

INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS EN SITUACIÓN DE INCENDIO

Garantizar la resistencia al fuego de la estructura de un edificio en caso de incendio para impedir que este se propague de unos recintos a otros así como para evitar el colapso estructural del propio edificio durante, al menos, el tiempo exigido por la legislación vigente, es una tarea que forma parte de todo proceso de diseño o proyecto de “seguridad en caso de incendio” en el ámbito de la edificación o de la industria.



Autor: **MANUEL LLORET CANO**
Socio Director
ASHES Fire Consulting, S.A.

El método utilizado para garantizar las exigencias prescriptivas en cuanto a tiempos de estabilidad al fuego de los edificios, en la gran mayoría de los proyectos, está basado en el principio de mantener la estructura “fría” a pesar del calentamiento del gas del recinto generado por la acción del incendio.

Este tipo de diseño basado en la aplicación de elementos que actúan de barrera térmica entre el incendio y el elemento

estructural, tiene la ventaja, desde el punto de vista del diseño, que requiere poco o ningún conocimiento por parte del proyectista sobre la ciencia del fuego y el cálculo de estructuras (Figura 1).

La contrapartida de no aplicar ingeniería y llegar al límite en cuanto a la simplificación técnica para cumplir la normativa tiene como consecuencia, en muchos de los casos, un importante sobre costo en la correspondiente partida de protección

pasiva del proyecto de ejecución del edificio así como en los posteriores gastos de mantenimiento y conservación del mismo.

El avance en el conocimiento sobre el comportamiento de las estructuras ante el incendio desde los años 90 hasta la fecha, ha sido tan importante que ha surgido una disciplina con entidad propia dentro del campo de la “ingeniería de seguridad en caso de incendio”. Dicha disciplina, bien conocida en la terminología anglosajona como “Structural Fire Engineering” (SFE), constituye una rama o especialización de la “ingeniería de Protección Contra Incendios”.

De esta forma, frente al método tradicional en el que no es necesario realizar ningún estudio, análisis o cálculo, para determinar la resistencia al fuego de las estructuras, está la posibilidad de aplicar ingeniería de incendios y calcular analíticamente la resistencia de la estructura para cada caso particular.

La ingeniería de estructuras en situación de incendio, en adelante SFE, es multidisciplinar y estudia el comportamiento del incendio, determina el calor que este

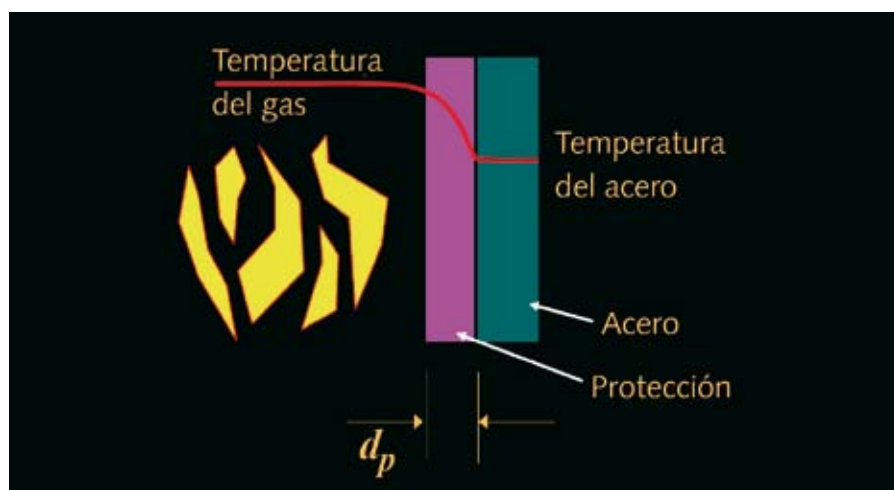


Figura 1. Protección estructural – Método tradicional

transfiere a la estructura y calcula la respuesta mecánica de dicha estructura al estar sometida a las cargas reales del edificio y a las térmicas procedentes del incendio. Como resultado, se determina si la estructura necesita o no necesita protección estructural para mantener su capacidad portante. Y en caso de que así fuese, permite conocer qué elementos de la estructura son necesarios proteger y cuáles no así como el tipo de protección más adecuado para cada caso. Para ello, es necesario utilizar software específico de cálculo térmico y mecánico.

A diferencia del método tradicional, para aplicar ingeniería de estructuras en situación de incendio se requieren sólidos conocimientos de la dinámica del fuego así como de transferencia de calor y de cálculo de estructuras.

Los diseños realizados aplicando SFE se ajustan a las condiciones reales de cada caso particular lo cual implica importantes ahorros en producto, instalación y mantenimiento así como un mayor control sobre los elementos más solicitados y por tanto más críticos en cuanto al fallo, que pueden ser reforzados mejorando con ello el nivel de seguridad global que pudiera obtenerse con la protección



Figura 2. Ingenierías de Incendio

uniforme de todos los elementos estructurales, resultado de la aplicación directa del método tradicional.

Hasta ahora he mencionado la ingeniería de Protección Contra Incendios (Fire Protection Engineering) y la ingeniería de estructuras en situación de incendio (Structural Fire Engineering). A estas dos habría que añadir otro tipo de ingeniería dentro del campo que nos ocupa y que se conoce como ingeniería de seguridad ante

el incendio (Fire Safety Engineering).

Básicamente, la ingeniería de seguridad en situación de incendio es la disciplina global que integra a las otras dos siendo la ingeniería de estructuras en situación de incendio una parte de la ingeniería de Protección Contra Incendios. En la Figura 2 se puede ver una representación gráfica de esta clasificación.

Se trata de disciplinas diferenciadas que, fuera del ámbito especializado, lle-



Figura 3. Banco de ensayo de elementos estructurales a compresión

gan a confundirse. Esta confusión tiene precisamente su origen en el uso que se hace de esta terminología en diferentes lugares del mundo.

En España, la normativa ha evolucionado hacia una terminología más europea y el CTE utiliza ya el concepto de "seguridad en caso de incendio" frente al utilizado en la NBE-CPI/96 en donde se hacía referencia a las "condiciones de Protección Contra Incendios" para referirse al mismo concepto.

La ingeniería de seguridad en caso de incendio es una disciplina que resulta difícil de definir con rigurosidad. Se puede decir que abarca un campo multidisciplinar donde se encuentran la ciencia, la tecnología, la gestión y las leyes y que proporciona un punto de integración entre las medidas de Protección Contra Incendios y el concepto de "seguridad para las personas" en caso de incendio.

Las principales materias que abarca son: la ciencia del fuego, la ingeniería de protección activa y pasiva, el control del humo y el calor, el comportamiento humano, la evaluación del riesgo de incendio, el diseño de sistemas y la gestión de los recursos humanos y materiales en situación de incendio. Su aplicación afecta en mayor o menor medida a la mayoría de las disciplinas que se utilizan en el desarrollo de un proyecto de edificación. Desde la arquitectura, la ingeniería de obra civil y de estructuras, la ingeniería de instalaciones mecánicas y

eléctricas hasta la propia gestión operativa del edificio.

Es por ello por lo que resulta fundamental contar con la presencia de un ingeniero de incendios desde una fase inicial o temprana del proyecto. Los principales beneficios que se obtienen por este motivo son; mayor flexibilidad e innovación en el diseño, en la construcción y en los materiales empleados, igual o superior seguridad en caso de incendio y menores costes de Protección Contra Incendios tanto en protección activa como protección pasiva.

El Instituto de Ingenieros de Incendio del Reino Unido define la ingeniería de seguridad en caso de incendio como "la aplicación de la ciencia, la ingeniería, las leyes, los códigos de diseño y el criterio procedente de un experto en la materia, para la protección de las personas, el patrimonio y el medio ambiente, de los efectos destructivos de un incendio, todo ello basado en un entendimiento del fenómeno del incendio y sus efectos así como del comportamiento de las personas en situación de incendio".

La ciencia del fuego, a la que antes hacía referencia, comprende la química del fuego y la dinámica del fuego siendo la determinación del calor generado y el comportamiento del humo los temas más críticos. El calor deteriora la resistencia y la rigidez de la mayoría de los materiales de construcción. Los efectos térmicos del incendio sobre los materiales y/o estructuras son considerados, técnicamente, al aplicar la "ingeniería de Protección Contra Incendios".

La ingeniería de Protección Contra Incendios comprende el diseño de sistemas de protección activa y protección pasiva para proporcionar un nivel de protección satisfactorio de los edificios y sus contenidos en caso de incendio.

La protección activa de edificios incluye sistemas de detección y alarma, rociadores y otros sistemas automáticos y

manuales de lucha contra incendios.

La protección pasiva trata el diseño del edificio para que la capacidad portante del mismo sea suficiente para resistir la acción del incendio así como para limitar su propagación. La ingeniería de estructuras en situación de incendio forma parte de esta disciplina.

La Sociedad de Ingenieros de Protección Contra Incendios de Estados Unidos (SFPE) define la ingeniería de Protección Contra Incendios como la "aplicación de la ciencia y la ingeniería para la protección de las personas y el medio ambiente de los efectos destructivos de un incendio lo cual incluye: el análisis del riesgo de incendio, la minimización de los daños materiales mediante un buen diseño, construcción y uso de los edificios, el diseño, la instalación y el mantenimiento de sistemas de detección, comunicación y extinción así como la propia investigación y análisis después del siniestro".

Como puede apreciarse, esta definición, aunque algo más detallada, es realmente idéntica a la citada en el párrafo anterior referida a la ingeniería de seguridad en caso de incendio. La razón de esta pequeña contradicción es que la terminología empleada en Estados Unidos no se corresponde con la utilizada en Europa y otras partes del mundo y genera esa "confusión" a la que hacía referencia al inicio del artículo.

MARCO NORMATIVO

El CTE ha supuesto un avance importantísimo respecto a la Norma Básica en muchos aspectos y en particular en el estudio del comportamiento de las estructuras en situación de incendio.

El CTE permite determinar la resistencia al fuego mediante ensayos y mediante métodos analíticos simplificados. Estos son sólo aplicables a elementos individuales sometidos a la acción de un fuego nominal o (ISO) de la misma manera que ya se contemplaba en la antigua norma básica y en otras normativas actualmente en vigor (Figura 3).

Sin embargo, el hecho destacable y relevante es que también admite calcular la resistencia al fuego de una estructura a partir de la exposición a otros modelos de incendio y por tanto diferentes al incendio standard, incluidos los modelos de incendio basados en dinámica de fluidos o CFD.

El CTE también permite realizar el cálculo de la respuesta mecánica mediante modelos simplificados o avanzados de cálculo estructural en situación de incen-

La ingeniería de Protección Contra Incendios comprende el diseño de sistemas de protección activa y protección pasiva para proporcionar un nivel de protección satisfactorio

dio. Este enfoque es adecuado para las siguientes situaciones: 1) Estudio de edificios singulares, 2) Estudio de estructuras en su conjunto y 3) Estudios ajustados a una situación de incendio real.

Para realizar este tipo de análisis conforme a normativa, hay que utilizar los Eurocódigos (EC). El EC1 establece la metodología del análisis estructural. Tal y como se indica en la Figura 4, se puede partir de un modelo de incendio nominal o de un modelo natural. Determinado el modelo de incendio, el análisis estructural lo podemos realizar para un único elemento, para una subestructura o para toda la estructura. Dependiendo de lo que se haya decidido calcular, podremos utilizar modelos simplificados, avanzados o cualquiera de los dos.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL AVANZADO FRENTE AL MÉTODO TRADICIONAL

De lo expuesto en el punto anterior se concluye que el CTE permite calcular la resistencia al fuego aplicando la disciplina antes definida como "ingeniería de estructuras en situación de incendio", lo cual conduce, en muchos de los casos, a diseños ajustados a una situación real y por lo tanto mucho más económicos, tanto en ejecución como en mantenimiento, sin por ello reducir, de ninguna manera, la seguridad del edificio.

Esto es posible si se utiliza un modelo térmico de fuego natural y/o un modelo mecánico basado en el cálculo avanzado siendo la mejor opción una combinación de ambos.

En la Figura 5 vemos la curva de fuego standard (curva verde), que es el modelo de fuego que se corresponde con el calentamiento en un horno, es decir, recinto sin ventilación, temperatura uniforme, el combustible nunca se agota y las temperaturas suben continuamente.

La curva roja es la que se corresponde con un fuego natural o real que es el que se ajusta a las condiciones particulares de un edificio en concreto: combustible, geometría, ventilación, etc. Tener en cuenta estos factores puede conducir a que las temperaturas reales a las que está expuesta la estructura sean muy inferiores a las obtenidas con la exposición al fuego nominal. Si efectivamente esto ocurre, la estructura tendrá mayor resistencia y necesitará menor protección.

También se puede utilizar el fuego natural para calcular la duración exigida del incendio como alternativa a la de la tabla 3.1. del CTE (ver Tabla 1). Esto se consigue utilizando la metodología

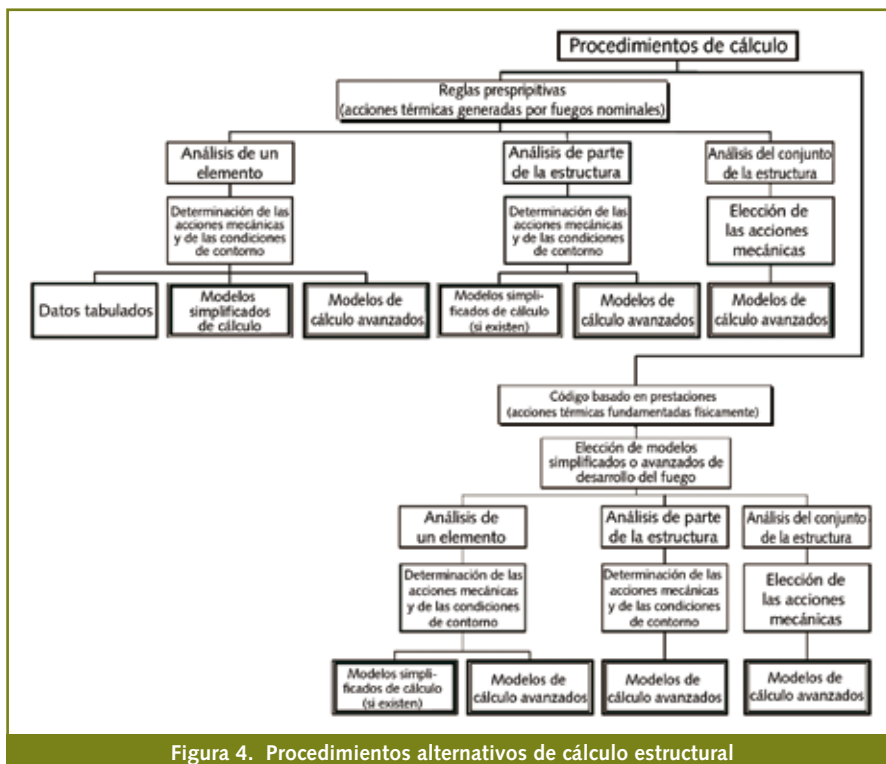


Figura 4. Procedimientos alternativos de cálculo estructural

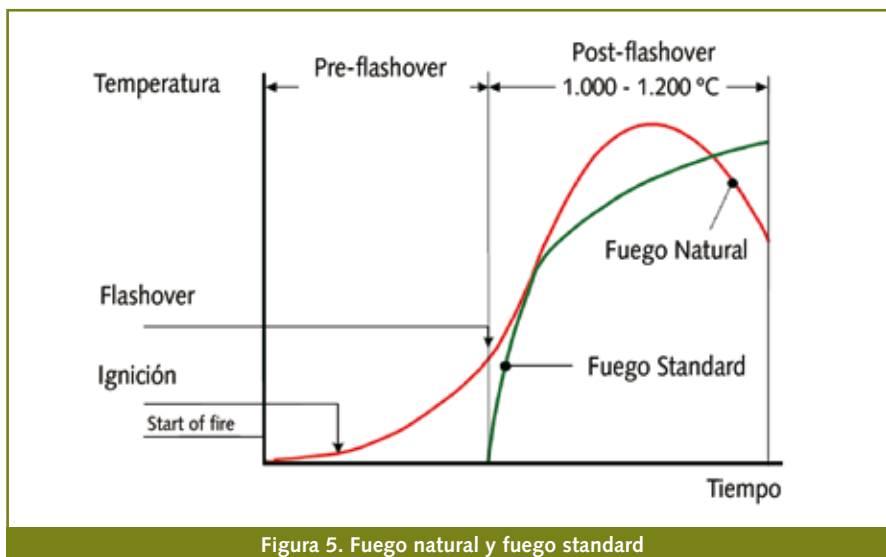


Figura 5. Fuego natural y fuego standard

Tabla 1. Resistencia al fuego exigida según CTE

Uso del sector de incendio considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante		
		Altura de evacuación del edificio		
		<15 m	<28 m	≥28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)	-	R 90	-	-
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)	-	R 120 ⁽⁴⁾	-	-

⁽¹⁾ La resistencia al fuego suficiente de un suelo es la que resulte al considerarlo como techo del sector de incendio situado bajo dicho suelo.

⁽²⁾ En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la resistencia al fuego exigible a edificios de uso Residencial Vivienda.

⁽³⁾ R 180 si la altura de evacuación del edificio excede de 28 m.

⁽⁴⁾ R 180 cuando se trate de aparcamientos robotizados.

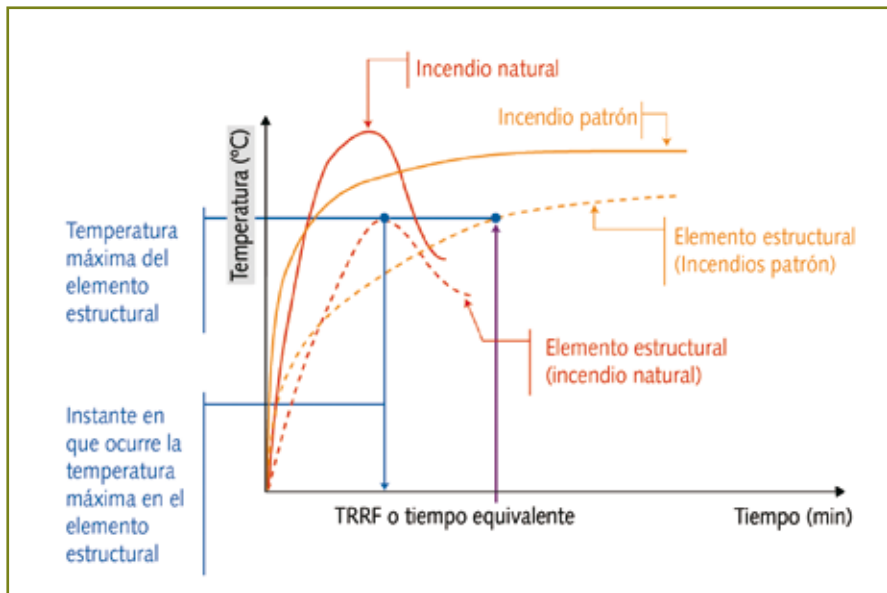


Figura 6. Tiempo de exposición al fuego equivalente

del tiempo equivalente que consiste en determinar en qué momento se produce sobre la curva normalizada la máxima temperatura del incendio real.

Este método es interesante porque se pueden combinar el modelo de fuego natural y el modelo de fuego nominal y a partir de aquí utilizar los valores

publicados de resistencia al fuego de los elementos estructurales para justificar el cumplimiento del tiempo equivalente de exposición al fuego, no siendo necesario realizar ningún tipo de cálculo estructural (Figura 6).

Por otro lado, realizar un cálculo estructural avanzado puede conducir a una

optimización de la protección estructural ya que permite considerar una serie de factores que no se tienen en cuenta en la metodología tradicional.

Se entiende por cálculo avanzado a un cálculo que es realista en cuanto a la situación particular del edificio, es decir: tamaño y geometría real de la estructura, cargas aplicadas y condiciones de contorno reales, etc. Ocurre lo mismo que con el modelo de fuego, podemos hacer diseños mucho más ajustados a la situación real (Figura 7).

En particular, un cálculo avanzado permite:

- Utilizar una combinación de cargas inferior a la utilizada a temperatura ambiente.

$$L_u = \gamma_{fg} \cdot G + \gamma_{fq} \cdot Q + \gamma_{fj} \cdot W$$

$$r_{load} = \frac{U_{incendio}^*}{R_{ambt}}$$

- No aplicar factores de seguridad reductores de la capacidad de carga.

$$U_{incendio} \leq \phi_f \cdot R_{incendio} \quad U^* \leq \phi \cdot R$$

$$\phi_f = 1 \quad \phi \leq 1$$

De esta forma, es posible aprovechar la reserva de resistencia que proporciona el dimensionamiento de los elementos de la estructura en condiciones de temperatura ambiente.

- Analizar estructuras completas o parciales y no únicamente elementos individuales.

A medida que aumenta la temperatura aumenta la dilatación térmica de los elementos generando fuerzas internas que pueden mejorar el comportamiento estructural del conjunto. La interacción entre elementos mejora el comportamiento individual de cada uno.

- Particularizar la protección a los elementos que lo necesitan:

Dado que en una estructura cada elemento soporta cargas diferentes, el análisis avanzado permite un cálculo específico de la protección para cada elemento estructural. Se protegen solamente los elementos necesarios.

- Utilizar diferentes criterios de fallo a los utilizados en los ensayos de elementos individuales.

Por ejemplo, en el ensayo de una viga, se considera fallo cuando el desplazamiento que se produce es superior al valor de la flecha dividido por 30.

Esto es así por las propias limitaciones físicas del horno de ensayo, sin embargo, puede ocurrir que en una situación real se

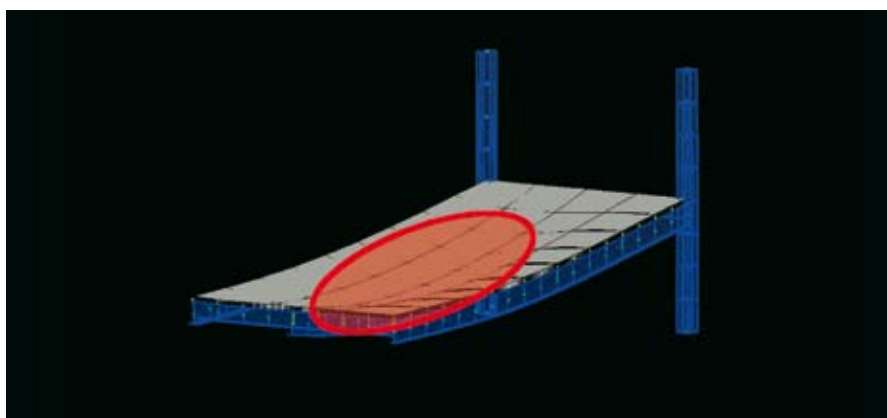


Figura 7. Modelización estructural

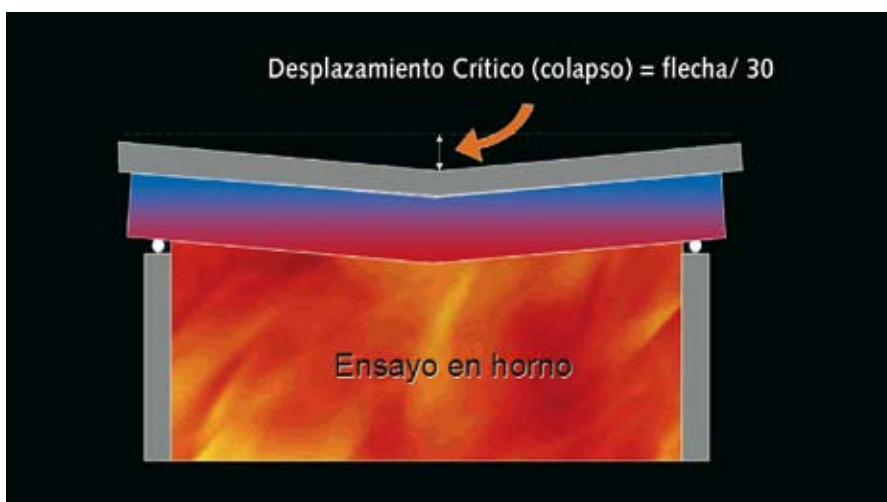


Figura 8. Representación de un ensayo de resistencia al fuego

produzcan deformaciones más grandes y no comprometan la estabilidad de la estructura (Figura 8).

MODELO DE CÁLCULO AVANZADO S/EC1 Y EC3

La metodología para realizar el cálculo avanzado consiste en utilizar tres modelos diferenciados: modelo de fuego, modelo de transferencia de calor y modelo de cálculo de respuesta estructural (Figura 9).

De esta forma, a partir de la información del combustible, geometría del recinto, actividad (carga de fuego), calculamos el campo de temperaturas a las que está expuesta la estructura con el modelo de incendio.

Con el campo de temperaturas calculado, la geometría de la estructura y otros parámetros, utilizamos el modelo de transferencia de calor para calcular los gradientes de temperatura en el interior de los elementos estructurales.

Con los gradientes de temperatura calculados y las cargas aplicadas en la estructura utilizamos el modelo estructural para calcular la respuesta mecánica (capacidad de carga).

En definitiva, se aplican tres modelos interrelacionados entre sí tal y como se indica en la Figura 10.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL AVANZADO FRENTE AL DISEÑO BASADO EN PRESTACIONES

La aplicación de la ingeniería de estructuras en situación de incendio o cálculo estructural avanzado, requiere el uso de software de simulación computacional tipo CFD así como la identificación de posibles escenarios de incendio y modelos de fuego.

El uso de este tipo de software así como la metodología de trabajo basada en el análisis de diferentes escenarios de incendio está, típicamente, asociado al diseño basado en prestaciones (PBD).

Sin embargo, el cálculo estructural avanzado y diseño prestacional son dos cosas completamente diferentes que no deben confundirse entre sí por el hecho de compartir el uso de un mismo tipo de herramientas así como una metodología de análisis similar.

La diferencia radica en que, mientras el diseño prestacional se utiliza como "alternativa" a la vía prescriptiva para comprobar si, a pesar de no cumplirse la prescripción, se mantienen las condiciones de seguridad en el edificio concreto objeto

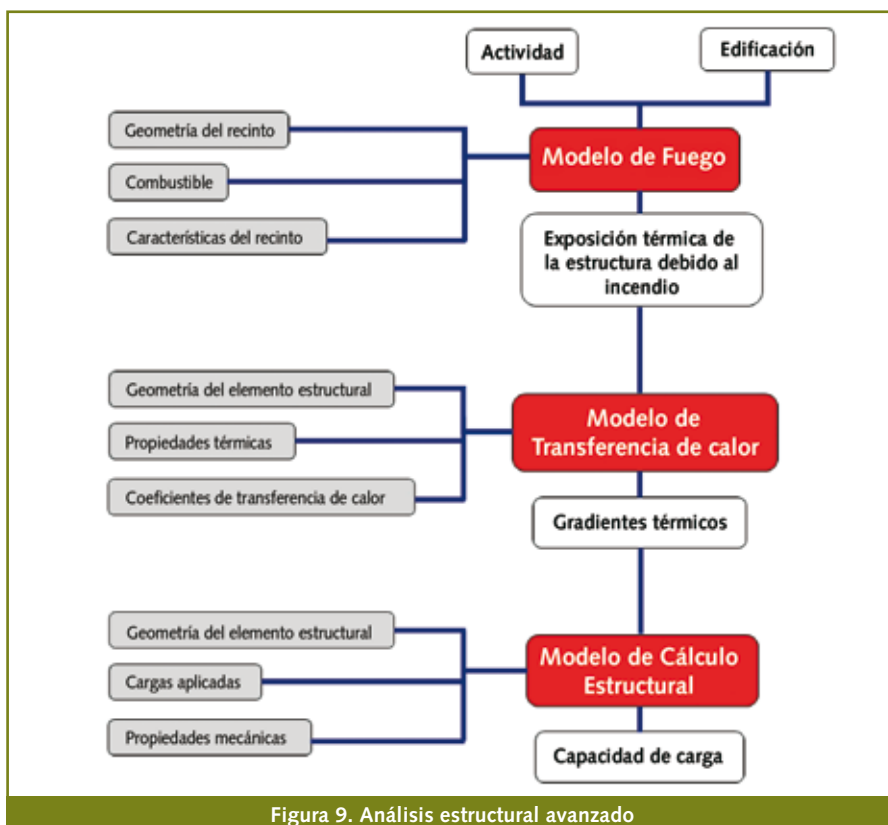


Figura 9. Análisis estructural avanzado

de estudio, el cálculo estructural avanzado se realiza, en la mayoría de los casos, para comprobar si la resistencia de la estructura "cumple" con lo exigido por la normativa, a partir de las condiciones térmicas y mecánicas específicas del edificio.

La validación del cálculo avanzado por parte de la autoridad competente se basará en la conformidad técnica de dicho cálculo de la misma forma que se valida la justificación, mediante cálculo, de cualquier otra instalación que figure en el proyecto del edificio; cálculo estructural a temperatura ambiente, cálculo hidráulico, cálculo eléctrico, cálculo de evacuación de humos, etc. No obstante, es muy recomendable, para evitar imprevistos no deseados, consensuar con

la autoridad competente, los escenarios de incendio y los supuestos que permiten simplificar los modelos, antes de realizar ningún tipo de análisis.

CONCLUSIONES

Como conclusión de lo expuesto simplemente resaltar que los principales países desarrollados como EEUU, Japón, Canadá, Alemania, Inglaterra, Suecia, etc. consideran que la ingeniería de seguridad en caso de incendio es una ciencia que se estudia, se acepta y se aplica y que la ingeniería de estructuras en caso de incendio, como rama o especialización de esta, permite la construcción de edificios más seguros y al mismo tiempo, más económicos. ■

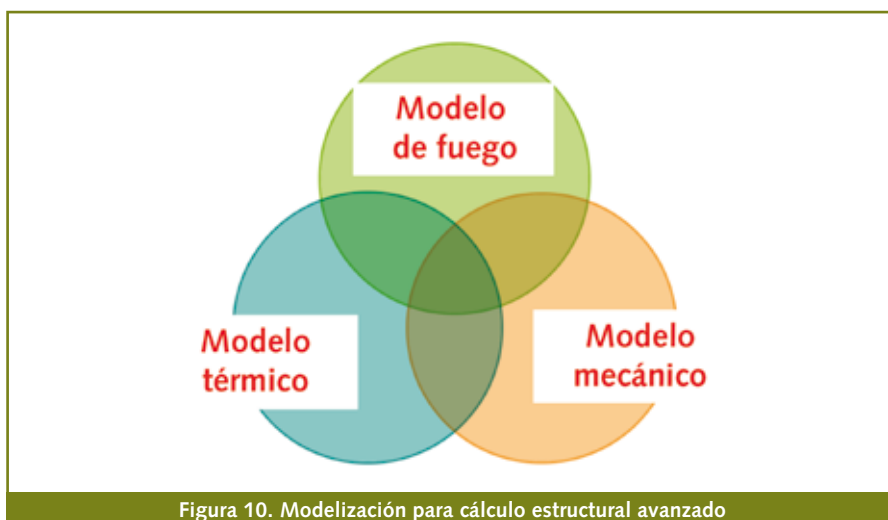


Figura 10. Modelización para cálculo estructural avanzado