambiente. Algunos ejemplos de estos compuestos son el benceno, el estireno y el fenol. El benceno es un conocido carcinógeno.

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Son compuestos orgánicos que contienen anillos aromáticos. Se forman durante la combustión incompleta de materia orgánica. Algunos HAP, como los benzopirenos, han sido identificados como cancerígenos.

Partículas. Las partículas presentes en el humo dificultan la visibilidad y la respiración, especialmente si son de tamaño reducido. Los HAP pueden aglomerarse formando partículas de hollín. La aspiración de estas partículas puede causar daños graves en el aparato respiratorio (A. A. Stec, 2017).

TOXICIDAD

La manera general de tratar la potencial toxicidad de los gases generados consiste en asumir el comportamiento aditivo de tóxicos individuales y expresar la concentración de cada uno como su fracción de la concentración letal para el 50 % de la población para una exposición de 30 minutos (CL50). La suma de estas contribuciones genera una dosis efectiva fraccional (FED). Una FED igual a uno indica que la suma de concentraciones de especies individuales será letal para el 50 % de la población durante una exposición de 30 minutos. Este enfoque usa los datos existentes de letalidad de ratas, como se describe en la norma ISO 13344.

Toxicidad de los materiales aislantes térmicos en caso de incendio

Las estrategias de mejora de la eficiencia energética están impulsando la sustitución de materiales de construcción tradicionales por materiales de aislamiento ligeros que, si son combustibles, no solo pueden contribuir a la carga de fuego, sino que además pueden generar gases tóxicos (B. C. Roberts, 2015). Existen riesgos tanto si las intervenciones de mejora son por el exterior como si se realizan por el interior. En este último caso la incidencia de los gases tóxicos puede ser aún mayor.

En 2011, Stec y colaboradores (A. A. Stec, 2011) analizaron la toxicidad en caso de incendio de seis materiales aislantes térmicos habitualmente utilizados en edificación: lana de vidrio (glass wool, GW), lana de roca (stone wool, SW), espuma de poliestireno expandido (expanded polystyrene, EPS), espuma fenólica (phenolic,

PhF), espuma de poliuretano (polyurethane, PUR) y espuma de poliisocianurato (polyisocyanurate, PIR). Los aislantes fueron ensayados, en un horno estacionario, bajo diferentes condiciones de ensayo. Las muestras se sometieron a diferentes temperaturas y se consideraron varios niveles de ventilación, caracterizados por diferentes valores de la relación de equivalencia, ϕ , introducida en la sección 3.2. Concretamente se quiso distinguir entre situaciones con buena ventilación (W-V) y situaciones infraventiladas (U-V).

La contribución a la toxicidad de los materiales inorgánicos (lana de vidrio o lana de roca) es muy pequeña en comparación con cualquier otro aislante.

Dos de los materiales —la lana de roca (SW) y la lana de vidrio (GW)— no mostraron llama en ningún caso, aunque sí generaron humos. El resto de los materiales no mostraron llama a 350 °C pero sí a 600 °C. Para todos los casos, se analizó la contribución de los componentes tóxicos individuales, así como la dosis efectiva fraccional (FED), según el método descrito en la sección 3.3. La Figura 3.3 resume algunos de los resultados obtenidos.

Los resultados muestran que la contribución a la toxicidad del fuego de los materiales inorgánicos, GW and SW, es muy pequeña en comparación con la de cualquiera de los otros aislantes. Las espumas orgánicas muestran, en todos los casos,

TOXICIDAD

menores producciones de CO en condiciones bien ventiladas, en comparación con las condiciones infraventiladas. Para los dos materiales que contienen nitrógeno, PUR y PIR, las generaciones de cianuro de hidrógeno también aumentan con la disminución de la ventilación. En términos globales, los materiales que mostraron un peor comportamiento (mayor FED) fueron el PIR y el PUR.

Otro aspecto que se ha analizado por parte de algunos autores es el efecto de los tratamientos retardantes de llama en la toxicidad resultante. Dichos tratamientos se aplican para mejorar la reacción al fuego de las espumas orgánicas. Sin embargo, esto implica la adición de sustancias que, dependiendo de su composición, pueden producir gases tóxicos adicionales durante la combustión, como haluros de hidrógeno, nitrógeno, fósforo y óxidos de azufre (J. Giebultowicz, 2017). Además, al hacer que la combustión sea menos eficiente, también puede aumentar la producción de los productos de combustión comunes. Por ejemplo, en el caso de espumas rígidas de poliuretano se obtuvieron, para algunos tipos de retardante, relaciones CO/CO₂ considerablemente más elevadas que en las espumas sin tratar (D. Adeosun, 2014).

3.4. Normativas existentes en otros países y en otros sectores

Actualmente la normativa europea referente a la clasificación de la reacción al fuego de los materiales de construcción se centra en la evaluación de los

parámetros relacionados con la ignición y liberación de calor. Se contempla también la producción de gotas inflamadas y la opacidad de los humos, pero no la toxicidad de los mismos.

Un informe reciente de la Comisión Europea (T. Yates, 2017) indica que algunos países europeos regulan la toxicidad de los materiales de construcción en determinadas circunstancias. **Francia** limita el uso de materiales con una clasificación inferior a B-s1 si contienen cloro o nitrógeno en su composición debido a la posible liberación de cloruro de hidrógeno o cianuro de hidrógeno. En **Polonia** la regulación de 2012 del Ministerio de Infraestructuras referente a las características técnicas que deben cumplir los edificios hace referencia a las normas PN-EN 13501 *Fire classification of construction products and building elements* y PN- B-02855 *Fire protection of buildings - Test method for the secretion of toxic products of decomposition and combustion of materials*. En estas normas se definen tres niveles de toxicidad de los productos de construcción, pero únicamente afectan a los materiales de acabados y mobiliario en edificios de pública concurrencia.

En **Suecia** existen una serie de recomendaciones en los límites de CO, CO₂ y producción de partículas en caso de incendio realizadas por el Swedish National Board of Housing, Building and Planning. Estas recomendaciones están pensadas para ser aplicadas cuando los agentes involucrados en la construcción del edificio escojan garantizar la seguridad.

TOXICIDAD

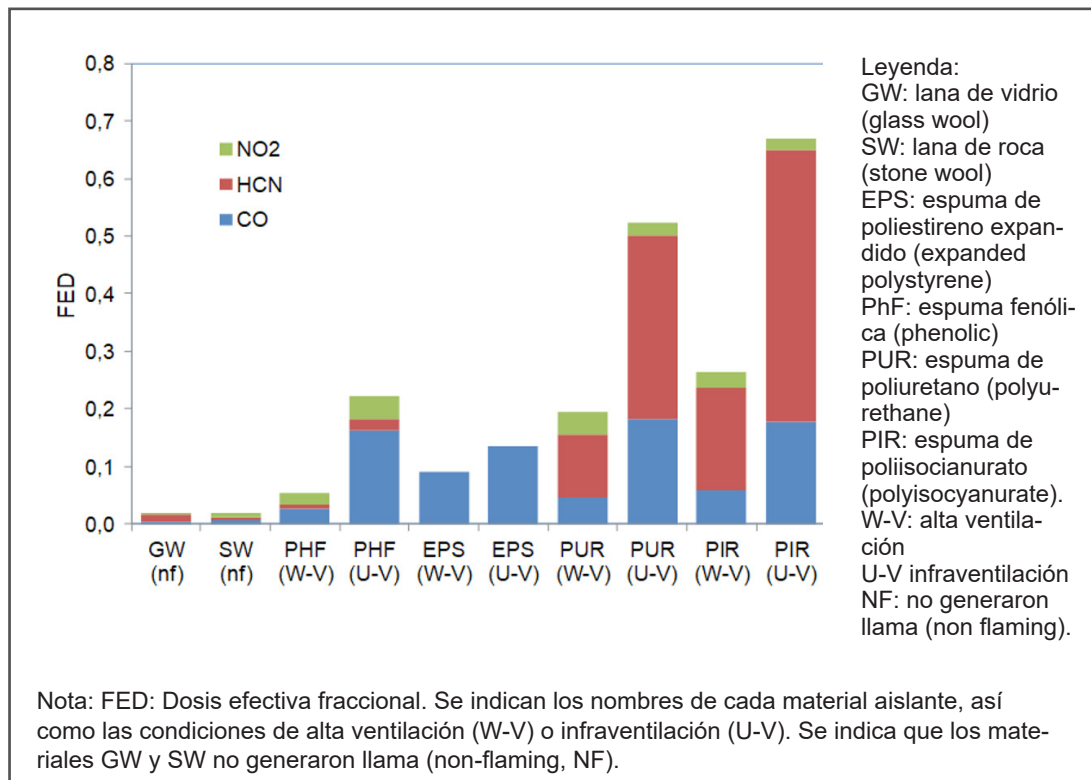


Figura 3.3. Relación de la concentración de los tres gases tóxicos principales respecto a su concentración letal.

Fuente: A. M. Lacasta y L. Haurie a partir de los datos obtenidos por Stec y colaboradores (A. A. Stec et al., 2011).

dad en caso de incendio mediante el diseño de prestaciones y no a través del cumplimiento de los requisitos prescriptivos.

De forma similar, en **Lituania** no se regula la toxicidad de los humos generados en un incendio en las normativas prescriptivas referentes a materiales de

construcción, pero existe una regulación de la toxicidad recogida en los Requisitos Básicos de Seguridad en Caso de Incendio si se utiliza el diseño por prestaciones.

En **Bélgica** existe un control de la producción de gases corrosivos por parte de los cables eléctricos.

TOXICIDAD

En **Alemania** había existido una regulación referente a la toxicidad de los humos de productos como los cables. Sin embargo, se decidió eliminar la evaluación de la toxicidad por la introducción de controles que limitan la producción de humos, a través de la evaluación de la opacidad de los humos generados en un incendio.

Fuera de la Unión Europea, **China** controla la toxicidad de los humos producidos en caso de incendio especialmente para espumas aislantes aplicadas en edificios de pública concurrencia. **Rusia** utiliza el test específico GOST sobre animales para determinar los niveles de CO, CO₂, HCN, NO_x y OI. En **Japón** se utiliza la normativa JIS A 1321:1976 para determinar la toxicidad de los productos de construcción, aunque quedan exentos de esta determinación los productos que tengan una baja liberación de calor en el cono calorimétrico.

España sigue la tendencia europea en la que se controla principalmente la contribución a la propagación del incendio por parte de los materiales de construcción. El Código Técnico de la Edificación en el documento básico de Seguridad en caso de incendio (CTE DB-SI) indica que la reacción al fuego de los materiales se evaluará mediante la clasificación europea que únicamente regula la opacidad de los humos. Por otro lado, el CTE DB-SI indica que se deben instalar sistemas de control y evacuación del humo generado en un incendio para garantizar la evacuación de los ocupantes del edificio. Al igual que en otros países europeos,

existen requisitos relativos a la toxicidad de los humos de los materiales en el caso de cableados para instalación eléctrica, que aparecen en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT).

España sigue la tendencia europea de controlar, principalmente, la contribución a la propagación del incendio por parte de los materiales de construcción.

En otros sectores como el naval y el ferroviario, en los que se considera que la evacuación es muy difícil o imposible, se aplican normativas que cuantifican la toxicidad de los humos de los materiales utilizados. El sector naval utiliza la norma IMO Solas II-2 que exige el análisis de sustancias tóxicas como CO, HCl, HBr, HF, HCN, SO₂ y NO, incapacitando a los materiales que superen unos valores umbrales. En el anexo 1, parte 2, apéndice 2 de dicha norma, se encuentra el "Procedimiento de ensayo de exposición al fuego para la producción de gases tóxicos".

El ensayo específico para conocer la emisión de gases nocivos es el descrito en la norma ISO 19702:2006 *Toxicity testing of fire effluents - Guidance for analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIR gas analysis*. El sector ferroviario se rige por la normativa europea EN 45545-2 Requisitos de prestaciones frente al fuego de materiales y componentes. Se recoge el ensayo de

toxicidad y opacidad de humos según la ISO 5659-2 para determinar diferentes sustancias tóxicas: CO, HCl, HBr, HF, HCN, SO₂ y NO. Se limitan las emisiones de sustancias tóxicas permitidas para los materiales utilizados en la construcción ferroviaria.

3.5. Conclusiones del capítulo

La inhalación de los gases es la causa más frecuente de muerte en caso de incendio. Dependiendo de la composición de los materiales y de las condiciones en las que se desarrolla el incendio, estos gases pueden ser altamente tóxicos, tal como han demostrado numerosos trabajos científicos.

Entre los materiales aislantes térmicos utilizados en fachadas, las espumas orgánicas son las que presentan una mayor peligrosidad, especialmente las que liberan cianuro de hidrógeno, como las espumas de poliuretano (PUR) o de poliisocianurato (PIR).

La inhalación de los gases es la causa más frecuente de muerte en caso de incendio.

A pesar de que es bien sabido que los gases tóxicos suponen un riesgo para la salud a corto y medio plazo, sigue existiendo una falta de regulación en España respecto a la toxicidad de los gases emitidos por los materiales de construcción en caso de incendio. Sí existe normativa, en cambio, en otros sectores como el na-

val o el ferroviario.

Probablemente la normativa debería aplicar diferentes criterios en cuanto a toxicidad en función de las características del edificio. En el caso de edificios de gran altura en los cuales la evacuación puede presentar mayores dificultades y la propagación por fachadas adquirir mayor relevancia, se tendrían que incluir limitaciones a la producción de gases tóxicos.

3.6. Bibliografía y otras referencias

- Alarifi, A. A., Phylaktou, H. N., Andrews, G. E. "What kills people in fire? Heat or Smoke?". The 9th Saudi Student's Conference. Birmingham, Reino Unido, 2016.
- Adeosun, D. Analysis of Fire Performance, Smoke Development and Combustion Gases from Flame Retarded Rigid Polyurethane Foams. (Tesis doctoral). University of Waterloo, 2014.
- Boyle, D., Knapton, S. "Grenfell Tower victims 'poisoned by cyanide' after insulation released highly toxic gas". The Telegraph (22 de junio de 2017). En línea: <http://www.telegraph.co.uk/news/2017/06/22/grenfell-tower-victims-poisoned-cyanide-insulation-released/> [consulta: 15 de marzo de 2018].
- Doroudiani, S., Doroudiani, B., Doroudiani, Z. "Materials that release toxic fumes during fire". Toxicity of Building Materials. 2012, pp. 241-282.
- Fundación MAPFRE, Víctimas de

TOXICIDAD

- incendios en España en 2010 - Víctimas de incendios en España en 2016.
- Giebułtowicz, J. "Analysis of fire deaths in Poland and influence of smoke toxicity". *Forensic science international*, vol. 277, 2012, pp. 77-87.
 - Hall, J. R. "Fatal effects of fire". National Fire Protection Association. Fire Analysis and Research Division, 2011.
 - Herrera-Martínez J., Hernández-García R. I., Berdeja-Martínez B. M. "Toxicidad de acroleína (contaminante ambiental) en tráquea y pulmones de ratas". *Bioquímica*, vol. 31, n.º 3, 2006, pp. 90-96.
 - Hull, T. R., Paul, K. T. "Bench-scale assessment of combustion toxicity - A critical analysis of current protocols". *Fire Safety Journal*, vol. 42, n.º 5, 2007, pp. 340-365.
 - Hull, T. R., Brein, D., Stec, A. A. "Quantification of toxic hazard from fires in buildings". *Journal of Building Engineering*, vol. 8, 2016, pp. 313-318.
 - ISO 13344:2004, Estimation of the Lethal Toxic Potency of Fire Effluents, 2004.
 - Mayol, D. T. NTP 65: Toxicología de compuestos de pirólisis y combustión, 1983.
 - Roberts, B. C., Webber, M. E., Ezekoye, O. A. "Development of a multi-objective optimization tool for selecting thermal insulation materials in sustainable designs". *Energy and Buildings*, vol. 105, 2015, pp. 358-367.
 - Stec, A. A., Hull, T. R. "Assessment of the fire toxicity of building insulation materials". *Energy and Buildings*, vol. 43, n.º 2-3, 2011, pp. 498-506.
 - Stec, A. A. "Fire toxicity-The elephant in the room?". *Fire Safety Journal*, vol. 91, 2017, pp. 79-90.
 - Tuovinen H., Blomqvist P., Saric F. "Modelling of hydrogen cyanide formation in room fires". *Fire Safety Journal*, vol. 39(8), 2004, pp. 737-755.
 - Yates, T. Study to evaluate the need to regulate within the Framework of Regulation (EU 305/2011 on the toxicity of smoke produced by construction products in fires. European Commission, 2017. En línea: <http://ec.europa.eu/docsroom/documents/27346>