

Evaluación del riesgo tóxico en los incendios. Ensayos de toxicidad de los productos volátiles de la combustión



JOSÉ MIGUEL LACOSTA BERNA
Experto Superior en Seguridad.

SUMARIO

La preocupación por la toxicidad de los Productos volátiles de la combustión (Pvc) ha movido a ISO a publicar dos documentos –ISO 9122 e ISO 13344–. El primero comprende una serie de trabajos técnicos detallados, mientras que el segundo es más normativo, siendo más fácil de adaptar a las exigencias legales o reglamentarias al utilizar el soporte técnico del anterior. Ambos documentos ISO tratan sobre la toxicidad de la combustión, principalmente desde un punto de vista de ensayos de laboratorio.

Palabras clave: Incendios, ensayos, toxicidad, productos volátiles de la combustión.

INTRODUCCIÓN

Los exámenes de los forenses sobre las víctimas de los incendios revelan invariablemente, que la causa más común de muerte en los incendios es debida a la inhalación de gases tóxicos.

Los efectos tóxicos de la exposición a los Productos volátiles de la combustión (definidos como el conjunto de productos volátiles, aerosoles, particulados o gaseosos, producidos por una combustión o una pirólisis, que se citarán a partir de aquí como Pvc) fueron, probablemente, observados ya por el hombre prehistórico en sus intentos iniciales de hacer fuego en el interior de las cavernas.

La contribución del monóxido de carbono a la toxicidad de los Pvc ha sido reconocida desde hace más de un siglo, pero hasta 1951 no se publicó una extensa investigación médico-fisiológica, realizada por el Centro Químico del Ejército de los Estados Unidos (1). Estas investigaciones, realizadas con animales, trataban de distinguir, cuantitativamente entre los efectos de la exposición directa a la llama (quemaduras en la piel y en el tracto respiratorio) y los factores tóxicos –incluyendo CO, CO₂, disminución de oxígeno y otros tóxicos–. Los experimentos mostraron que el monóxido de carbono ejercía un efecto fisiológico en una amplia gama de Pvc, así como fuertes evidencias de interacción entre todos los factores, químicos y de estrés térmico, incluyendo el simple estrés por calor.

La rápida expansión de la ciencia en la investigación de polímeros durante los años cincuenta produjo un

aumento sustancial en la información química y toxicología referente al fuego. En los sesenta y setenta las investigaciones dedicadas al estudio de los métodos de ensayos de laboratorio fueron aumentando. Los objetivos empezaban a estar claros: entender la amenaza del fuego y ensayar los materiales.

Dos trabajos de enorme importancia aparecieron prácticamente al mismo tiempo. En 1982, el Comité de la NFPA sobre toxicidad de los productos de la combustión presentó un trabajo sobre el tema (2) cuyo destino fundamental era su Comité de Normalización; y al año siguiente, miembros del Southwest Research Institute (S. Antonio, Texas) publicaron un libro, ya convertido en un clásico (3), que era una versión ampliada de un informe del Comité E-5 de ASTM sobre normas de fuego. Ambos estudios coincidían en la apreciación de que «la toxicidad debería ser una par-

te de la evaluación del riesgo de incendio».

Aunque ya estaban trabajando en el tema (4), a finales de 1982 se alcanzó un acuerdo en ISO sobre la necesidad de intentar la integración de la información sobre combustibilidad y toxicidad (y no emplear sólo la información sobre toxicidad como base para la decisión sobre materiales). En concreto, se encargó la tarea al Comité Técnico 92 de la ISO (ISO/TC 92), creado en 1965 y cuya denominación es *Fire Tests for building materials, components and structures*, y más en particular en su *Subcomité 3, Toxic Hazards in Fire*.

La preocupación por la toxicidad de los Pvc ha llevado a ISO a publicar dos documentos –ISO 9122 (5) e ISO 13344 (6)–. El primero comprende una serie de trabajos técnicos detallados (este documento consta de 6 partes, algunas ya publicadas como norma y otras todavía como proyecto), mientras que el segundo es más normativo, siendo más fácil de adaptar a las exigencias legales o reglamentarias al utilizar el soporte técnico del anterior. Ambos tratan sobre la toxicidad de la combustión, principalmente desde un punto de vista de ensayos de laboratorio, y sobre ambos se centrará este trabajo.

NATURALEZA QUÍMICA DE LOS PVC

Mecanismos de la formación de los productos

Es esencial conocer cómo se forman los productos de la combustión para comprender los aspectos químicos de la toxicología de la combustión en los incendios.

Bajo la acción del calor, los materiales orgánicos, poliméricos y no, se descomponen y desprenden productos volátiles. Si se llega a una concentración suficiente de estos productos y se encienden, puede desarrollarse un fuego capaz de realimentar térmicamente al material y permitir que continúe el proceso de combustión.

La primera etapa en la formación de los Pvc está relacionada con la descomposición térmica de los materiales que, en los incendios, se produce a lo largo de una amplia gama de temperaturas (Fig. 1), en condiciones de oxidación o inertes (pirolíticas). La mayoría de los productos químicos presentes en las atmósferas de los incendios se generan a partir de la descomposición de los materiales y



han escapado a la destrucción por la llama.

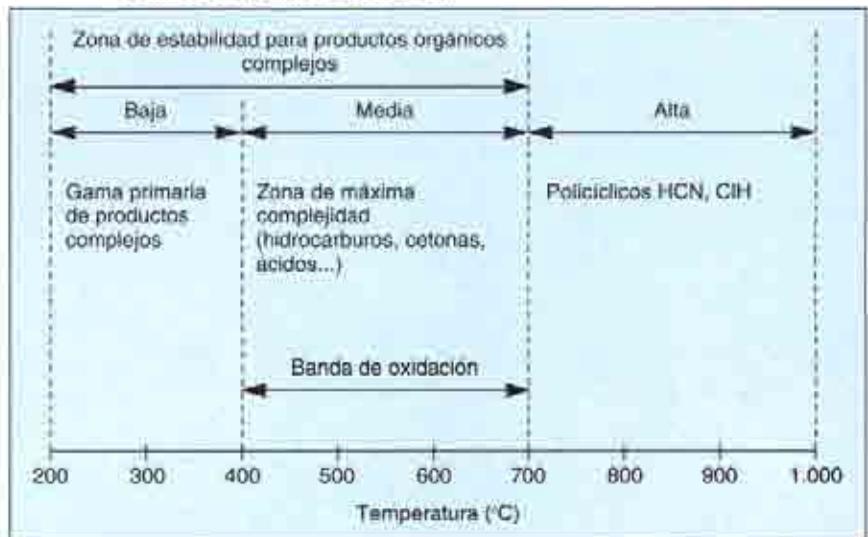
A temperaturas relativamente bajas (alrededor de los 400 °C) un material se descompone, dando un número restringido de productos químicos complejos. Es a temperaturas medias (entre 400 y 700 °C) donde se produce la mayor variedad, y, muy a menudo, la mayor cantidad, que puede incluir hidrocarburos, sustancias oxigenadas (hidrocarburos, cetonas, ácidos, etc.). Esta es asimismo la principal zona en la que los compuestos orgánicos, que son muy sensibles al oxígeno, pueden formar sustancias oxigenadas por incorporación del oxígeno atmosférico.

A altas temperaturas (por encima de los 700 °C) los compuestos orgánicos y organometálicos, que no son estables durante los tiempos de contacto que normalmente se alcanzan, pueden descomponerse. También están presentes hidrocarburos policíclicos complejos y otros productos esta-

TABLA 1. Relación de sustancias químicas encontradas en ensayos a gran escala realizados con madera y poliestireno expandido. (Tomado de: Ref. 10.)

Madera	Poliestireno expandido.
Metano	Metano
Acetileno	Acetileno
Etileno	Etileno
Etano	Etano
Aleno	Propeno
Propeno	Propino
Ciclopropano	Metanol
Propino	Acetaldehído
Metanol	Buteno
Acetaldehído	Butadieno
Buteno	Etanol
Butadieno	Acroleína
Etanol	Acetona
Acroleína	Ciclopentadieno
Acetona	Hexeno
Ciclopentadieno	Benceno
Crotonaldehído	Ciclohexadieno
Hexeno/ciclohexano	Hepteno
Benceno	Tolueno
Ciclohexadieno	Octeno
Hepteno	Octadieno
Heptino	Xileno
Heptadieno	Estireno
Tolueno	Noneno
Octeno	Benzaldehído
Xileno	Metilestireno
Estireno	Indeno
Noneno	Etilestireno
Benzaldehído	Metilindeno
Metilestireno	Naftaleno
Deceno	Metilnaftaleno
Indeno	Acenafteno
Etilestireno	Acenaftileno
Metilindeno	
Naftaleno	

FIGURA 1. Zonas de temperaturas importantes durante la descomposición de los polímeros. (Tomado de: Ref. 7.)



bles de bajo peso molecular, tales como ácido cianhídrico y algunos nitrilos orgánicos. En contraste, la combustión con llamas tiende a deshacerlos, formándose una pequeña gama de productos elementales de la combustión.

Además de CO, CO₂ y H₂O, una amplia variedad de productos forman parte de los Pvc (Tabla 1).

Caracterización de las atmósferas de los incendios

En los últimos años se han hecho grandes avances en el análisis de los Pvc, reconociéndose que su naturaleza depende particularmente del tipo del material, de las temperaturas alcanzadas y de las condiciones de ventilación. Cierta número de factores son importantes para definir las atmósferas existentes en los incendios, tanto para consideraciones toxicológicas como para hacer comparaciones

entre trabajos de laboratorio y ensayos de fuego a gran escala.

Estos factores incluyen:

a) La producción de óxidos de carbono (así como la relación CO₂/CO) y la reducción del oxígeno como una medida de las condiciones básicas de combustión.

b) La concentración de gases tóxicos específicos adicionales (respecto al monóxido de carbono), que pueden ser importantes cuando arden materiales específicos (por ejemplo, ácido cianhídrico, ácido clorhídrico).

c) Tipos y concentración de productos orgánicos «no quemados» (huella dactilar química), que incluyen:

1. Concentración total de monóxido de carbono.

2. Distribución de los porcentajes de grupos importantes: por ejemplo, hidrocarburos aromáticos y alifáticos, especies oxigenadas, nitrogenadas, haluros, etc. (Tabla 2).

TABLA 2. Grupos químicos producidos en cada una de las etapas de fuego durante la descomposición térmica de 40 kg de cada uno de los materiales citados. (Tomado de: Ref. 5.)

Material	Madera			Polipropileno			
	Composición	Crecimiento	Zona estable	Descenso	Crecimiento	Zona estable	Descenso
% sustancias orgánicas oxigenadas							
% hidrocarburos no saturados							
% hidrocarburos saturados							
% hidrocarburos aromáticos							



d) Cantidades totales generadas de los productos mayores con significación toxicológica.

Otros aspectos importantes relacionados con los Pvc incluyen:

- El oscurecimiento (generalmente densidad óptica por metro), velocidad de producción y cantidad total de humo producido.

- La temperatura de los productos y la radiación desde esos productos.

da del fuego, así como en base a las temperaturas esperadas (o irradiación), como se resume en la Tabla 3.

PRINCIPIOS BÁSICOS PARA DETERMINAR LA TOXICIDAD AGUDA POR INHALACIÓN

Naturaleza de los efectos tóxicos

Las evaluaciones de toxicidad se realizan para obtener datos que per-

mitan predecir las consecuencias de la exposición de las personas a los Pvc. Los datos que existen, referentes al efecto de las atmósferas conteniendo Pvc, se han obtenido a través de muchas víctimas de incendios, especialmente en exámenes *post-mortem*.

Generalmente se han encontrado altos niveles de carboxihemoglobina, lo que indica exposición a CO, y en algunos casos se ha citado exposi-

Clasificación de los incendios

Recientes investigaciones han mostrado que, a pesar de la enorme complejidad de los Pvc, la concentración de oxígeno y las relativas de dióxido y monóxido de carbono (relación CO₂/CO) proporcionan un medio sencillo de caracterización. Su fundamento se basa en que la conversión relativa del oxígeno a monóxido y dióxido de carbono depende fundamentalmente de la concentración de oxígeno; así, una alta concentración favorece la combustión completa de CO₂, y a la inversa, una restricción de oxígeno producirá CO.

Diferentes tipos de incendios pueden clasificarse, combinando la relación CO₂/CO con la concentración de oxígeno y con la «severidad» espera-

TABLA 3. Clasificación general de los incendios. (Tomado de: Ref. 5.)

Etapas o fases del incendio	Oxígeno (%) (1)	Relación CO ₂ /CO (2)	Temperatura (°C)	Radiación (kW/m ²) (3)
1. <i>Descomposición</i>				
a) Fuego latente (automantenimiento)	21	N. A.	< 100	N. A.
b) Sin llama (oxidativo)	5-21	N. A.	< 500	< 25
c) Sin llama (pirólic)	< 5	N. A.	< 1.000	N. A.
2. <i>Incendio en desarrollo (con llama)</i>	10-15	100-200	400-600	20-40
3. <i>Incendio completamente desarrollado (con llama)</i>				
a) Relativamente poca ventilación	1-5	< 10	800-900	40-70
b) Relativamente gran ventilación	5-10	< 100	600-1.200	50-150

(1) Condiciones generales ambientales (promedio) en el interior del compartimento.

(2) Valor medio en la pluma de fuego (cerca del fuego).

(3) Radiación incidente (promedio) sobre la muestra.

ción al HCN. Ambas sustancias son conocidas como causantes de una paralización progresiva del sistema nervioso central, que conduce a la inconsciencia y a la muerte. Este tipo de efecto tóxico ha sido denominado como **narcosis** y se considera muy importante en la respuesta de las personas a los Pvc.

Hay muchos informes sobre Pvc que han sido descritos como irritantes y que producen tos, asfixia e incapacidad para ver. Se ha citado la neumonía química, tanto en supervivientes de incendios como en víctimas. La irritación, tanto sensorial como pulmonar, ha sido considerada como uno de los factores mayores en la respuesta de las personas a los Pvc. Pocos informes ha habido, si es que ha existido alguno, sobre incendios con víctimas debidas a otros efectos toxicológicamente significativos, aparte de los de narcosis e irritación.

Importancia de los valores obtenidos con animales sobre las personas

Los datos disponibles referentes a los efectos sobre las personas deben considerarse teniendo en cuenta los estudios de sustancias similares sobre animales. Los efectos encontrados en animales experimentales han sido muy parecidos a los encontrados en las personas. La muerte se ha atribuido a la presencia de gases narcóticos, tales como CO y HCN. Los irritantes también han señalado su presencia, habiéndose detectado mediante observaciones clínicas de salivación, descarga nasal, lacrimación y medida de la relación de respiración. El daño pulmonar ha sido confirmado también por exámenes histopatológicos de los pulmones de los animales expuestos a altas concentraciones de irritantes corrosivos.

En general, los agentes químicos de acción directa parecen tener el mismo espectro de actividad sobre todas las especies, incluyendo a las personas. Las revisiones efectuadas para comparar la acción de una lista extensa de las sustancias químicas presentes en los Pvc, han encontrado en muchos casos grandes semejanzas entre los efectos agudos en las personas y en los animales de laboratorio.

Sin embargo, hay diferencias fisiológicas entre los pequeños roedores (los animales más empleados) y las personas, que son de especial importancia en la toxicología de la combustión. Una de ellas es la diferencia en el volumen respiratorio en un minuto

Los dos trabajos principales que de alguna manera supusieron el arranque «científico» de los trabajos de valoración toxicológica aparecieron prácticamente al mismo tiempo (1982-83) y coincidían en la apreciación de que «la toxicidad debería ser una parte de la evaluación del riesgo de incendio».

(RVM) relacionado con el peso del cuerpo, que es mucho mayor para los roedores. Fenómeno que ha sido empleado, desde hace muchos años, con ventaja en las personas, empleando roedores y pájaros para detectar la presencia de gases narcóticos en minas y otros lugares cerrados.

Otra diferencia importante es que los roedores de laboratorio respiran por la nariz, mientras que las personas pueden elegir entre respirar por la nariz o por la boca.

A pesar de estas diferencias, se ha observado hasta la fecha una razonablemente buena correlación cuantitativa entre los efectos de los Pvc sobre los humanos y sobre los animales de laboratorio.

Recientes investigaciones han demostrado que, a pesar de la enorme complejidad de los Pvc, la concentración de oxígeno y las relativas de dióxido y monóxido de carbono (relación CO₂/CO) proporcionan un medio sencillo de caracterización, ya que la conversión relativa del oxígeno a monóxido y dióxido de carbono depende, sobre todo, de la concentración del primero.

Toxicología de inhalación «clásica» frente a toxicología de la combustión

Se han realizado muchos estudios sobre toxicología de inhalación aguda como parte de la caracterización de una sustancia química, con el fin de tomar decisiones sobre su empleo, transporte y niveles de exposición seguros. Su objetivo es la protección de usuarios, vendedores y fabricantes de sustancias químicas. En consecuencia, las características de los ensayos se han ajustado para evaluar el «caso más desfavorable», empleándose frecuentemente exposiciones de una y de ocho horas. El nivel de efectos negativos tolerado es muy bajo, de modo que la simple supervivencia de una concentración no se considerará adecuada si existen otras consecuencias, aunque no sean fatales. La gama de efectos tóxicos que se espera se produzcan es muy amplia, y los protocolos de ensayo empleados se diseñan para reflejarlos.

En contraste, la toxicología de la combustión tiene como finalidad modelar una situación de «emergencia». Por consiguiente, los tiempos de exposición empleados son generalmente muy reducidos, siendo típicos los de cinco a treinta minutos. La supervivencia es el factor elemental más importante y se ha puesto más énfasis sobre la incapacitación, la toxicidad severa o la muerte que sobre cambios en el peso corporal, por ejemplo, que sería más significativo en un estudio convencional. Conforme ha aumentado el conocimiento de la toxicología de la combustión, la gama de efectos tóxicos considerados como importantes se ha reducido a narcóticos e irritantes.

Determinación de los aspectos cuantitativos de la toxicidad

Los aspectos cuantitativos de un tóxico se estudian variando su dosis y relacionándola con los efectos encontrados. Para cada nivel de dosis los efectos se registran mediante variables discretas o continuas. Los dos valores habitualmente más empleados son la ED₅₀ (Effective Dose 50, dosis efectiva que produce una respuesta del 50 por 100 o una respuesta en el 50 por 100 de los animales) y el nivel sin efecto (No Effect Level, la dosis más alta que no produce un efecto particular). Tanto en toxicología de inhalación como de combustión, el valor del tipo EC₅₀ que se emplea más a menudo es el LC₅₀(t) (Lethal Concentration 50, concentración a

la que los animales han sido expuestos durante un tiempo t y calculada para producir la incapacidad del 50 por 100 de los animales). Estos valores se han obtenido a partir de experimentos en los que se han producido respuestas tanto de más como de menos del 50 por 100.

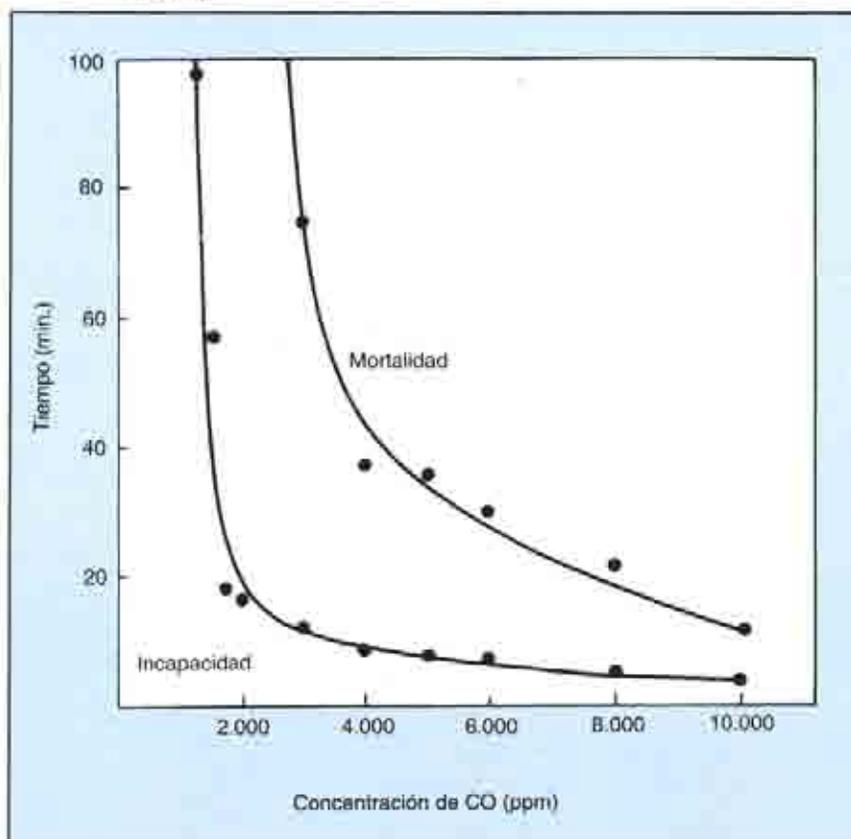
Relación entre concentración, tiempo y respuesta

La magnitud o severidad de muchos efectos biológicos aumenta cuando aumentan las dosis del agente causal, siendo, generalmente, el aumento del efecto proporcional a la dosis. En toxicología de inhalación, la **dosis** es una función de muchos factores, dos de los cuales son la concentración del tóxico en la atmósfera y la duración de la exposición. Multiplicar la concentración de la atmósfera por el tiempo de exposición permite hacer una estimación aproximada de la dosis inhalada (pero no necesariamente retenida) por un animal, asumiendo que la ventilación es constante.

Muchos estudios sobre toxicología de inhalación emplean un tiempo determinado de exposición y estudian la relación dosis-respuesta, variando las concentraciones de la atmósfera de ensayo. La magnitud de la respuesta se registra gráficamente en función de la concentración y se pue-

La toxicología de inhalación emplea tiempos de exposición (de una a ocho horas) más largos que los de la toxicología de combustión (de cinco a treinta minutos), ya que ésta tiene como finalidad analizar situaciones de «emergencia», en las que el factor más importante es el de la supervivencia.

FIGURA 2. Curva concentración-tiempo para CO (animal de ensayo: ratas). La dosis de exposición necesaria para producir la incapacidad, por ejemplo, puede obtenerse multiplicando los valores de cualquier par de coordenadas; 2.000 ppm \times 20 min. = 40.000 ppm-min. (Tomado de: Ref. 12.)



den determinar parámetros como la pendiente de la curva o la EC_{50} . Alternativamente, se puede fijar la concentración en la atmósfera y variar el tiempo de exposición, obteniéndose en este caso los valores ET_{50} (Effective Time 50, el tiempo de exposición para producir el 50 por 100 de las respuestas) (Fig. 2).

Para tiempos mayores, la variación de la respuesta es más sensible a los cambios en las concentraciones de la atmósfera, mientras que para períodos de tiempo cortos la respuesta es relativamente insensible a tales cambios. Diferentes tóxicos tendrán diferentes curvas concentración-tiempo (Fig. 3), que se emplearán para caracterizar el comportamiento del material. Esto es muy importante en toxicología de la combustión, ya que muchos sistemas de seguridad contra incendios emplean el tiempo disponible para escapar como criterio de diseño.

EL MODELO DE FUEGO

El primer aspecto «técnico» para la valoración de la toxicidad se refiere a

los «modelos de fuego», es decir, al conjunto de aparatos y equipo de laboratorio necesario para descomponer térmicamente al material cuya toxicidad se estudia.

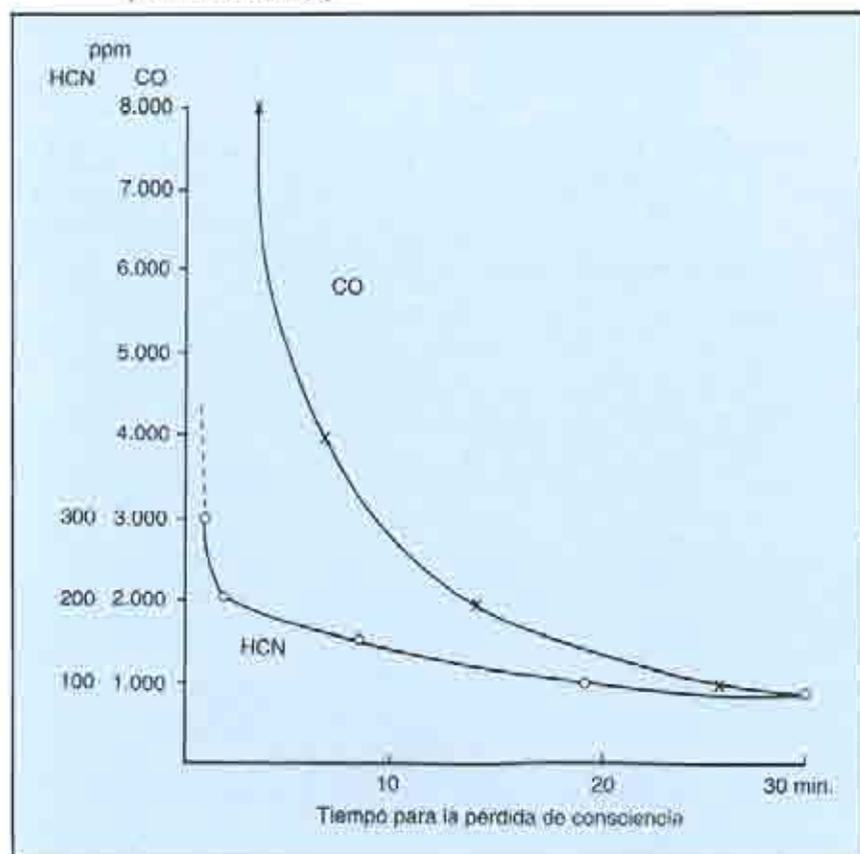
Veamos cuáles son los criterios para que un modelo de fuego sea aceptable, lo que debe incluir la capacidad de generar condiciones características de las etapas conocidas de los incendios.

Caracterización de las etapas del incendio

Para una discusión sobre modelos de fuego y su empleo apropiado se acepta, generalmente, que los valores contenidos en la Tabla 3 se correspondan con las características de determinadas etapas o fases del incendio.

El proceso químico primario que conduce a la formación de los Pvc es la descomposición térmica de los materiales, que rompen sus enlaces y, en presencia de oxígeno, se recombinan en especies oxigenadas. Así, los compuestos con carbono son piroliza-

FIGURA 3. Comparación entre los tiempos para la incapacidad y las concentraciones para exposición de primates a CO y HCN. Para el CO, la concentración y el tiempo son equivalentes, para el HCN un pequeño aumento de la concentración produce un gran aumento en el tiempo. (Tomado de: Ref. 9.)



dos en fragmentos de hidrocarburos volátiles que pueden formar diferentes sustancias (CO o CO_2), dependiendo de las condiciones, tanto térmicas como de oxidación. Ambas sustancias están generalmente presentes en los Pvc, y su relación se utiliza muy a menudo como un indicador característico del tipo particular, o de la etapa, de un incendio.

En los fuegos pequeños, en desarrollo, una relación CO_2/CO de 100 o más indica una combustión (con combustible controlado) con ventilación sin limitación. En fuegos grandes, completamente desarrollados, que tienen generalmente la ventilación controlada, cuando se producen en edificios, una relación de 10 o menos indicaría una relativamente baja ventilación; mientras que una relación de más de 10 indicaría lo contrario.

El hidrógeno es oxidado a agua, el cloro es generalmente desprendido como cloruro de hidrógeno y el nitrógeno aparece como compuestos orgánicos nitrogenados (especialmente nitrilos), cianuro de hidrógeno, óxidos de nitrógeno y nitrógeno molecular, dependiendo nuevamente de las condiciones térmicas y de oxidación. To-

dos los incendios con llama o sin ella (incluyendo los fuegos latentes) pueden generar una legión de sustancias debido a la descomposición incompleta y a la sólo parcial oxidación de los materiales combustibles afectados; sin embargo, los fuegos sin llama son los que producen mayor cantidad de tales sustancias. Es importante recordar que todas esas reacciones químicas están sometidas a los principios usuales de la termodinámica y de la cinética. Por consiguiente, la estequiometría y la energía térmica juegan papeles significativos en la definición de los Pvc que se forman a lo largo de toda la gama en que pueden clasificarse los incendios.

Criterios para evaluar los modelos de fuego

a) Importancia de los incendios reales

La selección de un modelo de fuego, apropiado para ensayos de toxicidad de los Pvc, debe realizarse considerando cuidadosamente los datos que relacionan las condiciones de

combustión de laboratorio con los tipos y etapas de los incendios reales.

Todos los modelos de fuego que se indican en la Tabla 4 son capaces de reproducir las características de la descomposición sin llamas. Sin embargo, se reconoce que la mayoría de las víctimas y muertes en incendios son consecuencia de los incendios con llamas. Éstos incluyen tanto fuegos pequeños (a menudo muy restringidos a los materiales que arden primero), donde las pérdidas se producen en la habitación de origen, y también los grandes incendios completamente desarrollados, en los que las víctimas se producen lejos del recinto de origen.

En términos de una correlación con muchas víctimas de incendios, los criterios más importantes para un modelo de fuego apropiado implican las condiciones de fuego desarrollado con baja o alta ventilación. Particularmente importante son las consideraciones que implican ventilación (disponibilidad de oxígeno), relaciones CO_2/CO , temperatura y/o flujo de calor y tiempos de permanencia de los Pvc en la zona de altas temperaturas.

b) Contenido en oxígeno

La concentración en oxígeno es la concentración residual en los Pvc primarios antes de cualquier dilución.

El análisis de los gases y vapores de los Pvc representa un campo de estudio muy especializado, debido a la complejidad y reactividad de las mezclas de gases y de la posibilidad de un rápido cambio en la concentración en función del tiempo.

TABLA 4. Resumen de los principales métodos de laboratorio empleados para evaluar la toxicidad de los Pvc. (Tomado de: Ref. 5.)

Método	Dispositivo de combustión	Temperat. del horno	Movimiento del aire	Cantidad de material	Número de animales por ensayo	Modo de exposición	Duración de la exposición	Medidas de la toxicidad (1)	Análisis químicos
DIN	Horno de tubo anular móvil	Fija 200 a 800 °C	Dinámico	Fija, el mismo volumen o peso	Ratas, por lo menos 5 en general 20	Sólo cabeza o cuerpo entero	30 min.	LC ₅₀ (30 min. + 14 días) y otros	CO, CO ₂ , O ₂ , gases seleccionados COHb
CAMI	Horno de tubo	Fija 625 °C	Estático, con recirculación	Fija, 0.75 g (2)	Ratas, 3 por lo menos 3 ensayos	Cuerpo entero	30 min.	t y b	CO, CO ₂ , O ₂ , HCN gases seleccionados
NBS	Horno de crisol	Fijo, 25 °C inferior a la temperatura de autoignición	Estático	Variable, 8 g como máximo	Ratas, 6	Sólo cabeza	30 min. (3)	LC ₅₀ (30 min. + 14 días)	CO, CO ₂ , O ₂ , COHb
US-Rad	Horno radiante	Fijo, flujo de calor superior a 5 W/cm ²	Estático	Variable, superficie	Ratas, 6	Sólo cabeza	30 min.	LC: valores que definen la mayor categoría de potencia tóxica	CO, CO ₂ , O ₂
U-PITT	Horno de tubo	Programado a 600 °C, por encima del 0,2% de la temperatura de pérdida de peso	Dinámico	Variable	Ratones, 4	Sólo cabeza	30 min. a partir de una pérdida de peso del 0,2% (4)	RD ₅₀ (5), LC ₅₀ (30 min. + 10 min.), S1, valor de asfixia, histopatología, IT ₅₀	CO, CO ₂ , O ₂ , HCN gases seleccionados
USF	Horno de tubo	Fijo o programado, de 200 a 800 °C	Estático o dinámico	Normalmente fija, 1 g variable para obtener el LC ₅₀	Ratones, 4 por lo menos 2 ensayos	Cuerpo entero	30 min.	t y b	CO, CO ₂ , O ₂ , gases seleccionados
JGBR (6)	Horno de calor radiante	Programado a 600 °C desde la temperatura ambiente	Dinámico	Superficie fija de 324 cm ²	Ratones, 8	Cuerpo entero	15 min.	t	CO, CO ₂ , O ₂ , HCN, HCl, gases seleccionados

(1) LC₅₀ se refiere a una evaluación de la toxicidad aguda, incluyendo la determinación de la naturaleza de la toxicidad y valorando la LC₅₀ como un índice de la potencia tóxica.

(2) Método CAMI modificado para calentamiento programado o fijo, para combustión con o sin llama y para determinar la LC₅₀.

(3) Opcionalmente exposición de 10 min. para 30 mg/l de LC₅₀ > 2 mg/l para determinar rápidamente si el material desprende productos tóxicos.

(4) Excepto para la determinación de la irritación sensorial.

(5) RD = Respiratory Depression.

(6) Están desarrollándose modificaciones significativas, en especial en el sistema de combustión.

Su valor disminuye durante el desarrollo del incendio desde un nivel de ambiente normal, alrededor del 2 por 100, hasta un 10-15 por 100 en un incendio pequeño o en desarrollo, y más tarde se reduce a 1-10 por 100 en un incendio completamente desarrollado, dependiendo de la ventilación, velocidad de combustión y la geometría del recinto.

c) Relación CO₂/CO

La relación CO₂/CO se calcula a partir de las concentraciones de esos

gases en las atmósferas de los Pvc. Esta relación experimenta rápidos cambios durante el desarrollo de un incendio. Inicialmente, en pequeños fuegos y en condiciones de buena ventilación es alta habitualmente (100-200). En fuegos completamente desarrollados con ventilación controlada alcanza un valor casi constante (1-10), dependiendo de la ventilación. En la figura 4 se muestran valores de esa relación en fuegos reales.

d) Temperatura y flujo de calor

La temperatura es el valor medio dentro del recinto y nos da una medi-

da de la exposición térmica a la que están sometidos los materiales presentes y, por consiguiente, de los productos de su descomposición térmica. El flujo de calor radiante se emplea también como medida de la exposición a la energía térmica. En fuegos pequeños o de desarrollo temprano, la temperatura en el ambiente está típicamente en unos valores de 400-600 °C, con un flujo radiante entre 20-40 kW/m². En fuegos completamente desarrollados, la gama de temperaturas oscila entre 600 y 1.200 °C, con flujos radiantes entre 50 y 150 kW/m².

Estos factores tienen una conside-

table influencia sobre la composición de los Pvc. Son hechos importantes, desde el punto de vista de la toxicidad, que incendios pequeños o de desarrollo temprano producen generalmente una baja emisión relativa de CO y HCN, junto con una mezcla compleja de productos de pirólisis y de oxidación que han escapado de la zona de llama. En fuegos completamente desarrollados, debido a las altas temperaturas y a las condiciones viciadas de oxígeno, se producen grandes cantidades de sustancias tóxicas con bajo peso molecular, tales como CO y HCN.

e) *Validez de la evaluación de los riesgos tóxicos*

Demostrar la validez de un modelo de fuego que reproduzca el riesgo tóxico correspondiente a un incendio real es un objetivo ideal que puede ser abordado, pero no necesariamente alcanzado. Son escasos los estudios realizados empleando fuegos a escala real para evaluar la contribución de algunos materiales de construcción a los riesgos tóxicos. Incluso en este caso debe tenerse un cuidado considerable al generalizar las conclusiones de tales estudios, ya que materiales idénticos en las mismas situaciones pueden sufrir diferentes tipos de fuegos.

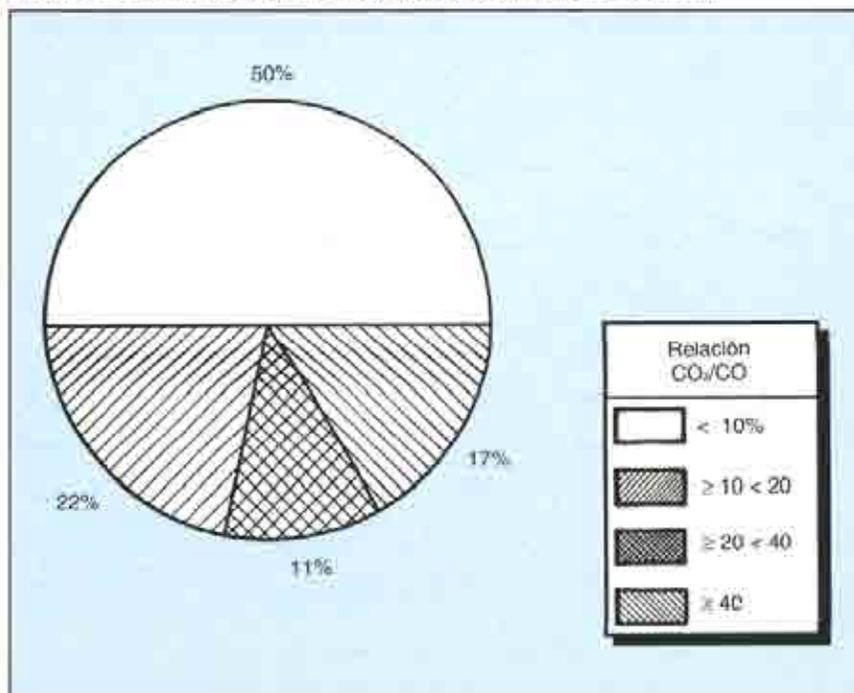
Debido a que el CO es el mayor tóxico en incendios, muchos de los ensayos a pequeña escala que se han considerado como válidos se refieren tradicionalmente a las medidas de CO, expresadas directamente como CO o como relación CO₂/CO. Estudios experimentales indican que su producción es independiente de la concentración de oxígeno hasta que la relación oxígeno/combustible cae hasta alrededor del 50 por 100, más del necesario para una combustión completa o estequiométrica. A partir de ahí, la producción de CO aumenta bruscamente cuando disminuye el oxígeno.

Además de las diferencias en el calentamiento de la probeta, el CO producido en ensayos a escala de laboratorio puede diferir del producido en ensayos a gran escala debido a los siguientes factores:

- Relación aire/combustible. Si esta relación no es igual en las dos escalas, la producción de CO será diferente.

- Efectos del tiempo de permanencia. El tiempo disponible para quemar el CO a CO₂ sería a menudo mucho mayor en los de gran escala que en los de laboratorio.

FIGURA 4. Relación CO₂/CO en incendios reales. (Tomado de: Ref. 5.)



El efecto neto de los hechos mencionados es que los ensayos a escala de laboratorio tienen a menudo tendencia a producir cantidades mucho más bajas de CO que las observadas en ensayos a escala real.

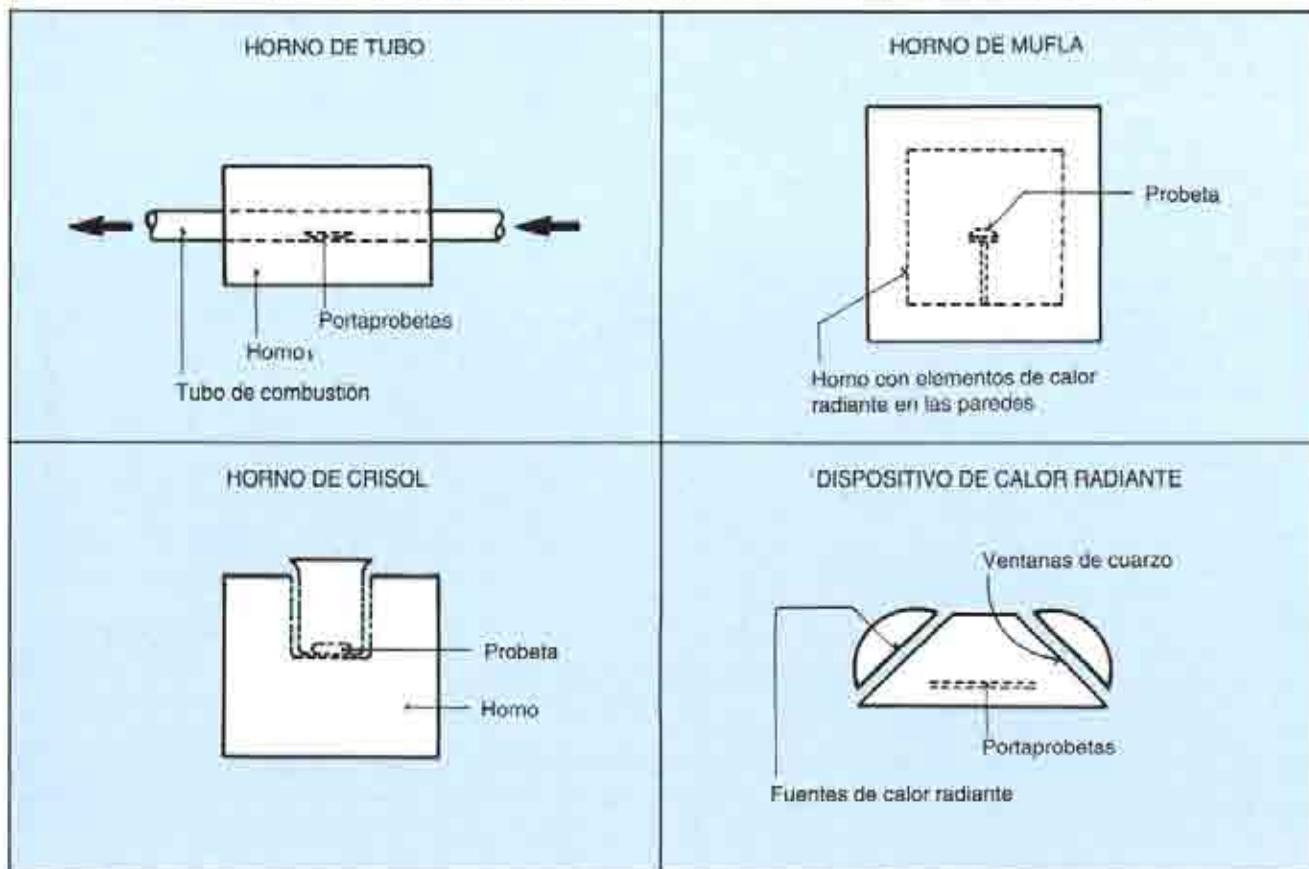
f) *Composición y configuración de la probeta*

Los modelos a escala de laboratorio requieren el empleo de probetas

relativamente pequeñas. Cuando se selecciona el modelo de fuego debe tenerse en cuenta el tamaño, la orientación y la forma del portaprobetas y de la cámara de combustión (Fig. 5). El modelo tiene que permitir el ensayo de probetas de manera que sean representativas con su uso final. Probetas de materiales compuestos o materiales multicapas, por ejemplo, se ensayarán con las modificaciones menores de la configuración y presentación con que se utilicen.



FIGURA 5. Modelos de fuego. Diferentes formas de hornos para la descomposición de los materiales a ensayar.



Selección de un modelo de incendio

Un modelo es, por definición, un sustituto. La precisión de cualquier modelo viene dada por lo próximo que esté en la realidad que intenta sustituir. El uso correcto de un modelo depende de lo bien que el usuario conozca y tenga en cuenta las limitaciones de exactitud del modelo; de manera que la selección de un modelo válido se convierte inicialmente en un trabajo de evaluación sobre las limitaciones del mismo relativas a la precisión, seguido de un uso adecuado que no infrinja esas limitaciones.

Ha habido un largo debate sobre la adecuación y validez de los modelos de fuego. Participantes en este debate han expresado variados niveles de disconformidad sobre el grado con el que los modelos se desvían de la realidad de incendios a gran escala (factor de exactitud) o con las posibilidades de que el modelo pudiera, por medio de un uso incorrecto, conducir a decisiones inapropiadas referentes al riesgo de los productos si estuvieran afectados por un incendio real (factor de uso correcto).

No hay modelo de fuego que copie o simule todas las características del

incendio. Por consiguiente, no hay acuerdo en que cualquiera de los modelos actualmente disponibles sea superior a los otros, de manera que la selección del modelo de fuego apropiado debe hacerse combinando la gama de aplicaciones de los modelos en sus límites reconocidos para representar las etapas del fuego y las

condiciones de interés. En el análisis final, la elección de un modelo de fuego deberá ser concordante con un buen conocimiento de las características del incendio real que va a ser simulado.

MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE GASES Y VAPORES

El análisis de los gases y vapores de los PVC representa un campo de estudio muy especializado debido a la complejidad y reactividad de las mezclas de gases y de la posibilidad de un cambio rápido en la concentración en función del tiempo. Esto ha conducido al desarrollo de nuevos métodos, o a adaptar las existentes, para poder analizar los gases presentes en la combustión de acuerdo con sus propias exigencias.

a) Elementos buscados

Inicialmente ISO ha estudiado nueve gases: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂), ácido cianhídrico (HCN), ácido clorhídrico (HCl), ácido bromhídrico (HBr), ácido fluorhídrico (HF),

En general, los agentes químicos de acción directa parecen tener el mismo espectro de actividad sobre todas las especies, incluyendo a las personas. En este sentido se han encontrado en muchos casos grandes semejanzas entre los efectos agudos en las personas y en los animales de laboratorio.

óxidos de nitrógeno (NOx) y acroleína (CH₂CHCHO), si bien hay una segunda lista de sustancias en las que la experiencia no permite todavía normalizar los ensayos.

b) Unidades

Las unidades de la concentración de gases se darán en volumen/volumen (es decir, en tanto por ciento o en ppm) mejor que en peso/volumen (es decir, en mg/m³).

Monóxido de carbono (CO)

Concentración de análisis: entre 50 ppm y 10 por 100 en aire o en atmósfera empobrecida de oxígeno.

Métodos propuestos:

- De referencia: cromatografía de gas con detector de conductividad térmica.
- Alternativo: análisis IR no dispersivo.
- Para bajas concentraciones de CO: reducción de metano por cromatografía de gas con detector de ionización de llama de hidrógeno.

Normas de consulta:

- ASTM D 3416. *Standard test method for total hydrocarbons, methane and carbon monoxide in the atmosphere (Gas chromatographic method).*
- ASTM D 3162. *Standard test method for Carbon Monoxide in the atmosphere (continuous measurements by non dispersive Infra Red Spectrometry).*

Dióxido de carbono (CO₂)

Concentración de análisis: entre 5 ppm y 40 por 100 en aire o en atmósfera empobrecida en oxígeno.

Métodos propuestos:

- De referencia: cromatografía de gas (método del baño).
- Alternativo: análisis IR no dispersivo en continuo.

Oxígeno O₂

Concentración de análisis: entre 0,1 y 21 por 100.

Métodos propuestos:

- De referencia: cromatografía de gas (método isotérmico).
- Alternativo: técnica paramagnética (en continuo).

Normas de consulta:

La severidad de algunos efectos biológicos aumenta cuando lo hacen las dosis del agente causal, siendo generalmente el aumento del efecto proporcional a la dosis. En toxicología de inhalación, la dosis es una función de muchos factores, dos de los cuales son la concentración del tóxico en la atmósfera y la duración de la exposición.

- NF X 20-377. *Method of analysis of oxygen based on the paramagnetic properties of this gas.*

Ácido cianhídrico (HCN)

Análisis del ión cianuro (CN⁻) en solución. Concentración de análisis: entre 5 y 400 ppm.

Métodos propuestos:

- De referencia: cromatografía iónica de alta resolución (HPIC).
- Alternativo: cromatografía de gas, electrodo de ión selectivo, análisis colorimétrico.

Ácidos clorhídrico (HCl) y bromhídrico (HBr)

Recogidos en un medio adecuado, por ejemplo, agua.

Métodos propuestos:

- De referencia: titulación potenciométrica con nitrato de plata.
- Alternativo: cromatografía de ión.

Con bajas concentraciones de haluros hay posibilidad de falsas señales con sulfuros y cianuros.

Ácido fluorhídrico (HF)

Absorbida en solución acuosa.

Métodos propuestos:

- De referencia: electrodo de ión selectivo.
- Alternativo: cromatografía de ión.

Óxidos de nitrógeno (NOx)

Se determinan NO y NO₂.

Concentración de análisis: entre 0,01 y 1.000 ppm en aire o en atmósfera empobrecida de oxígeno.

Métodos propuestos:

- De referencia: quimiluminiscencia.
- Alternativo: método colorimétrico químico.

Acroleína

La acroleína es recogida en una solución con 1 por 100 de bisulfito sódico (NaHSO₃).

Métodos propuestos:

- De referencia: técnica colorimétrica.
- Alternativo: cromatografía de líquidos (HPLC).

Otros gases de interés

Nitrógeno (N₂), dióxido de azufre (SO₂), sulfuro de carbonilo (COS), amoníaco (NH₃), isocianatos, nitrilos, organofosforados, estireno, aldehídos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), compuestos de arsénico y antimonio, hidrocarburos totales, partículas sólidas.

PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS TÓXICOS

Conceptos generales

La culminación de los trabajos de evaluación de la toxicidad de los Pvc consiste en encontrar la forma de expresar la relación entre la concentración encontrada de una sustancia tóxica y una concentración conocida de esa misma sustancia que produce un efecto tóxico particular en un tiempo dado de exposición.

Una de las lagunas importantes que se presentaron durante los es-



fuerzas iniciales de desarrollo fue la falta de un concepto claro de «dosis de un tóxico», junto con la apreciación de su utilidad como una herramienta para establecer modelos. Otras carencias fueron las de una buena base de datos apropiados para cortas exposiciones a concentraciones relativamente altas de tóxicos. Además, el conocimiento de los modelos de descomposición de laboratorio en los que pudieran basarse los modelos toxicológicos era insuficiente.

La cuantificación de la «dosis» ha sido fundamental para el desarrollo de métodos basados en modelos sobre los efectos tóxicos por inhalación de los gases de incendios. Las respuestas fisiológicas están generalmente «relacionadas con una dosis», es decir, la magnitud del efecto aumenta cuando las cantidades o la acción acumulada sobre el cuerpo de un agente fisiológicamente activo también aumentan. Como la dosis de tóxico que se inhala de los Pvc no puede ser medida directamente, se supone que esa dosis es función de la concentración de Pvc y del tiempo de exposición. Realmente esa «dosis» es una expresión de la agresión a la que está expuesto el sujeto. El

Conforme ha aumentado el conocimiento de la toxicología de la combustión, la gama de efectos tóxicos considerados como importantes se ha reducido a narcóticos e irritantes.

término **dosis de exposición** es probablemente más exacto y se ha convertido en el más utilizado en toxicología de la combustión.

La concentración de los gases tóxicos más comunes, tales como el CO y el HCN, se expresan habitualmente como partes por millón (ppm) en volumen. Por consiguiente, la dosis de exposición se puede expresar como producto de la concentración (C) por el tiempo (t), es decir, en ppm·min. En el caso de una concentración variable del tóxico gaseoso, la dosis de exposición es el área integrada de la curva concentración-tiempo.

A menudo, la concentración de gases tóxicos procedentes del incendio no se puede conocer. En ese caso, es posible trabajar todavía con el concepto de dosis de exposición tal como se aplica al humo. Dado que la concentración de humo no puede ser cuantificada, se toma como una aproximación que la concentración de humo es proporcional a la pérdida de peso durante el fuego. El área integrada bajo la curva, que relaciona la pérdida de peso por unidad de volumen en función del tiempo, se convierte así en una medida de la exposición al humo, medido en g·m³·min. La dosis de exposición al humo en

cualquier punto de la curva puede calcularse a partir de los valores obtenidos mediante una cámara de combustión de laboratorio, incendios experimentales instrumentados, valores generados a partir de incendios modelados matemáticamente e incluso valores estimados a partir de incendios reales.

Con objeto de hacer modelos a los efectos tóxicos de la exposición de los Pvc es necesario conseguir información sobre dos parámetros básicos:

1. La dosis de exposición (Ct) generada por el incendio (para los mayores gases tóxicos en el humo o para la pérdida de peso de los materiales que se están quemando).

2. La dosis de exposición (Ct) necesaria para un efecto tóxico dado (letalidad o incapacidad).

Atmósferas con un solo gas

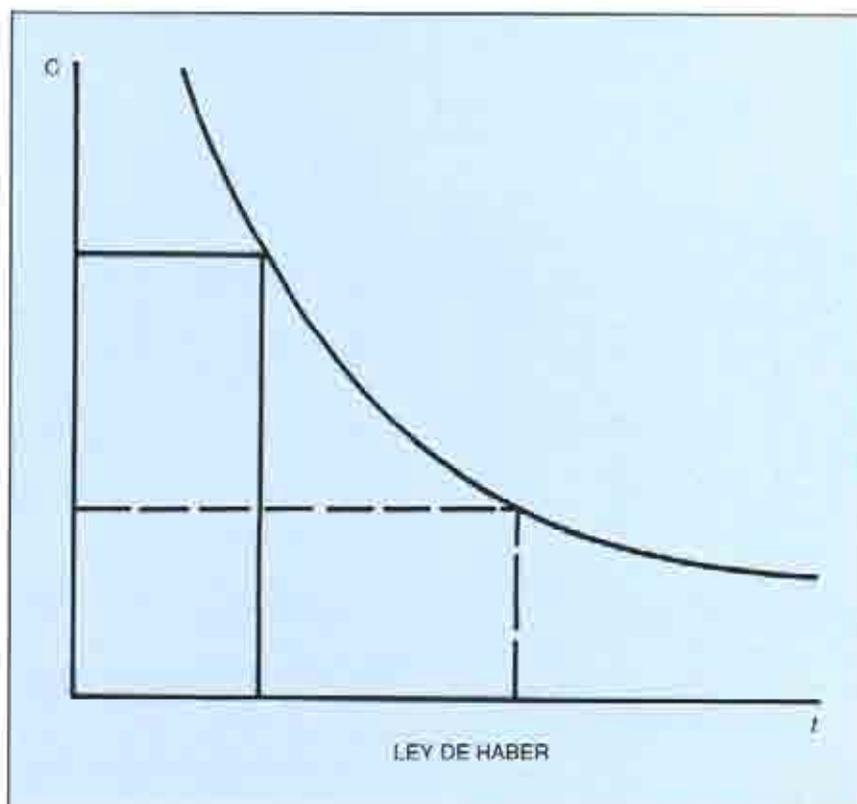
La forma más simple de modelo considera una situación con un único gas tóxico en la que la dosis de exposición asociada con unos efectos dados, por ejemplo, la incapacidad o la muerte, es constante para cualquier concentración de exposición (es decir, donde la Ley de Haber es válida y $C \times t = k$, donde k es la dosis de exposición constante necesaria para producir un efecto tóxico dado) (Fig. 6). Desgraciadamente este no suele ser el caso a lo largo de toda la gama de concentraciones de interés y es deseable determinar la dependencia de la dosis de exposición efectiva de la concentración del tóxico.

Una vez que las dosis de exposición efectivas son conocidas, el concepto de **dosis efectiva fraccionaria** (FED, *Fractional Effective Dose*), como la suma o integración de las dosis de exposición fraccionarias (Fig. 7), se convierte en una herramienta de trabajo en toxicología de la combustión. Los incrementos de la dosis de exposición ($C \times t$) se calculan y se comparan con una dosis de exposición Ct específica necesaria para producir un efecto tóxico estipulado. De este modo se calcula una FED elemental para cada pequeño intervalo de tiempo. La dosis de exposición acumulada se obtiene realizando una suma continua de las FED elementales.

Matemáticamente, el modelo para un tóxico «i» individual puede expresarse de la siguiente manera:

$$\int_0^t \frac{C_i}{(Ct)_i} dt \quad [\text{Ec. 1}]$$

FIGURA 6. Cuando concentración y tiempo son equivalentes, se cumple que $C \times t = k$ (Ley de Haber), donde k es la dosis «constante» necesario para conseguir un efecto tóxico dado. En el caso de la LC₅₀ para un tiempo de exposición determinado el efecto es la muerte del 50 por 100 de los animales.



La mayoría de los métodos de modelado toxicológico emplean este concepto de una manera o de otra.

Atmósferas con gases múltiples

Los métodos para predecir los efectos tóxicos de los Pvc han realizado considerables progresos, pero se encuentran todavía en fase de creación. Varios modelos han sido desarrollados, cada uno con alguna aplicación razonablemente convincente, pero todavía tienen considerables limitaciones. Muy a menudo, los límites han sido la disponibilidad y la calidad de los datos de partida. Los modelos de desarrollo del fuego no son capaces todavía de predecir los valores de concentración-tiempo de los tóxicos, ni tales datos están disponibles generalmente en la documentación publicada que describe los ensayos de incendio a gran escala.

Todos los modelos tienen en común los conceptos de la acumulación de las dosis de exposición a los tóxicos y de la aditividad de los efectos tóxicos para la mayoría de gases ensayados, teniendo cada tóxico su propia acción sobre cada individuo ex-

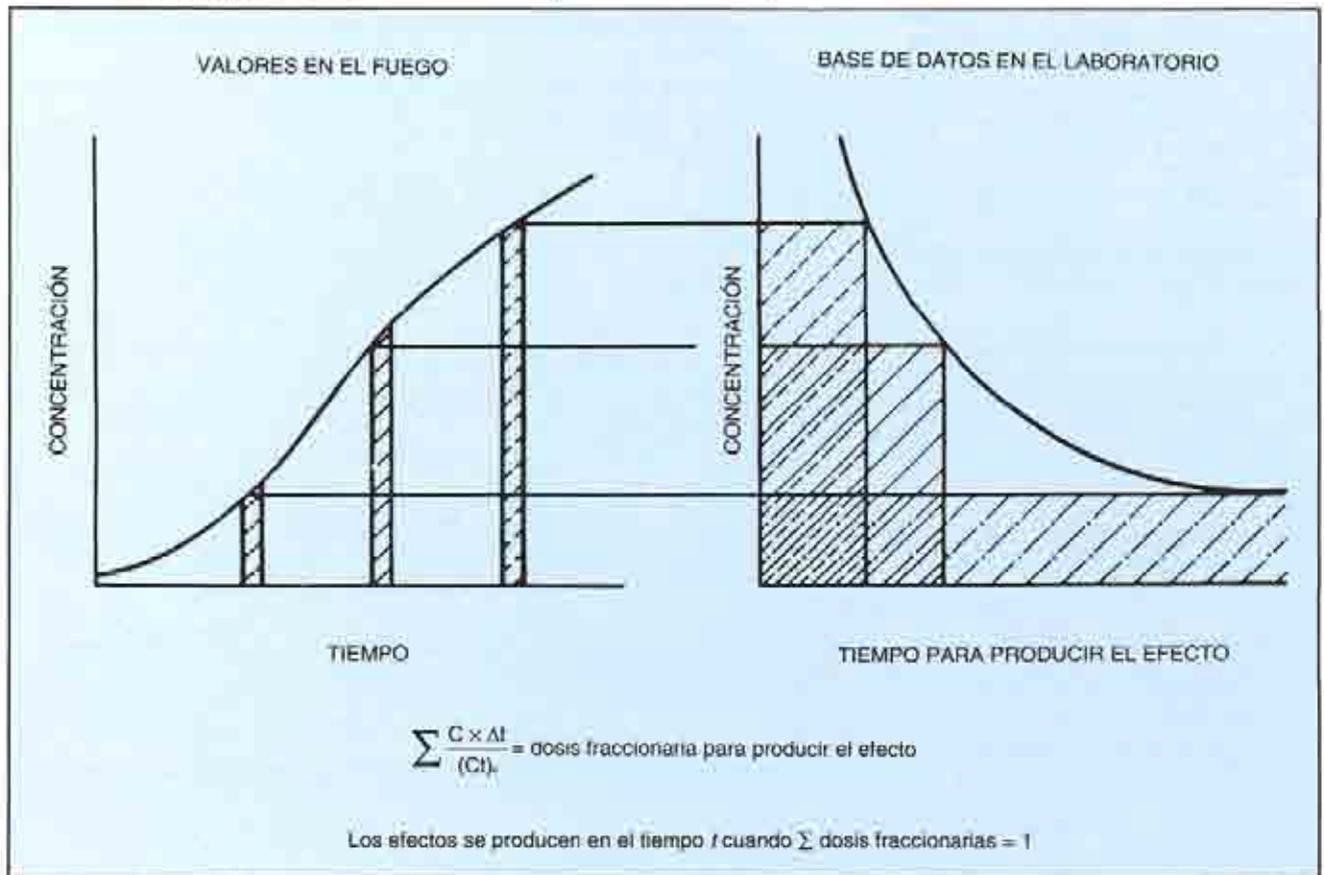
puesto, y contribuyendo así a la agresión global. Una excepción pueden ser los efectos de irritación sensorial, que no está relacionada con la dosis, incluso a través de diferentes irritantes sensoriales puede, sin embargo, ser considerada como aditiva.

Hay dos métodos para predecir los efectos tóxicos de los Pvc conteniendo tóxicos múltiples: uno, empírico, que se basa en la medida de la pérdida de peso combinada con la potencia tóxica del material afectado obtenido de valores de exposición para animales, y el otro, basado en el análisis de la composición de los tóxicos mayores conocidos en el humo.

Precisamente el método que recoge ISO 13344 para valorar la potencia tóxica letal de los Pvc se basa en el principio empírico, y básicamente es la ampliación al caso de tóxicos múltiples de lo indicado anteriormente para atmósfera con un solo gas.

En este modelo las concentraciones de los mayores tóxicos gaseosos en los Pvc durante un periodo de treinta minutos y el producto Ct cada uno se determina integrando las superficies bajo los representativos gráficos concentración-tiempo. Los valores de los productos Ct, junto con los de pérdida

FIGURA 7. El cálculo de la FED se realiza integrando el área bajo la curva que relaciona la concentración (C) con el tiempo (t) necesario para conseguir un efecto dado. (Tomado de: Ref. 12.)



de peso de la probeta durante el ensayo, se emplean para predecir el valor LC_{50} del material sometido a ensayos a los treinta minutos.

$$FED = \sum \int_0^t \frac{C_i}{(Ct)_i} dt \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde C_i es la concentración de la sustancia tóxica «i» y (C) es la dosis de exposición específica necesaria para producir el efecto tóxico. Cuando, como en este método de ensayo, el valor del tiempo de treinta minutos se suprime, la FED se convierte simplemente en la relación entre la concentración promedio de un tóxico gaseoso y su valor LC_{50} para el mismo tiempo de exposición. Cuando la FED es igual a 1, la mezcla de gases tóxicos será mortal para el 50 por 100 de los animales expuestos.

Cálculo de la FED

La potencia tóxica letal predicha (LC_{50}) de un material se calcula a partir de los valores analíticos de la atmósfera de la combustión para el CO , CO_2 , O_2 , y si están presentes, de HCN , HCl y otros tóxicos.

Todos los modelos tienen en común los conceptos de la acumulación de las dosis de exposición a los tóxicos y de la aditividad de los efectos tóxicos para la mayoría de gases ensayados, teniendo cada tóxico su propia acción sobre cada individuo expuesto y contribuyendo así a la agresión global.

a) La FED para treinta minutos para un peso de probeta determinado se puede calcular como se indica en la Ec. 3

$$FED = \frac{[CO]}{LC_{50}CO} + \frac{[HCN]}{LC_{50}HCN} + \frac{[HCl]}{LC_{50}HCl} + \frac{[C]}{LC_{50}C} + \dots \quad [\text{Ec. 3}]$$

en la que los valores de todas las concentraciones de gas son los valores de los productos C integrados a partir de sus respectivas curvas concentración-tiempo durante un tiempo de ensayo de treinta minutos y dividido por 30. Para cada tóxico individual, los valores LC_{50} son los determinados estadísticamente a partir de valores experimentales independientes que producen una mortalidad del 50 por 100 en los ensayos con animales (ratas) durante un periodo de treinta minutos más una exposición de catorce días.

b) Como alternativa al empleo de la Ec. 3, se puede emplear la Ec. 4 para calcular la FED para treinta minutos en aquellos casos en los que la falta de oxígeno y las concentraciones de CO_2 son suficientemente altas (> 1 por 100) como para tener un im-

pacto significativo sobre la toxicidad del CO.

$$FED = \frac{m[CO]}{[CO_2] - b} + \frac{21 - [O_2]}{LC_{50}O_2} + \frac{[HCN]}{LC_{50}HCN} + \frac{[HCl]}{LC_{50}HCl} + \frac{[C]}{LC_{50}C} + \dots \quad [Ec. 4]$$

donde los valores de todas las concentraciones de gas son los productos C integrados obtenidos de modo análogo al anterior. Todos los valores están en ppm excepto el O₂ que está en tanto por ciento. Los valores de m y b dependen de la concentración de CO₂. Si es superior o igual al 5 por 100, m = -18, y b = 122.000. Si es inferior, m = 23, y b = -38.000.

c) Otra alternativa (la Ec. 5) tiene en cuenta el efecto de hiperventilación del CO₂ y de otros tóxicos empleando un factor de multiplicación (VCO₂), y los efectos tóxicos directos del CO₂ empleando un factor aditivo (A).

$$FED = \left[\frac{[CO]}{LC_{50}CO} + \frac{[HCN]}{LC_{50}HCN} + \frac{[\text{Gases ácidos irritantes}]}{LC_{50}\text{Gases ácidos irritantes}} + \frac{[\text{Irritantes orgánicos}]}{LC_{50}\text{Irritantes orgánicos}} \right] VCO_2 + A \quad [Ec. 5]$$

Los valores de las concentraciones están calculados como en los casos anteriores.

Los valores generalmente aceptados del LC₅₀ para algunos de los componentes de los Pvc más comunes se dan en la Tabla 5.

CONCLUSIONES

La metodología para la predicción de los efectos tóxicos de los Pvc ha realizado considerables progresos, pero aún se encuentra en una etapa de desarrollo. Se han propuesto varios modelos, cada uno con aplicaciones razonablemente fundadas, pero todavía con limitaciones considerables. El concepto común a todos es la acumulación de dosis de tóxicos y la aditividad de sus efectos para la mayoría de los gases ensayados.

De los ensayos de laboratorio con muchos materiales se desprende que la toxicidad de los Pvc es consecuencia de un número limitado de sustancias. Esto se debe, sobre todo, a que el CO es, con diferencia, el tóxico producido más frecuente y predomi-

TABLA 5. Valores generalmente aceptados de los LC₅₀ a los treinta minutos de exposición (animal de ensayo: ratas) para los Pvc más frecuentes. (Tomado de: Ref. 6.)

Componente de los Pvc	LC ₅₀ para 30 min. (ppm)
CO	5.700
HCN	165
HCl	3.800
HBr	3.800
HF	2.900
SO ₂	400
NO ₂	170
Acroleína	150
Formaldehído	750

nante. Los materiales con nitrógeno pueden producir HCN, tóxico más potente y de acción más rápida que el CO. Los Pvc también puede contener irritantes, cuyo papel no está todavía claro y debe estudiarse mucho más.

La tendencia en los ensayos biológicos con animales es emplear roedores (ratas y ratones), que para el tóxico más común (CO) constituyen un modelo razonable, ya que sus respuestas permiten predecir los efectos en las personas. Con otras sustancias, tales como los irritantes procedentes de materiales con halógenos, el empleo de roedores es más cuestionable.

La tendencia en los ensayos biológicos con animales es emplear roedores (ratas y ratones), que constituyen un modelo razonable para el tóxico más común, ya que sus respuestas permiten predecir los efectos en las personas.

Todavía no se pueden incorporar los valores de toxicidad de los Pvc a la evaluación del riesgo en caso de incendio. Las premisas para su inclusión incluyen mediciones en función del tiempo de los efectos tóxicos de los parámetros dinámicos del fuego. El camino a recorrer requiere un considerable desarrollo, la integración en un modelo y la validación posterior.

En la actualidad, el camino más efectivo para la reducción de las víctimas en los incendios parece ser el del conocimiento de la propiedad de inflamabilidad: facilidad de incendio, propagación de la llama y calor desprendido, junto un desarrollo de los equipos de detección y extinción. Los datos obtenidos en ensayos de toxicidad de los Pvc tienen grandes posibilidades en el desarrollo responsable de nuevas aplicaciones y productos.

BIBLIOGRAFÍA

- ZAPP, J. A. (1951): «The Toxicology of Fire», Medical Division Special Report, n.º 4, US Army Chemical Center.
- CLARKE, F. B.; BENJAMIN, I. A., y CLAYTON, J. W. (1982): «An Analysis of Current Knowledge in Toxicity of the Products of Combustion», NFPA Report.
- KAPLAN, H. L.; GRAND, A. L., y HARTZELL, G. E. (1983): *Combustion Toxicology Principles and Test Methods*, Technomic Publishing.
- ISO/TR 6543 (1979): *The development of test for measuring toxic hazards in fire*.
- ISO 9122: *Toxicity testing of fire effluents*.
- ISO 13344: *Determination of the lethal toxic potency of the fire effluents*.
- WOOLLEY, W. D., y FARDELL, P. J. (1982): «Basic aspects of Combustion Toxicology», Fire Safety Journal, 5.
- HARTZELL, G. E. (1983): *Smoke Toxicity Testing*, FRCA, Fall Conference.
- PURSER, D. A.: *Modeling Toxic and Physical Hazard in Fire*, FRCA Conference, marzo de 1987.
- WOOLLEY, W. D. (1986): *Are foams a fire hazard?*, Fire and Cellular Polymers Elsevier.
- HIRSCHLER, M. M.: *Fire retardance, smoke toxicity and fire hazard*, Conferencia presentada en Flame Retardants 94 Conference, Londres.
- HARTZELL, G. E.; PRIEST, D. N., y SWITZER, W. G. (1989): *Modelling of Toxicological Effects of Fire Gases: II. Mathematical Modeling of Intoxication of Rats by Carbon Monoxide and Hydrogen Cyanide*, Advances in Combustion Toxicology I., Technomic.
- HILADO, C. J. (1982): *Flammability Handbook for Plastics*, Technomic.
- BABRAUSKAS, V. (1995): *Quantitative measures of combustion toxicity of building products. Full scale tests, bench-scale tests and hazard assessments*, Rockwool Toxicity Seminar.