

Capítulo 5 – Estabilidad al Fuego

5.1. Introducción

Los coeficientes de dilatación térmica de acero y hormigón son prácticamente iguales, y las variaciones uniformes de temperatura no originan tensiones en la pieza mixta como consecuencia de su heterogeneidad, ya que ambos materiales deforman por igual; cuando las piezas están situadas en ambientes interiores sin variaciones térmicas diferenciales, podemos prescindir de este efecto, pero incluyendo las coacciones por enlaces superabundantes – si los hay- como si la pieza fuera homogénea, mediante los criterios habituales de Resistencia de Materiales.

El criterio anterior es aplicable para efectos climáticos que se producen lentamente y sin grandes cambios de temperatura; pero en situación de incendio, con variaciones rápidas e importantes, influye otro parámetro que es muy diferente en estos materiales: la inercia térmica, grande en el hormigón mal conductor de la temperatura y pequeña en el acero buen conductor. Por ello, en un instante intermedio durante el incendio hay alargamientos diferenciales entre hormigón y acero – en ese intervalo de tiempo el hormigón ha deformado poco y el acero bastante más, aunque al final alcancen el mismo valor- que producen esfuerzos sobre los conectadores de tal magnitud, que es prácticamente imposible diseñar la conexión para absorberlos y originan su rotura; entonces la viga mixta deja de trabajar como tal con una pérdida instantánea de resistencia que origina rotura frágil.

5.2. Normativa

La seguridad en las construcciones bajo el fuego es un concepto de carácter subjetivo, relacionado con el entorno social donde se ubican. Durante mucho tiempo el incendio se ha considerado una situación catastrófica que, cuando se produce, origina daños inevitables, pero a medida que ha ido creciendo la importancia de los edificios construidos –número de usuarios, altura, coste de instalaciones, etc.- lo hace el riesgo y la alarma creada por los efectos que se derivan. En consecuencia, las normativas recientes de los países desarrollados contemplan la prevención de incendios, manteniendo su carácter accidental, para evitar que puedan producir daños a las personas y pérdidas económicas desproporcionadas, como establece la Directiva de Productos de Construcción 89/106/EEC:

Las construcciones se proyectarán y construirán de tal modo que, en caso de que se produzca un incendio:

- *La capacidad resistente de la construcción se mantenga durante un periodo determinado de tiempo.*
- *Se limite la aparición y expansión de las llamas y del humo dentro de la construcción.*
- *Se limite la expansión del incendio a las construcciones colindantes.*
- *Los ocupantes puedan abandonar la construcción o ser rescatados por otros medios.*
- *Se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.*

Estos requisitos se pueden conseguir con diferentes estrategias que incluyen medidas de protección activas –tienden a apagar el incendio- y pasivas –adecuan la resistencia de la estructura y limitan su propagación-.

En el ámbito nacional, Norma Básica de la Edificación CPI-96 “Condiciones de protección contra incendios en los edificios” es la versión actual de la legislación sobre ésta materia desarrollada en las dos últimas décadas; tiene fundamentalmente carácter de “protección” –minimizar los daños una vez declarado o que sean desproporcionados con su magnitud- y apenas incluye medidas de “prevención” –para evitarlo- que son materia específica de otros reglamentos de seguridad aplicables a las actividades desarrolladas en los edificios. Su contenido es muy amplio: compartimentación, evaluación, señalización, comportamiento de materiales y elementos constructivos, instalaciones generales y de seguridad frente a incendios; aunque en su articulado dedica poca atención a los aspectos estructurales que aquí nos interesan –sólo establece los tiempos de resistencia al fuego requeridos para distintos usos, sin especificar criterios de comprobación salvo para algunos tipos de revestimientos- en el Apéndice 1 remite a otros documentos del Comité Europeo de Normalización (CEN) para verificar la resistencia al fuego de los elementos estructurales, entre los que incluye la parte 1.2 del Eurocódigo 4 a la que corresponden los criterios sobre estructuras mixtas.

En muchos países, EN1993-1-2 y EN1994-1-2 constituyen los primeros documentos formales sobre ingeniería de seguridad ante incendio que se pueden utilizar convenientemente en el diseño.

Para analizar el comportamiento según los criterios generales de CPI-96 –en las pocas situaciones que contempla- inicialmente, por la tabla 1 de su artículo 14 se obtiene el tiempo de estabilidad al fuego exigible a los elementos estructurales en función del uso y altura de evaluación del edificio; no establece directamente cómo verificar esta prescripción en una estructura no protegida, y si lo está, en el Apéndice 1 indica los tiempos de resistencia que proporcionan algunos revestimientos –tabla 1: muros de hormigón; tabla 2: muros y tabiques de ladrillo cerámico o silito-calcáreo; tabla 3: muros y tabiques de bloques de hormigón- y en el artículo 17 especifica los requisitos que deben satisfacer los documentos justificativos del comportamiento ante el fuego de otros materiales y sistemas de protección –Marcas, Sellos y Certificados de Conformidad-. Como se ve, CPI sólo establece el tiempo necesario de resistencia al fuego de los elementos estructurales y para su comprobación en estructura mixtas hay que recurrir a los criterios del Eurocódigo 4.

Otro aspecto de esta norma que afecta a la estructura, aunque no sea específico de ella, se refiere a los sectores de incendio en que deben estar compartimentados los edificios para garantizar que el fuego, si se produce, quede confinado y controlado en su interior durante un tiempo establecido en función de su uso; para ello, los cerramientos que lo delimitan –verticales y horizontales- y los elementos estructurales interiores deben tener las características adecuadas. En el artículo 15 indica que la superficie construida de un sector debe ser $<2.500\text{m}^2$, pudiendo duplicarse este valor cuando esté protegido con una instalación de rociadores automáticos de agua no eximida por la norma.

5.3. Criterios de comprobación

El comportamiento ante el fuego de los elementos constructivos y estructurales queda caracterizado por los siguientes aspectos,

- Resistencia “R”: capacidad de una estructura o elemento estructural para soportar cargas durante la acción del fuego.
- Integridad “E”: capacidad de un elemento de compartimentación para prevenir el paso de llamas y gases calientes.

- Aislamiento térmico “I”: capacidad de un elemento de compartimentación para evitar la transmisión excesiva de calor.

Estos términos son similares, con alguna diferencia, a los que CPI-96 designada por E – estabilidad-, P –para-llamas- y R –resistencia.

“R”, “E” e “I” deben tener en cuenta de acuerdo con las siguientes especificaciones:

- Elementos que sólo requieren resistencia: “R”; han de mantener su capacidad portante durante la exposición al fuego –el colapso puede producirse por rotura de secciones, formación de un mecanismo, pandeo, etc.
- Elementos sólo de compartimentación: “E e I”; realizarán esta función durante la exposición al fuego, evitando,
 - La pérdida de integridad “E” por formación de grietas, agujeros o aberturas suficientemente grandes para permitir su propagación por el paso de gases calientes o llamas.
 - El fallo en el aislamiento “I” por alcanzarse en superficies no expuestas temperaturas superiores a las de ignición; el incremento medio de temperatura en la superficie no expuesta se limita a 140°C y el máximo a 180°C.
- Elementos con ambas funciones: “R, E e I”.

Además, se limitará la deformación cuando los medios de protección o los criterios de cálculo para la compartimentación estén influenciados por las flechas de los elementos sustentantes, y también para evitar pérdidas de apoyo, dilatación excesiva en los tirantes o la desintegración de la cubierta.

El campo de aplicación de los procedimientos incluidos en la parte 1-2 del Eurocódigo 4 para estructuras mixtas expuestas al fuego queda limitado a los métodos pasivos de protección, sin incluir medidas activas.

Para el análisis de la estructura, el incendio es una acción sobre ella y se caracteriza por una curva que relaciona la temperatura alcanzada y el tiempo transcurrido, figura 5.1. La evolución de la temperatura con el tiempo depende de: la geometría del edificio o el local, la carga del fuego, la ventilación y la transmisión térmica. Dado su carácter indeterminado, se adopta convencionalmente una de referencia tanto para los cálculos como para ensayar el comportamiento de los materiales y elementos constructivos, denominada curva normalizada o fuego-tipo, figura 5.2, que corresponde a la expresión,

$$T - T_o = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [5.1]$$

t tiempo de referencia, en minutos

T_o temperatura ambiente inicial, en °C –normalmente 20°C-

T temperatura ambiental en el instante t , en °C

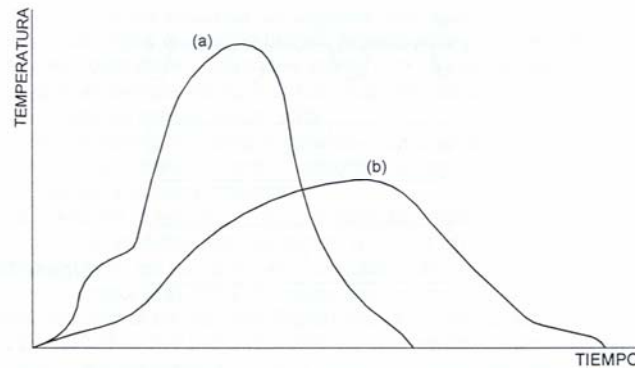


Figura 5.1. Temperatura alcanzada vs tiempo transcurrido.

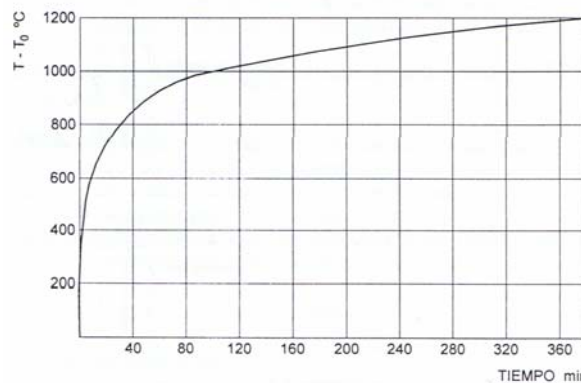


Figura 5.2. Curva normalizada o fuego tipo.

La seguridad al fuego puede verificarse en los siguientes dominios, que implícitamente contienen el tiempo de resistencia establecido por CPI:

- Dominio del tiempo $t_{fi,req} \leq t_{fi,d}$ [5.2]
- Dominio de la resistencia $E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$ [5.3]
- Dominio de la temperatura $\theta_d \leq \theta_{cr,d}$ [5.4]

- $t_{fi,req}$ tiempo requerido de resistencia al fuego
- $t_{fi,d}$ tiempo de resistencia al fuego de la estructura
- $E_{fi,d,t}$ efecto de las acciones sobre la estructura en situación de fuego
- $R_{fi,d,t}$ capacidad resistente de la estructura en situación de fuego
- θ_d temperatura de la estructura por efecto del fuego
- $\theta_{cr,d}$ temperatura crítica de la estructura

El comportamiento se analizará por alguno de los procedimientos siguientes:

- Métodos avanzados de cálculo. Estudian la respuesta al fuego de los elementos estructurales, subestructuras o estructuras completas, considerando la interacción entre partes expuestas y las que no lo están; requieren el uso de programas complejos y el conocimiento detallado de las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales a elevada temperatura, para el seguimiento de los cambios de comportamiento a intervalos regulares durante el incendio, que permiten predecir el tiempo que tarda en producirse el fallo y la forma en que tiene lugar.

- Modelos simplificados de cálculo. Permiten estimar la resistencia de elementos o subestructuras por métodos numéricos; su campo de aplicación está limitado a tipologías cuyos resultados se han podido confrontar con valores experimentales.
- Datos tabulados. Resultados obtenidos por métodos avanzados o ensayos, que proporcionan la resistencia de algunos elementos concretos; es el nivel más útil para el proyectista aunque sólo se dispone de tablas para pocos tipos.
- Cálculo basado en ensayos. Como alternativa a los métodos avanzados, el proyecto se puede basar en resultados de ensayos cuando no es posible verificar el comportamiento por otros procedimientos; se debe ensayar una parte representativa de la estructura para obtener la resistencia del elemento o datos térmicos para análisis posteriores. El anejo informativo H del Eurocódigo 4 incluye una guía para la planificación de ensayos y evaluación de resultados.

La aplicación de los datos tabulados y los métodos simplificados está limitada a algunos tipos de elementos estructurales sometidos a fuego normalizado con la misma distribución de temperatura en toda su longitud, y proporcionan resultados conservadores en comparación con los ensayos o métodos avanzados; actualmente son los únicos procedimientos útiles en la práctica. Para su utilización, necesitamos conocer las acciones y las características de los materiales en situación de incendio, que son diferentes a las establecidas para temperatura ambiente; por ello, en la comprobación de estructuras frente al fuego se considerará:

5.3.1. Acciones

Las acciones provocadas por la exposición al fuego pueden ser directas o indirectas: las primeras son de carácter térmico debidas al flujo de calor entre la estructura y su entorno, y las segundas mecánicas por coacciones a las deformaciones de los cambios de temperatura; actúan junto con las correspondientes a ambiente normal y para obtener su efecto en situación de incendio $E_{fi,d,t}$ se utiliza la combinación accidental –el fuego no es probable que se produzca simultáneamente con los valores máximos de otras acciones variables–.

$$\sum G_{k,j} \cdot \gamma_{GA,j} + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum Q_{k,i} \cdot \psi_{2,i} + \sum A_d(t) \quad [5.5]$$

- $G_{k,j}$ valor característico de una acción permanente
- $Q_{k,1}$ valor característico de la acción variable considerada como principal
- $Q_{k,i}$ valor característico del resto de las acciones variables
- $\sum A_d(t)$ acciones de cálculo por exposición del fuego en el instante t
- $\gamma_{GA,j}$ coeficiente de seguridad para acciones permanentes en situación accidental; se adopta $\gamma_{GA,j} = 1$
- $\psi_{1,1}$ y $\psi_{2,i}$ coeficientes de combinación para el valor frecuente y casi permanente de las acciones variables –se adoptan los mismos que a temperatura ambiente–

Como valores característicos de las acciones permanentes y variables se consideran los nominales especificados por NBE-AE-88.

Una regla que en ocasiones simplifica el criterio anterior, permite obtener el efecto de las acciones directas en situación de incendio $E_{fi,d,t}$ a partir de los resultados correspondientes al cálculo de la estructura a temperatura ambiente, por la relación,

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad [5.6]$$

E_d efecto de las acciones para la combinación fundamental a temperatura ambiente
 η_{fi} factor definido por,

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} \quad [5.7]$$

γ_{GA} es el coeficiente de ponderación para acciones permanentes en situación accidental, γ_G y γ_Q los de acciones permanentes y variables para la combinación fundamental; todos ellos a temperatura ambiente; ξ es la relación entre la carga variable principal y la permanente aplicadas a la estructura,

$$\xi = Q_{k1} / G_k \quad [5.8]$$

Si hay varios valores posibles de η_{fi} se usa el mayor; para edificios normales con estructura mixta se puede tomar $\eta_{fi} = 0,6$ y en zonas de almacén 0,7; la figura 5.3 representa su variación para $\gamma_{GA} = 1,0$, $\gamma_G = 1,35$ y $\gamma_Q = 1,50$.

Cuando en los datos tabulados se hace referencia al nivel de carga $\eta_{fi,t}$ para proyecto frente al fuego, corresponde la relación,

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} \cdot R_d \quad [5.9]$$

$E_{fi,d,t}$ es el efecto de las acciones en situación de incendio y R_d la resistencia del elemento a temperatura ambiente; con el valor $E_{fi,d,t}$ dado por [5.9], de ésta última expresión resulta,

$$\eta_{fi,t} = \eta_{fi} \cdot E_d / R_d \quad [5.10]$$

Por lo que el nivel de carga en situación de incendio equivale a η_{fi} multiplicado por la reacción entre el efecto de las acciones y la resistencia de la pieza, ambas a temperatura ambiente; como simplificación conservadora se puede suponer que $E_d / R_d = 1$ -a temperatura ambiente la pieza está al límite de su resistencia- con lo cual $\eta_{fi,t} = \eta_{fi}$ y su valor se obtiene de la figura 5.3.

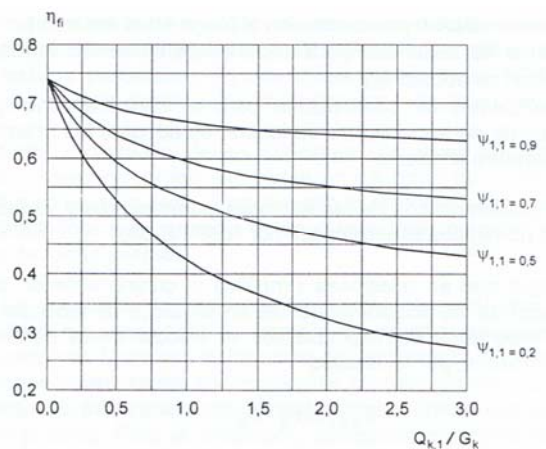


Figura 5.3. Cálculo gráfico de η_{fi} .

5.3.2. Comportamiento mecánico de los materiales

Los diagramas tensión-deformación que se definen para el comportamiento de los materiales a elevadas temperaturas corresponden a valores característicos, pero coinciden con los ponderados puesto que los coeficientes parciales para cálculo frente al fuego son,

$$\gamma_{M,f_i,a} = \gamma_{M,f_i,s} = \gamma_{M,f_i,c} = \gamma_{M,f_i,v} = 1,0 \quad [5.11]$$

- **Acero estructural.**

El diagrama genérico en función de la temperatura del acero θ_a está representado en la figura 5.4 y queda definido por tres parámetros:

- La pendiente de la zona elástica lineal $\bar{E}_{a,\theta}$.
- El límite de proporcionalidad $f_{ap,\theta}$.
- La tensión máxima $f_{amax,\theta}$.

Que se obtiene aplicando los factores de reducción K_θ de la tabla 5.1 al valor de $E_{a,20^\circ C}$ o $f_{ay,20^\circ C}$ a temperatura ambiente –para casos intermedios se puede interpolar linealmente.

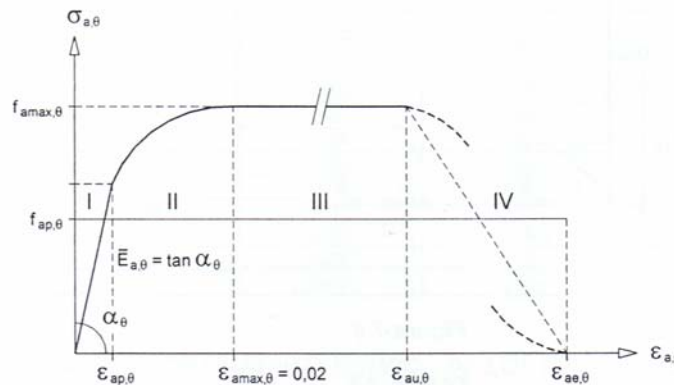


Figura 5.4. Diagrama tensión-deformación acero estructural.

Temperatura del acero θ_a (°C)	$k_{E,\theta} = \frac{\bar{E}_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{max,\theta} = \frac{f_{amax,\theta}}{f_{ay}}$
20	1,00	1,00	1,00	1,25
100	1,00	1,00	1,00	1,25
200	0,90	0,807	1,00	1,25
300	0,80	0,613	1,00	1,25
400	0,70	0,420	1,00	
500	0,60	0,360	0,78	
600	0,31	0,180	0,47	
700	0,13	0,075	0,23	
800	0,09	0,050	0,11	
900	0,0675	0,0375	0,06	
1000	0,0450	0,0250	0,04	
1100	0,0225	0,0125	0,02	
1200	0	0	0	

Tabla 5.1. Factores de reducción de las características mecánicas del acero estructural a altas temperaturas.

- **Hormigón.**

El diagrama para compresión simple en función de la temperatura del hormigón θ_c se representa en la figura 5.5, definido por dos parámetros:

- La resistencia a compresión $f_{c,\theta}$.
- La deformación $\varepsilon_{cu,\theta}$ correspondiente a $f_{c,\theta}$.

El segundo lo proporciona directamente la tabla 5.2 y el primero se obtiene aplicando el factor de reducción $K_{c,\theta}$ de la misma tabla –se puede interpolar linealmente- a su resistencia a temperatura ambiente $f_{c,20^\circ C}$, para hormigones silíceos de densidad normal –en los calizos también se puede utilizar quedando, normalmente, del lado de la seguridad-.

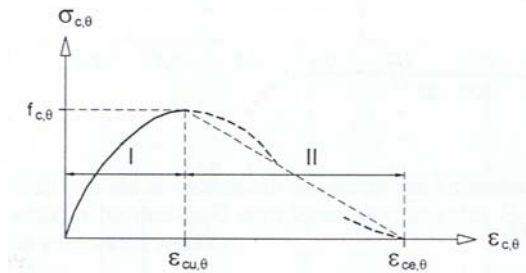


Figura 5.5. Diagrama tensión-deformación hormigón.

Temperatura del hormigón θ_c (°C)	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_c$		$\varepsilon_{cu,\theta} \cdot 10^3$
	normal	ligero	normal
20	1,00	1,00	2,5
100	1,00	1,00	4,0
200	0,95	1,00	5,5
300	0,85	1,00	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	-

Tabla 5.2. Factores de reducción de las características mecánicas del hormigón a altas temperaturas.

- **Acero de armar.**

Para aceros de dureza natural el diagrama tensión-deformación es como el indicado para el acero estructural, con los mismos parámetros definidos por la tabla 5.1 en función de su temperatura; para los estirados en frío es válido el modelo, pero con los coeficientes reductores de la tabla 5.3.

Temperatura acero conformado en frío (chapa) θ_s (°C)	$\frac{E_{s,\theta}}{E_s}$	$\frac{f_{sp,\theta}}{f_{sy}}$	$\frac{f_{sy,\theta}}{f_{sy}}$
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	0,96	1,00
200	0,87	0,92	1,00
300	0,72	0,81	1,00
400	0,56	0,63	0,94
500	0,40	0,44	0,67
600	0,24	0,26	0,40
700	0,08	0,08	0,12
800	0,06	0,06	0,11
900	0,05	0,05	0,08
1000	0,03	0,03	0,05
1100	0,02	0,02	0,03
1200	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.3. Factores de reducción de las características mecánicas de acero conformado en frío a altas temperaturas.

5.3.3. Comportamiento térmico de los materiales

El Eurocódigo 4 propone las características siguientes para modelos simplificados de cálculo; para modelos avanzados incluye otras expresiones más aproximadas y, por tanto, más complejas.

- **Acero estructural y de armar**
 - Deformación térmica $\Delta L/L = 14 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta_a - 20)$ [5.12]
 - Calor específico $C_a = 600 J/Kg \cdot ^\circ C$ [5.13]
 - Conductividad térmica $\lambda_a = 45 W/m \cdot ^\circ C$ [5.14]

- **Hormigón de densidad normal**
 - Deformación térmica $\Delta L/L = 18 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta_a - 20)$ [5.15]
 - Calor específico $C_a = 1000 J/Kg \cdot ^\circ C$ [5.16]
 - Conductividad térmica $\lambda_a = 1,60 W/m \cdot ^\circ C$ [5.17]

5.3.4. Comportamiento estructural del forjado ante el fuego

El forjado mixto de chapa colaborante es diseñado inicialmente a flexión como una serie de vanos simplemente apoyados o bien como un forjado continuo. Con fuego, el forjado debe ser considerado como simplemente apoyado o bien como continuo, siguiendo las bases del diseño inicial. La resistencia del forjado en condiciones de fuego está asegurada por el refuerzo de las armaduras pasivas. Éste puede ser el refuerzo puesto en el diseño a temperatura ambiente (para control de fisuración, etc.) que en muchos casos resulta suficiente para las condiciones de fuego.

Durante el fuego la chapa grecada se calienta rápidamente, se expande y existe la posibilidad de que ésta se separe del hormigón. Sin embargo, en recientes ensayos se comprueba que este comportamiento no es relevante. Es normal, aunque conservativo, asumir que la chapa no contribuye en condiciones de fuego. Sin embargo, la chapa contribuye a mejorar los criterios de

integridad y aislamiento térmico: ésta actúa como diafragma previniendo el paso de la llama y de gases calientes, como escudo reduciendo el flujo de calor a través del hormigón.

Sin la contribución de la chapa, el refuerzo empieza a ser efectivo y el forjado actúa como un forjado de hormigón armado. Eventualmente el refuerzo se agota y el forjado falla. Es entonces cuando puede desarrollarse una *acción de catenaria* fuera de los bordes del forjado con el refuerzo, produciendo una pequeña extensión debida a la chapa, actuando en tracción pura en lugar de flectada. Una importante conclusión de recientes ensayos es que la deformación de los bordes de los soportes de las vigas es mínima y la *acción de catenaria* es muy pequeña. El aparente acortamiento de la luz debido a la flexión central de los nervios de la chapa, es aproximadamente igual al incremento de la luz debido a la expansión térmica.

El papel que juega el hormigón es muy importante en cuanto que dota al refuerzo de aislamiento térmico y controla la transmisión del calor a través del forjado. El hormigón aligerado tiene mejor comportamiento que el hormigón normal. Además pierde fuerza menos rápidamente que el hormigón normal en condiciones de fuego.

Conocer y aplicar los criterios “europeos” de cálculo de estabilidad al fuego permite, con un armado apropiado, obviar la necesidad de protección de la propia chapa (aunque no de la periferia de viguetas, vigas y soportes, en general), lo que potencia considerablemente, en su caso, la reducción de costes y plazos de ejecución de este tipo de forjados.

5.4. Comprobación ante el fuego de los Forjados mixtos según el modelo simplificado del Eurocódigo 4

5.4.1. Introducción

Su aplicación requiere conocer las acciones sobre la estructura en situación de incendio y la variación de las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales en función de la temperatura, aspectos que ya se han citado en los apartados anteriores.

Estos procedimientos son aplicables a los forjados de hormigón sobre chapa nervada, continuos o simplemente apoyados, calentados uniformemente por el fuego normalizado y sin protección; no incluyen el posible efecto de coacciones o dilataciones por el fuego.

Con protección sobre la chapa se reduce la transferencia de calor al hormigón en función de las características de aislamiento; el criterio de resistencia R se considera aceptable si la temperatura de la chapa se mantiene $\leq 350^{\circ}C$ para el fuego normalizado y el de aislamiento térmico “I” (integridad) se comprueba igual que para forjados no protegidos, incluyendo la reducción de temperatura que proporciona el revestimiento.

El campo de aplicación para forjados sin protección está limitado a los valores dados por la tabla 5.4, con espesores y longitudes indicadas en la figura 5.6,

perfiles de cola de milano	perfiles trapezoidales
$77,0 \leq l_1 \leq 135,0$ mm	$80,0 \leq l_1 \leq 155,0$ mm
$110,0 \leq l_2 \leq 150,0$ mm	$32,0 \leq l_2 \leq 132,0$ mm
$38,5 \leq l_3 \leq 97,5$ mm	$40,0 \leq l_3 \leq 115,0$ mm
$30,0 \leq h_1 \leq 60,0$ mm	$50,0 \leq h_1 \leq 100,0$ mm
$50,0 \leq h_2 \leq 130,0$ mm	$50,0 \leq h_2 \leq 100,0$ mm

Tabla 5.4

Siguiendo los criterios de comprobación de estructuras bajo la acción del fuego, tenemos que:

- Integridad “E”: para forjados mixtos de chapa colaborante este criterio se cumple.
- Aislamiento térmico “I”: el aislamiento térmico del forjado depende básicamente de la geometría y del espesor del mismo.
- Resistencia “R”: consiste en comprobar que el momento último que puede soportar el forjado es mayor que el momento de sollicitación, bajo condiciones de fuego.

Una extensa serie de ensayos realizados en el Reino Unido sobre todo tipo de perfiles metálicos colaborantes del mercado europeo, permitió observar que cualquier diseño superaba los 30 minutos de resistencia al fuego sin ningún refuerzo adicional.

Es por ello aceptado que un forjado colaborante tiene garantizada una RF-30 sin necesidad de armaduras complementarias.

5.4.2. Criterio de aislamiento térmico “I”

En el apartado D.1 el Anejo D del Eurocódigo 4, da un procedimiento para calcular el tiempo de resistencia para el criterio de aislamiento que un forjado mixto de chapa colaborante es capaz de soportar. Éste tiempo depende básicamente de unos coeficientes tabulados y de la geometría del forjado. En el apartado D4 del mismo documento, explica cómo calcular el espesor efectivo y da unos mínimos que deben cumplirse con respecto al criterio de aislamiento térmico. Éste lo explicamos a continuación.

Para el criterio de aislamiento térmico “I” (integridad) se considera el espesor eficaz definido por,

- Para $h_2/h_1 \leq 1,5$ y $h_1 > 40mm$

$$h_{eff} = h_1 + 0,5 \cdot h_2 \cdot \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1 + L_3} \right) \quad [5.19]$$

- Para $h_2/h_1 > 1,5$ y $h_1 > 40mm$

$$h_{eff} = h_1 \cdot \left(1 + 0,75 \cdot \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1 + L_3} \right) \right) \quad [5.20]$$

h_3 es el espesor del pavimento sobre la capa de hormigón, si existe, que se adoptará $\leq 20mm$; cuando $L_3 > 2 \cdot L_1$ el espesor eficaz se toma h_1 ; a partir del valor h_{eff} la tabla 5.5 proporciona el tiempo de resistencia para el criterio de aislamiento –o inversamente, dada la resistencia se obtiene el espesor eficaz necesario del forjado-.

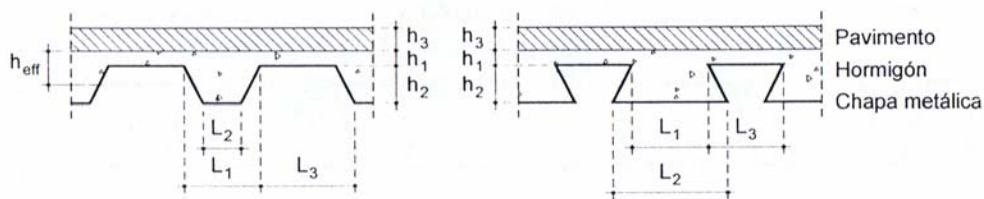


Figura 5.6. Espesores y longitudes para el cálculo del ancho efectivo.

Resistencia al fuego normalizado	Espesor eficaz mínimo h_{eff} (mm)
I 30	$60 - h_3$
I 60	$80 - h_3$
I 90	$100 - h_3$
I 120	$120 - h_3$
I 180	$150 - h_3$
I 240	$175 - h_3$

Tabla 5.5

5.4.3. Criterio de resistencia "R"

El límite para el criterio de resistencia se alcanza cuando el valor del efecto de las acciones $E_{fi,d,t}$ es igual a su capacidad resistente en situación de incendio $R_{fi,d,t}$, obtenida por cálculo plástico a partir de la geometría y posición de las rótulas, aplicando las reglas que se indican a continuación para momento positivo o negativo – se puede despreciar la resistencia a tracción del hormigón y de la chapa metálica-.

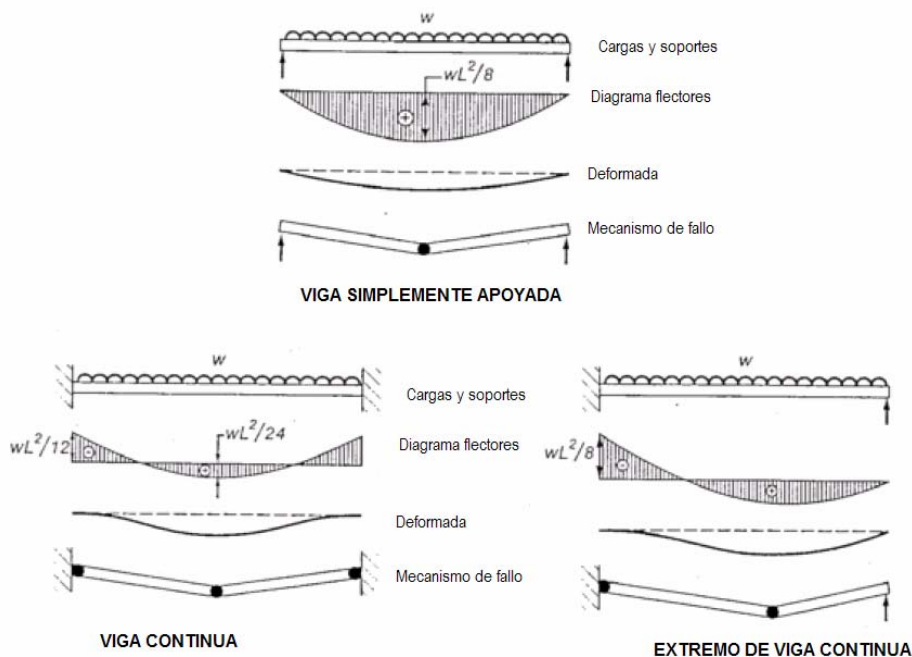


Figura 5.7. Cálculo plástico de los esquemas estructurales más frecuentes.

El momento resistente se determinará como sigue:

$$M_{fi,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot z_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}} \right) + \alpha_{slab} \cdot \sum_{j=1}^m A_j \cdot z_j \cdot k_{c,\theta,j} \cdot \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad [5.21]$$

Donde,

$$\alpha_{slab} = 0.85$$

$f_{y,i}$, es el límite elástico f_y para el elemental área de acero A_i , tomado como positivo en el lado de las compresiones del eje neutro plástico y como negativo en el lado de las tensiones.

$f_{c,j}$ es la resistencia para el elemento de hormigón de área A_j a 20°C.

$k_{y,\theta,i}$ o $k_{c,\theta,j}$ están definidos en las tablas 5.1 y 5.2

z_i, z_j es la distancia desde la fibra neutra plástica hasta el centro de las áreas elementales A_i o A_j .

a) *Cálculo de de las resistencias de los materiales para momento último positivo*

$$M_{fi,Rd}^+$$

Si se cumplen las condiciones de anchos efectivos recogidas en el apartado anterior 5.4.2 del criterio de aislamiento (I), se puede suponer que la temperatura en la zona superior del hormigón mantiene el valor ambiental y su resistencia a compresión es $0,85 \cdot f_{c,20^\circ C}$.

La chapa alcanzará una temperatura diferente en función de si se trata de ala superior, inferior o bien el alma. Ésta temperatura se halla según lo establecido en el apartado D.2 del Anejo D del Eurocódigo 4. Una vez tenemos la temperatura, la resistencia de la chapa variará en función de la tabla 5.3.

La temperatura θ_s de las armaduras se obtiene por la tabla 5.6, en función de la resistencia a fuego especificada en proyecto y del valor z dado por,

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad [5.22]$$

Siendo u_1 , u_2 y u_3 sus distancias en mm a la chapa, figura 5.8; la utilización de esta tabla queda restringida por las limitaciones:

$$u_1, u_2 \geq 50mm \quad [5.23a]$$

$$u_3 \geq 50mm \quad [5.23.b]$$

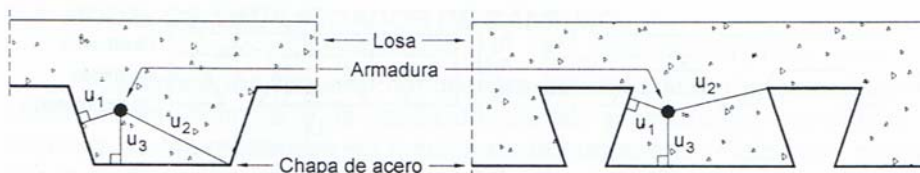


Figura 5.8. Cálculo de z.

Resistencia al fuego normalizado	Temperatura del acero de armar (°C)
R 60	$\theta_s = 1175 - 350 \cdot z \leq 810^\circ C$ para $z \leq 3,3$
R 90	$\theta_s = 1285 - 350 \cdot z \leq 880^\circ C$ para $z \leq 3,6$
R 120	$\theta_s = 1370 - 350 \cdot z \leq 930^\circ C$ para $z \leq 3,8$
R 180	$\theta_s = 1490 - 350 \cdot z \leq 1000^\circ C$ para $z \leq 4,0$
R 240	$\theta_s = 1575 - 350 \cdot z \leq 1050^\circ C$ para $z \leq 4,2$

Tabla 5.6. Cálculo de la temperatura de la armadura a partir de z.

A partir de θ_s se determina la resistencia de las armaduras por la tabla 5.1 que, con la del hormigón y la de la chapa expresada antes, permite calcular $M_{fi,Rd}^+$.

b) Cálculo de de las resistencias de los materiales para momento último negativo

$$M_{fi,Rd}^-$$

En este caso el hormigón comprimido está en la zona inferior del forjado que se calienta por el fuego y reduce su resistencia; como aproximación conservadora para evitar el cálculo en la sección real nervada, se puede considerar un espesor uniforme h_{eff} definido en el apartado 5.4.2 para el criterio de aislamiento, obteniendo la variación de temperatura por la tabla 5.7 en función de la distancia x a la fibra inferior, y de ella su resistencia por la tabla 5.2 –considerando escalones de temperatura constante-.

Para determinar la resistencia $f_{s,max,\theta}$ de las armaduras en la zona traccionada del forjado se utiliza la tabla 5.1, considerando una temperatura θ_s igual a la del hormigón situado en esa posición; con este valor y el del hormigón se obtiene $M_{fi,Rd}^-$.

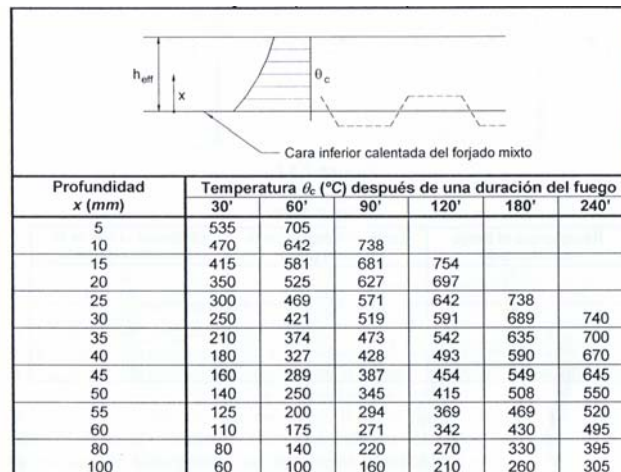


Tabla 5.7. Distribución de la temperatura en una losa maciza de hormigón, con un espesor efectivo.

5.5. Otros modelos simplificados para la comprobación ante el fuego

Aunque lo que se explica exhaustivamente en el presente trabajo está referido íntegramente al modelo de cálculo dado por el Eurocódigo 4, existen otros modelos simplificados. Concretamente citaremos los dos publicados por “The Steel Construction Institute” (ver ref. 10).

El primer método que da es el llamado “Método Ingenieril”, que es muy parecido al que se ha explicado en el apartado anterior. Este método consiste en el cálculo de un momento resistente del forjado bajo condiciones de fuego, donde las resistencias de los materiales están tabuladas en función de la temperatura. Los criterios de comprobación de los momentos son diferentes a los del Eurocódigo 4.

El segundo método, llamado “Método Simplificado”, fue desarrollado por CIRIA (ver ref. complementarias [1] y [2]). Difiere del primero en cuanto que los cálculos no son requeridos, simplificando enormemente las comprobaciones.