

Algo más sobre el comportamiento de las estructuras frente al fuego

F. Mañà (O.C.E.)

La protección contra incendios ha sido dirigida, a nivel de estudio de los casos acaecidos, primero, y de la consiguiente normativa, después, a soslayar los primeros momentos de la aparición del suceso. Los sistemas de detección y de extinción automática, en primer lugar, la evacuación de los usuarios y la extinción con medios propios del usuario después y, por último, la protección y el aislamiento de las áreas más imprescindibles del edificio, son los capítulos que van abordando las diferentes normas (en España la NTE-IPF).

Si el incendio tiene una duración considerable, más de 3 horas, se tiene muy poco conocimiento sobre la permanencia de los aislamientos, sobre las importantes deformaciones que sufren los elementos estructurales y, en resumen, sobre la seguridad de la estructura en el momento en que están actuando los miembros del Servicio de Extinción de Incendios, circunstancia que tiene que ser observada a partir de su especial idiosincrasia y que intentaremos abordar más adelante.

Otra cuestión de gran interés para los profesionales de la construcción es la de poder evaluar el estado de deterioro de los materiales estructurales de cara a su posible reutilización, sea por modificaciones en su calidad, sea por presentarse una aceleración en su proceso de envejecimiento (abordable a partir de criterios de durabilidad).

El estudio con detalle de todos estos aspectos sobrepasa con mucho los propósitos de un simple artículo. Un desarrollo extenso sobre el tema podría ser una excelente tesis doctoral que brindo a quien tenga ganas para ello, aquí nos limitaremos a realizar una pequeña labor de síntesis de todos aquellos datos que hemos ido acumulando con el tiempo, extraídos de visitas realizadas sobre los restos de los más importantes incendios acaecidos en la zona.

Los accidentes que sufren los bomberos en su actuación pueden provenir de una de las siguientes causas:

- 1.— intoxicación por humo;
- 2.— explosión de parte de los sistemas energéticos del edificio o de materias almacenadas;
- 3.— cedimiento brusco de elementos estructurales o de cerramientos.

El primero es, sin lugar a dudas, el que ha causado más muertes. Hay cantidad de materiales almacenados que producen en su combustión gases letales (no ya como desalojadores de oxígeno, sino como creadores de un ambiente corrosivo que ataca a los tejidos del sistema respiratorio). Las materias más peculiares en este aspecto son: Los compuestos de cloro (cloruro de polivinilo) y los acrílicos. Dado que los plásticos ya no son unos materiales «sustitutivos» sino que forman parte de gran cantidad de útiles y tejidos del consumo habitual, se encuentran almacenados en volúmenes considerables en cualquier industria importante y es por ello que cada día alcanza más relevancia este peligro potencial.

No es un tema que debamos tratar a fondo por no ser de nuestra especialidad, pero por su importancia me he atrevido a mencionar. El segundo: la desconexión preventiva de todos los sistemas energéticos pone fuera de juego los sistemas automáticos del edificio, lo cual puede ser a causa de accidentes en construcciones singularmente automatizadas, en las que las circulaciones se vean colapsadas por este motivo. En general, y en la actualidad no es una fuente grave de accidentes durante los trabajos de extinción de incendios. En el caso de materiales almacenados potencialmente explosivos, los bomberos se mueven dentro de un ámbito de gran riesgo pero conocido, lo cual le quita interés para seguir tratando el tema.

Las caídas instantáneas de elementos estructurales, acaecidas sin grandes deformaciones que avisen de la proximidad del colapso, se suelen producir, en elementos de hormigón armado, por:

- 1.— Solicitaciones a flexión en piezas dotadas de cuantías bajas, lo cual nos lleva a desconfiar de todos aquellos elementos estructurales que tienen un canto desmesurado respecto a la luz que cubren y la sobrecarga que soportan.

La cierta contradicción aparente, difícil de intuir, subsidiaria de este criterio, puede ser la causa de que se produzcan daños al poner confianza en los elementos, aparentemente, más resistentes por su mayor volumen.

2.— Solicitaciones a compresión de elementos deteriorados por el fuego y/o sobrecargados instantáneamente. Este efecto tiene especial relevancia cuando se trata de piezas esbeltas a las que a su pérdida de resistencia se les suma una disminución del módulo de elasticidad, lo cual reduce de forma importante la carga crítica de pandeo y motiva que este conocido fenómeno de inestabilidad tansversal se presente de golpe. Lo citado tiene en las piezas metálicas mucho más interés por su mayor probabilidad de presentarse.

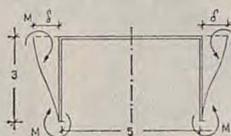
3.— En piezas solicitadas por esfuerzos cortantes de importancia, sea por la aparición instantánea de sobrecargas gravitatorias (caída de elementos superiores), sea por efecto de sobrecargas térmicas provenientes de la dilatación de los dinteles bajo el efecto del fuego.

En este último caso es notablemente anómalo el comportamiento de los sistemas estructurales continuos, sean láminas, plegaduras o, lo más habitual, losas, macizas o aligeradas, soportadas por pilares.

A. Coín, en su artículo «Incidencias sobre el cálculo de obras resistentes al fuego» (aparecidos en un número de la revista *Annales*) anota que los techos sometidos 2 horas a una temperatura de 350° dilatan 3,5 mm/metro, especificando que «existe una clara dificultad en determinar sobre qué longitud se aplica la temperatura, lo cual es función de las sustancias almacenadas y de su disposición en las plantas». En viviendas propone la adopción de 10 m.

En este último supuesto, la deformación horizontal de un segmento de 10 m de longitud de un techo podría llegar a ser de 35 mm, y no es difícil intuir que esta importante deformación motivaría sobre los pilares grandes esfuerzos de flexión. A fin de tener un orden de valor de estos esfuerzos, vamos a desarrollar un ejemplo:

Si los pilares limitaran un vano de 5 m, tuvieran una altura de 3 m y una sección de 0,4 × 0,4 m:



La deformación δ , medida en la cabeza de uno de ellos sería:

$$\delta = 3,5 \frac{5}{2} = 0,875 \text{ cm.}$$

Los momentos locales ocasionados:

$$M = \frac{6 \cdot 210.000 \cdot 213.333}{300^2} \cdot 0,875 = 2.613.329 \text{ kg. cm.}$$

$$M = 26,13 \text{ T} \cdot \text{m.}$$

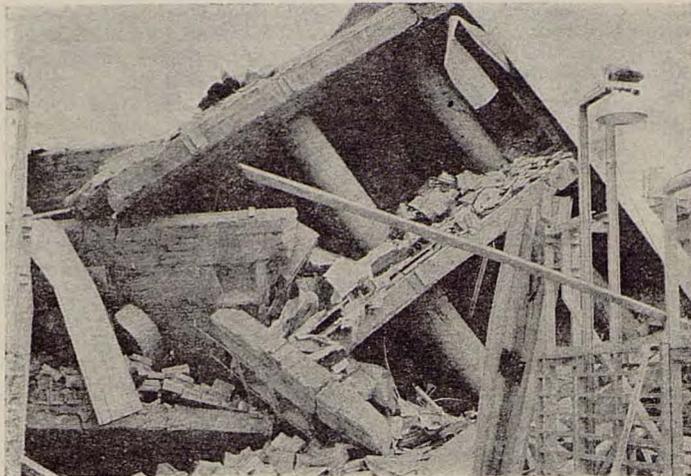
Y los esfuerzos cortantes

$$T = \frac{2 \cdot 26,13}{3} = 17,42 \text{ T.}$$

Ambos esfuerzos, a parte de tener unas cuantías muy considerables respecto a la sección de las piezas, proceden de un desplazamiento rápido. Las piezas sobrecargadas tienen pocas probabilidades de movilizar cierto reacondicionamiento de tipo plástico, y en consecuencia el colapso del elemento se puede presentar instantáneamente.

Si se tiene en cuenta esto, las fotografías de los resultados de un incendio acaecido en la localidad de Badalona dan que meditar sobre el comportamiento de las estructuras reticulares frente al fuego (fots. 1, 2, 3, 4, 5 y 6).

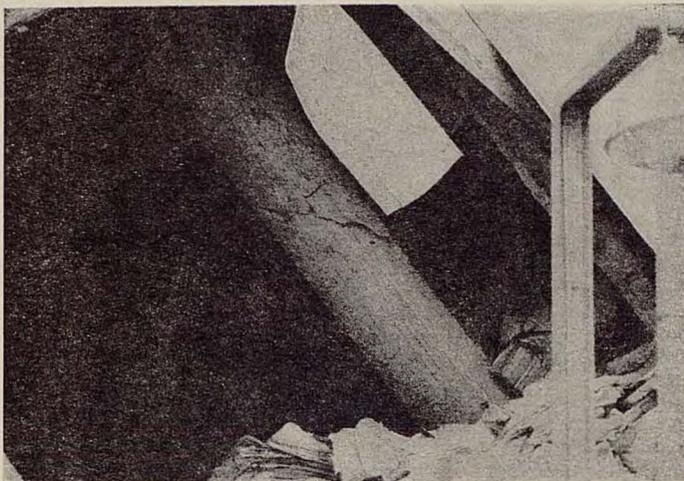
En los casos en que el sistema es menos hiperestático, debido, en general, a que las vigas están simplemente apoyadas sobre los pórticos y no se han dispuesto armaduras superiores de continuidad, los techos presentan una mayor capacidad de deformarse perpendicularmente a su plano (por relajamiento de la armadura inferior), introduciendo sobre los pilares empujes mucho menores que en el caso de los techos continuos, antes citados. Al producirse el relajamiento mencionado sin sobrecargar exageradamente a los pilares, los miembros del servicio de extinción tienen tiempo para protegerse de una posible caída. El caso más curioso del que tenemos noticia es el del reciente in-



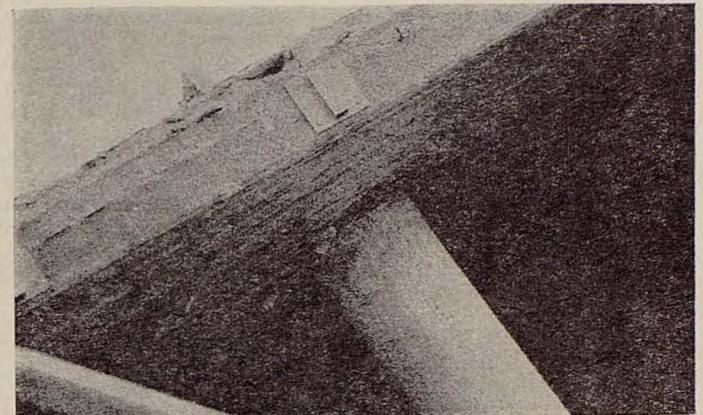
1. Vuelco general del edificio al colapsar uno o varios pilares.



4. Otra vista del pilar de la fotografía anterior.



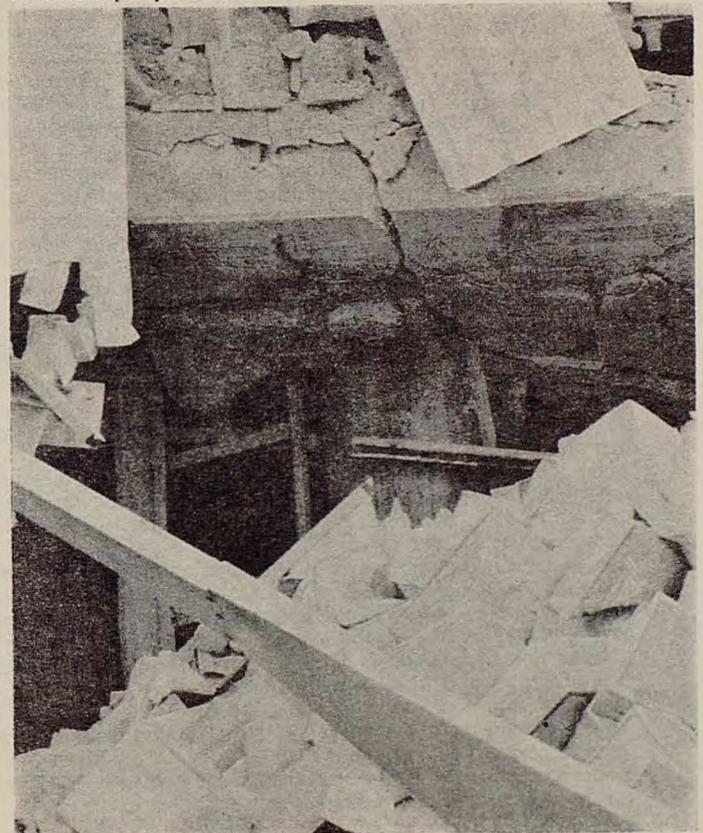
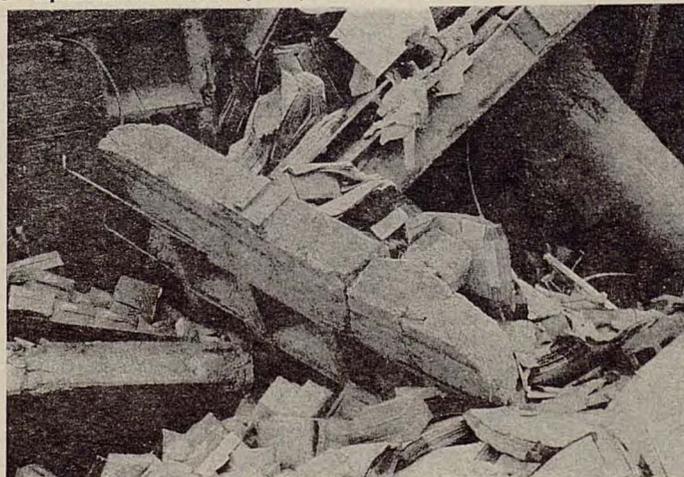
2. Grieta de cortante producida por los empujes del techo dilatado o por la caída.

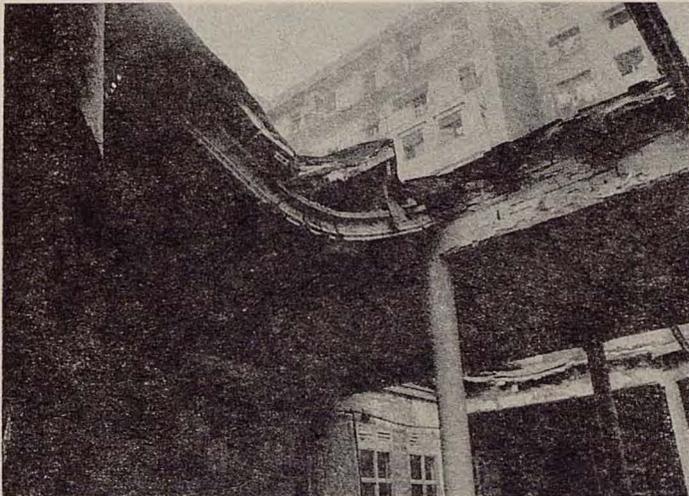


5. Rotura por punzonamiento.

6. Rotura por punzonamiento.

3. Aplastamiento de un pilar por flexocompresión.





7 y 8. Grandes flechas sin colapso al deformarse libremente.

endio de la «NATIONAL», en donde, como se puede observar en las fotografías 7, 8 y 9, los techos llegaron a deformarse tanto que es imposible imaginar que estén contruidos a partir de viguetas de hormigón armado y bovedillas a la catalana. En el caso de estructuras metálicas, las caídas instantáneas no están tan claras como en el caso de tratarse de un material tan rígido como es el hormigón.

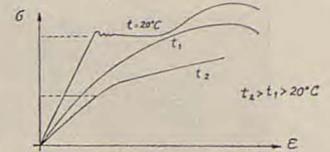
Las sobresolicitaciones producen en los elementos metálicos grandes deformaciones que «avisan» de su próximo (no inmediato) cedimiento. No obstante, son éstos precisamente los que —si nos basamos en la estadística— más daño han causado por sus anómalas caídas.

Ya de hace muchos años esta circunstancia ha sido explicada a través de la pérdida de resistencia que los metales presentan frente al fuego, y en líneas generales estoy de acuerdo con ello, pero se han olvidado cuestiones de detalle que pueden llegar a ser tan importantes o más que la simple pérdida de resistencia. Para entrar en el tema veamos primero qué variaciones experimentan las constantes mecánicas de un acero frente al fuego. P. Arnault en su artículo «Comportamiento de los aceros sometidos a temperaturas elevadas en las estructuras de hormigón» nos proporciona los siguientes datos:

Los diagramas tensión-deformación del acero se redondean en función de la temperatura y los valores del límite convencional (remanente de un 2 %) de elasticidad y del módulo de deformación bajan. Además, se demuestra que la variación del módulo de deformación es función del nivel de tensión.

Una secuencia de diagramas tensión-deformación realizados so-

bre un mismo acero natural a distintas temperaturas, da lugar al siguiente esquema:



La siguiente tabla, obtenida del mismo artículo, nos proporciona la variación de las constantes: resistencia, módulo de elasticidad, límite elástico aparente y alargamiento en la rotura, en función de la temperatura. (Expresando su variación en % sobre los valores obtenidos a temperatura de cero grados).

Temperatura °C	Resistencia a la tracción		Módulo de elasticidad		Límite elástico		Alargamiento %
	Kg/cm ²	%	T/cm ²	%	Kg/cm ²	%	
0	4200	100	2000	100	2600	100	23
100	3800	91	2000	100	2300	88	16
200	4500	107	1940	97	2000	77	16
250	4800	114	1840	92	1800	69	20
300	4500	107	1750	87	1700	66	27
350	3900	93	1700	85	1500	58	32
400	3000	71	1680	84	1250	48	38
450	2000	48	1460	73	950	36	41
500	1300	31	1300	65	700	27	45
600	700	16	1100	55	0	0	50

deformación aparente del 0,2 %

En ella se puede observar que hacia los 450°, la resistencia es del orden del 50 % de la inicial (se constata, además, un fenómeno no tan conocido, el de que la resistencia a 250 es mayor que la resistencia a 0°) y también que el módulo de elasticidad aparente ha bajado, a esta misma temperatura, a un 73 % del inicial.

No cabe duda que es mucho más espectacular la pérdida de resistencia a la tracción que la modificación del módulo de elasticidad; sin embargo, mientras que lo primero no nos justifica caídas instantáneas, lo segundo sí, a través del motivo que vamos a comentar.

En elementos metálicos, y fuera del ámbito de los incendios, suelen presentarse caídas bruscas cuando las piezas o las estructuras carecen de seguridad suficiente en su estabilidad transversal. En las primeras, cuando en elementos comprimidos se presenta el fenómeno del pandeo (sea un pilar, sea el cordón comprimido de una jácena), en las segundas cuando faltan elementos de arriostramiento durante las operaciones de montaje. En las fotografías 10 y 11 puede observarse como un perfil, bajo carga gravitatoria, ha caído, al desplazarse la aleta comprimida del plano que la contenía.

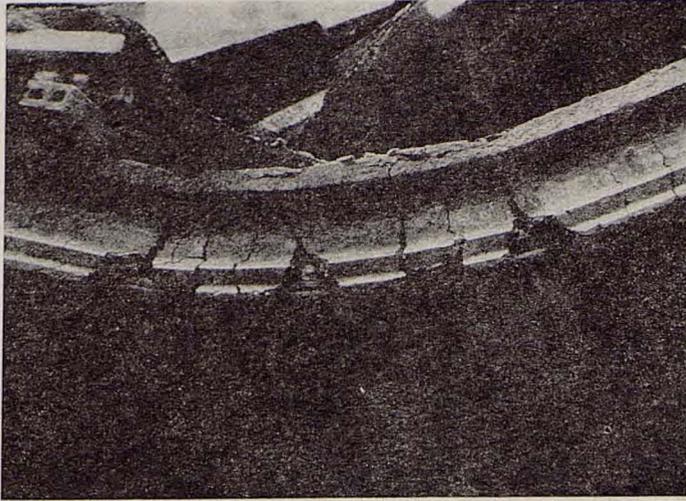
Recordemos algunos conceptos de pandeo:

«En piezas prismáticas rectas, bajo la acción de cargas matemáticamente axiales de compresión, «P», se verifica lo siguiente: mientras la carga permanezca por debajo de un determinado valor «Pki», la barra conserva su forma recta, siendo su equilibrio estable. Cuando $P > Pki$ la pieza se deforma transversalmente de tal manera que a pequeños incrementos de «P» se producen recorridos importantes que aumentan considerablemente las tensiones, al originarse, sobre las secciones transversales, sollicitaciones de flexo-compresión. En la práctica la carga de rotura casi coincide con «Pki».

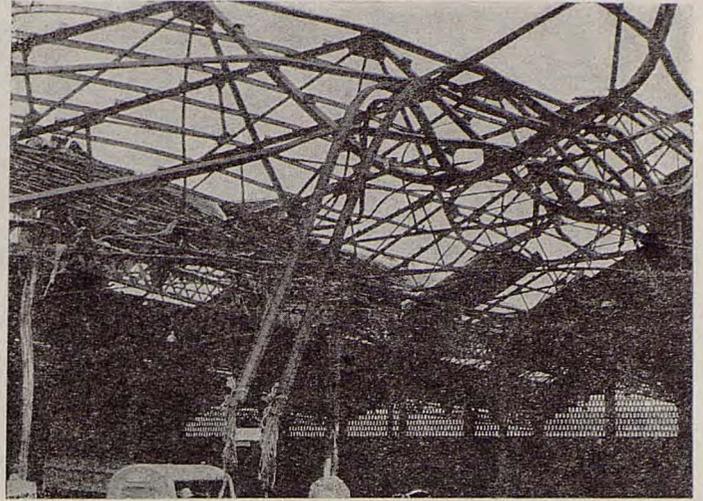
La expresión más simple de «Pki», la da Euler, con la siguiente expresión:

$$Pki = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

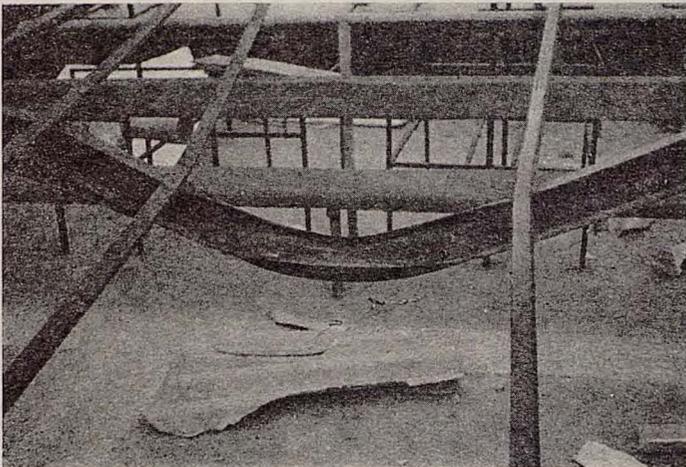
Cualquier pieza sometida al efecto del fuego presenta una caída considerable en el módulo de deformación. Si se trata de una pieza esbelta en la cual P estaba próxima a Pki se puede presentar el pandeo por causa de la disminución de Pki, pues ésta varía, linealmente con E, tal como se aprecia en la expresión antes indicada.



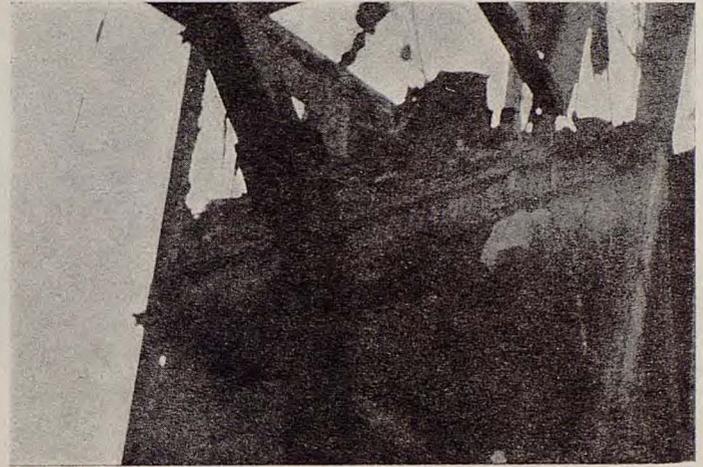
9.



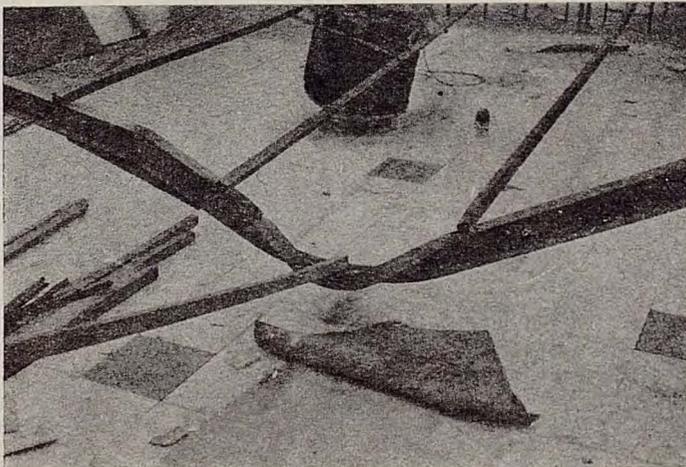
12.



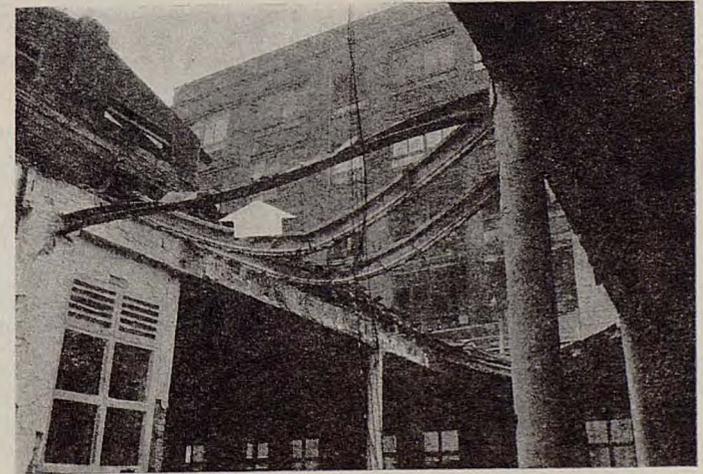
10.



13.



11.



14.

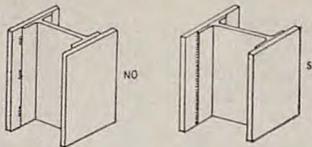
Los elementos estructurales metálicos más propensos a colapsar en presencia del fuego son aquellos para los que se admite una mayor esbeltez en su diseño, son:

- 1.—Cordones comprimidos de cerchas (fot. 12 pandeo de los pares en tinglado del muelle).
- 2.—Platabandas o perfiles delgados asociados por soldadura discontinua constituyendo un perfil compuesto. 13 (Incendio Iberia Radio).
- 3.—Aletas comprimidas de jácenas esbeltas. (Incendio NATIONAL).

Sobre este fenómeno debemos precisar que frente al fuego se produce una plastificación de las uniones de las barras. En el caso de encontrarse en situación de continuidad, sabemos que la carga crítica de pandeo es mayor que en el caso de piezas biarticuladas, pues bien, las primeras al calentarse tienden a comportarse como las segundas y por lo tanto P_{ki} también puede verse disminuida sensiblemente por esta causa.

De todo lo dicho se me ocurren dos propuestas: una, que los Municipios tengan más información sobre las características de las estructuras que se edifican (todos sabemos que hoy en día los «proyectos administrativos» sólo contienen aspectos formales y funcionales) y que esta información sea trasladada al servicio de Bomberos; otra, aplicar unos nuevos y mayores coeficientes de seguridad según los distintos tipos estructurales y que nos llevarían, sin lugar a dudas, a incrementar secciones y en el fondo a aumentar el costo de las estructuras. La última propuesta es la de «siempre», con la cual cada nuevo aspecto que contemplamos nos hace tender hacia la adopción de estructuras más macizas y caras (temo que con nuestros miedos acabemos descubriendo la pirámide o la cueva) vamos a ser originales por una vez, demos como válida la primera de las propuestas y establezcamos unos simples criterios, que por lo menos tendrán la virtud de atenuar caídas parecidas a alguno de los casos que hemos contemplado:

- 1.º—Que los edificios resueltos con losa continua (maciza o aligerada), dispuesta sobre pilares o sobre un sistema de pilares y jácenas, tengan una comprobación adicional realizada sobre la estructura por la cual los pilares admitan, sin colapsar (pero con cualquier grado de fisuración) los desplazamientos que puedan imponer los techos inmediatos al ser calentados hasta 500°. Sólo en edificios industriales y en las zonas de almacenaje que superen los 50 m² en planta.
- 2.º—Que los pilares compuestos de perfiles laminados y platabandas se sujeten a través de cordones continuos de soldadura.



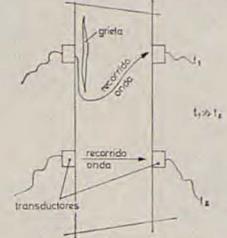
- 3.º—Que, a poder ser, los pares y diagonales a compresión de cerchas planas sean de hormigón o bien perfiles hormigonados a fin de disminuir su esbeltez (protección adicional al aislamiento térmico que ello les proporciona).

Otra cuestión que se nos ha planteado en más de una ocasión es la de la oportunidad de reutilizar los elementos afectados por el fuego.

Desde el punto de vista del mantenimiento de los parámetros mecánicos (resistencia, límite elástico, módulo de deformación y deformación en la rotura) es posible obtener opinión a base de ensayar testigos extraídos de los constituyentes de la estructura.

No presenta dificultad alguna tallar un testigo de hormigón, inspeccionar sobre el mismo el espesor de material afectado por el fuego, y proceder a su ensayo a la compresión. Prevenimos al lector de que no es oportuna para este menester la utilización de ninguno de los sistemas no destructivos en uso. El esclerómetro sólo daría información de una superficie tostada no representativa de la masa de hormigón y el «ultrasonido» nos daría lecturas de «tiempos» excesivamente elevados y dis-

pares, entre medidas consecutivas, al presentarse descascarillamientos próximos a la superficie, no visibles, producidos por choques térmicos durante el incendio.

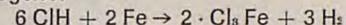


En el caso del acero pueden presentarse modificaciones importantes en su estructura cristalina que deriven en cierta fragilización del mismo (aparición de la rotura por tracción sin relajamiento), aunque en general no se reduce el valor del límite elástico. En el caso de aceros especiales con solicitaciones importantes es necesario proceder a un análisis químico y radiográfico de muestras levantadas «in situ» para deducir posibles modificaciones en su composición y estructura que rebajaran sus constantes mecánicas a niveles inaceptables.

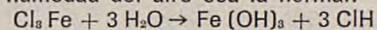
Desde mi punto de vista, tema más preocupante que el de las posibles pérdidas de resistencia es el de la durabilidad de los materiales que han soportado el incendio. Sobre este aspecto no he podido encontrar información suficiente como para poder ilustrar un vasto campo dentro del tema de las estructuras, no obstante existe una cuestión que creo dotada de gran interés: «Al arder algunas materias se originan óxidos (o ácidos) que combinados con el agua dan lugar a ácidos de elevada concentración que tras entumecer los materiales estructurales promueven su destrucción lenta».

Uno de ellos, quizás el más importante, es el cloruro de polivinilo. Sustancia extensamente empleada en la industria y por lo tanto objeto de grandes almacenamientos. Contiene de un 30 a un 40 % de cloro y es muy inestable a elevadas temperaturas, produciéndose ácido clorhídrico en presencia del agua de extinción. El agua ácida baña a los materiales estructurales y es causa de importantes alteraciones en los aceros de perfilera o en los redondos de armado del hormigón.

«El hierro en presencia del oxígeno del aire y del ácido clorhídrico se transforma en tricloruro férrico, liberándose simultáneamente hidrógeno:



El tricloruro es higroscópico y se disgrega mediante hidrólisis aún cuando la humedad del aire sea la normal:



En donde se demuestra claramente que se libera constantemente ácido clorhídrico para proseguir la corrosión. El hidróxido de hierro no se adhiere fijamente al metal sano, tiende a desprenderse en forma de polvo o de lascas. Nos encontramos frente a un fenómeno de oxidación expansiva (corrosión) que no termina hasta que no se ha transformado todo el hierro elemental.

Debe quedar claro que este fenómeno tanto se puede producir sobre un acero desnudo, como sobre otro que esté embebido dentro de una obra de fábrica (ladrillo u hormigón) que haya sido impregnada por el ClH. En el caso del hormigón pretensado por lo delgado del revestimiento de las barras y por la gran superficie que éstas ofrecen a la oxidación (la sección de hierro se logra a partir de muchos redondos de pequeño diámetro con una superficie lateral muy extensa) es realmente una cuestión grave que nos puede llevar a desechar todas las vigas en las que un análisis químico detecte o ClH o un pH bajo (si somos prudentes, con piezas de hormigón armado deberíamos reaccionar igual).

No quiero ni puedo cerrar este artículo mediante unas conclusiones finales, todo él ha sido un análisis más bien deslabazado de una serie de cuestiones sobre los incendios que no habían sido abordados unitariamente en la literatura. El tema debe quedar abierto a fin de que podamos ir aportando en lo sucesivo aspectos de los que tengamos noticia o de los que por nuestra cuenta hayamos alcanzado criterios que puedan ser de utilidad práctica.

F. M. (O.C.E.)