



Justo Adámez

■ Gerente de Ashes Fire Consulting, S.A.



Manuel Lloret

Director Técnico de Ashes Fire Consulting, S.A. ■

Fundamentos del diseño de estructuras en situación de incendio

Introducción

Las condiciones de seguridad contra incendios en una construcción, ya sea un edificio, una nave de logística o una industria debe cumplir los requisitos y las exigencias básicas establecidas en la normativa de aplicación.

Centrándonos en la seguridad estructural, el requisito básico consiste en asegurar que la construcción tiene un comportamiento estructural adecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su construcción y uso previsto.

Para satisfacer este objetivo se han de cumplir los valores de resistencia estructural al incendio indicados en la normativa correspondiente, de tal manera que la estructura portante mantenga su resistencia al fuego durante un tiempo que permita cumplir los requisitos básicos de seguridad contra incendios.

Ante este escenario, muchos profesionales se hacen con frecuencia el siguiente tipo de preguntas:

¿Es suficiente la estabilidad al fuego requerida por la normativa para un tipo de construcción y uso determinado?

¿No es exagerada la estabilidad al fuego requerida por la normativa para un tipo de construcción y uso determinado?

¿Se pueden reducir los valores de estabilidad al fuego de una estructura indicados en las tablas de la normativa para un caso concreto?

Soluciones alternativas

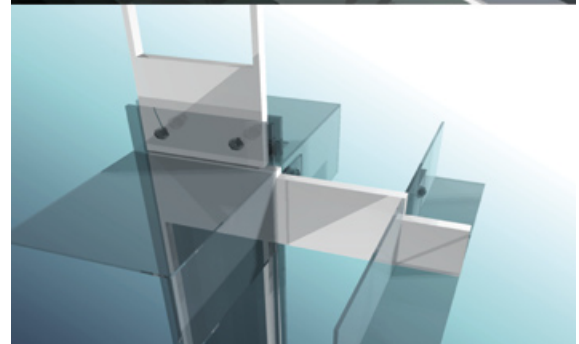
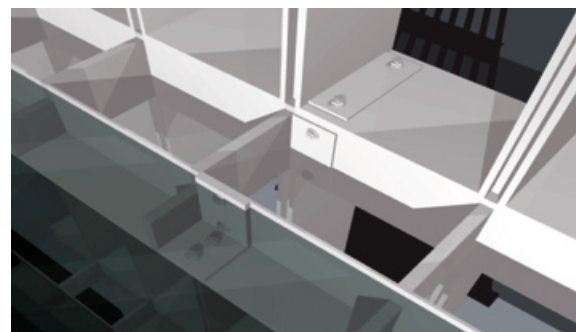
La respuesta a estos interrogantes, en muchos casos, es positiva y, para ello, pueden estudiarse soluciones alternativas cuando se den algunas de las siguientes premisas:

a) Está justificado por la singularidad de la construcción, como puede ser el caso de estructura de grandes atrios, estructuras exteriores o adosadas a fachadas, etc.

- b) Dificultad técnica de aplicación de medidas de protección a la estructura: pinturas, morteros protección con paneles para alcanzar un determinado tiempo de estabilidad al fuego.
- c) Coste económico no asumible.
- d) Como parte del diseño integral del conjunto de medidas de seguridad contra incendios de activa y pasiva, desarrollado en base a un análisis por prestaciones.

El aumento de la temperatura sobre la estructura de un edificio donde se esté produciendo un incendio afecta a la misma de la siguiente forma:

- ✓ Por un lado, los materiales de la estructura ven afectadas sus propiedades, modificándose de forma importante su capacidad mecánica.
- ✓ Por otro, aparecen acciones indirectas como consecuencia de las deformaciones de los elementos. Estas acciones indirectas dan lugar a tensiones que se suman a las ya existentes debidas a las acciones permanentes y accidentales existentes.



Para determinar o conocer los valores de estabilidad al fuego necesarios para un caso puntual es necesario un análisis técnico integral de ingeniería de incendios que incluya el uso de métodos avanzados de cálculo y simulación computacional, tales como

- ✓ Simulación computacional de desarrollo de incendio en el escenario considerado.
- ✓ Simulación computacional del comportamiento de la estructura sometida a la carga del incendio, cuyos datos de entrada serán las cargas a temperatura ambiente (cálculos de la estructura) y los datos obtenidos de la simulación del incendio en cuanto a la curva real del incendio (curva tiempo temperatura de desarrollo del incendio en dicho escenario).
- ✓ En ocasiones puede ser necesario para la validación de los valores obtenidos, realizar una simulación virtual de evacuación para conocer los tiempos de evacuación disponibles, tiempo necesario, etc.

Modelos avanzados

El uso de modelos avanzados, tanto de incendios como de estructuras, van a permitir determinar, normalmente, valores inferiores a los prescriptivos, lo cual tendrá un impacto importantísimo en los costes de ejecución y de mantenimiento de la construcción, así como en los aspectos estéticos del mismo, libertad de diseño arquitectónico, etc....

Este tipo de estudios indican también qué tipo de sistema sería el más conveniente desde el punto de vista técnico-económico para alcanzar los requerimientos de protección, teniendo además en cuenta las limitaciones existentes por motivos económicos, técnicos de aplicación-instalación, estéticos, etc.

El desarrollo de esta metodología se hace teniendo en cuenta aspectos relevantes del cálculo estructural en caso de incendio que favorecen la optimización de la protección estructural respecto del análisis de tipo prescriptivo (normativo).

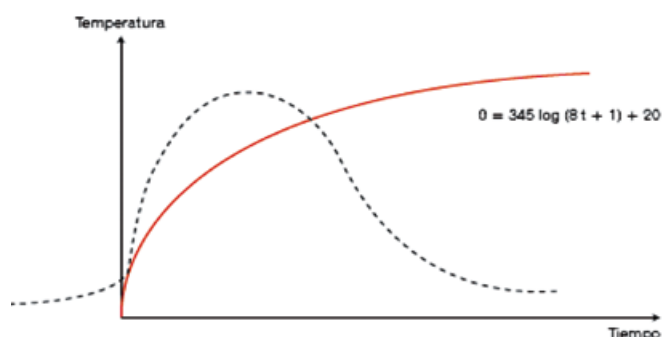
En particular se consideran:

- ✓ Los efectos térmicos procedentes de un incendio real, en lugar de basarse en los datos de la curva de incendio ISO o estándar. En estos estudios avanzados se tiene en cuenta el factor de ventilación real del recinto y el tiempo completo del incendio desde su inicio hasta la combustión completa de todos los materiales combustibles presentes en el sector de incendios
- ✓ El análisis de subestructuras del edificio, a diferencia del análisis de elementos individuales. Está demos-

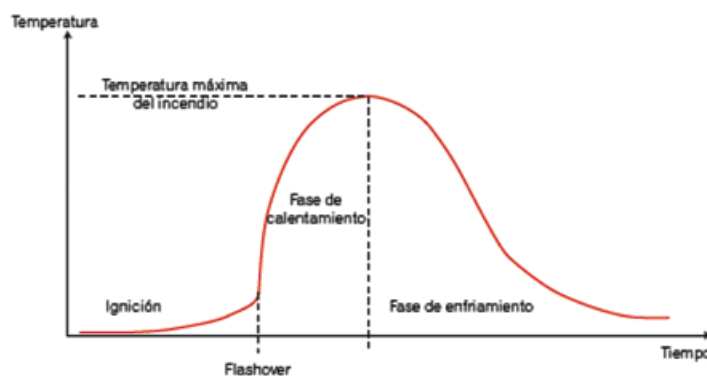
trado con ensayos de incendios a escala real que la interacción entre elementos mejora el comportamiento mecánico individual de cada uno ellos.

- ✓ Consideración de los elementos que cuentan con reserva de resistencia en el cálculo estructural a temperatura ambiente.

Por otra parte, desde el punto de vista normativo, la mayoría de los casos suelen estar contemplados en los eurocódigos para su correspondiente análisis y cálculo. Por ello, los estudios se realizan siguiendo las directrices y metodología indicada en los mismos, por lo que debe entenderse como un análisis dentro del marco normativo.



▶ Modelo de incendio estándar- patrón ISO 834



▶ Curva de temperatura-tiempo de desarrollo de un incendio real

Normativa de aplicación

En la normativa española, el CTE (Código Técnico de la Edificación) utiliza métodos simplificados para el cálculo de la resistencia al fuego de las estructuras. Estos métodos son únicamente aplicables a elementos estructurales individuales considerando, además, que el fuego es de

tipo nominal y, por lo tanto, representado por la curva normalizada de tiempo-temperatura.

El CTE permite utilizar modelos de incendio avanzados así como métodos de cálculo estructural también avanzado indicando además que son adecuados para las siguientes situaciones:

- ✓ Estudio de edificios singulares.
- ✓ Análisis y cálculo de la estructura en su conjunto (global) o parte de ella.
- ✓ Estudio más ajustado a la situación de incendio real.

Según también el CTE en su documento básico SI-6 apartado 1, la metodología de obligado cumplimiento en España (y Europa por ser normas armonizadas) para el cálculo estructural en condiciones de incendio utilizando modelos de incendio avanzados basados en dinámica de fluidos, son los Eurocódigos.

Fundamentos del diseño estructural en situación de incendio

Severidad del incendio y resistencia al fuego: verificación

La mayoría de los edificios están hechos a base de elementos constructivos del tipo cerramientos, tabiquerías interiores, forjadas y cubiertas que son soportados por elementos portantes del tipo columnas y vigas. Para evitar el colapso del edificio, los elementos estructurales deben tener una capacidad portante suficiente durante todo el desarrollo del incendio. En otras palabras, el fallo estructural ocurrirá si la carga aplicada excede la capacidad portante del conjunto en algún momento durante el incendio.

En estructuras sencillas, el colapso de un elemento conduce al colapso de toda la estructura. En estructuras más complejas es posible que éstas sobrevivan a un incendio aún cuando uno o varios elementos hayan perdido su capacidad portante. Esto es algo que a temperatura ambiente no ocurre y se debe a las fuerzas interiores que aparecen como consecuencia de las interacciones de unos elementos con otros inducidas por la dilatación térmica.

El paso principal en el diseño de estructuras en situación de incendio es verificar que la resistencia de la estructura (o parte de ella) es superior a la severidad del incendio a la que dicha estructura está expuesta.

Esta verificación requiere que se cumpla la siguiente ecuación de diseño:

$$\text{Resistencia al Fuego} \geq \text{Severidad del Incendio}$$

La resistencia al fuego de la estructura es una medida de su capacidad para resistir el fallo o colapso mientras que la severidad del incendio es una medida de su potencial destructivo que podría llegar a producir el colapso de la estructura.

Existen tres métodos para verificar y comparar la resistencia al fuego con la severidad del incendio. En este sentido, la verificación puede realizarse en el dominio del tiempo, de la temperatura o de la resistencia.

Dominio	Unidades	Resistencia al Fuego	Severidad del incendio
Tiempo	Minutos/horas	Tiempo de colapso	Duración del fuego calculada o especificada en un código
Temperatura	°C	Temperatura que produce el colapso	Máxima temperatura alcanzada durante el incendio
Resistencia	KN	Capacidad de carga a temperatura elevada	Carga aplicada durante el incendio

Verificación en el dominio del tiempo:

El tiempo transcurrido hasta el fallo (o colapso) de un elemento estructural de un edificio es el grado de resistencia al fuego de dicho elemento (*Fire resistant rating*). Los grados de resistencia al fuego de los productos están basados en ensayos a escala real para los cuales se utiliza una exposición a un fuego de tipo estándar.

La duración de un incendio es lo que normalmente se especifica en las normativas de incendio y es una medida del grado de severidad del incendio en cuestión. Cuando es dado por normativa, está referido a un incendio de tipo estándar (curva ISO).

Lógicamente, la duración del incendio también puede calcularse con fuegos de tipo real y cuando esto es así, se considera una combustión completa del material existente en el sector de incendios sin tener en cuenta la intervención con medios auxiliares ni el funcionamiento de los sistemas automáticos de extinción.

Resistencia al fuego

- ✓ Grado de resistencia al fuego:

La resistencia al fuego normalmente se cuantifica como el tiempo que un elemento cumple un criterio concreto durante la exposición a un ensayo estándar de resisten-

cia al fuego (nominal). Tal y como se ha visto en el apartado anterior, la resistencia al fuego de un elemento estructural también se puede cuantificar según la temperatura crítica o la capacidad portante máxima que puede llegar a aguantar dicho elemento durante un incendio.

El grado de resistencia al fuego de un elemento (*rating*) es la resistencia al fuego asignada a ese elemento estructural. Se necesita asignar un grado de resistencia al fuego a los elementos para comparar con la severidad del incendio especificada en las normativas o códigos de diseño y comprobar su adecuación.

El grado de resistencia al fuego de un elemento depende de muchos factores siendo los principales, la severidad del incendio, el material, la geometría y condiciones de soportación del elemento, los grados de libertad y las cargas aplicadas durante el incendio. El grado de resistencia al fuego asignado a un elemento debe especificar también estos datos de partida.

✓ Ensayo de resistencia al fuego:

Los ensayos de resistencia al fuego de los elementos estructurales no pretenden simular incendios reales. El propósito es proporcionar un método común que permita comparar la capacidad portante entre diferentes tipos de estructuras.

Los ensayos pueden ser a escala real o a pequeña escala.

Los ensayos a escala real se llevan a cabo para elementos o partes de una estructura (subestructura) representativa de los edificios con el objeto de determinar su grado de resistencia al fuego, de tal forma que al instalar una estructura similar en un edificio real se le pueda asignar el mismo grado de resistencia al fuego.

Esto supone una simplificación muy importante y se aleja mucho de la realidad ya que existen muchas diferencias entre el escenario de incendio del ensayo y el escenario de un incendio real. Normalmente hay diferencias de tamaño entre las estructuras a comparar, diferentes cargas aplicadas, diferentes condiciones de contorno (grados de libertad) y diferentes tipos de fuego al que están expuestas.

A continuación se describe la problemática de las cargas aplicadas.

✦ Cargas aplicadas: todo elemento al que se le exige cumplir con un criterio de estabilidad frente al fuego debe ser ensayado bajo la acción de la carga aplicada. Elementos ensayados sin carga conducen a resultados no seguros, ya que no permiten valorar el efecto de las deformaciones bajo la acción del incendio. De

hecho, el nivel de carga sobre un elemento estructural durante un incendio real puede tener un efecto importantísimo en su rendimiento o capacidad portante.

El problema de los ensayos es decidir el nivel de carga a aplicar. Si un elemento se prueba con un nivel de carga bajo, la resistencia al fuego será alta pero puede restringir el uso del producto en otras aplicaciones donde sea necesario considerar un nivel de carga mayor.

Esta problemática se puede solventar realizando cálculos complejos con modelos avanzados de simulación computacional que permitan predecir el grado de resistencia al fuego de la estructura bajo la acción de las cargas reales existentes en el edificio. Estos modelos deben estar calibrados con diferentes ensayos a escala real.

✦ Criterio de fallo o colapso: para alcanzar las condiciones de estabilidad un elemento estructural debe mantener su capacidad portante bajo la acción de las cargas aplicadas durante la duración del ensayo o la duración del incendio sin producirse el colapso.

El estándar para muchos ensayos es tener una limitación de la deformación y/o una limitación en la velocidad a la que se produce la deformación, de tal forma que se para el ensayo antes de que se produzca el colapso de la estructura y pueda dañar el horno. Un criterio de fallo común es limitar la deformación a 1/20 de la luz/envergadura o también limitar la velocidad de deformación a 1/30 de la luz/envergadura.

Cálculo estructural avanzado

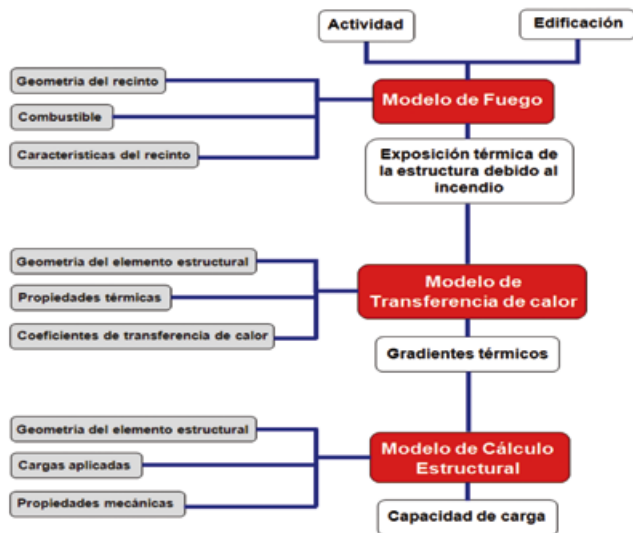
El cálculo estructural en situación de incendio debe considerar los siguientes pasos:

- ✓ Selección de los escenarios de incendio o escenarios de fuego de cálculo oportunos.
- ✓ Determinación de los fuegos de cálculo correspondientes.
- ✓ Cálculo de la evolución de la temperatura en el interior de los elementos estructurales.
- ✓ Cálculo del comportamiento mecánico de la estructura expuesta al fuego. El comportamiento mecánico de una estructura expuesta al fuego dependen de las acciones térmicas y de su efecto sobre las propiedades de los materiales y sobre las acciones mecánicas indirectas, así como el efecto mecánico de las acciones directas.

El procedimiento de cálculo estructural en situación de incendio establecido en el Eurocódigo contempla di-

ferentes alternativas de análisis permitiendo utilizar modelos de cálculo estructural de tipo simplificado o modelos de cálculo de tipo avanzado, a partir de acciones térmicas generadas por fuegos nominales o por acciones térmicas calculadas a partir de los parámetros físicos y químicos generados por fuegos reales.

Los modelos avanzados de cálculo estructural proporcionan un análisis realista de las estructuras expuestas al fuego.



Los modelos avanzados de cálculo estructural deben incluir tres modelos separados de cálculo para determinar:

- ✓ La severidad del incendio calculada con un modelo de fuego avanzado.
- ✓ El desarrollo y distribución de la temperatura en el interior del elemento estructural.
- ✓ El comportamiento mecánico de la estructura o parte de ella calculada con un modelo de cálculo estructural avanzado.

Con un modelo de fuego avanzado el análisis térmico de los elementos se realiza para toda la duración del incendio, incluida la fase de enfriamiento. Además, debe tener en cuenta la posible propagación de unos combustibles a otros y la posibilidad de llegar al *flashover* estando limitado el tamaño del incendio al área del sector de incendios.

Conclusiones

En el presente artículo se han expuesto los fundamentos y principios de ingeniería en los que se basa la ingeniería

“Los modelos avanzados de cálculo estructural proporcionan un análisis realista de las estructuras expuestas al fuego”

contra incendios estructural, una de las ramas de la ingeniería contra incendios que más desarrollo está experimentando en la comunidad de ingeniería contra incendios internacional.

Los estudios rigurosos pueden resolver multitud de problemas a los que se enfrenta la ingeniería y arquitectura moderna, siendo el ámbito de las estructuras un aspecto al que se le presta poca atención y donde el ingeniero consultor contra incendios puede contribuir con más beneficios.

