ASOCIACION PARA LA PROMOCION
TECNICA DEL ACERO

# UN CAMINO MÁS FLEXIBLE HACIA LA SEGURIDAD EN LA EDIFICACIÓN

**Julia Villa Cellino**
*Profesora Titular del Departamento de Estructuras de la Edificación*
*Universidad Politécnica de Madrid*

*Introducción: el riesgo y la seguridad*

**Los agentes involucrados en el proceso constructivo tenemos que hacer frente a la exigencia de un público que espera de nuestro trabajo una seguridad garantizada en sus edificios. Sabemos que nos estamos moviendo en un campo lleno de incertidumbres en el que tenemos que producir edificios suficientemente seguros al precio más bajo dentro de lo razonable.**

**Está claro que nos enfrentamos a un arduo trabajo para llegar al conocimiento necesario que nos permita confirmar los modelos que hacemos de cómo se comportan nuestros edificios ante las fuerzas de la naturaleza, o frente a los accidentes provocados por los hombres.**

**Habitualmente, para los edificios en condiciones normales de utilización, manejamos unos niveles de seguridad que deben cumplirse para evitar que se produzcan fallos en la estructura por el colapso o la rotura de una parte o de toda ella. Esta definición de la seguridad es posible porque existe, en la comunidad científica, un acuerdo sobre los valores de probabilidad de aparición de un fallo estructural durante la vida útil de un edificio y a partir de ellos se fijan dichos requisitos de seguridad.**

**El estado actual de los conocimientos en el tema del efecto de los incendios en los edificios no se encuentra suficientemente reflejado en las normas y códigos de obligado cumplimiento. El nivel de correlación entre conocimiento técnico y normativa, en cuanto a condiciones de seguridad frente a incendios, no es tan precisa e inequívoca como las que acostumbramos a utilizar en otras materias relativas a seguridad en la construcción.**

**Cuando se discute la seguridad de un edificio frente al incendio nunca se plantea reducir la seguridad existente actualmente en las normas y códigos, lo que se busca es un camino más flexible para alcanzarla.**

**En este contexto los diseñadores, ingenieros y arquitectos, tenemos no sólo la posibilidad sino, expresamente la responsabilidad, de elaborar soluciones imaginativas para resolver los problemas relacionados, no simplemente con la función a que están destinados los edificios, sino también con su seguridad. Es en este tema fundamental donde no se puede ofrecer al público una garantía absoluta de que ningún desastre, accidente o catástrofe, es posible; lo que se puede y se debe proponer es un nivel aceptable de seguridad, por comparación con otros riesgos intrínsecos al tipo de vida de nuestra sociedad.**

**Por estas razones, los autores de proyectos que quieren alcanzar, además de los objetivos antedichos en cuanto bajo coste y seguridad idónea, otras formas específicas de diseño arquitectónico, como ocurre al introducir las posibilidades expresivas de las estructuras, tienen que tomar, dentro de este campo, un número de decisiones importante sobre muy diferentes disciplinas, como por ejemplo el movimiento de humos y gases o el comportamiento de grupos de personas presas de pánico. Es obvio que la mayoría de los profesionales del sector no estamos acostumbrados y/o quizás tampoco estamos preparados para trabajar de esta manera por la novedad que supone dentro de nuestras atribuciones; pero creo que es igualmente indiscutible que debemos de confiar en que hay investigadores y técnicos que tienen información fidedigna sobre el tema.**

**Entre los técnicos que tienen en sus manos la responsabilidad de elaborar o actualizar las normas y códigos, se plantea con frecuencia una controversia respecto a si los documentos, elaborados con fines normativos, deben contener una cantidad de información técnica que los asemeje a libros de texto; obviamente, en la mayoría de las materias sujetas a normativa la respuesta sería negativa.**

**Existe, no obstante, una gran diferencia al abordar la seguridad de los edificios frente a los incendios, derivada del hecho de que, la mayoría de los interesados en utilizar los nuevos y necesarios caminos procedentes de modernas investigaciones, no pueden acceder fácilmente a una información suficientemente amplia para abordar los temas de una manera inequívoca. Por este motivo y en el caso concreto del incendio, soy partidaria de incluir en los textos normativos la precisa cantidad de información técnica para cumplir el objetivo antedicho. Este propósito lo cumplen específicamente las partes dedicadas a seguridad frente al incendio de los Eurocódigos, por lo que me referiré a ellos de manera recurrente.**

***Sobre el mantenimiento de las instalaciones***

**En el análisis y la observación, no sólo de aquellos problemas que han conseguido evitarse sino también, de los accidentes que desafortunadamente han ocurrido, es donde debemos buscar las enseñanzas de la realidad con mente abierta y desechar posturas catastrofistas y temerosas, justificadas en el caso del público en general pero que, en ningún caso, deben surgir en el ámbito de la comunidad científica implicada en el proceso de construcción, incluyendo aquí también a los profesionales trabajando al servicio de la administración que tienen el deber de conocer el ámbito científico de su trabajo.**

**Uno de los grandes incendios de que hemos tenido noticias últimamente, en el que afortunadamente no hubo víctimas, es el que afectó a varios piso de la torre este del Parque Central en Caracas. En la prensa local del 17 de octubre de 2004 dice textualmente en referencia al suceso: "Para las 10,40 am el incendio ha afectado en un principio los pisos 34 al 41 del edificio, pero las llamas continúan propagándose hacia los pisos superiores."..... "Cabezas explicó que la labor del cuerpo de bomberos se vió afectada por la falta de agua.."... "Criticó el presidente del CSB (Centro Simón Bolívar) que las salidas de emergencia de este emblemático edificio de Caracas estuvieran cerradas y en muchas de ellas obstaculizado su paso con muebles atravesados." La noticia continúa más adelante: "El incendio se desató como a las 12:05 am, las primeras unidades llegaron al lugar a las 12:15 am y los funcionarios bomberiles lograron arribar al piso donde se produjo el suceso (el piso 34) a las 12:40 am, debido a que los ascensores estaban apagados." Y continúa "Ha sido muy difícil controlar el siniestro debido a que los sistemas de seguridad referentes a bombas y sistemas de tuberías contra incendios del edificio no funcionaron ..... se desplegó el uso de mangueras con sistema de relevos a través de cuarenta pisos, con el fin de poder trasladar el agua hasta la zona afectada por las llamas."**

**De la absoluta falta de un mantenimiento adecuado en este edificio de Caracas, en el que faltaba agua, se habían bloqueado las puertas de evacuación, los ascensores estaban clausurados, y todas las medidas de seguridad previstas no pudieron entrar en funcionamiento, se desprende como conclusión inmediata la pregunta: ¿es realmente tan improbable que ocurra lo mismo en España?. A veces resultan muy estrictas las exigencias en cuanto a los cálculos y las medidas de protección frente al incendio mientras se aprecia muy poca exigencia en el mantenimiento real de las instalaciones y de los elementos de seguridad.**

**Acaso deberíamos ser más realistas en la previsión de las cosas que pueden, o deben, no funcionar en el transcurso de un incendio, por ejemplo los ascensores; respecto a estos, la recomendación habitual en caso de incendio, es utilizar como medio de evacuación y acceso de bomberos las escaleras; posiblemente habría que plantear ascensores especialmente diseñados en previsión de emergencias, completamente aparte de los de uso diario.**

***Estado actual de la cuestión***

**Si comparamos el nivel de conocimientos que tenemos hoy sobre el comportamiento general de los edificios y las estructuras en condiciones normales y el correspondiente a una situación de incendio encontraremos un abismo cuyas consecuencias son fácilmente identificables al observar los usos en la práctica profesional relacionada con el tema.**

**Es habitual entre los arquitectos diseñar un edificio completo haciendo ciertas previsiones, de instalaciones generales y de estructura, cuyo cálculo encargan posteriormente a los especialistas correspondientes. Aunque parezca exagerado me consta que, en lo que a seguridad contra incendios se refiere, es frecuente que el arquitecto diseñe las necesarias vías de evacuación y demás medidas de seguridad contra incendios, a regañadientes, pensando en el fondo que está destrozando la idea global de su proyecto; lo peor llega cuando cree haber terminado y recibe calculada su estructura, entonces tiene que empezar a pensar en como resolver el problema de la resistencia al fuego.**

**La confluencia entre el cálculo de las estructuras y la resistencia al fuego es variopinta y, en algunos casos, surrealista; me gusta compararlo con el caso en que ante el encargo de calcular una estructura para una zona sísmica le dice el calculista al cliente: aquí tiene su estructura pero lo del sismo lo pone usted.**

***Normas prescriptivas***

**En el pasado esta situación estaba justificada en la falta de un cuerpo científico para abordar el problema de la seguridad frente al incendio como un todo. Los métodos de comprobación más antiguos y tradicionalmente empleados consisten, como es bien sabido, en someter a los diversos elementos que componen la estructura, ya diseñada, al correspondiente ensayo normalizado.**

**Estos ensayos, realizados según las normas UNE, deberían reproducir en el horno, para cada elemento, las mismas condiciones de carga, vínculos etc.., que tendría puesto en obra, lo que evidentemente no suele ser posible. Por otro lado el sistema empleado para los ensayos de resistencia al fuego, presenta el inconveniente añadido de tomar como criterio de rotura un límite de deformación para los elementos aislados que resulta obligado por las dimensiones de los hornos y para evitar su deterioro en el curso del ensayo.**

**En estos métodos empíricos la comprobación de resistencia se cumple si el tiempo de estabilidad ante el fuego normalizado obtenido para el elemento, como resultado del ensayo, $t_f$ , es mayor o igual que el exigido por la normativa vigente, $t_{f,req}$ .**

$$t_f >= t_{f,req}$$

**Sin embargo, debido a la dificultad y el coste económico que supone realizar los ensayos, se fueron elaborando tablas de clasificación de los elementos según la resistencia al fuego obtenida de los ensayos. Estas**

**tablas pasaron a ser la herramienta necesaria para el cálculo de la resistencia al fuego de las estructuras ya que, el proceso se simplifica frecuentemente hasta quedar reducido a la utilización de un repertorio de elementos estructurales, dotados de diferentes tipos y espesores de recubrimiento, de manera que garanticen diferentes valores de estabilidad al fuego.**

**Posteriormente, a partir de los resultados de los numerosos ensayos existentes y de otros programas experimentales específicos, se han ido desarrollando diversos métodos simplificados de cálculo. Estos métodos pretenden ante todo, la adecuación de sus resultados a los correspondientes de los ensayos, por lo que, para lograr los resultados buscados, utilizan coeficientes correctores cuando es necesario.**

**Finalmente, con la generalización del uso de la informática, se ha producido en los últimos años un gran avance hacia la comprensión del desarrollo de los incendios, explotando la posibilidad de elaborar con el ordenador modelos para simular, no sólo el comportamiento de materiales y estructuras sometidos a fuegos más parecidos a los incendios reales, sino de movimiento de humos en edificios y de grupos de personas en ensayos de todo tipo.**

***Concepto de seguridad global de los edificios frente al incendio***

**En 1994 comenzó un Proyecto de Investigación Europeo, patrocinado por la Comunidad Europea del Carbón y del Acero CECA y desarrollado entre diversos países, con objeto de paliar el problema de la construcción de edificios con estructuras de acero sin revestir que presenta graves dificultades de cumplimiento de las exigencias de resistencia al fuego (se encuentra traducido al español el informe final del proyecto con el título "Concepto de Seguridad frente a Incendio Real").**

**La primera parte del proyecto consistió en la realización de un programa de ensayos titulado "Comportamiento de un edificio de estructura de acero de varias plantas sometido a incendios reales" coordinado por la British Steel Technical y el Building Research Establishment y una investigación llamada "Bâtiments en Acier Compétitifs grâce à un Concept de Sécurité d'Incendie Naturel" y coordinado por PROFILARBED-Recherches destinada a poner a punto un "concepto de seguridad global de los edificios frente al incendio". El programa de ensayos fue realizado en el Reino Unido entre 1995 y 1996 en el Large Building Test Facility (LBTF) de Cardington del Building Research Establishment.**

**La finalidad de los ensayos era:**

**- Observar, en las condiciones del ensayo, el comportamiento del edificio completo sometido a incendios localizados (esto es necesario debido a la obligatoriedad de sectorizar los edificios de ciertas dimensiones para la seguridad contra incendios).**

**- Dañar la estructura en el intento de encontrar su límite de resistencia y cuantificar su coeficiente de seguridad.**

**- Desarrollar recomendaciones de cálculo basadas en el comportamiento real de la estructura.**

**- Poner a punto programas de ordenador para simular el incremento de las temperaturas de los gases del recinto durante el incendio.**

**Como ejemplo del trabajo de los muchos investigadores que participaron en el proyecto, incluyo las observaciones de Bailey, Lennon y Moore del Building Research Establishement, que estudiaron los resultados de dos de los ensayos.**

**Uno de ellos se realizó sobre un recinto de 9m x 6m situado en una esquina de un edificio de 8 plantas de estructura mixta con las características de las edificios de oficinas ingleses; los muros de división interiores se hicieron con paneles resistentes al fuego que admitían una deformación de 15mm, uno de los paramentos exteriores estaba cerrado todo con fábrica de bloques y en el otro había una ventana con doble acristalamiento. Las vigas de acero, incluso las uniones se dejaron sin recubrir lo mismo que la cara inferior de la chapa que conformaba el forjado.**

**Todos los pilares de acero se recubrieron hasta el nivel del forjado debido a que en un ensayo anterior, con los pilares sin proteger, se hundió uno de ellos lo que no supuso para nada la ruina del edificio y sirvió para comprobar la eficacia de la hiperestaticidad de la estructura que permitió una redistribución de las cargas. Sin embargo para no seguir deteriorando el edificio decidieron hacer el resto de los ensayos con los pilares revestidos de material aislante. Dentro del anecdotario de los ensayos también resultó imprevisto el comportamiento del doble acristalamiento de la ventana en el ensayo anterior, en el que los cristales no llegaron a romperse y tuvieron que entrar los bomberos para romperlos y provocar que se avivara el incendio.**

**El segundo ensayo se hizo sobre un recinto mayor, con una superficie de 340m$^2$ y dos huecos acristalados enfrentados; la carga combustible por metro cuadrado era la misma y a partir de la experiencia del primer ensayo, se decidió quitar desde el principio un tercio del acristalamiento en cada lado para permitir que el incendio se desarrollase desde el principio. Todas las vigas de acero, incluso las uniones se dejaron también sin**

recubrir lo mismo que la cara inferior de la chapa que conformaba el forjado y todos los pilares se recubrieron hasta el nivel del forjado.

Proporcionaron, entre otras, las siguientes conclusiones:

- Mientras que las uniones de la estructura metálica se mantengan intactas, un forjado mixto de chapa plegada dañado por el fuego puede resistir una carga mayor que la carga última de cálculo prevista, aunque las deformaciones de la estructura hagan el forjado inservible.
- Las partes de la estructura afectadas por el fuego pueden utilizar los elementos fríos adyacentes para reconducir las cargas por itinerarios distintos de los iniciales a temperatura ordinaria; este efecto resulta tanto más beneficioso para la estructura afectada por el fuego cuanto más pequeño sea el recinto de incendio.
- El efecto beneficioso proporcionado por las losas de forjado sobre la viga metálica no es simplemente el aumento de rigidez, sino que la continuidad en su plano supone una importante coacción a la dilatación térmica, lo que también contribuye a que no aumenten las deformaciones.
- La consideración de elementos aislados de acero para predecir su comportamiento ante el fuego resulta excesivamente conservador y está muy lejos de la realidad, por lo que proponen la puesta a punto de programas de cálculo que puedan contemplar, aunque sea con simplificaciones, el entorno completo del incendio.
- No se produjo una rotura evidente de las vigas ensayadas sin recubrir aunque alcanzaron temperaturas superiores a los 900 °C.
- Los códigos de seguridad contra incendios existentes que predicen el colapso de las estructuras metálicas para 680 °C resultan demasiado conservadores.
- Mientras que los pilares estén protegidos en toda su altura, en las vigas sólo se producirán daños localizados.
- Los muros separadores colocados en los ejes de la estructura (por ejemplo bajo una viga de acero) tienen un buen comportamiento.
- Por el contrario los muros situados fuera de los ejes presentan signos de rotura debido a la deformación de la estructura. Deben ser colocados sobre los ejes o deben de tener una suficiente capacidad de deformación.
- El comportamiento de la estructura es diferente y mejor que el que se desprende de los ensayos normalizados.
- En las proximidades de las uniones de la viga metálica se produce pandeo local. Por ello de forma conservadora se deben suponer las uniones de la viga como articulaciones en los cálculos a fuego.
- El comportamiento de las uniones durante el enfriamiento debe ser controlado. Quizás sea necesario diseñar uniones más dúctiles para asegurar la resistencia después del incendio.

**- El forjado mixto es extremadamente beneficioso para la integridad de la estructura debido a la capacidad resistente de la losa como membrana.**

**Es evidente que, mientras no se generalicen, las conclusiones extraídas de los diferentes ensayos solamente son aplicables a edificios iguales a los ensayados. Pero a partir de los resultados de estos ensayos se está trabajando en programas de simulación del comportamiento tanto de la estructura como del propio desarrollo del incendio. Estos programas de simulación en ordenador, que pueden ser aplicados para otros tipos de edificios y diferentes escenarios de incendio, son la herramienta que se está poniendo a punto y que ya permite estudiar el comportamiento de estructuras diversas sometidas a diferentes incendios reales.**

***Normas basadas en prestaciones***

**Paralelamente se va produciendo un cambio de tendencia en las normas y códigos, desde la mencionada exigencia de cumplir obligatoriamente una serie de reglas, como es un tiempo de estabilidad ante el fuego normalizado, hacia las normas basadas en prestaciones que, al fijar la exigencia en la consecución de unos resultados específicos, permiten cumplir determinados estándares de seguridad mediante un análisis, más o menos global, del comportamiento del edificio y sus ocupantes en caso de incendio.**

**Entiendo que la Norma Básica de la Edificación CPI- 96 que, cito textualmente "establece las condiciones que deben reunir los edificios para proteger a sus ocupantes frente a los riesgos originados por un incendio y para prevenir daños a terceros" permite la utilización de todos los métodos de cálculo incluidos en la nueva redacción de los Eurocódigos.**

**En primer lugar, para la determinación de la estabilidad ante el fuego exigible a la estructura portante de un edificio, dice concretamente en su artículo 14, que puede realizarse "por procedimientos analíticos, o bien adoptando los valores que se establecen en esta norma básica.....". Hay que hacer notar que en este artículo se dicen las condiciones que debe cumplir la estructura y que permite dos alternativas.**

**Comenzando por la segunda opción, los valores a que se refiere están incluidos en la Tabla 1 y expresados en términos de períodos de tiempo de fuego normalizado (EF-30, EF-60 etc.... ), según el uso y la altura de los edificios. Aquí encontramos la obligación, tradicionalmente utilizada, de que los elementos estructurales mantengan su función resistente durante un determinado tiempo de ensayo normalizado.**

**En la primera opción hace referencia a procedimientos analíticos y se fundamenta en la obligación de llegar a un resultado de seguridad aceptable. Para este fin hay a su vez tres alternativas, todas ellas basadas en una aproximación más realista a lo que es un incendio que el fuego de los hornos de ensayo. Según la complejidad del análisis realizado se obtiene como resultado:**

**- la necesidad de que la estructura (o elemento estructural) mantenga su función resistente durante un tiempo limitado mientras se encuentra sometida a un incendio real,**

**- que debe resistir durante el completo desarrollo del incendio, incluida la fase de enfriamiento,**

**- la tercera alternativa es la más sencilla porque se puede concretar en la resolución de una simple fórmula. El resultado que se obtiene es lo que se llama tiempo equivalente que, a mi entender tiene un campo de aplicación limitado. Se basa en un intento de transformar en periodos de tiempo de ensayo normalizado (EF-30, EF-60 etc....) los resultados obtenidos por la aplicación de modelos de incendio más realistas.**

**En el artículo 17 de la NBE CPI-96 dice "La justificación de que el comportamiento ante el fuego de un elemento constructivo satisface las condiciones de resistencia al fuego establecidas en esta norma básica, podrá realizarse mediante alguno de los procedimientos siguientes:**

**a) Contraste con los valores fijados en el Apéndice 1.**

**b) Marca de Conformidad a normas UNE, Sello o Certificado de Conformidad con las especificaciones técnicas, .....**

**c) Aplicación de un método de cálculo teórico experimental, conforme a lo establecido en el apartado 3.3."**

**Es precisamente en el Apéndice 1 donde la CPI-96 propone la utilización de las Partes 1-2 de los Eurocódigos 2, 3, 4, 5 y 6 para "la determinación de la resistencia al fuego de los elementos estructurales ....". Estos eurocódigos estructurales remiten a su vez a la Parte 1-2 del EC1 "Acciones sobre las Estructuras Expuestas al Fuego".**

**El apartado 3.3 dice "las entidades que intervengan preceptivamente en el visado técnico, la supervisión y el informe del proyecto, así como la concesión de las autorizaciones y licencias preceptivas, podrán admitir soluciones diferentes a las establecidas en esta norma ..... cuando juzguen suficientemente justificadas.....".**

***Dificultades en la aplicación de normas basadas en prestaciones***

**Creo, por lo tanto, que está abierto el camino que permite la integración de la estructura, en particular la metálica, como un elemento importante del diseño general de los edificios sin dejar de satisfacer por ello las**

**exigencias normativas de seguridad en caso de incendio. Hay, por otro lado, ciertos inconvenientes para que esto sea posible, entre los que se cuentan:**

**- una costumbre muy arraigada entre los profesionales de utilizar las opciones prescriptivas de las normas;**

**- la dificultad de manejar una serie de disciplinas muy dispares pero, todas ellas implicadas en la aparición el desarrollo y las consecuencias de un incendio en un edificio lo que, evidentemente, se simplifica notablemente con las citadas normas prescriptivas;**

**- una fragmentación y/o dispersión de responsabilidades que se produce en algunos casos como consecuencia de lo anterior y en otros por el funcionamiento propio de la industria de la construcción;**

**- a todo esto hay que añadir un quizás comprensible, pero no justificado, desconocimiento de algunas de las citadas disciplinas por parte de los propios técnicos que elaboran proyectos pero, fundamentalmente, de algunos técnicos encargados de la supervisión y control por parte de los organismos competentes.**

**En la creencia de que el primer cometido al que hay que enfrentarse es el de la divulgación de los nuevos métodos hacia los que nos encaminamos me permito explicar someramente las bases de un planteamiento global y desde el comienzo del proyecto de la seguridad contra incendios. Vaya por delante que simplemente voy a exponer lo que he recogido en las últimas versiones de los diferentes Eurocódigos y sus documentos de apoyo.**

***El incendio real***

**El Eurocódigo 1 de Acciones (EN1991-1-2, y EN1990) aplicó, a la determinación de la seguridad de las estructuras frente a incendios reales, el procedimiento semiprobabilísta que describe la EN 1990 a partir del que se establecen los valores de cálculo para las acciones sobre las estructuras en condiciones normales de uso.**

**En el caso particular de la seguridad frente al incendio, la acción principal proviene del fuego, por lo que el primer dato necesario para diseñar un edificio seguro frente al incendio, es definir la energía calorífica que al desprenderse puede afectar a la estructura, teniendo en cuenta que una parte de la energía total se empleará en calentar el recinto en que se desarrolla y el resto se perderá por las aberturas.**

**Esta acción puede ser cuantificada calculando la densidad de carga de fuego, en la que se incluyen los materiales susceptibles de entrar en combustión y su correspondiente capacidad calorífica. Sin embargo la carga de fuego sólo se convierte en acción real sobre la estructura si llega a estar implicada en el incendio; por lo que otra cuestión que requiere ser**

**respondida es la cantidad de carga de fuego total que va a ser quemada en caso de que el fuego se inicie. Esto a su vez dependerá de las proporciones que llegue a alcanzar el incendio, y para estimarlas tienen que ser perfectamente conocidas las medidas de protección activa seleccionadas para el edificio.**

**Por lo tanto la probabilidad de que esta acción térmica llegue a actuar sobre la estructura será el producto de la probabilidad de que el incendio se inicie y de la probabilidad de que el incendio latente alcance la fase de combustión generalizada.**

***Un planteamiento global***

**En las primeras etapas de elaboración del proyecto de un edificio y a partir de las previsiones de uso del mismo, habría que definir los objetivos generales de seguridad y las estrategias de protección contra el fuego. Una vez que ya está definida la geometría así como el tipo de construcción proyectada para el edificio, se puede pasar al análisis de la seguridad de las estructuras frente al incendio mediante los modernos procedimientos analíticos.**

**Para ello es necesario establecer previamente una serie de modelos para definir todos los fenómenos y caracterizar a todos los elementos implicados en el hecho. Este trabajo, con el que los técnicos estamos acostumbrados a enfrentarnos, puede no ser tan sencillo para alguien ajeno a nuestra profesión ya que nos obliga a la ampliación del repertorio de modelos que hemos interiorizado desde siempre para representar la realidad física que nos rodea, sin cuestionar su procedencia. Es igualmente imprescindible fijar unos criterios en que basar la comprobación de la seguridad requerida.**

**En el borrador de la nueva redacción del EC1 se plantea el procedimiento general para el análisis del comportamiento de las estructuras frente al incendio dividido en 4 etapas cuya aplicación hay que decidir en cada caso:**

- **1ª: Selección de los escenarios de incendio de cálculo oportunos.**
- **2ª: Determinación de los correspondientes fuegos de cálculo.**
- **3ª: Cálculo de la evolución de la temperatura en el interior de los elementos de la estructura.**
- **4ª: Cálculo del comportamiento mecánico de la estructura expuesta al fuego.**

**La información necesaria para la resolución de las tres primeras etapas hay que buscarla fundamentalmente en el citado EC1 y solamente para la elaboración de la tercera y de la cuarta es necesario el resto de los**

**Eurocódigos estructurales. Apunto a continuación un resumen del proceso general.**

***Selección de los escenarios de incendio de cálculo oportunos***

**Se define el escenario de incendio como: " Una descripción cualitativa del desarrollo de un incendio, identificando en el tiempo los acontecimientos fundamentales que lo caracterizan y lo diferencian de otros posibles incendios. Habitualmente describe la ignición y el proceso de extensión del fuego, la fase de combustión generalizada, y el proceso de enfriamiento juntamente con el entorno del edificio y los sistemas que tengan incidencia en la evolución del incendio".**

**Cada escenario de incendio se representa mediante una única secuencia de acontecimientos y circunstancias exteriores junto con las medidas de seguridad contra el fuego proyectadas específicamente para el edificio. Por lo tanto para cada escenario hay que enumerar y combinar una serie de factores previsiblemente presentes que, en general, no se pueden modificar en función de la seguridad global contra incendios, como son entre otros:**

- **el tipo de fuego que se puede producir, un fuego latente, localizado, plenamente desarrollado.....**
- **el tamaño y las condiciones de ventilación del recinto y/o del edificio**
- **las características del entorno que rodea al edificio**
- **el estado de cada una de las medidas de protección contra incendios, incluidas las medidas activas y pasivas de seguridad**
- **el tipo, el tamaño y la localización de una posible fuente de ignición**
- **la distribución y características de los materiales combustibles**
- **la densidad de la carga de fuego**
- **la detección, alarma y posible supresión del fuego por parte de las personas presentes**
- **el estado de las puertas del recinto y/o edificio**
- **la rotura de los cristales de las ventanas ya que si el modelo para el incendio no la tiene en cuenta, hay que considerarlos rotos desde el principio.**

**El escenario de incendio de cálculo es el escenario específico en el que se desarrolla un análisis. El número de posibles escenarios para un mismo edificio puede ser muy amplio por lo que se debe proceder a su reducción mediante un proceso de clasificación de los escenarios según el riesgo de que se produzcan, teniendo en cuenta la probabilidad y las consecuencias de ello.**

**Para llegar a decidir el modelo que corresponde a los escenarios de incendio, se empieza por la caracterización del espacio en el que se inicia el fuego y la posterior definición del lugar concreto en dicho espacio; a continuación se introduce la hipótesis de la ignición y las primeras etapas del desarrollo del fuego para continuar comparándola con otras hipótesis que incluyan posibles acontecimientos imprevistos que tengan un mayor riesgo de desencadenarse o peores consecuencias, escogiendo finalmente aquella que resulte más desfavorable. Luego, se identifican las características de los sistemas de protección pasiva y activa que pueden tener un impacto importante en el desarrollo del incendio, para terminar considerando las acciones de las personas presentes que pueden influir de una forma favorable o no en la extensión del fuego y de los humos.**

**Como resultado de esta etapa se está en condiciones de decidir el modelo más idóneo para el incendio. También hay que decidir el valor de diversos parámetros que se incluyen en el cálculo como coeficientes de ponderación de la densidad de carga de fuego, dependen de dos factores fundamentales:**

**- las prestaciones de cada una de las diferentes medidas de protección activa**

**- la fiabilidad de dichas medidas.**

***Determinación de los correspondientes fuegos de cálculo***

**El fuego de cálculo se puede definir como "Un desarrollo específico de un incendio que se adopta para emprender cálculos." Se considera como una descripción completa de un incendio que generalmente pasará por las fases de ignición, crecimiento, combustión generalizada, enfriamiento y extinción.**

**Una de las variables que se puede calcular para definir un fuego es la denominada "velocidad de desprendimiento de calor" originada por la combustión de los materiales envueltos en él. Con esta variable se determina la velocidad de crecimiento de un fuego mediante la curva de generación de calor, que es una curva parabólica en la que la velocidad de desprendimiento de calor es proporcional al tiempo al cuadrado. Así se dividen los fuegos en lentos, medios rápidos y muy rápidos. También los edificios se clasifican en 4 categorías según la velocidad estimada de propagación de un incendio.**

**Finalmente los modelos para el fuego de cálculo se definen mediante curvas temperatura-tiempo, que representan la variación de la temperatura de los gases que rodean a las superficies de los elementos estructurales del recinto incendiado en el transcurso del tiempo, se pueden resumir y agrupar en 2 tipos fundamentales:**

**1- Curvas Temperatura-tiempo nominales: son las curvas convencionales, de evolución de las temperaturas de los gases con el tiempo, que se utilizaron tradicionalmente para los hornos de ensayo como la curva ISO 834, habitualmente denominada curva normalizada o curva estándar.**

**2- Modelos basados en incendios reales o naturales: Tienen en cuenta, de una manera más o menos simplificada, las características del edificio que pueden incidir en el desarrollo de un incendio. Según su complejidad se dividen a su vez en simplificados y avanzados; en ambos casos contemplan la posibilidad de analizar el incendio en dos fases, antes y después de que se produzca la combustión generalizada.**

**Los que representan la primera fase se denominan respectivamente: Fuegos Localizados y Modelos de Dos-zonas. Se utilizan cuando no es probable que se produzca una combustión generalizada de los materiales combustibles del recinto, por lo tanto, la distribución de temperaturas no es uniforme. Se asume que la acumulación de productos de combustión hacia el techo del recinto conlleva la existencia de dos zonas de diferentes temperaturas; la zona alta, con una distribución uniforme de temperatura y espesor variables con el tiempo y la zona baja de menor temperatura también uniforme y variable en el tiempo.**

**La segunda fase del incendio se representa con los modelos que presuponen que se ha producido la combustión generalizada de todos los materiales. Los modelos simplificados son modelos sencillos que utilizan parámetros específicos con un campo de aplicación limitado, se denominan Fuegos de Sector, son ejemplos de este tipo las curvas temperatura-tiempo paramétricas.**

**En los modelos avanzados se denomina a estos fuegos Modelos de Una-zona; los más antiguos de ellos son las curvas que los investigadores suecos Magnusson y Thelandersson obtuvieron, entre los años 1971-72 mediante una simulación numérica, entonces las denominaron curvas de incendio real o natural. Actualmente se están elaborando Modelos Basados en la Dinámica de Fluidos que proporcionan la evolución de las temperaturas de los gases del incendio en el recinto variables en el tiempo y en el espacio.**

***Cálculo de la evolución de la temperatura en el interior de los elementos de la estructura***

**Cuando una estructura se encuentra sometida a la acción de un incendio aparece un proceso de transferencia de calor por radiación y convección desde el fuego hacia las superficies exteriores de los elementos**

**estructurales en las que se va originando un incremento de temperaturas. Esta elevación de temperaturas en la superficie desencadena, debido a la transferencia de calor por conducción, un incremento de temperatura en toda la estructura y consecuentemente, una serie de procesos físicos y químicos que pueden llegar a alterar sustancialmente las características mecánicas y físicas de los materiales que componen la estructura.**

**La cantidad de calor conducido hacia el interior de la estructura dependerá de las propiedades térmicas de dichos materiales, densidad, conductividad térmica y calor específico, que en general también se verán influidas por el incremento de temperatura.**

**El modelo que se hace para la definición de estas agresiones de tipo térmico que actúan en la estructura en el transcurso de un incendio se denomina Acción Térmica y se representa mediante el flujo de calor neto que incide sobre los elementos de estructura afectados por el incendio. Para su cálculo es necesario introducir, entre otros parámetros, la temperatura de los gases que rodean al elemento de estructura, que dependerá del modelo adoptado para el incendio.**

**El resultado del proceso de transferencia térmica es el conocimiento de las temperaturas en los elementos estructurales y por lo tanto la base para el análisis del comportamiento mecánico de éstos.**

***Cálculo del comportamiento mecánico de la estructura expuesta al fuego***

**La definición del modelo para la estructura debe estar implícitamente decidido desde el principio del proceso, en general hay dos opciones: un Análisis Global de la estructura que ha de llevarse a cabo teniendo en cuenta el modo de rotura específico de la estructura sometida a las altas temperaturas del incendio. Este tipo de análisis, por su complejidad, está indicado básicamente para el diseño de edificios singulares y para trabajos de investigación.**

**Análisis de partes de la estructura: Como alternativa al método general, se puede optar por una división de la estructura en elementos individuales o pequeños subconjuntos. Es el más generalizado y permite modelos de diversos grados de dificultad.**

**En el caso de elementos estructurales aislados, su capacidad resistente va estrechamente ligada al deterioro producido en el material a causa del incremento de temperaturas; cuando el sistema estructural es mas complejo, influyen en la resistencia al fuego otros parámetros como la forma, el grado hiperestático y el efecto de las dilataciones térmicas.**

**La definición de las propiedades mecánicas de los materiales y su variación con la temperatura constituyen el Modelo para los Materiales estructurales y para la definición de las agresiones de tipo mecánico que actúan en la estructura en el transcurso de un incendio se recurre al modelo habitual de Acciones Mecánicas considerando el incendio como una situación de carácter accidental.**

***Criterios de comprobación de la estabilidad de las estructuras***

**El objetivo final de todo el proceso descrito es la comprobación de que las estructuras siguen siendo estables y por lo tanto el edificio se mantiene en pie; puede efectuarse con diferentes criterios según la opción decidida para definir la situación crítica de la estructura:**

**Tiempo: se calcula el tiempo $t_f$ durante el cual la estructura, sometida a un modelo de fuego definido por la curva normalizada, es capaz de mantener su función resistente y se compara con el tiempo de estabilidad al fuego exigido por la normativa $t_{f,req}$ , en general $t_{f,req}$ = EF-30, 60, 90....**
**La comprobación es:**

$$t_f => t_{f,req}$$

**Temperatura: la temperatura crítica $T_{cri}$ de un elemento se define como aquella temperatura que sobrepasada por el material estructural ocasionará el fallo al producirse alguno de los estados límites; estrictamente hablando sólo puede aplicarse a elementos de un solo material, aunque se utiliza para el hormigón armado haciendo referencia únicamente a la temperatura de las armaduras. Esta temperatura crítica hay que compararla con la que alcanzará un elemento, $T_M$ , sometido a un modelo de fuego definido por la curva normalizada durante el tiempo $t_{f,req}$ , o bien, cuando se utiliza un modelo basado en incendios reales, con la temperatura máxima $T_M$ que alcanzará el elemento durante el completo desarrollo del incendio. El elemento no puede alcanzar una temperatura superior a la crítica.**

$$T_{cri} => T_M$$

**Resistencia: se calcula la capacidad portante $R_{d,f}$ de la estructura sometida a un modelo de fuego definido por la curva normalizada una vez transcurrido el tiempo $t_{f,req}$ , o bien, cuando se utiliza un modelo basado en incendios reales, se calcula la capacidad portante mínima $R_{d,f}$ de la estructura. Posteriormente se comprueba que es mayor que el efecto de las acciones $E_{d,f}$ (solicitaciones, fuerzas interiores) que se producirán en la estructura simultáneas al incendio, se debe cumplir:**

$$R_{d,f} => E_{d,f}$$

*Conclusiones: Hacia una ingeniería del fuego*

**A la vista de lo comentado anteriormente, se puede afirmar que la norma NBE-CPI 96 permite emprender el cálculo y/o la comprobación de la seguridad ante el incendio de los edificios mediante las diversas vías que se definen en los Eurocódigos.**

**El "Concepto de seguridad global de los edificios frente al incendio" Propone un cálculo realista de la resistencia al fuego basado en un análisis global de la estructura con la consideración para las acciones mecánicas de una combinación en situación accidental. La utilización para el cálculo de las acciones térmicas de las curvas de incendio real, teniendo en cuenta el efecto de las medidas activas de lucha contra el fuego sobre la evolución de las temperaturas del incendio. Define como aspectos fundamentales:**

**- La seguridad de los ocupantes y los bomberos. Teniendo en cuenta que, en un incendio el mayor número de muertos y heridos se debe al humo y las emanaciones tóxicas, el objetivo principal de la estrategia de seguridad será la detección y evacuación temprana de los humos.**

**- El tiempo de resistencia ante el incendio. Aún con el modelo de incendio real limita el tiempo necesario de resistencia al fuego de la estructura; propone un periodo mínimo de 15 minutos afectado de dos coeficientes de ponderación relacionados con la posibilidad de evacuación de las personas y las consecuencias del fallo; de la combinación de estos valores se obtienen una serie de periodos de tiempo de resistencia al fuego específicos para cada caso concreto. Esta posibilidad es especialmente interesante para edificios industriales aislados.**

**- El cálculo realista de la resistencia al fuego de la estructura incluyendo las medidas activas de protección que se introducen como coeficientes de ponderación sobre el valor característico de la carga combustible.**

**- La reducción de las pérdidas materiales.**

**La inclusión del concepto de escenario de incendio en la nueva redacción del EC1 (EN1991-1-2), sienta las bases para la introducción en la normativa nacional de lo que actualmente se denomina la ingeniería del fuego que es un enfoque necesario para producir un diseño racional de determinados edificios singulares, sobre todo metálicos, en los que se puede llegar a garantizar suficientemente la seguridad en caso de incendio teniéndola en cuenta desde el comienzo de la concepción del edificio.**

**La experiencia está demostrando que para evitar el colapso progresivo de un edificio incendiado habría que diseñar las estructuras suficientemente resistentes y dúctiles, lo que significa que puedan deformarse suficientemente sin rotura; deben ser suficientemente resistentes y dúctiles no sólo los elementos sino también las uniones entre ellos que**

**deben estar cuidadosamente diseñadas y ejecutadas; no hay olvidar que la ductilidad es, junto a la elevada resistencia una de las principales propiedades del acero estructural.**

**En la concepción del esquema general hay que prever que la estructura permita caminos alternativos para las cargas y el hecho de que el acero sea un material homogéneo facilita extraordinariamente una alternancia de solicitaciones durante el incendio.**

**La continuidad entre los elementos adyacentes es una característica habitual de las estructuras metálicas de los edificios de varias plantas, que en general, se proyectan con vigas y/o pilares pasantes; esto produce un modelo de comportamiento fuertemente hiperestático que es el más adecuado para que se produzca una redistribución de cargas si ocurre el fallo aislado de algún elemento.**

**Tampoco hay que olvidar que, si bien el acero pierde progresivamente su resistencia al elevarse las temperaturas, también la recupera íntegramente al enfriarse lo que evita posibles accidentes posteriores al incendio aunque la estructura se encuentre muy deformada.**