



JOSÉ MIGUEL LACOSTA BERNA
Experto Superior en Seguridad

Valoración de materiales dañados por el fuego.

Guía para la investigación de incendios

SUMARIO

La investigación de un incendio intenta descubrir las causas que lo han motivado.

Con mucha frecuencia, el análisis de los restos visibles tras un incendio no siempre proporciona datos suficientes como para averiguar su origen. Sin embargo, suele ser todo lo que nos queda y, por tanto, es necesario estudiarlo.

En este trabajo se ha hecho una primera división general entre materiales de decoración e interiorismo y estructurales. Particularizando en un estudio más detallado, en el primer caso, de diferentes grupos de materiales por aplicaciones: pinturas, cables, metales, etc. y en el segundo, en materiales concretos: madera, acero u hormigón armado.

Por último, y como resumen, se presenta una tarjeta de ayuda para la investigación de incendios.

Palabras clave: Seguridad contra incendios, investigación de siniestros, comportamiento de materiales.

INTRODUCCIÓN

La investigación de un incendio intenta llegar a descubrir las causas que lo han motivado. En el caso particular de las investigaciones sobre los restos materiales (Fig. 1), una de las finalidades es conocer la severidad y extensión del ataque del fuego —otra puede ser la búsqueda de acelerantes, y hay más— con el siguiente objetivo: determinar el tipo y desarrollo del incendio, como base para una posterior recuperación o rehabilitación y para establecer su gravedad a efectos de la prima del seguro.

La idea central de este tipo de investigaciones se basa en la evidencia de que en un recinto, o edificio, en el que no se aprecien daños visibles des-

pués de un incendio, tales como la carbonización de la madera, la rotura del hormigón o la deformación de las estructuras de acero, existen escasas probabilidades de pérdidas permanentes de resistencia de los materiales, y, por tanto, los daños materiales serán reducidos, aunque esto puede que no ocurra en todos los casos.

Con mucha frecuencia, el análisis de los restos visibles tras un incendio no proporciona datos suficientes como para dictaminar sobre el origen del mismo. Esto es debido a la complejidad del fenómeno del fuego, que origina una gran variedad de temperaturas, así como a múltiples efectos mecánicos, que hacen variar la resistencia de los materiales involucrados, y químicos, que favorecen las reacciones y liberar compuestos activos.

En todos los casos es esencial hacer una minuciosa inspección del local o recinto completo, incluso de la parte no afectada, para asegurarnos, por ejemplo, que el daño mediante dilatación térmica o fuga de agua no se ha producido en aquellas partes no afectadas directamente por el incendio, así como para aportar datos complementarios y determinar los materiales más característicos y que puedan proporcionar mayor información.

LA AYUDA DE LOS ENSAYOS

Los ensayos normalizados de resistencia al fuego determinan el periodo de tiempo durante el cual los elementos de construcción deben mantener su función resistente y/o separadora, para la que han sido diseñados, mientras están expuestos al fuego de acuerdo con una curva tiempo-temperatura predeterminada, donde la temperatura alcanza los 821 °C en treinta minutos y los 1029 °C en dos horas.

Esta relación tiempo-temperatura es la idealización de un incendio en una habitación con un desarrollo incontrolado. Se da por sentado que hay un suministro ilimitado de combustible y que su velocidad de combustión, controlada fundamentalmente por las condiciones de ventilación, conduce a un modelo predecible (Fig. 2).

En los incendios reales, el fuego puede haber permanecido localizado durante mucho tiempo, la velocidad de aumento de la temperatura puede haber sido más rápida, o más lenta, que en el ensayo normalizado o puede haberse producido un desarrollo

FIGURA 1. Los efectos mecánicos y químicos producidos durante el incendio, así como en las tareas de extinción y salvamento, pueden hacer muy difícil la investigación sobre los restos materiales. Aun así, es todo lo que nos queda y, por consiguiente debemos estudiarlo.

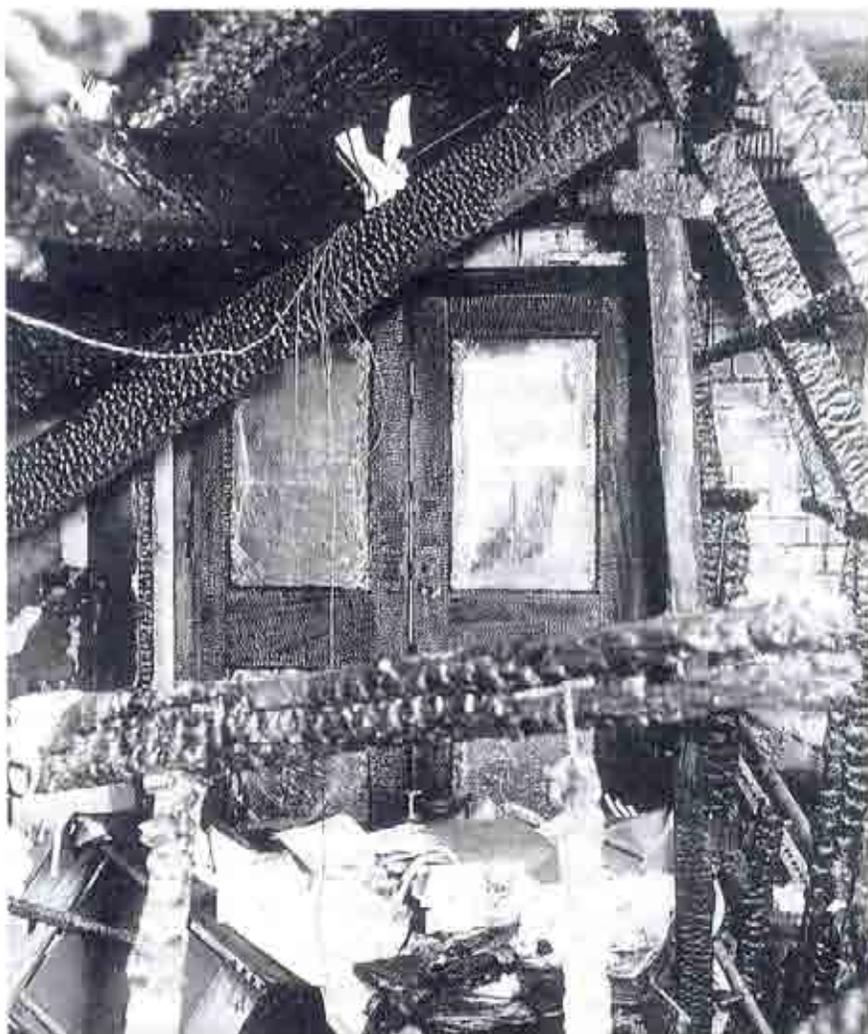
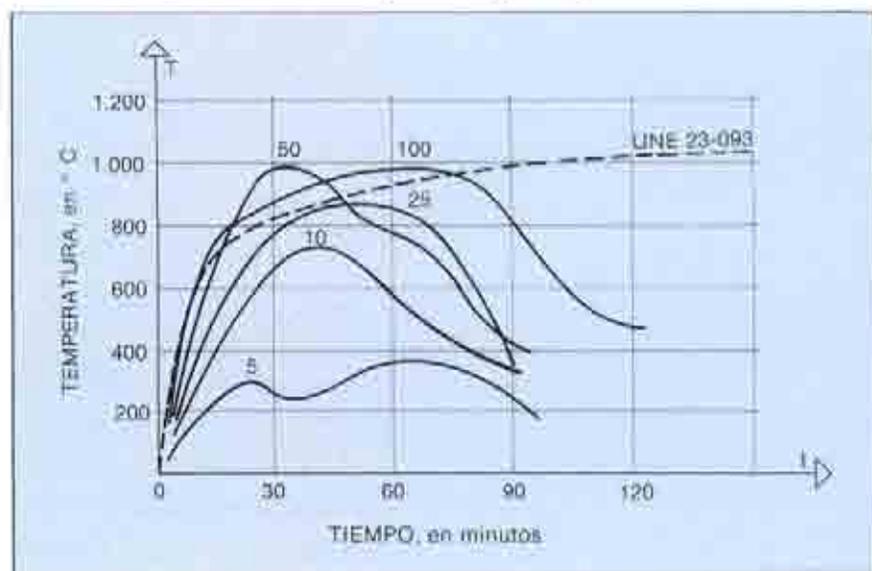


FIGURA 2. Curvas tiempo-temperatura. Curva teórica normalizada UNE 23-093 (ISO 834) y curvas experimentales para diferentes cargas de fuego. La curva normalizada sigue la ecuación $T - T_0 = 345 \log(8t + 1)$.



extensivo. Diferentes habitaciones y distintas partes de un edificio pueden sufrir diferentes intensidades del incendio.

Conocer el comportamiento de los componentes de un edificio, bajo condiciones de ensayos normalizados, nos permite predecir *daños semejantes* si se llega a determinar la severidad del incendio (Fig. 3). Sin embargo, es importante llegar a conocer, tan exactamente como sea posible, las condiciones reales de cada elemento de la estructura a continuación del incendio.

Un examen de los restos puede no dar un valor exacto de las temperaturas del fuego, ya que están sometidas a fluctuaciones locales; pero la mayoría de las veces es todo lo que nos queda y bien merece la pena su estudio. La Tabla I proporciona una guía aproximada para estimar las temperaturas alcanzadas por diversos componentes en un incendio de edificios mediante un examen de lo que ha quedado.

LAS EVIDENCIAS

En muchos casos de evidencias de materiales afectados por la acción del

FIGURA 3. Los ensayos normalizados pueden ayudarnos a determinar la severidad del incendio, comparando el daño semejante obtenido en el ensayo normalizado y el producido en el fuego real. Cortesía del Laboratorio de Investigación y Control del Fuego (AFITI-LICOF).

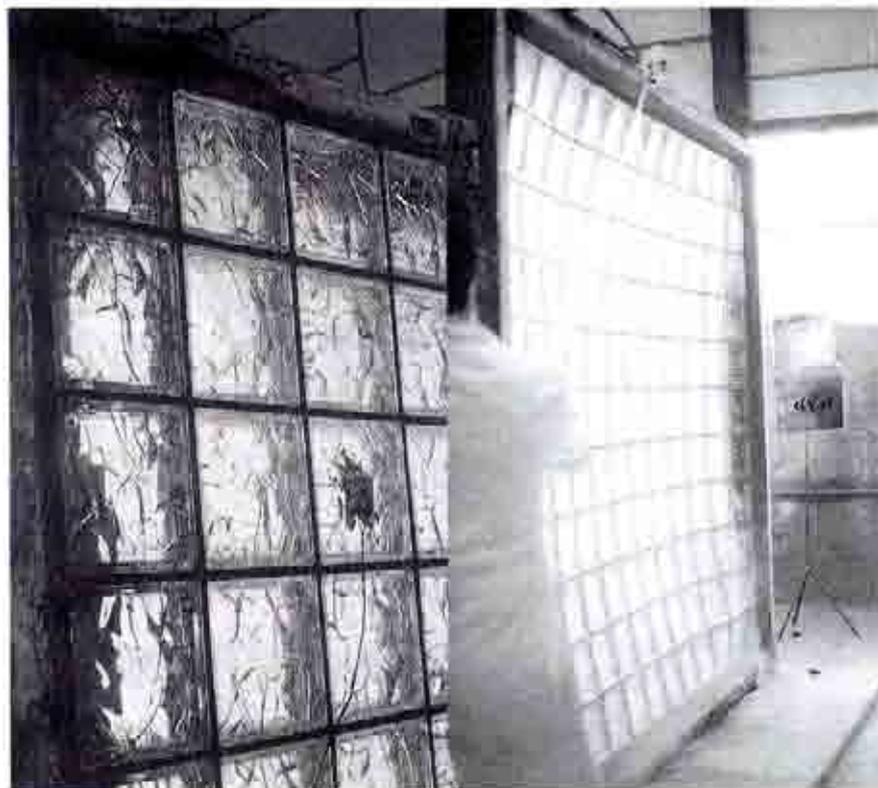


TABLA I. Valoración de las temperaturas alcanzadas en un incendio por análisis de los materiales y componentes afectados.

Material	Ejemplos típicos	Condición	Temperatura aproximada (°C)
Poliestireno	Pequeños recipientes para alimentación	Destruídos	120
	Cáscaras de TV, monturas de gafas	Reblandecidos Funden y fluyen	120-140 250
Polietileno	Films, bolsas	Se arrugan	120
	Botellas, cubos	Reblandecen y funden	150
Polimetilmetacrilato		Reblandecido	130-200
		Ampollado	250
Celulosa	Papel, cartón, algodón	Se oscurece	200-300
Soldadura blanda de estaño	Uniones de fontanería	Funden	250
Aluminio	Accesorios, revestimientos	Reblandecidos	400
		Fundidos	650
Acero inoxidable	Cubiertos	Colorados	400-500
Vidrio	Cristales, botellas	Reblandecidos	700-800
		Fluyen fácilmente	850
Plata	Joyería	Fundidos	950
Latón	Cerraduras, grifos	Fundidos (sobre todo las partes salientes)	800-1.000
Cobre	Clabeado	Fundidos	1.100
Fundición de hierro	Radiadores	Fundidos	1.100-1.200

fuego no puede determinarse siempre una temperatura concreta, debido a la acción combinada del tiempo y de la temperatura. Un material sometido a una temperatura de 800° C durante algunos minutos puede tener una apariencia completamente similar al sometido a una temperatura inferior durante un periodo de tiempo más largo.

A veces hay temperaturas claras, en las que se producen cambios bien definidos. En muchos casos, y para gran número de materiales, esos puntos límites están estrechamente definidos. Los análisis de laboratorio son necesarios a veces, pero los investigadores pueden generalmente esbozar un modelo del incendio estudiando las temperaturas relativas, y el estado en que han quedado los materiales quemados o sobrecalentados.

MATERIALES DE DECORACIÓN E INTERIORISMO

Los materiales de construcción

La coloración del hormigón a diferentes profundidades es una pista, tanto sobre la temperatura máxima alcanzada en la superficie como de

la acción del binomio tiempo-temperatura sufrido. Hacen falta cuidado y experiencia cuando se evalúan superficies rotas y desmenuzadas. La interpretación dependerá sobre si la rotura ocurrió durante el periodo de máxima exposición al calor o posteriormente, así como sobre el margen que debemos darnos por ese factor.

La amplitud del cambio de color varía con el tipo y la clase de material analizado, fino o basto, pero los cambios se producirán en diferentes grados en prácticamente todos los tipos de hormigón. Humedeciendo la superficie del hormigón afectada conseguiremos intensificar los colores. Algunos tipos de piedras muestran cambios similares.

La carpintería

La profundidad de carbonización a partir de la superficie original da una idea aproximada de la duración del ataque del fuego sobre elementos de madera. Como se indica más adelante, la madera carboniza a una velocidad constante en cada cara expuesta al fuego.

Los metales

La resistencia al fuego no es una propiedad de un material particular, sino que es una característica de un sistema particular que incluye: material, oxidante, fuente de encendido, ambiente y condiciones. Por ejemplo, el acero ordinario a temperatura ambiente no puede encenderse con una cerilla —a menos que el acero se encuentre en forma de lana de acero—. Tal distinción en la forma del material es a menudo pasada por alto cuando se interpretan los datos de un incendio.

La mayoría de los aluminios son aleaciones. La mayoría de esas aleaciones tienen alrededor del 25 por 100 de aluminio y en gran parte incluyen en su composición pequeños porcentajes de otros metales, tales como titanio, silicio, manganeso o magnesio. El punto de fusión de una chapa de aluminio oscila entre 640 y 660° C, pero algunas aleaciones pueden fundir a temperaturas tan bajas como 530° C e incluso a 510° C.

Se emplean varios tipos de tratamientos térmicos, los cuales pueden, a menudo, cambiar las características básicas del metal, es decir, de dúctil a frágil, y sus fallos no tendrán necesariamente la misma apariencia.

Cuando las aleaciones de aluminio se calientan hasta la temperatura de

fusión, se arrugan y se separan, haciéndose pedazos y dejando grietas y fisuras brillantes. Si se calientan suficientemente para formar gotas, aparecen como pequeñas bolsas arrugadas. Por otro lado, los aceros tienden a quemar cuando se calientan hasta la zona de los rojos (Tabla II), formando óxidos en los bordes y en las secciones delgadas.

El metal dañado por fuego produce principalmente una pérdida de resis-

TABLA II. Escala aproximada de colores y temperaturas para los aceros sometidos al fuego (°)

Temperatura (°C)	Escala aproximada de colores
500	Rojo sombra naciente
650	Rojo oscuro
800	Rojo cereza naciente
900	Rojo cereza
1.000	Rojo cereza claro
1.100	Naranja oscura
1.200	Naranja claro
1.300	Bianco
1.400	Bianco brillante
1.500	Bianco deslumbrante

(*) Los pirómetros ópticos utilizados para medir las temperaturas que se producen en los incendios se basan en que los cuerpos, a temperaturas próximas y superiores a 500° C, se ponen incandescentes, variando su color y brillo con la temperatura.

tencia. Las aleaciones de aluminio pierden un 10 por 100 de su resistencia cuando se calientan treinta minutos a 200° C, diez minutos a 230° C, tres minutos a 290° C o dos minutos a 315° C. Los ensayos de dureza pueden emplearse para determinar la cantidad de exposición a la temperatura, pero es necesaria una aproximación del tiempo transcurrido para determinar la temperatura máxima.

El acero inoxidable empieza su decoloración entre 430 y 480° C, desde un marrón rojizo a azul claro, a azul brillante, a negro. Cuando se examine este metal, los investigadores deberían analizar ambos lados; el lado que presenta el azul más claro fue el lado opuesto a la fuente de calor, y la zona calentada sería más pequeña en diámetro (Fig. 4).

Las pinturas

Las imprimaciones de cromato de cinc empiezan en marrón rojizo a 230° C, son marrones a 260° C, marrones oscuras a 316° C y negras a 370° C. Los recubrimientos cadmiados empiezan a decolorarse a 260° C. La silicona presenta ampollas a 370° C.

Las pinturas epoxi y poliuretano se ablandecen a 200° C, se decoloran a 316° C, se ampollan a 430-450° C (Fig. 5) y se queman completamente entre 480 y 510° C.

Seccionando la pintura con una cu-chilla conoceremos la profundidad

FIGURA 4. El acero inoxidable presenta coloraciones bien diferenciadas entre la superficie directamente atacada por la flama (A) y la cara posterior (B).

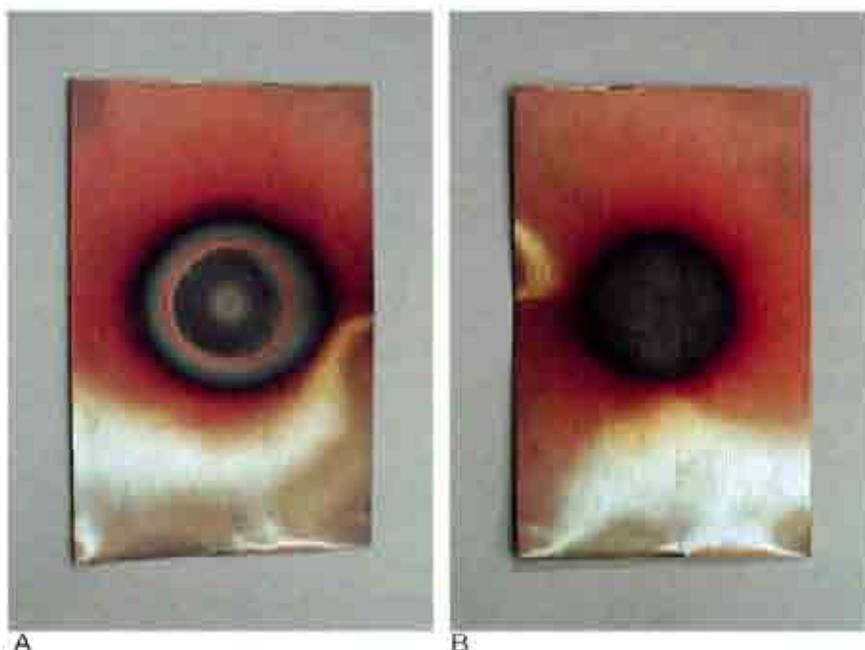


FIGURA 5. El color y extensión del ampollado son buenas pistas para orientarnos hacia el foco del incendio.



del sobrecalentamiento. Chamuscados severos ennegrecerán la superficie sin hacerlo en profundidad. Es poco probable tener el metal de debajo quemado sin encontrar la pintura quemada en toda la superficie. En algunos casos es posible carbonizar las imprimaciones orgánicas debajo de una pintura de aluminio resistente al calor sin «superficie quemada» aparente.

Los investigadores deben tomar nota de aquellos materiales que ardiéron, los que fundieron y los que fueron dañados por la presencia de calor.

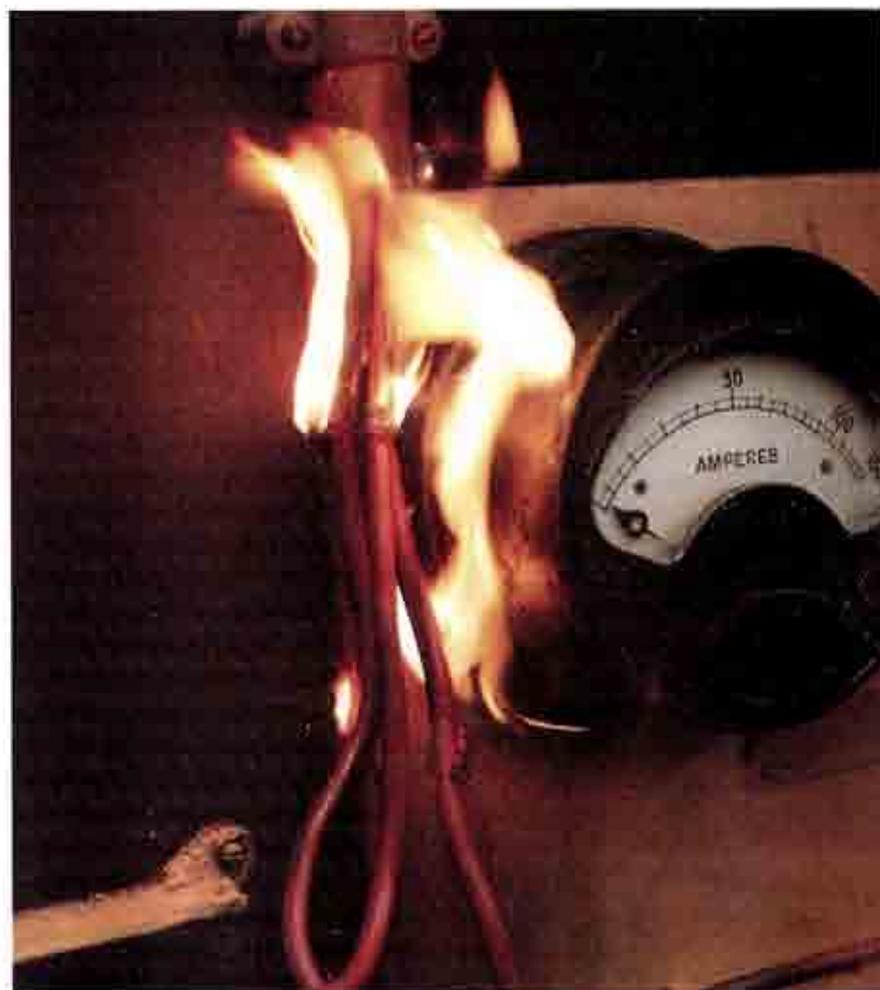
Los cables eléctricos

Cuando se rompen cables eléctricos sin que conduzcan corriente, la rotura es limpia y representa la típica fractura de cono y copa. Cuando la corriente circula, se produce un arco en la rotura, produciendo pequeñas bolas de metal oxidado que se forman en las puntas de los hilos. Un incendio exterior al haz de cables quema primero el exterior, y el conductor interior queda limpio y brillante, excepto donde el aislamiento se ha quemado también. Los cables quemados por exceso de corriente queman desde dentro hacia afuera y el conductor presenta un aspecto oscuro y oxidado, algunas veces sin daño en la cubierta exterior. El estañado del conductor de cobre se difundirá por el interior del cobre a temperaturas por encima de la de fusión, de 230° C, y se convierte en áspero e irregular, o incluso desaparece, (Fig. 6).

Los materiales plásticos

Dejando aparte algunos plásticos muy especiales, como los recubri-

FIGURA 6. La investigación sobre los cables eléctricos es una tarea difícil, dada la «costumbre» de atribuir a la electricidad la causa de los incendios en todos aquellos siniestros en que haya involucrados equipos o conducciones eléctricos y cuyo proceso de iniciación no está claramente definido.



mientos de las sartenes, los portálamparas de «baquelita» o los tableros con superficies de melamina, en general los plásticos desaparecen en un incendio. El polietileno (empleado para bolsas de tipo camiseta) funde a los 120-150° C, similar temperatura para las bandejas blancas de poliestireno (las empleadas en los supermercados al comprar carne o embutidos).

Los plásticos de uso doméstico más generalizado tienen temperaturas de descomposición o de fusión relativamente bajas, al menos en comparación con otros materiales. Ahora bien, en investigación de incendios, la importancia de estos materiales es grande como testigo de la extensión de las llamas o del calor. Las zonas donde empiezan a aparecer, la posición en que quedan tras fundirse o la cara más afectada pueden indicarnos el origen, el foco del incendio o delimitarnos la zona de mayor intensidad.

El humo

Se producen marcas de hollín como consecuencia de su impulsión por las corrientes de aire, hasta que tropieza con un objeto al que puede adherirse por sí mismo, bien por medio de los aceites no quemados que contiene o por atracción electrostática. Algo que conviene recordar es que el hollín no se adhiere por sí mismo sobre superficies calentadas por encima de los 370° C. Por consiguiente en las zonas que muestren la mayor intensidad del incendio puede haber poca o ninguna cantidad de hollín.

LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Durante los incendios, los elementos estructurales están sujetos a una absorción de calor que se traduce

en una expansión térmica. Las altas temperaturas afectan a la resistencia de las —valga la redundancia— estructuras resistentes, sean éstas de un material o de otro. Veámos con más detalle el comportamiento de tres materiales habituales.

La madera

Tanto los incendios como las pruebas de laboratorio han demostrado que la madera es uno de los materiales estructurales con mayor estabilidad ante el fuego debido principalmente a que es mala conductora del calor y a que tiene un bajo coeficiente de dilatación (tres veces inferior al del acero)

Ahora bien, a nivel de su calificación, en cuanto a su reacción al fuego, lo hace generalmente como M4, ya que se inflama fácilmente y en su combustión se desarrolla gran cantidad de calor. Para aclarar esa aparente contradicción estudiaremos la variación de sus propiedades mecánicas durante un incendio.

Al examinar una pieza de madera después de un incendio, comprobamos que está recubierta de una capa más o menos espesa de «carbón vegetal», hallándose la parte central totalmente intacta (Fig. 7). La resistencia mecánica del carbón vegetal es casi nula, pero la de la zona central es prácticamente igual a la de la madera original. Por tanto, la disminu-

FIGURA 7. Aspecto de una madera sometida al fuego por una de sus caras. Obsérvese la capa de «carbón vegetal» que la recubre.



ción de las cualidades que sustentan una viga o pilar se debe básicamente a la reducción de su sección útil. El espesor de la capa carbonizada depende, como es natural, de la intensidad del fuego, de la duración del ataque y de la especie vegetal de la madera.

La velocidad de carbonización de la madera se evalúa frecuentemente en unos 0,7 mm por minuto, valor obtenido en ensayos de resistencia al fuego y que disminuye a medida que aumenta la capa carbonizada. En particular, la densidad de la madera tie-

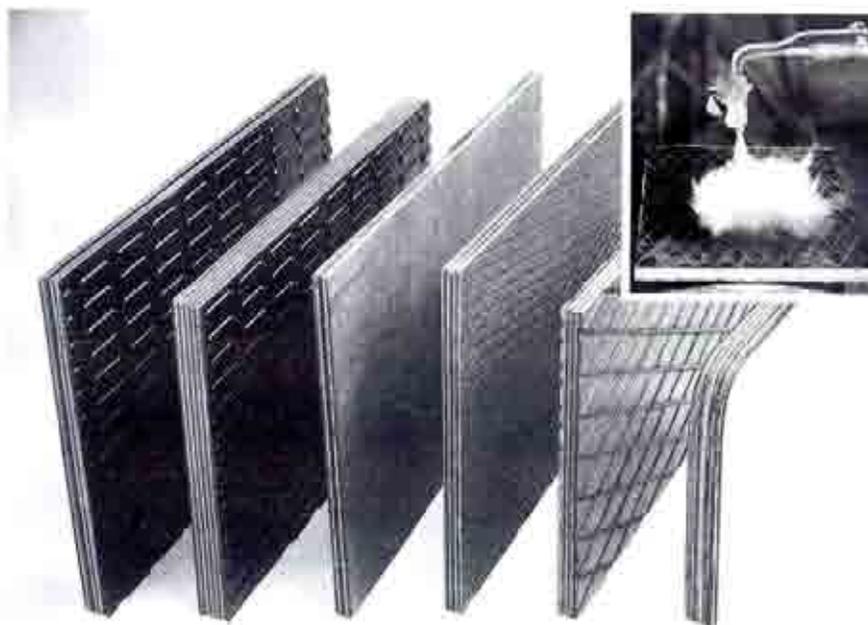
ne una influencia primordial en la velocidad de carbonización, y cuando mayor sea aquella tanto menor será ésta.

La resistencia al fuego de maderas laminadas y encoladas, también conocidas como «contrachapados», depende de la calidad del encolado. Si éste es mediocre, los elementos se separan rápidamente y la pieza pierde todas sus cualidades importantes. Si el encolado resiste, se comportan entonces como un material macizo e incluso mejor (Fig. 8).

La lenta degradación de la resistencia mecánica de la madera es debida a su débil conductividad térmica. La humedad también juega un importante papel en el retraso de la acción. Además de mantener los 100° C, esta humedad no se elimina totalmente por evaporación, sino que pasa a enriquecer las capas más profundas. La deshidratación, por efecto del calor, provoca un aumento de la resistencia. Por cada 1 por 100 de humedad perdida, crece en un 4 por 100 la resistencia a la compresión y un 2 por 100 la resistencia a la flexión, compensándose inicialmente la pérdida de resistencia debida a la disminución de sección producida al arder.

Por último, el carbón vegetal ya citado protege de la siguiente forma. Se acumula durante el desarrollo del incendio, ya que sólo se quema lentamente, y mientras éste se mantiene las partes superiores de las estructuras son laminadas por las llamas. El oxígeno no consumido se diluye, tanto en los gases de combustión como en los productos volátiles combustibles todavía intactos. Este fenó-

FIGURA 8. En la actualidad hay tableros contrachapados de madera que alcanzan la Clase M1 y que se presentan con una extensa gama de acabados. Cortesía de PRODEMA.



meno se acentúa en la proximidad de las vigas, dada la expansión de productos volátiles e inflamables provenientes de la propia pirogenación. El oxígeno para la combustión de la capa carbonizada es escaso, por lo que ésta prácticamente sólo arde mientras la viga se halla rodeada por las llamas.

Cuando las llamas van disminuyendo aparece el peligro del incendio del carbón y la consiguiente desprotección del alma de la pieza; sin embargo, mientras las partes centrales continúan emitiendo gases, la ignición es débil, y como la incandescencia va acompañada de una radiación elevada, la combustión no es suficiente para compensar la pérdida de calor, por lo que la viga se enfría y el calor disminuye. Si las vigas o pies derechos se rodean de obra quedan, naturalmente, más protegidas. Por el contrario, si se hallan en contacto con piezas metálicas, éstas transmiten el calor al interior de la madera (si la atraviesan), con lo que la pérdida de resistencia mecánica es muy rápida.

De lo anteriormente expuesto se deducen dos consecuencias importantes:

— Que la madera, aun siendo un material de clase M4, se tolera como elemento estructural en muchas Ordenanzas.

— Que esta tolerancia deberá ser mucho menor cuando se utilicen tornillos metálicos para unir piezas de madera o se coloquen perfiles metálicos de refuerzos en vigas antiguas (sujetas a ellas con pernos), ya que entonces se ocasionan pérdidas de resistencia mucho mayores que las normales en los mismos elementos estructurales de iguales secciones.

El acero

Para conocer la estabilidad al fuego de los elementos metálicos es necesario saber la influencia que la temperatura ejerce sobre sus características mecánicas, cuáles son sus temperaturas críticas y cómo se efectúa el proceso de calentamiento.

Es bien conocido que las características mecánicas de los metales varían con la temperatura. En la figura 9 puede verse un gráfico que demuestra la variación de las características mecánicas estáticas R , E y σ_e , en función de la temperatura para un acero de construcción. Puede observarse cómo la resistencia a la tracción (R), aumenta hasta temperaturas próximas a los 200° C, iniciando luego su

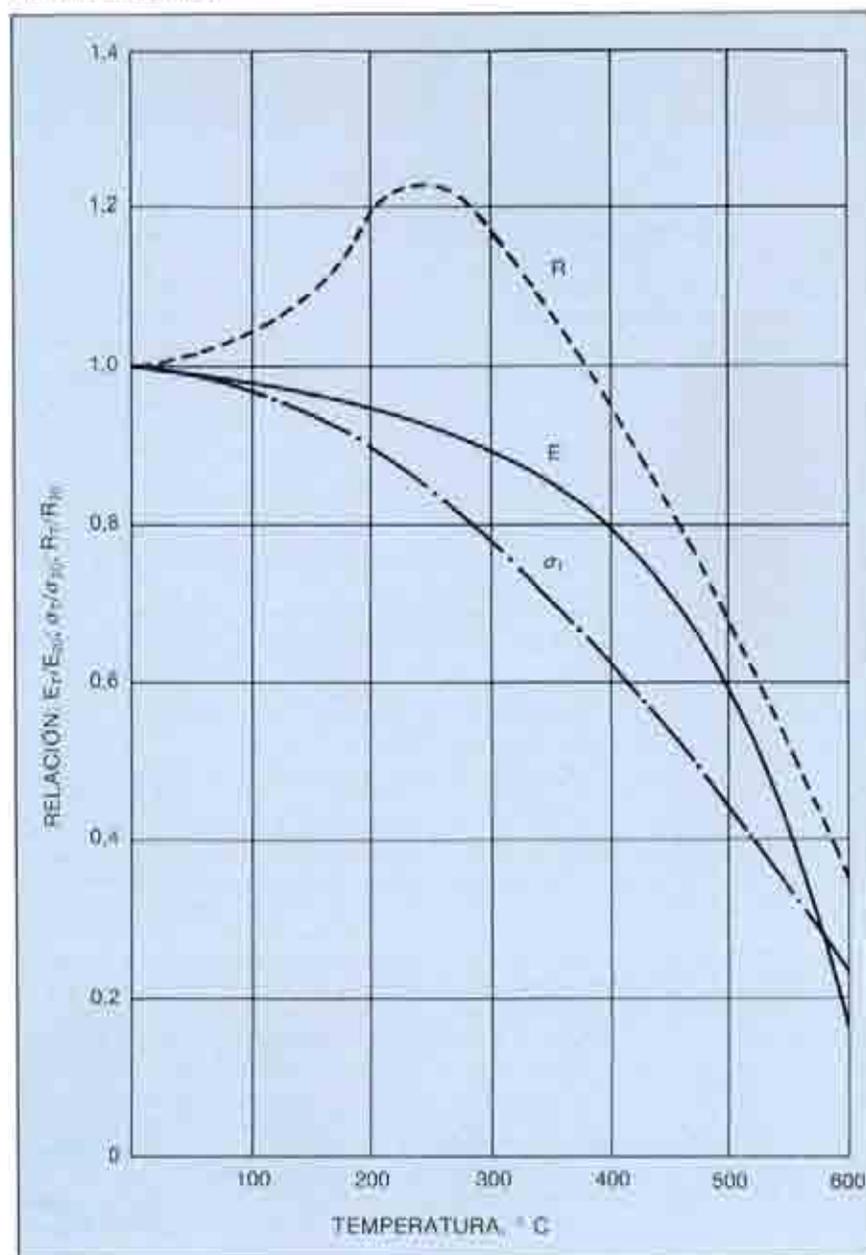
caída. Tanto el módulo de elasticidad (E) como el límite elástico σ_e disminuyen de forma monótona a medida que la temperatura aumenta.

Los valores representados en ordenadas están referidos a los correspondientes a 20° C. La resistencia a la tracción a 450° C es del orden de un 80 por 100, y el límite elástico es un 50 por 100 del correspondiente a 20° C. Por tanto, no puede garantizarse la estabilidad de un elemento metálico desnudo cuando por efecto del calor generado en un incendio sufre un calentamiento que provoca una elevación de temperatura.

a) Comportamiento al fuego de las estructuras metálicas

La teoría del hundimiento de las estructuras metálicas en un incendio puede resumirse así: en una armadura hay elementos que trabajan a tracción, y otros, a compresión. La tendencia a derrumbarse por el fuego es más acentuada en los elementos largos y de poca sección, porque los elementos que trabajan a compresión tienen una masa mayor y suelen ser más cortos que los que trabajan a tracción. La inercia térmica en ambos es distinta, y los primeros en acusar

FIGURA 9. Variación de las características mecánicas del acero de construcción en función de la temperatura (E_T = módulo de elasticidad; σ_{eT} = límite elástico; R_T = resistencia a la tracción. Todos ellos a la temperatura T). Procedencia. Tomado de la Ref. 9.





la acción del calor son los largos y de poca sección. Supongamos que la elevación de temperaturas es uniforme en la proximidad de todos los elementos de una armadura. Desde que las llamas llegan al techo, las piezas en estado de tracción tienden a alargarse, lo que acentuará la fatiga a compresión de los otros elementos. Por otro lado, las vigas que se apoyan sobre los muros tienden a provocar su vuelco hacia el exterior. El muro, sin embargo, resistiendo a esos empujes, crea unos esfuerzos sobre las vigas y la dilatación elástica se convierte en un acortamiento que compensará parcialmente la dilatación térmica.

Luego, rápidamente, las vigas se curvarán ligeramente, lo que tenderá a anular los esfuerzos de vuelco sobre el muro; por tanto, es muy posible que el muro quede dislocado, pero no derrumbado.

Al acentuarse la elevación de temperatura, las piezas que trabajan a compresión comienzan a notar los efectos de las llamas, tendiendo a plegarse; la flexión de las piezas largas se acentúa, la estructura se acorta y el esfuerzo sobre los muros se invierte de sentido. Por último, la estructura, completamente deformada, cae, arrastrando los muros del edificio.

Este supuesto es puramente teórico, pero la experiencia nos ha permitido comprobar que los hechos son muy similares a los descritos. Además, en la mayor parte de los in-

En muchos casos de ruinas de materiales afectados por el fuego no puede determinarse siempre una temperatura concreta, debido a la acción combinada del tiempo y de la temperatura.

cidios las temperaturas no se distribuyen uniformemente, lo que implica diferencias importantes en el comportamiento mecánico antes supuesto, aunque el conjunto, más complejo, es parecido y el derrumbamiento de los muros tiene lugar hacia adentro (Fig. 10).

Si el incendio se extiende antes del desplome, pero las deformaciones no elásticas quedan, subsisten unas tensiones que habrá que tener en cuenta en la estructura incendiada para ver si su estabilidad continúa en las mismas condiciones del cálculo inicial y, por tanto, se puede garantizar su seguridad.

b) Temperatura críticas

Se entiende por temperatura crítica (T_c) de un elemento de acero la temperatura por encima de la cual no se garantiza la estabilidad mecánica del elemento, es decir, cuando su resistencia o su límite elástico se hacen inferiores a las tensiones de trabajo reales en la estructura en que participan.

La temperatura crítica así definida depende de varios factores, tales como:

- La naturaleza del acero
- La tensión de servicio establecida para el acero.
- Las condiciones de sujeción del elemento (isostático o hiperestático).
- La posibilidad de dilatación libre.

c) Tensiones de servicio

Para los ensayos de resistencia al fuego generalmente se toma como tensión de servicio la máxima admisible establecida para la calidad de acero que se trate. La pérdida de estabilidad o ruina de los elementos de construcción se debe normalmente al descenso del límite elástico (σ), a valores por debajo de la tensión máxima admisible para los que trabajan a flexión o al descenso de la resistencia a la tracción, o a la compresión (R), y del módulo de elasticidad (E) por debajo de los valores máximos establecidos para los elementos que trabajan a tracción o a compresión.

En términos generales se conside-

Los investigadores deben analizar cuidadosamente aquellos materiales que ardió, los que se han fundido y los que solamente han sido dañados por la acción del calor.

titución, tanto en materiales como la dosificación de los mismos. Los áridos silíceos y calcáreos presentan un comportamiento muy diferente, y el contenido en agua aumenta la resistencia al fuego, pues la absorción del calor se emplea primero en evaporarla.

El hormigón armado debe considerarse como elemento metálico protegido, y su resistencia al fuego puede ser menor que si el hormigón no tiene acero. Si el calor llega a éste, su deformación produce el agrietamiento de la capa protectora de hormigón, lo que es función de la constitución y de la forma de trabajar del elemento (compresión, tracción o flexión); por tanto, el comportamiento de vigas y pilares será diferente en unos u otros casos.

Cuando el hormigón está sometido

a la acción del fuego sus componentes sufren importantes modificaciones. El agua que lleva incluida empieza a evaporarse a partir de los 100° C, retardando así el calentamiento del material. A los 400° C una parte del cemento se transforma en cal viva; hacia los 600° C, los áridos — todos no tienen el mismo coeficiente de dilatación térmica — se expanden fuertemente, dando lugar a tensiones internas que empiezan a disgregar el hormigón. Por su parte, la cal puede dar lugar a desprendimientos de CO₂.

El hormigón, en este proceso de elevación de temperaturas, va sufriendo una serie de cambios de coloración que puede servirnos de índice en las pérdidas de resistencia y del cambio en condiciones experimentadas (Fig 11); así, a 200° C el color

ra que, para los aceros de construcción, las tensiones máximas admisibles de servicio son aproximadamente de un 40 por 100 de σ_1 y un 60 por 100 de R a 20° C. En la figura 9, puede verse que:

— La resistencia a la rotura descendiendo por debajo de la tensión máxima admisible para la temperatura de unos 500° C.

— El límite elástico descendiendo por debajo de la tensión máxima admisible para una temperatura de unos 450° C.

d) Proceso de calentamiento

Los principales factores que influyen en la elevación de temperatura en el acero son:

— La intensidad de calentamiento, que viene dada por la carga térmica existente en el local considerado en los ensayos de resistencia al fuego y por la curva normalizada tiempo-temperatura.

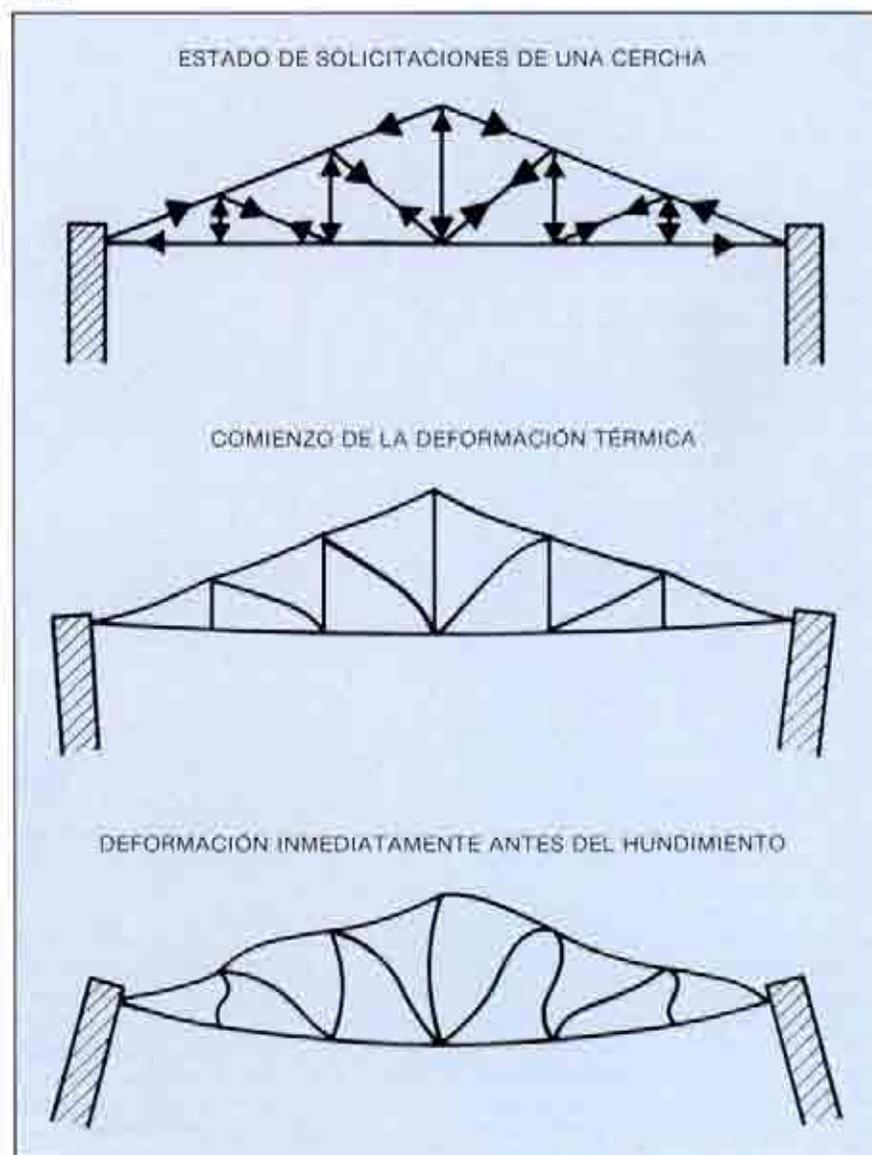
— La masa de la pieza o, mejor dicho, su relación volumen/superficie expuesta al fuego.

— La presencia de pantallas que aseguren la protección del acero frente a las elevaciones de temperatura (el hormigón de recubrimiento forma una pantalla natural). Habría que utilizar recubrimientos de un espesor tal que las armaduras permanecieran por debajo de una temperatura crítica.

El hormigón armado

El comportamiento al fuego del hormigón en masa es función de su cons-

FIGURA 10. Efectos de fuego en cerchas de acero. Procedencia: Tomado de la Ref. 8.



del hormigón es gris y no hay cambios apreciables. De 300 a 600° C el color cambia a rosa o rojo, permaneciendo el hormigón prácticamente sano. Entre 600 y 900° C el color cambia a un gris con partículas rojas que indican desmenuzamiento con alta succión de agua. De 900 a 1.200° C el color cambia a amarillento, indicando que el hormigón está sintetizado y se desmenuza, presentando una gran pérdida de resistencia; el hormigón se vuelve blando.

A favor del comportamiento del hormigón frente al fuego cuenta que la mezcla cemento-árido tiene una conductividad térmica baja, de aquí que el calentamiento afecte sólo a las capas externas y hasta una profundidad de 50 a 100 mm (Fig. 12). Esto causa agrietamientos superficiales, seguidos de descascarillamientos, que pueden ser importantes, llegando a dejar al aire las armaduras que quedarán expuestas al calor y al fuego.

El acero, al quedar expuesto al calor, se dilata, su límite elástico disminuye y, simultáneamente, su tensión de rotura, pudiéndose dar el caso de producirse roturas a temperaturas de unos 500° C, dependiendo del tipo de acero.

Las barras de acero, especialmente en pilares, al dilatarse y quedar sujetas al hormigón por los estribos se curvan entre ellas. Este efecto hace que los desprendimientos en las zonas de recubrimiento sean importantes. En el caso de forjados, sometidos a la acción del fuego en su cara inferior, se producen dilataciones en esa cara que dan lugar a que el forjado se curve y se desprendan las bovedillas.

La adherencia acero-hormigón también disminuye como consecuencia de los diferentes coeficientes de dilatación de los dos materiales, produciéndose, por tanto, desprendimientos en el recubrimiento. La combinación de esos efectos hace que a temperaturas de 600 a 800° C pueden darse casos en que el elemento estructural haya perdido hasta un 50 por 100 de su resistencia.

Considerando aisladamente los materiales hormigón y acero, y a la vista de la experiencia recogida en ensayos realizados sobre probetas sometidas a altas temperaturas, podemos ver que el comportamiento de los materiales frente al fuego es totalmente diferente.

En la figura 13 puede verse la pérdida de resistencia del hormigón con la temperatura. Observamos que hasta los 200° C apenas si hay pérdida de resistencia a la compresión, pero a partir de los 300° C ya empieza a

FIGURA 11. Relación entre la temperatura sufrida, el color alcanzado y la resistencia residual del hormigón afectado por el fuego.

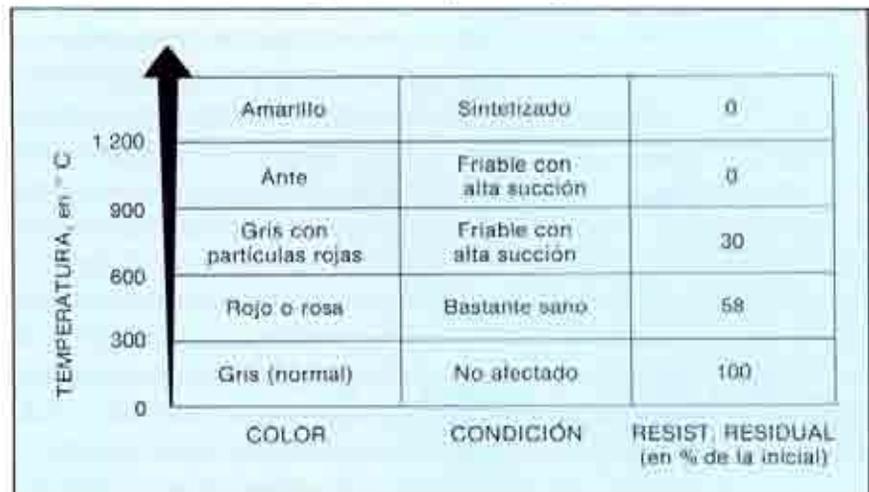
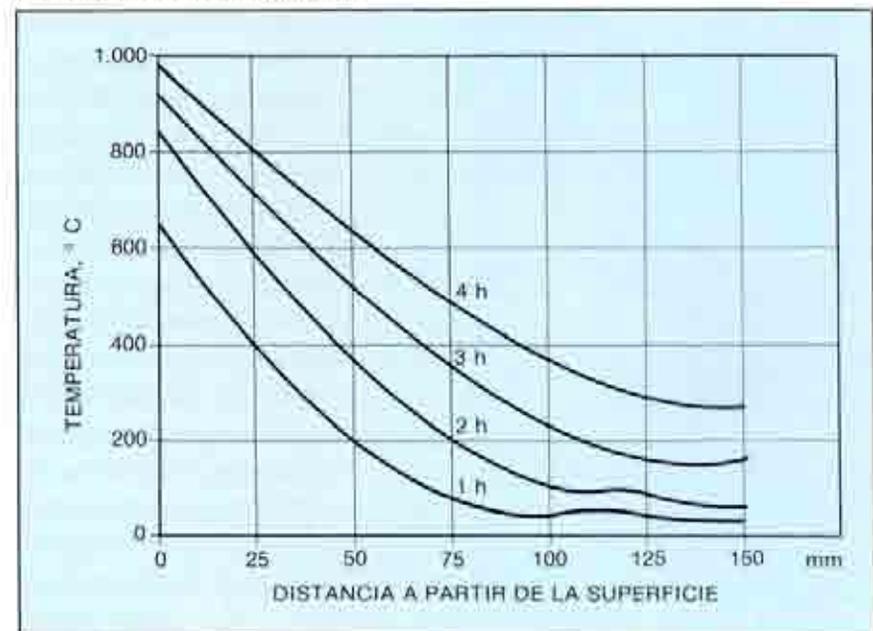


FIGURA 12. Gradientes de temperatura en columnas de hormigón correspondientes a varios tiempos a partir de la iniciación de un ensayo de acuerdo con la curva normalizada.



notarse, y por encima de esa temperatura el decrecimiento va totalmente en aumento.

Las distintas coloraciones a las que antes nos habíamos referido también se ha observado en los ensayos de laboratorio.

Hay que tener en cuenta que los cambios descritos son permanentes, y las observaciones también pueden producirse transcurrido un cierto tiempo; sin embargo, si la estructura ha estado sometida a temperaturas superiores a los 600° C y después a la acción del agua, la coloración puede cambiar e incluso inducirnos a error.

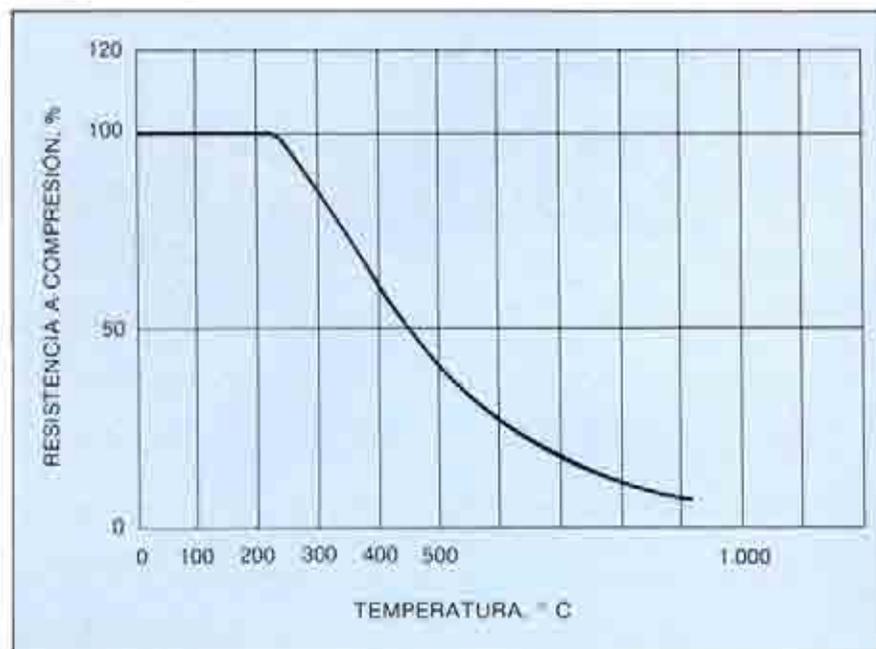
AYUDAS A LA INVESTIGACIÓN

Como resumen de lo expuesto anteriormente, en la figura 14 puede observarse una tarjeta titulada "Ayuda a la investigación de incendios" y que ha preparado el Servicio de Incendios del Gran Manchester (GB).

La tarjeta está dividida en cuatro partes:

1. **Preserve el lugar.** Se quiere llamar la atención sobre la importancia de no mover o alterar los restos antes de que se efectúe la investigación, anotando la posición de los heridos, si las puertas y ventanas estaban abiertas o cerradas y si se han pro-

FIGURA 13. Influencia de la temperatura sobre la resistencia a compresión del hormigón. Tomado de: FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. *Patología y terapéutica del hormigón armado*. Ed. DOSSAT. 1977.



ducido fallecimientos esperar, sin mover los cuerpos, a que la autoridad judicial levante los cadáveres.

2. **Testigos.** Se refiere al tipo de preguntas que se efectuarán a los testigos para permitir al investigador re-

FIGURA 14. Tarjeta de ayuda a la investigación. Procedencia: Servicio de Incendios del Gran Manchester (GB).

AYUDA PARA LA INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS

1. Preserve el lugar
 No mueva o altere los restos pendientes de investigar.
 Si hay víctimas mortales espere al levantamiento o al juez.
 Tome croquis, o fotografías, si algo debe ser movido.
 Examine la zona o habitación donde se ha originado.
 Anote la posición de ventanas y puertas: cerradas/abiertas.

2. Declaraciones

Sucesos antes del descubrimiento: ↓ TIEMPO ↓ Situación en el descubrimiento: ↓ TIEMPO ↓ Situación en la llegada	Preguntas ¿Cómo? ¿Qué? ¿Por qué? ¿Cuándo? ¿Dónde? ¿Quién?
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

3. Desarrollo

	Carpintería	Acristalamientos	Revocos
Lento	grietas uniformes	agrietados y manchados	adherido
Rápido	grietas profundas y resquebrajaduras	rotura clara	desprendido de la pared*

* Si los ladrillos expuestos no están ennegrecidos es probable que el revoco manchado haya sido limpiado por los chorros de agua.

4. Situación del fuego

EN LA CARPINTERÍA - GRADO DE CARBONIZACIÓN POR HUMO Y CALOR - NIVELES DE MANCHAS EN LA PINTURA - GRADO DE AMPOLLADO EN LOS CRISTALES - SEVERIDAD DE LAS ROTURAS	PUNTO DE ORIGEN
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------

construir el escenario de los hechos antes del descubrimiento, en el momento del descubrimiento y durante la llegada de los equipos de socorro.

3-4 **Desarrollo y situación.** Estos apartados quieren demostrar que, estudiando los materiales básicos afectados por el incendio, así como el grado de quemado, es posible identificar el foco originario.

Las ventajas de esta tarjeta son las de muestra al investigador, en los momentos iniciales en los que suele producirse el desconcierto (es el tiempo de la frase, ¿por dónde empezamos?), un camino, una sistemática eficaz y sencilla, que puede ampliarse enormemente con los resultados de los análisis de los restos de materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- LABRADOR, J.: *Investigación de cables eléctricos*. Seguritecna, marzo 1987.
- TUCKER, D. M., y READ, R. E. H.: *An assessment of structures following damage from fire*. Fire, marzo 1982.
- Manual of Investigation of Fires of Electrical Origin*, Manual NFPA 907 M.
- ORTEGA, S.: *Investigación sobre siniestros de incendios*. Seguritecna, diciembre 1987 y enero 1988.
- J. L. ALFONSO, J. L.: *La investigación de fuegos fatales*. Fuego 75, abril 1987.
- PERADEJORDI, J.: «Comportamiento de los productos químicos ignífugantes sobre los textiles utilizados en el hábitat», *Revista MAPFRE Seguridad*, n.º 3, 1981.
- VELEZ, R.: *La madera y su resistencia al fuego*. AITIM, 1968.
- RIFÀ, E.: «Protección de elementos estructurales contra el fuego», *ALARMA*, n.º 261.
- DE LA ROSA, T.: «Estimación de la resistencia al fuego de elementos de estructuras metálicas, como complemento de la norma UNE 23-093», *Boletín de la Normalización Española*. Enero y febrero 1980.
- ELVIRA, L. M., y JIMÉNEZ, F. J.: «Comportamiento al fuego de materiales y estructuras», *Monografías del INIA*, 1982.
- MORLEY, P. D., y ROYLES, R.: «The influence of High Temperature on the Bond of Reinforced Concrete», *Fire Safety Journal*, 2 (1979/1980).
- PHILLIPPS, C., y MCFADDEN, D.: *Investigación del origen y causa de los incendios*. Editorial MAPFRE, 1984.