

CAPÍTULO XII. PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO FRENTE AL INCENDIO

Artículo 43.º Consideraciones generales

43.1. Bases.

El capítulo XII de esta Instrucción establece los criterios a aplicar en el proyecto de estructuras de acero de edificación para verificar su capacidad portante bajo la acción de un incendio, considerado como una "situación accidental", a efectos de seguridad estructural.

Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este capítulo los establecimientos regulados por normativa específica del Ministerio de Defensa, los establecimientos con instalaciones cuya vigilancia corresponda al Consejo de Seguridad Nuclear, y los establecimientos a que se refiere la Ley General de Seguridad Minera.

43.2. Acción de incendio a considerar en el proyecto de estructuras acero en edificación

Los modelos de la acción de incendio admitidos por esta Instrucción para el proyecto de estructuras de acero en edificación, consideran sólo sus efectos sobre la estabilidad o capacidad portante, y no otros aspectos de su comportamiento ante el fuego regulados por otras normas de construcción, como por ejemplo la estanquidad al fuego que llegado el caso pudiera ser exigible, la capacidad de aislamiento térmico, etc. Por lo tanto la aplicación del presente articulado se restringe al caso, normal en el proyecto de edificios con estructuras de acero, de que se asignen a otros elementos constructivos esas prestaciones distintas de los aspectos puramente resistentes.

Dependiendo del fuego de cálculo adoptado deben de utilizarse los siguientes procedimientos:

- a) con una curva nominal tiempo-temperatura, el análisis térmico de los elementos estructurales se aplica para un periodo de tiempo especificado;
- b) con otro modelo de fuego, el análisis térmico de los elementos estructurales se hace para toda la duración del incendio, incluida la fase de enfriamiento.

Salvo que las Instrucciones o Normas de acciones vigentes indiquen lo contrario se adoptarán para los incendios los modelos incluidos en el ANEJO.

43.3. Procedimientos de comprobación de la seguridad de las estructuras de acero ante el incendio

Los procedimientos de comprobación de la seguridad de las estructuras de acero ante el incendio explícitamente incluidos en esta Instrucción pertenecen a la categoría de los modelos de cálculo catalogados como "simplificados", en los Eurocódigos relativos a esta cuestión para estructuras de diversos materiales.

Siempre que la normativa local aplicable no proscriba explícitamente la adopción de criterios teórico-experimentales, deberán ser admitidos los modelos de cálculo "avanzados" que con carácter normativo (no informativo) definan los Eurocódigos o Euronormas de carácter firme (no experimental), con idéntica validez y en igualdad de condiciones que los criterios expuestos en la presente Instrucción, la cual otorga en tal caso plena libertad de elección de unos u otros criterios exclusivamente al autor del proyecto.

Comentarios

Esta observación se aplica especialmente al articulado relativo al cálculo de las temperaturas alcanzadas en el acero (artículo 48), ya que en los mismos se recoge únicamente el modelo de cálculo más sencillo, que supone una distribución homogénea de temperaturas en cada instante del proceso de incendio, aunque por la elevada difusividad térmica del acero esta hipótesis simplificadora es aceptable, siempre que no se extraigan de su contexto los diversos criterios recogidos en esta Instrucción, que por esa y otras hipótesis son aplicables, en principio, sólo como un conjunto unitario, salvo justificación apropiada.

Artículo 44.º Acciones mecánicas e indirectas concomitantes con el incendio

Comentarios

La observación anterior se aplica también en este apartado al no hacerse referencia explícita las acciones indirectas debidas a las dilataciones y deformaciones térmicas.

Para las acciones mecánicas se adoptarán los valores de cálculo correspondientes a una situación accidental:

$$\Sigma G_{k,i} + \Psi_{1,j} Q_{k,1} + \Sigma \Psi_{2,j} Q_{k,j} \quad \text{donde:}$$

$G_{k,i}$ Valores característicos de las acciones permanentes

$Q_{k,1}, \Psi_{1,j}, Q_{k,1}$ Valor característico y valor representativo frecuente de la acción variable determinante para cada comprobación resistente.

$Q_{k,2}, \Psi_{2,j}, Q_{k,2}$ Valores característicos y valores representativos casi permanentes del resto de acciones variables que sean desfavorables para cada comprobación.

Salvo valores menores de los coeficientes Ψ definidos en el capítulo correspondiente de esta Instrucción, podrán adoptarse los siguientes:

Sobrecargas de uso en zonas de almacén

$$\Psi_1 = 0.9$$

$$\Psi_2 = 0.8$$

Sobrecargas de uso en viviendas	$\Psi_1 = 0.5$	$\Psi_2 = 0.3$
Sobrecargas de uso en otros casos	$\Psi_1 = 0.7$	$\Psi_2 = 0.6$
Sobrecargas de nieve	$\Psi_1 = 0.2$	$\Psi_2 = 0$
Acción del viento	$\Psi_1 = 0.5$	$\Psi_2 = 0$
Acciones indirectas	$\Psi_1 = 0.5$	$\Psi_2 = 0$

Artículo 45.º Propiedades de los materiales sometidos a la acción del incendio

Los artículos siguientes definen los valores "convencionales" a adoptar en los modelos de cálculo formulados por esta Instrucción, para diversas características mecánicas y térmicas de los materiales empleados. Algunos de dichos valores convencionales son cantidades "ad hoc" calibradas para ajustar los resultados de aplicación de dichos modelos, englobando empíricamente la incidencia de aspectos que trascienden del fenómeno puro referenciado en la denominación literal de cada magnitud o parámetro. Por lo tanto no pueden utilizarse fuera del contexto en que se incluyen.

45.1. Características mecánicas de los aceros estructurales

Para las comprobaciones resistentes en situación de incendio, se adoptará $\gamma_{M,fi} = 1$ como coeficiente parcial de seguridad de la resistencia del acero a temperatura elevada, definida en el presente apartado.

Aceros estructurales al carbono:

Para su aplicación en los procedimientos de comprobación resistente definidos en este capítulo, se deberán adoptar los siguientes coeficientes correctores de las características mecánicas del acero estructural, en función de la temperatura alcanzada por el mismo (θ_a):

$K_{y,\theta} = F_{y,\theta}/f_y$ Cociente entre el límite elástico efectivo y el límite elástico a 20 °C

$K_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$ Cociente entre el módulo de deformación en la fase lineal del diagrama tensión-deformación, y el módulo de Young a 20 °C

Los valores de estos coeficientes deben tomarse de la Tabla 45.1.1, en la que se admite interpolar linealmente. La aplicación de estos coeficientes es válida si se aplican los modelos de cálculo simplificado de las temperaturas del acero recogidos en esta Instrucción, u otros procedimientos admitidos por la misma, pero en este segundo caso se debe verificar que la velocidad de incremento de temperatura se mantenga entre los límites $2 \leq d\theta_a/dt \leq 50$ °C/minuto.

En la misma Tabla consta también el parámetro siguiente:

$K_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$ Cociente entre el límite de proporcionalidad y el límite elástico a 20 °C

Junto con los anteriores, este parámetro interviene en la formulación del siguiente diagrama tensión (σ) -deformación (ϵ) uniaxial, que puede adoptarse si se emplean métodos de cálculo "avanzados", de entre los indicados como válidos en el artículo 47:

Instrucción EAE. Capítulo XII

- Para $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta}/E_{a,\theta}$: $\varepsilon = \sigma/E_{a,\theta}$
- Para $\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta} = 0.02$: $\varepsilon = \sigma/E_{a,\theta} + (\varepsilon_{y,\theta} - f_{y,\theta}/E_{a,\theta}) \{1 - \sqrt{[1 - (\sigma - f_{p,\theta})^2 / (f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2]}\}$
- Para $\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta} = 0.15$: $\sigma = f_{y,\theta}$
- Para $\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta} = 0.20$: $\sigma = f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$
- Para $\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$: $\sigma = 0$

Tabla 45.1.1

Coefficientes de corrección con la temperatura de las características mecánicas de los aceros estructurales al carbono

θ_a	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

Otras propiedades físicas de los aceros estructurales al carbono:

Alargamiento unitario de origen térmico, $\varepsilon_\theta = L(\theta_a)/L(20^\circ\text{C}) - 1$, en función de la temperatura (θ_a):

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 750^\circ\text{C}$: $\varepsilon_\theta = 10^{-6} [12 + 0.004(\theta_a - 20)] (\theta_a - 20)$

Para $750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$: $\varepsilon_\theta = 1.1 \cdot 10^{-2}$

Para $860^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$: $\varepsilon_\theta = 2.2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6.2 \cdot 10^{-3}$

Instrucción EAE. Capítulo XII

Calor específico c_a en $J/(kg^\circ K)$, variable con la temperatura (θ_a):

$$\text{Para } 20^\circ C \leq \theta_a \leq 600^\circ C: \quad c_a = 425 + 0.773 \theta_a - 1.69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$$

$$\text{Para } 600^\circ C \leq \theta_a \leq 735^\circ C: \quad c_a = 666 + 13002/(738 - \theta_a)$$

$$\text{Para } 735^\circ C \leq \theta_a \leq 900^\circ C: \quad c_a = 545 + 17820/(\theta_a - 731)$$

$$\text{Para } 900^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C: \quad c_a = 650$$

(nótese que en torno a los $735^\circ C$ existe una divergencia de c_a , típica de un punto crítico en el diagrama de fases, que pudiera desestabilizar algunos procesos de integración numérica si no se advierte esa circunstancia).

Conductividad térmica λ_a en $W/(m^\circ K)$, variable con la temperatura (θ_a):

$$\text{Para } 20^\circ C \leq \theta_a \leq 800^\circ C: \quad \lambda_a = 54 - 0.0333 \theta_a$$

$$\text{Para } 800^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C: \quad \lambda_a = 27.3$$

(λ_a no se utiliza en los modelos de cálculo simplificados recogidos en esta Instrucción, pero su elevado valor, en relación a la de los materiales de protección, es lo que justifica la hipótesis de distribución de temperatura homogénea que fundamenta aquellos modelos).

A pesar de las deformaciones que sufre el acero, su densidad ρ_a puede tomarse prácticamente constante en los cálculos: $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

45.2. Propiedades de los materiales de protección

Las propiedades de los materiales de protección se introducen en los cálculos de artículos posteriores mediante diversas magnitudes, en general dependientes de la temperatura; cuando por simplificación de la notación dicha dependencia no se explicita, deberá sobreentenderse, en su caso. Por esta dependencia de la temperatura, entre otras razones, no son en absoluto aplicables en los modelos de cálculo de este capítulo valores usuales a temperatura ambiente de dichas magnitudes:

λ_p Conductividad térmica convencional, en $W/(m^\circ K)$, diferente de la conductividad térmica intrínseca, a causa de fenómenos diferentes de la propia conducción térmica englobados empíricamente en dicho parámetro, tales como posibles resistencias de contacto entre el acero y la protección, fisuras y transformaciones durante el proceso, etc.

c_p Calor específico convencional, en $J/(kg^\circ K)$

Dichas magnitudes, y otras derivadas de las mismas, se afectan del subíndice "k" cuando tienen consideración de valores característicos, y con el subíndice "d" cuando intervienen como valores de cálculo, con los criterios de ponderación que se definen en el artículo 48.3.

Otras propiedades de los materiales de protección que se consideran en el articulado son:

ρ_p Densidad, en kg/m^3

Δt_p "Tiempo de retraso" de materiales de protección con un contenido permanente de humedad (ver artículo 48.2).

Instrucción EAE. Capítulo XII

P Porcentaje de humedad máximo admitido en los cálculos.

$r_{p,ef}$ "Resistividad térmica efectiva" definida en artículos posteriores.

Los valores característicos de todas estas magnitudes deben ser de procedencia experimental, pero se admiten diversos orígenes de dichos valores, que se tienen en cuenta en el coeficiente de ponderación dado en el artículo 48.3. Una de las procedencias admitidas (caso D de dicho artículo) es la bibliografía disponible sobre materiales genéricos, pero sólo los recogidos a dicho efecto en la tabla 45.3.1. La mención de un determinado material de protección en dicha tabla no impide la utilización en los cálculos de valores más favorables que los dados en la misma, siempre que su origen sea experimental y de acuerdo con los criterios y condiciones de los casos A), B o C) del artículo 48.3.

Tabla 45.3.1. Valores característicos de propiedades convencionales de materiales de protección genéricos.

Material	λ_{pk} W/(m°K)	c_{pk} J/(kg°K)	ρ_{pk} kg/m ³	ρ_k % peso
Granito, mármol	2.40	900	2800	0
Hormigón de densidad normal con árido silíceo (1)	1.50	900	2200	0
Hormigón de densidad normal con árido calizo (2)	1.25	900	2200	0
Fábrica de ladrillo cerámico con mortero de cemento	1.15	1000	1450	0
Hormigón ligero, según su densidad	0.80 (3)	850	1600	2
	0.65	850	1300	2
	0.50	800	1000	2
	0.35	800	700	2
Placas de yeso	0.20	1300	800	20
Mortero de vermiculita	0.17	1100	800	2
Placas de base silicatada en general	0.15	1100	400	3
Placas de perlita o vermiculita	0.15	1100	400	15
Fibra mineral proyectada	0.12	1000	200	0

(¹) En el caso de los hormigones de densidad normal, si se requiere mayor precisión, los valores anteriores se pueden sustituir por las expresiones siguientes, variables con su temperatura (θ_c , en °C; $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$):

$$c_c = 900 + 80 (\theta_c / 120) - 4 (\theta_c / 120)^2$$

(²)

$$\lambda_c = 2 - 0.24 (\theta_c / 120) + 0.012 (\theta_c / 120)^2$$

$$\lambda_c = 1.6 - 0.16 (\theta_c / 120) + 0.008 (\theta_c / 120)^2$$

(³) Para hormigones ligeros con $\rho_c = 1600 \text{ kg/m}^3$, se puede adoptar, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$

$$\lambda_c = 1.0 - \theta_c / 1600 \not\leq 0.50$$

Artículo 46.º Comprobación resistente de elementos prismáticos sometidos a la acción del incendio

La comprobación de las piezas prismáticas metálicas sometidas a la acción del incendio se efectuará siguiendo el formato general siguiente:

$$E_{fi,d} / R_{fi,d,t} \leq 1, \text{ siendo:}$$

$E_{fi,d}$ Efectos de la acción de incendio definida en el artículo 43.2, conjuntamente con las acciones concomitantes especificadas en el artículo 44 de este capítulo, con los coeficientes de ponderación indicados en el mismo.

$R_{fi,d,t}$ Límites respectivos, suponiendo la pieza sometida a la distribución de temperaturas (θ) en el instante (t) del proceso de incendio.

$t = t_{fi,requ}$ Tiempo de incendio normalizado (único tipo de proceso de incendio considerado en las formulaciones de esta Instrucción).

Si se utilizan otros modelos de fuego de cálculo, apartado (b) de 43.2, los límites $R_{fi,d}$ corresponden a la peor situación resistente de la pieza sometida a la distribución de temperaturas (θ) durante el proceso completo del incendio.

Si los efectos a considerar ($E_{fi,d}$) se reducen a un único esfuerzo o sollicitación ($S_{fi,d}$), o varios no interactuantes entre sí, simplemente se debe comprobar $S_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$ (sollicitaciones \leq límites resistentes respectivos). Para varios esfuerzos interactuantes, $E_{fi,d} / R_{fi,d,t} \leq 1$ representa la fórmula de interacción aplicable en cada caso. Los límites resistentes $R_{fi,d,t}$ se definen en los artículos posteriores (46.1 hasta 46.6).

Se exceptúan las piezas que incluyan secciones transversales de clase 4 (según 46.1) no sollicitadas en tracción pura (artículo 46.2) ni en tracción compuesta (párrafo final del artículo 46.4), para las cuales preceptivamente la comprobación se efectuará en formato de temperaturas:

$$\theta_{a,t} / \theta_{a,cr} \leq 1,$$

siendo $\theta_{a,t}$ las temperaturas alcanzadas en el acero y $\theta_{a,cr}$ su valor crítico de acuerdo con lo especificado en 46.7.

Comentarios

La expresión $\theta_{a,t} / \theta_{a,cr} \leq 1$ puede considerarse como un caso particular de la desigualdad $E/R \leq 1$ si como "efectos de las acciones" se toman las temperaturas $\theta_{a,t}$ y como "límites resistentes", las temperaturas críticas que corresponda a la combinación de esfuerzos concomitantes. De hecho, todas las comprobaciones del tipo $S_{fi,d}/R_{fi,d,t} \leq 1$ admiten su correspondiente $\theta_{a,t} / \theta_{a,cr} \leq 1$, pero en aras de la simplicidad, en esta Instrucción se ha adoptado un formato único de comprobación, excepto para el caso indicado de secciones de clase 4, cuya temperatura crítica dada en 46.7 debe considerarse como aplicable sólo en dicho caso.

46.1. Clasificación de las secciones transversales

Para la comprobación resistente en situación de incendio, las cuatro categorías de secciones transversales (1, 2, 3, 4) se mantienen con idéntico significado que para los cálculos a temperatura ambiente, pero con un valor reducido del parámetro:

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{(235/f_y)},$$

siendo f_y el límite elástico a 20°C, expresado en N/mm².

46.2. Elementos sometidos a esfuerzo axial de tracción

La resistencia de cálculo de una sección solicitada en tracción pura y con una temperatura uniforme (θ_a) viene dada por la expresión:

$$N_{fi,\theta,R,d} = k_{y,\theta} N_{pl,R,d} \gamma_{M1} / \gamma_{M,fi}$$

siendo:

$N_{pl,R,d}$	Resistencia de cálculo de la sección solicitada en tracción pura a temperatura ambiente, definida en esta Instrucción.
$k_{y,\theta}$	Coefficiente de reducción del límite elástico a la temperatura θ_a , según 45.1.
$\gamma_{M1} / \gamma_{M,fi}$	Relación de coeficientes de ponderación de la resistencia del material, en caso de ser distintos en los cálculos en situación de incendio y a temperatura ambiente.

La resistencia de cálculo de una sección solicitada en tracción pura y con una distribución no homogénea de temperatura en un instante dado (t) del proceso de incendio, puede calcularse con carácter conservador aplicando la misma expresión anterior con el valor de $k_{y,\theta}$ que corresponda a la temperatura máxima de la sección, o bien, con mayor precisión, de la forma siguiente:

$$N_{fi,t,R,d} = \sum F_{x,\theta,i,R,d}$$

$$F_{x,\theta,i,R,d} = A_i k_{y,\theta,i} f_{yi} / \gamma_{M,fi}$$

donde:

A_i	Area de la sección parcial i-ésima de una partición de la sección tal que la temperatura de cada sección parcial pueda asimilarse a un valor uniforme en su interior (θ_i), en cada instante del proceso, de acuerdo con lo indicado posteriormente.
-------	---

Instrucción EAE. Capítulo XII

$k_{y,\theta,i}$	Coeficiente de reducción del límite elástico para la temperatura θ_i , según 45.1.
f_{yi}	Límite elástico a 20°C, de la sección parcial i-esima, supuesto homogéneo en toda ella.
$\gamma_{M,fi}$	Coeficiente de ponderación de la resistencia del material para los cálculos en situación de incendio, según 45.

Como partición válida de la sección para el cálculo antedicho, se admite cualquier subdivisión en secciones parciales tal que la resultante de tensiones de toda la sección, supuestas iguales a $k_{y,\theta,i} f_{yi} / \gamma_{M,fi}$ en cada punto, con $k_{y,\theta}$ función de la temperatura correspondiente (θ), no sea inferior en más de un 5 % de $N_{pl,R,d}$ al valor $\sum F_{x,\theta,i,R,d}$, en ningún instante del proceso.

Comentarios

La condición anterior se cumple en general aunque las diferencias $|\theta - \theta_i|$ dentro de cada sección parcial sean porcentualmente bastante superiores al 5 %.

Si la discretización adoptada cumple todas las condiciones siguientes:

- El espesor de cada elemento i-ésimo es constante.
- La distribución de temperaturas dentro de cada elemento varía sensiblemente de forma lineal en su interior, entre sus valores extremos θ_{1i} , θ_{2i} , en el instante (t) considerado.
- Se toma para cada elemento $\theta_i = \max^\circ [(\theta_{1i} + \theta_{2i})/2, \theta_{Gi}]$, siendo θ_{Gi} la temperatura de su centro de gravedad (G_i), pueden admitirse dentro de cada elemento oscilaciones de temperatura tan elevadas como:
- $|\theta_{2i} - \theta_{1i}| \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Hay que advertir no obstante que la condición d) se sustituye por otras más exigentes para los cálculos de secciones flectadas, según lo expuesto en el artículo 46.4. Estas condiciones más exigentes se aplican también para el caso de tracción compuesta, tal como se indica en dicho artículo.

46.3. Elementos sometidos a esfuerzo axil de compresión

La resistencia de cálculo de una pieza solicitada por una carga compresora centrada cuya sección sea de clase 1, 2 o 3, se tomará igual a:

$$N_{b,fi,t,R,d} = \chi_{fi} N_{fi,\theta,R,d}$$

siendo:

$N_{fi,\theta,R,d}$	Resistencia de cálculo de una sección solicitada en tracción pura en el mismo instante (t) del proceso de incendio, calculada según 46.2, en este caso con el valor de $k_{y,\theta}$ que corresponda a la temperatura máxima (θ) de la sección en dicho instante, aun cuando su distribución no sea homogénea.
χ_{fi}	Coeficiente de pandeo obtenido con las mismas expresiones dadas en esta Instrucción para los cálculos a temperatura ambiente, salvo por la modificación de los parámetros siguientes:

$$\alpha = 0.65\sqrt{(235/f_y)}$$

Coefficiente de imperfección para situación de incendio, en función de f_y , límite elástico a 20°C, expresado en N/mm².

$$\lambda_{\theta} = \lambda\sqrt{(k_{y,\theta} / k_{E,\theta})}$$

Esbeltez relativa empleada para los cálculos a temperatura ambiente, corregida en función de los coeficientes $k_{y,\theta}$ y $k_{E,\theta}$ obtenidos en 45.1 con la temperatura máxima (θ) de la sección en el instante (t) del proceso de incendio considerado.

Además de lo anterior, la longitud de pandeo l_{fi} en situación de incendio puede reducirse con respecto a utilizada en los cálculos a temperatura ambiente, si el soporte analizado pertenece a un entramado arriostrado de nudos rígidos y tal que las plantas consecutivas no formen parte del mismo sector de incendio, pudiendo entonces adoptarse para l_{fi} los valores correspondientes a una pieza biempotrada, salvo en la altura superior, en la que se tomará la longitud de pandeo de una pieza empotrada-apoyada (ver figura 46.3.1).

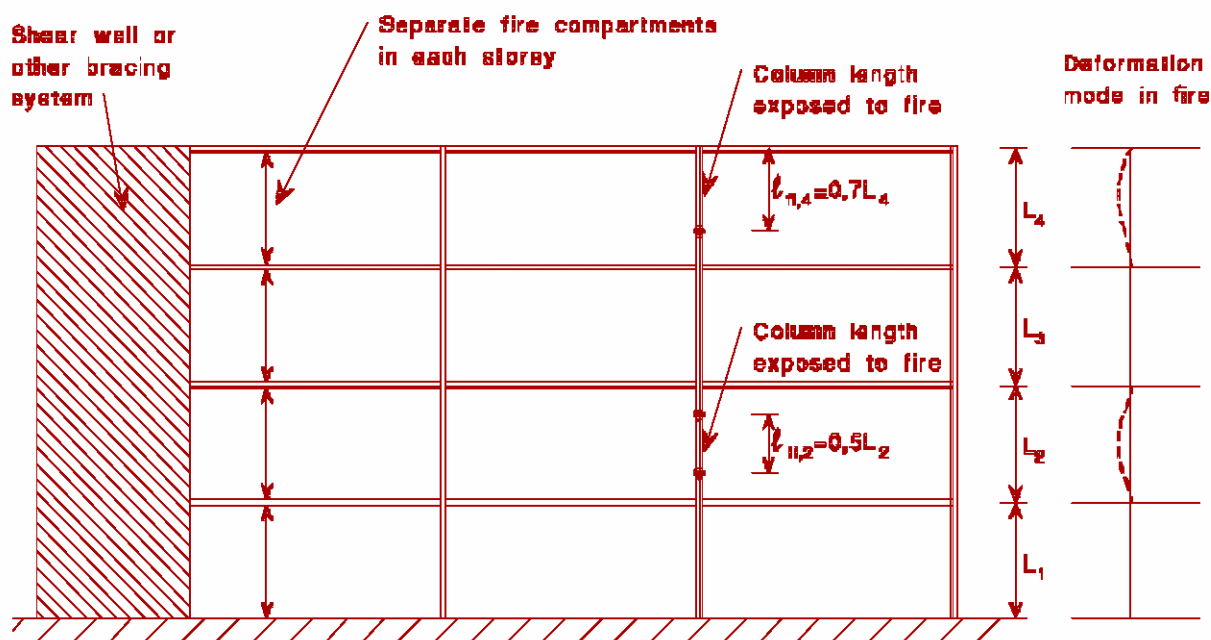


Figura 46.3.1: Longitudes de pandeo l_{fi} de soportes de pórticos arriostrados de nudos rígidos, con sectores de incendio no mayores que una planta.

46.4. Vigas arriostradas frente al pandeo lateral

La comprobación resistente en situación de incendio de una sección de clase 1, 2 o 3 solicitada en flexión simple, con el pandeo lateral coaccionado, se efectuará con las solicitaciones $V_{fi,S,d}$ y $M_{fi,S,d}$ determinadas con los coeficientes de ponderación definidos en el artículo 44 de este capítulo, y habiendo evaluado previamente su distribución de temperaturas en un instante dado (t) del proceso de incendio según los criterios dados en el presente capítulo de esta Instrucción.

El momento último de cálculo de una sección de clase 1, 2 o 3 solicitada en flexión simple, con el pandeo lateral coaccionado, y con una temperatura uniforme (θ_a) viene dado por la expresión:

$$M_{fi,\theta,V,R,d} = k_{y,\theta} M_{V,R,d} \gamma_{M1} / \gamma_{M,fi} \quad \text{siendo:}$$

$$M_{V,R,d}$$

Momento último de la sección solicitada en flexión simple a temperatura ambiente, incluyendo en su caso la reducción por

efecto del esfuerzo cortante, según los criterios definidos en esta Instrucción.

$k_{y,\theta}$	Coefficiente de reducción del límite elástico a la temperatura θ_a , según 45.1.
γ_{M1} y $\gamma_{M,fi}$	Relación de coeficientes de ponderación de la resistencia del material, en caso de ser distintos en los cálculos en situación de incendio y a temperatura ambiente.

El momento último de cálculo de una sección de clase 1, 2 o 3 solicitada en flexión simple, con el pandeo lateral coaccionado, y con una distribución no homogénea de temperatura en un instante dado (t) del proceso de incendio, puede obtenerse de manera aproximada tomando la misma expresión anterior ($M_{fi,\theta,V,R,d}$) con el valor de $k_{y,\theta}$ que corresponda a la temperatura máxima del acero de cada sección (θ_a), y aplicando los coeficientes correctores siguientes:

$$M_{fi,t,R,d} = M_{fi,\theta,V,R,d} / \kappa_1 \kappa_2$$

con:

$\kappa_1 = 1.00$	si la sección está expuesta al fuego en todas sus caras.
$\kappa_1 = 0.70$	para secciones con una cara protegida por una losa de hormigón, por un forjado mixto, o por un forjado de características térmicas equivalentes, y el resto de sus caras expuestas al fuego sin protección.
$\kappa_1 = 0.85$	en condiciones análogas al caso anterior, pero con protección contra el fuego en las caras expuestas (en este caso θ_a será menor, obviamente, que en caso anterior, pero su distribución será más homogénea, de ahí el valor más desfavorable de κ_1).
$\kappa_2 = 0.85$	en la sección extrema de una viga cuyo momento flector tenga carácter hiperestático.
$\kappa_2 = 1.00$	en las restantes secciones.

La resistencia de cálculo de una sección de clase 1, 2 o 3 solicitada en corte puro, en un instante dado (t) del proceso de incendio, se tomará igual a:

$$V_{fi,t,R,d} = k_{y,\theta} V_{R,d} \gamma_{M1} / \gamma_{M,fi}$$

siendo:

$V_{R,d}$	Cortante último de la sección solicitada en flexión simple a temperatura ambiente, según los criterios definidos en esta Instrucción.
θ_V	Temperatura media de la sección eficaz a cortante (A_V) utilizada para los cálculos a temperatura ambiente, de acuerdo con el capítulo correspondiente de esta Instrucción.
$k_{y,\theta,V}$	Coefficiente de reducción del límite elástico a la temperatura θ_V , según 45.1.
$\gamma_{M1} / \gamma_{M,fi}$	Relación de coeficientes de ponderación de la resistencia del material, en caso de ser distintos en los cálculos en situación de incendio y a temperatura ambiente.

Instrucción EAE. Capítulo XII

ambiente.

Como alternativa a los procedimientos anteriores, de libre elección por el autor del proyecto, la resistencia de una sección de clase 1 o 2 solicitada en flexión simple, con el pandeo lateral coaccionado, podrá verificarse sobre una discretización que cumpla las especificaciones posteriores, comprobando que existe una distribución particular cualquiera de fuerzas $\{F_{x,i}, F_{z,i}\}$ que cumplan las siguientes condiciones de equilibrio y de resistencia (ver figura 46.4.1):

$\sum F_{x,i} = 0$	Condición que determina la posición del eje neutro de tensiones ($z = 0$), el cual será en general variable en cada instante (t) del proceso
$ V_{f_i,S,d} / \sum F_{z,i} \leq 1$	
$ M_{f_i,S,d} / \sum z_i F_{x,i} \leq 1$	donde $M_{f_i,S,d}$ y $\sum z_i F_{x,i}$ se suponen de igual signo
$\sqrt{(F_{x,i}^2 + 3F_{z,i}^2)} / F_{x,\theta_i,R,d} \leq 1$	Para elementos contenidos dentro del área parcial A_v
$F_{z,i} = 0$ y $ F_{x,i} / F_{x,\theta_i,R,d} \leq 1$	Para los restantes elementos
$F_{x,\theta_i,R,d}$	Resistencia de la sección parcial i-ésima, dada en 46.2.
z_i	Posición de la resultante $F_{z,i}$ ("brazo mecánico" de dicha fuerza).

Como condiciones suficientes de validez de la discretización adoptada, pueden tomarse las (a), (b) y (c) especificadas en 46.2, junto con la condición adicional a), y los límites siguientes b) o c) para las diferencias de temperatura dentro de cada sección parcial:

- Las tensiones normales longitudinales no deben cambiar de signo en el interior de los elementos o secciones parciales, por lo que en caso de intersectar con el eje neutro de tensiones, deberán subdividirse.
- $|\theta_{z_i} - \theta_{z_{i-1}}| \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ Para elementos perpendiculares al plano de la flexión, y elementos paralelos al plano de la flexión cuyo brazo mecánico (z_i) se determine exactamente.
- $|\theta_{z_i} - \theta_{z_{i-1}}| \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ Para elementos paralelos al plano de la flexión (plano xz en la figura 46.4.1) en los que z_i se aproxime por la posición de su centro de gravedad ($z_i \approx z_{G_i}$ en dicha figura).

Este mismo procedimiento de cálculo se aplica también a las solicitaciones de flexotracción (esfuerzos $N_{f_i,S,d} > 0$ y $M_{f_i,S,d}$ concomitantes, además del cortante $V_{f_i,S,d}$, en su caso), simplemente sustituyendo la ecuación $\sum F_{x,i} = 0$ por:

$$\sum F_{x,i} = N_{f_i,S,d}$$

Si $V_{f_i,S,d} = 0$ y además las tensiones normales longitudinales son de tracción en toda la sección (solicitación de tracción compuesta), el procedimiento descrito se puede aplicar aunque la sección sea de clase 3 o 4 y/o el pandeo lateral no se halle coaccionado.

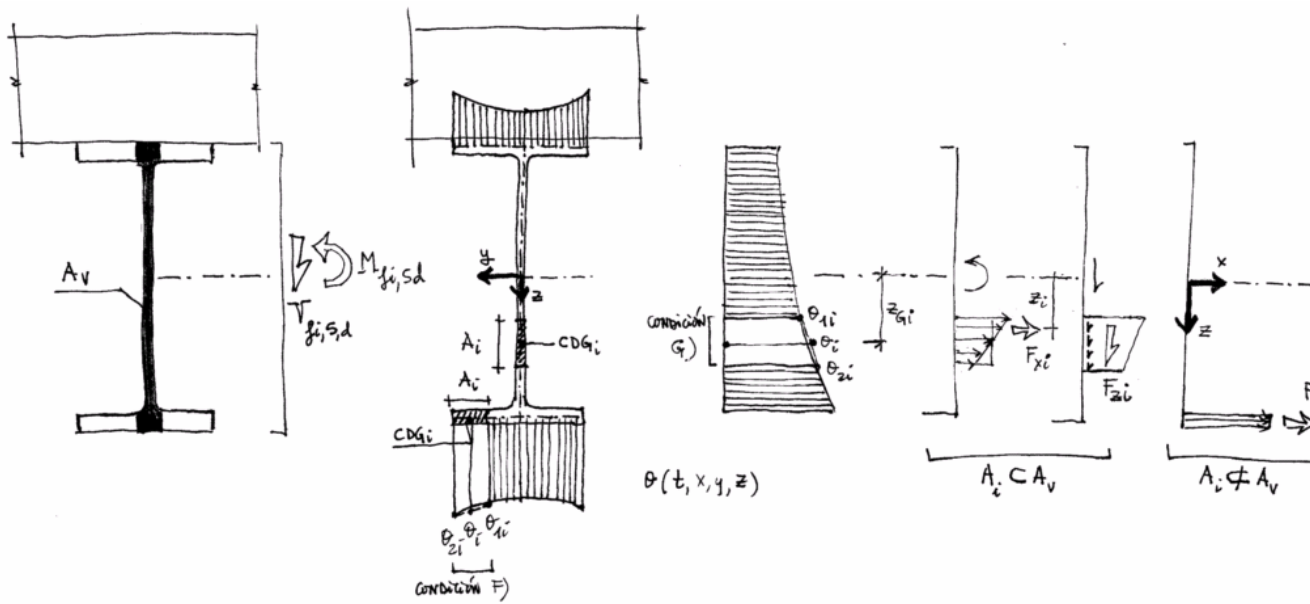


Figura 46.4.1. Distribución de temperaturas y esfuerzos en una sección de acero de clase 1 o 2 solicitada en flexión simple, en estado último en situación de incendio, con el pandeo lateral coaccionado.

46.5. Pandeo lateral de elementos sometidos a flexión

El momento último de cálculo de sección de clase 1, 2 o 3 solicitada en flexión simple, con una distribución no homogénea de temperatura en un instante dado (t) del proceso de incendio, puede obtenerse de manera aproximada tomando la misma expresión anterior ($M_{fi, \theta, V, R, d}$) con el valor de $k_{y, \theta}$ que corresponda a la temperatura máxima del acero de cada sección (θ_a), y aplicando los coeficientes indicados en la siguiente expresión:

$$M_{fi, t, R, d} = \chi_{LT, fi} M_{fi, \theta, V, R, d} / K_1 K_2,$$

con:

$M_{fi, \theta, V, R, d}$

Momento último de cálculo según el artículo anterior 46.4, con el valor de $k_{y, \theta}$ que corresponda a la temperatura máxima del acero de cada sección (θ_a).

K_1, K_2

Los mismos coeficientes correctores definidos en el artículo anterior.

$\chi_{LT, fi}$

Coefficiente de pandeo lateral obtenido con las mismas expresiones dadas en esta Instrucción para los cálculos a temperatura ambiente, salvo por la modificación de los parámetros siguientes:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{(235/f_y)}$$

Coefficiente de imperfección para situación de incendio, en función de f_y , límite elástico a 20°C, expresado en N/mm^2 .

$\lambda_{LT,\theta,com} = \lambda_{LT} \sqrt{(k_{y,\theta,com}/k_{E,\theta,com})}$ Esbeltez relativa empleada para los cálculos a temperatura ambiente, corregida en función de los coeficientes $k_{y,\theta,com}$ y $k_{E,\theta,com}$ obtenidos en 45.1 con la temperatura máxima de la zona comprimida de la sección (θ_{com}) en el instante (t) del proceso de incendio considerado.

El cortante último ($V_{fi,t,R,d}$) se calculará igual que en el apartado anterior 46.4.

46.6. Elementos sometidos a compresión y flexión

La comprobación resistente en situación de incendio de una pieza comprimida y flectada cuya sección de clase 1, 2 o 3, habiendo evaluado previamente su distribución de temperaturas en un instante dado (t) del proceso de incendio según los criterios dados en el presente capítulo de esta Instrucción, se efectuará aplicando los mismos criterios de comprobación definidos en esta Instrucción para temperatura ambiente, salvo los cambios siguientes:

- Se adoptarán las solicitaciones $N_{fi,E,d}$, $M_{y,fi,E,d}$, $M_{z,fiES,d}$ determinadas con los coeficientes de ponderación definidos en el art 44 de este capítulo.
- Para el cálculo de coeficientes de pandeo, se tomará el mismo coeficiente α dado en 46.3 y 46.5 como coeficiente de imperfección para la situación de incendio.
- Las esbelteces empleadas para los cálculos a temperatura ambiente, se corregirán por el factor $\sqrt{(k_{y,\theta}/k_{E,\theta})}$, en función de los coeficientes $k_{y,\theta}$ y $k_{E,\theta}$ obtenidos en 45.1 con la temperatura máxima (θ) de la pieza en el instante (t) del proceso de incendio considerado, tanto para la obtención de los coeficientes de pandeo sin torsión en cada plano principal de inercia, como para el coeficiente de pandeo con flexión y torsión.

Como alternativa simplificada, podrá aplicarse la fórmula de interacción siguiente:

$$\sqrt{n} + m_y + m_z \leq 1,$$

siendo:

$$n = N_{fi,E,d}/N_{b,fi,t,R,d}$$

$$m_y = M_{y,fiES,d}/M_{y,fi,t,R,d}$$

$$m_z = M_{z,fi,E,d}/M_{z,fi,t,R,d}$$

$$N_{b,fi,t,R,d}$$

Resistencia de cálculo de la pieza solicitada frente a la carga compresora, según 46.3 (en ausencia de otras solicitaciones concomitantes)

$$M_{y,fi,t,R,d}$$

Resistencia de cálculo con pandeo lateral frente a las flexiones en el plano de mayor inercia, obtenida según 46.5 (idem)

$$M_{z,fi,t,R,d}$$

Resistencia de cálculo sin pandeo lateral frente a las flexiones en el plano de menor inercia, obtenida según 46.4 (idem)

46.7. Elementos cuya sección es de Clase 4

Para las piezas que incluyan secciones transversales de clase 4 (según 46.1) no solicitadas en tracción pura (artículo 46.2) ni en tracción compuesta (párrafo final del artículo 46.4), se efectuará la comprobación siguiente:

$$\theta_{a,t}/\theta_{a,cr} \leq 1,$$

siendo:

$$\theta_{a,t}$$

Temperatura máxima del acero en el instante $t = t_{fi,requ}$ del proceso de incendio

$\theta_{a,cr} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperatura crítica a adoptar en este caso

Artículo 47.º Comprobación de la resistencia de las uniones

Como condición suficiente de validez de las uniones en la situación de incendio, se establece el cumplimiento simultáneo de todos los requisitos siguientes:

- La "resistencia térmica efectiva del revestimiento" ($r_{p,ef,d} = r_{p,ef,k}/\gamma_p$) no debe ser menor en los elementos de unión que en las piezas unidas.
- El cociente $S_{fi,d}/R_{fi,d,0}$ no debe ser mayor en la unión que en dichas piezas, siendo:
 $S_{fi,d}$ = Solicitaciones a considerar en la situación accidental de incendio, definidas en el presente capítulo.
 $R_{fi,d,0}$ = Límites resistentes respectivos, en el instante $t = 0$ del proceso de incendio, es decir, a temperatura ambiente pero con $\gamma_{M,fi} = 1$.
- La comprobación resistente a temperatura ambiente de la unión, como la de todos los elementos, debe efectuarse según los criterios señalados en esta Instrucción.

Artículo 48.º Cálculo de temperaturas en el acero

48.1. Elementos sin protección

Se define el área "expuesta" de una pieza metálica por unidad de longitud (A_m , en m^2/m), como la porción del perímetro de su sección transversal que no siendo exterior al edificio, ni estando en contacto con un forjado o elemento similar que la proteja, carezca de revestimiento protector al fuego. Si está "expuesto" todo el perímetro (A_L , magnitud usualmente tabulada por los laminadores), obviamente $A_m = A_L$. Si A_m es variable a lo largo de la pieza, se tomará su valor máximo. Este apartado se refiere a piezas en las que $A_m \geq A_L / 2$, mientras que el apartado siguiente corresponde a piezas con $A_m = 0$. Los casos intermedios no están recogidos explícitamente, pero sí admitidos, por esta Instrucción; en esos casos ($0 < A_m < A_L / 2$), el autor del proyecto podrá optar entre aplicar los criterios del presente apartado tomando $A_m = A_L / 2$, o bien aplicar los métodos de cálculo "avanzado" indicados en 43.3.

En función de A_m y del resto de parámetros luego indicados, el incremento elemental de temperatura en el acero ($\Delta\theta_{a,t}$) viene dado por:

$$\Delta\theta_{a,t} = S_m k_{sh} f_{net,d} \Delta t / (\rho_a c_a) \quad \text{con:}$$

$$S_m = A_m / V < / 10 \text{ m}^{-1}$$

Factor de sección (expresado en m^{-1}), siendo V el volumen de acero de la pieza por unidad de longitud (en m^3/m); es decir, $V=A$ = área de la sección transversal de acero expresada en m^2 , o $V = 10^{-4} A$, $10^{-6} A$ respectivamente si este área se expresa en cm^2 o en mm^2 .

k_{sh}

Factor que se puede tomar siempre igual a la unidad, pero que para secciones cuyo contorno no sea convexo puede reducirse adoptando:

$$k_{sh} = 0.9A_b / A_m$$

para secciones doble té simétricas, siendo $A_b = 2(b+h)$ el perímetro del rectángulo envolvente de la sección.

Instrucción EAE. Capítulo XII

$k_{sh} = A_b / A_m$	para otros tipos de secciones, siendo A_b el perímetro del menor polígono convexo envolvente de la sección.
Δt	incremento de tiempo, en segundos, respetando el límite siguiente: $\Delta t \leq \min^{\circ} (5 \text{ seg}, 5 \cdot 10^3 / S_m)$
ρ_a, C_a	densidad y calor específico del acero definidos en 45.2, expresados en las respectivas unidades SI, kg/m^3 y $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$.
$F_{\text{net,d}}$	flujo neto de calor por unidad de área, en W/m^2 , dado por: $F_{\text{net,d}} = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{\text{res}} [(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_{m,t} + 273)^4] + \alpha_c (\theta_{g,t} - \theta_{m,t})$
$\theta_{g,t}$	temperatura de la masa gaseosa ($^{\circ}\text{C}$) definida en 43.2
$\theta_{m,t} = \theta_{a,t}$	temperatura superficial de la pieza ($^{\circ}\text{C}$), que en este modelo se toma igual a la temperatura del acero ($\theta_{a,t}$), que se supone homogénea en toda la sección.
$\varepsilon_{\text{res}} = 0.7$	emisividad resultante para superficies de aceros al carbono, adoptando $\varepsilon_f = 1.0$ para la emisividad relacionada con el tipo de recinto.
$\varepsilon_{\text{res}} = 0.4$	
$\alpha_c = 25$	Coef. de transferencia térmica por convección, $\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$

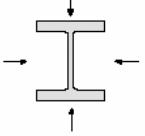
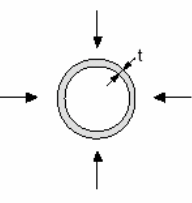
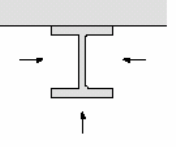
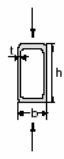
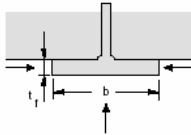
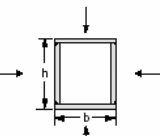
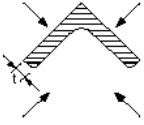
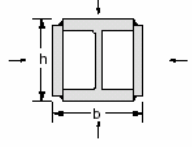
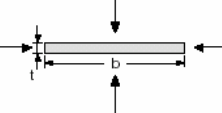
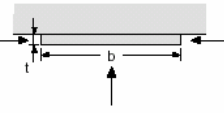
Para el cálculo de S_m de una sección dada, se pueden adoptar las expresiones siguientes, donde los espesores de acero (t_a) deben tomarse en metros:

- Para un tubo de sección cualquiera y espesor constante (t_a) pequeño en relación a su perímetro, expuesto en todas sus caras: $S_m \approx 1/t_a$
- Para una sección abierta de forma cualquiera y espesor constante (t_a), supuesto también pequeño en relación a su perímetro, $S_m \approx 2/t_a$ si la sección está completamente expuesta.
- En el mismo caso anterior, pero con sólo la mitad del perímetro expuesto: $S_m \approx 1/t_a$
- Si la sección está constituida por varias secciones parciales A_i que, todas ellas, estén incluidas en alguno de los casos anteriores, para el conjunto de la sección se puede adoptar la media ponderada siguiente:

$$S_m = \sum v_i S_i, \quad \text{con } v_i = A_i / \sum A_i$$
donde las sumatorias se extienden al conjunto de todas las secciones parciales, y S_i es el factor de sección individual que correspondería a cada una de ellas aplicando los casos a), b) o c) respectivos.
- Para otros casos, se puede aplicar la definición general $S_m = A_m / V$ o bien adoptar los valores que se indican en la tabla 48.1.1, si fueran aplicables.

Y en cualquier caso, no se tomará un valor de S_m inferior a 10 m^{-1} .

Tabla 48.1.1. Factor de sección de piezas sin protección

<p>Open section exposed to fire on all sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perimeter}}{\text{cross-section area}}$ 	<p>Tube exposed to fire on all sides: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Open section exposed to fire on three sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{surface exposed to fire}}{\text{cross-section area}}$ 	<p>Hollow section (or welded box section of uniform thickness) exposed to fire on all sides:</p> <p>If $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>I-section flange exposed to fire on three sides:</p> $A_m/V = (b + 2t_f)/(bt_f)$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V = 1/t_f$</p> 	<p>Welded box section exposed to fire on all sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{cross-section area}}$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Angle exposed to fire on all sides:</p> $A_m/V = 2/t$ 	<p>I-section with box reinforcement, exposed to fire on all sides:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{cross-section area}}$ 
<p>Flat bar exposed to fire on all sides:</p> $A_m/V = 2(b + t)/(bt)$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V = 2/t$</p> 	<p>Flat bar exposed to fire on three sides:</p> $A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ <p>If $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p> 

48.2. Elementos con revestimiento protector

En este caso la magnitud V se define igual que en el artículo anterior, pero la otra magnitud que interviene en el factor de sección es ahora A_p , el área de la superficie interna del revestimiento por unidad de longitud de la pieza (en m^2/m), descontando la parte que pudiera ser exterior al edificio o estar en contacto con un forjado o elemento similar que la proteja. Si la sección metálica y el revestimiento están total o parcialmente separados entre sí, A_p debe medirse sobre el menor polígono que, siendo de caras paralelas al revestimiento, sea tangente a la superficie metálica. Este y otros casos se indican en la tabla 48.2.1.

Despreciando en este caso los fenómenos de radiación y convección superficiales, el incremento elemental de temperatura en el acero ($\Delta\theta_{a,t}$ definido en 48) viene dado por:

Instrucción EAE. Capítulo XII

$$\Delta\theta_{a,t} = [(S_p / r_{p,ef,d}) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t / (\rho_a c_a) - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}] < / 0$$

con:

$$S_p = A_p / V$$

Factor de sección de la pieza protegida (en m⁻¹).

Δt incremento de tiempo, en segundos, respetando en este caso el límite siguiente:

$$\Delta t \leq 30 \text{ seg}$$

$$\rho_a, c_a$$

Densidad y calor específico del acero definidos en 45.2, en kg/m³ y J/(kg°K).

$$\varphi = \rho_{pd} c_{pd} d_p S_p / \rho_a c_a$$

Relación de capacidades caloríficas totales del revestimiento y de la pieza de acero, en los casos A) y D) del artículo 48.3

$$\varphi = 0$$

valor preceptivo en los casos B) y C) del mismo artículo.

$$d_p$$

espesor del material de protección en m.

$$\rho_{pd} c_{pd}$$

Valores de cálculo de la densidad y calor específico del revestimiento según 48.3, en kg/m³ y J/(kg°K).

$$r_{p,ef,d} = r_{p,ef,k} / \gamma_p$$

Valor de cálculo de la "resistencia térmica efectiva del revestimiento", en m² °K/W, con γ_p dado en 48.3

$$r_{p,ef,k} = (1 + \varphi/3) d_p / \lambda_{pk}$$

Valor característico de la resistencia térmica efectiva del revestimiento, en los casos A) y D) del artículo 48.3

$$r_{p,ef,k}$$

valor ad hoc determinado según 48.4, en los casos B) y D) del artículo 48.3.

$$\theta_{g,t}$$

Temperatura de la masa gaseosa (°C) definida en 43.2

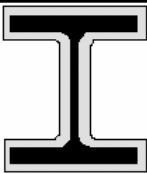
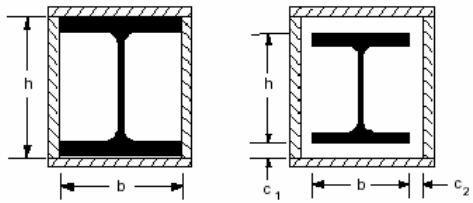
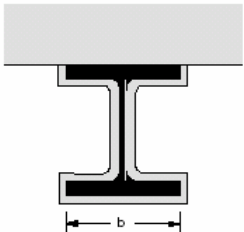
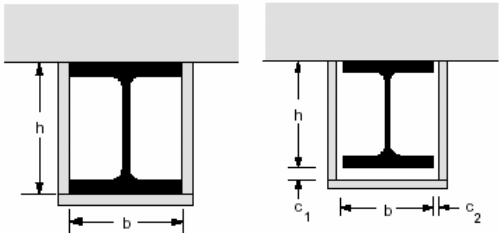
$$\Delta\theta_{g,t}$$

incremento de $\theta_{g,t}$ durante Δt

Para materiales de protección con un contenido permanente de humedad, y que hayan sido ensayados conforme al caso a) del artículo 48.3, la ecuación incremental anterior puede modificarse incorporando un "tiempo de retraso" (Δt_p) en el instante en que la temperatura del acero alcanza los 100°C, siempre que el valor de dicho tiempo de retraso se haya determinado de conformidad con ENV 13381-4. Dicho tiempo de retraso depende del porcentaje de humedad adoptado en los cálculos, que no podrá sobrepasar el valor máximo definido en la tabla 45.3.1 (p_k), o el que experimentalmente se determine como correspondiente al equilibrio higroscópico a una temperatura de 20°C y humedad ambiente relativa del 40 %. Para los casos b) y c) del artículo 48.3, preceptivamente se adoptará $\Delta t_p = 0$.

Tabla 48.2.1.

Factor de sección de piezas con revestimiento protector.

Sketch	Description	Section factor (A_p/V)
	Contour encasement of uniform thickness	$\frac{\text{steel perimeter}}{\text{steel cross-section area}}$
	Hollow encasement of uniform thickness ¹⁾	$\frac{2(b + h)}{\text{steel cross-section area}}$
	Contour encasement of uniform thickness, exposed to fire on three sides	$\frac{\text{steel perimeter} - b}{\text{steel cross-section area}}$
	Hollow encasement of uniform thickness, exposed to fire on three sides ¹⁾	$\frac{2h + b}{\text{steel cross-section area}}$

¹⁾ The clearance dimensions c_1 and c_2 should not normally exceed $h/4$

48.3. Características exigidas a los materiales de protección

Las características térmicas de los materiales de protección, en general dependientes de la temperatura, se definen mediante las magnitudes λ_p , c_p y ρ_p que intervienen en las expresiones del artículo 48.2. En general se trata de funciones variables con la temperatura, $\lambda_p(\theta)$, $c_p(\theta)$, $\rho_p(\theta)$, y cuando por simplificación de la notación dicha dependencia no se explicita, deberá sobreentenderse, en su caso.

Los valores de cálculo de los parámetros a adoptar en el proyecto se obtendrán a partir de los valores experimentales λ_{pk} , c_{pk} y ρ_{pk} , y de la resistencia térmica efectiva $r_{p,ef,k}$ definida en 48.2, aplicando un coeficiente parcial de seguridad γ_p en la forma:

$$c_{pd} = c_{pk} \quad \rho_{pd} = \rho_{pk} \quad \lambda_{pd} = \gamma_p \lambda_{pk}, \quad \text{y consecuentemente:}$$

Instrucción EAE. Capítulo XII

$$r_{p,ef,d} = r_{p,ef,k} / \gamma_p$$

El coeficiente γ_p a adoptar será el siguiente:

- a) $\gamma_p = 1.00$ si los valores experimentales aportados por el fabricante se han determinado conforme a las normas ENV 13381-1, ENV 13381-2 o ENV 13381-4, según corresponda.
- b) $\gamma_p = 1.10$ si los valores experimentales aportados por el fabricante proceden de la adaptación de resultados de ensayos de incendio normalizado efectuados de conformidad normas UNE no anteriores a 1997, siempre que estos resultados se conviertan siguiendo los criterios especificados en el artículo 48.4.
- c) $\gamma_p = 1.25$ para productos homologados según normas UNE anteriores y cuyos valores experimentales se conviertan siguiendo los criterios especificados en el artículo 48.4.
- d) $\gamma_p = 1.50$ si se adoptan valores experimentales de materiales genéricos tomados de la tabla 45.3.1.

Para cumplir el requisito de la comprobación resistente de cada pieza según los criterios de este capítulo, se obtendrán las temperaturas del acero correspondientes tomando el valor de cálculo $r_{p,ef,d} = r_{p,ef,k} / \gamma_p$, y aplicando el modelo del artículo 48.2, para lo cual se admitirá su implementación en forma de programas informáticos, tablas o ábacos si se cumplen las dos condiciones siguientes:

- Si dichos programas, tablas o ábacos son conformes con el modelo del artículo 48.2, tal como viene formulado en dicho artículo, para lo cual en los casos b) y c) deberá haberse efectuado la conversión especificada en el artículo 48.4, o bien se basan en ENV 13381-4.
- (para los casos b, c y d): Si dichas tablas o ábacos permiten la aplicación del factor γ_p indicado en cada caso.

Si una de las dos condiciones, o las dos, no se cumplen, para poder aplicar tales programas, tablas o ábacos el factor γ_p se deberá aplicar a las temperaturas del acero ($\theta_{a,t}$) deducidas de los mismos, o lo que es equivalente, las temperaturas medidas en los ensayos deberán multiplicarse por el coeficiente parcial de seguridad γ_p , para luego, en cualquier caso, verificar la comprobación resistente de cada pieza según los criterios de este capítulo de la presente Instrucción.

Los detalles constructivos y/o especificaciones del proyecto deberán asegurar que los materiales de protección empleados y sus procedimientos de unión o fijación a la pieza metálica permanezcan íntegros y eficaces durante el tiempo de incendio normalizado $t_{fi,requ}$ según el artículo 43.2. En el caso a), esta condición se verifica en virtud de las condiciones impuestas por las normas citadas para la validación de cada sistema ensayado. En los casos b) y c), cada fabricante deberá aportar documentación experimental suficiente para verificar las condiciones de integridad antedichas de los materiales y fijaciones o unión empleadas. En el caso d), el proyecto deberá incluir detalles constructivos que definan los mallazos, anclajes, etc. pertinentes.

Debe asimismo garantizarse la durabilidad de los materiales de protección, y en su caso el proyecto deberá especificar las condiciones de mantenimiento exigidas y, si fueran necesarias, capas adicionales o disposiciones de protección contra la corrosión. Este requerimiento es de especial aplicación a las pinturas intumescentes, sobre todo en ambientes de humedad elevada, presencia de ión cloro u otros agentes que puedan afectar a la durabilidad de los materiales, etc., y ello tanto si dichas condiciones ambientales se deben al entorno en que se ubica el edificio, como si proceden del uso del mismo (pabellones con piscinas, actividades industriales, etc.).

48.4. Conversión de valores experimentales

Los resultados de ensayos de incendio normalizado UNE EN 1363 efectuados de conformidad con normas diferentes de las ENV 13381-1, ENV 13381-2 o ENV 13381-4, para su aplicación en el modelo de cálculo definido en 48.2, y a los efectos previstos en el artículo 48.3, se convertirán a valores característicos de la "resistencia térmica efectiva del revestimiento" ($r_{p,ef,k}$) por el procedimiento indicado en el presente artículo, que se basa en la utilización de la tabla 48.4.1, en la cual se expresan las temperaturas del acero (θ_a, t) calculadas con el modelo del artículo 48.2 aplicado convencionalmente con $\phi = 0$, con resistencia térmica efectiva supuesta constante durante el proceso, y con $\gamma_p = 1$ (la introducción posterior de este coeficiente parcial de seguridad se efectuará según lo indicado en 48.3).

Dicha tabla constituye la definición numérica de $\theta_a = \theta_a(t, s)$, función teórica de temperaturas en el acero bajo las hipótesis antedichas, siendo $s = S_p/r_{p,ef}$.

Con cada terna de valores experimentales:

t_{ex}	duración del ensayo normalizado, en minutos
$\theta_{a,ex}$	temperatura máxima alcanzada en el acero, en °C
$S_{p,ex}$	factor de sección, en m^{-1} , calculado según los criterios de 48.2,

se obtendrá en la tabla 48.4.1 el caso (θ_a, t, s) para el que θ_a, t sean más próximos a $t_{ex}, \theta_{a,ex}$, cumpliendo $t \leq t_{ex}$ y $\theta_a \geq \theta_{a,ex}$. Como valor correspondiente de $r_{p,ef}$ se adoptará:

$$r_{p,ef} = S_{p,ex} / s \quad (\text{en } m^2 \text{ } ^\circ K/W)$$

Se admite refinar la determinación anterior de $r_{p,ef}$ por interpolación bilineal entre casos de la tabla en cuya "horquilla" estén comprendidos t_{ex} y $\theta_{a,ex}$. El mismo contenido de la tabla 48.4.1 consta en las figuras 48.4.1 y 48.4.2, sin valor cuantitativo (a cuyos efectos sólo tiene validez la tabla).

Los $r_{p,ef}$ evaluados se agruparán en lotes $\{ r_{p,ef,i} / 1 \leq i \leq N \}$, incluyendo N determinaciones que correspondan al mismo tipo y espesor ($d_{p,ex}$) de producto de protección, con iguales valores de t_{ex} y S_e ; no obstante, se podrán agrupar determinaciones que correspondan a diferentes t_{ex} y/o S_{ex} , si se toman los valores más desfavorables, para los límites de utilización que se indican luego. Como valor característico de cada lote se adoptará:

$$r_{p,ef,k} = [1 - 1/(5N)] \min^0(r_{p,ef,i})$$

Los $r_{p,ef,k}$ así obtenidos podrá utilizarse en los cálculos de proyectos (ahora con aplicación de γ_p), respetando para cada valor $r_{p,ef,k}$ las condiciones siguientes:

- Como condición suficiente de utilización de cada valor $r_{p,ef,k}$, se establece el cumplimiento simultáneo de:
 - $t_{fi,requ} \leq t_{ex}$, – $S_p \approx S_{ex} (\pm 25\%)$ – $d_p = d_{p,ex}$
- Nunca se admitirán extrapolaciones para $t_{fi,requ} > t_{ex}$.
- Cuando no se aprecien variaciones importantes (hasta $\pm 50\%$) en las determinaciones de $r_{p,ef,k}$ para un valor fijo del espesor de producto ($d_{p,ex}$) con diferentes t_{ex} y S_p , se admitirán interpolaciones para valores intermedios de estas últimas magnitudes.
- Si se observa un valor relativamente poco variable (hasta $\pm 25\%$) del cociente $d_{p,ex} / r_{p,ef,k}$ en todos o parte de los casos ensayados, se admitirán también interpolaciones en función de los correspondientes valores de $d_{p,ex}$, pero nunca extrapolaciones.

Comentarios

El cumplimiento de estas condiciones de utilización debe ser especialmente riguroso para las pinturas intumescentes, ya que a causa del débil espesor del producto y de la variación de este espesor a lo largo del proceso de incendio, pueden presentar discontinuidades importantes de su efectividad para diferentes espesores de pintura (o pesos de producto aplicado por m² de superficie), masividades de la pieza metálica y/o duración del ensayo.

Tabla 48.4.1.

Temperaturas del acero $\theta_a = \theta_a(t, s)$ en °C, para $15 \leq t \leq 240$ minutos y $50 \leq s \leq 6000$ W/(m³ °K)

t =	15	30	45	60	75	90	105	120	150	180	210	240
s												
50	27	37	48	59	70	81	92	103	125	147	168	189
100	35	54	73	94	114	134	153	173	211	248	283	318
150	42	69	98	126	154	181	208	234	285	333	378	420
200	49	84	121	156	191	225	258	289	349	405	456	502
250	56	99	142	185	226	265	302	338	406	466	520	569
300	62	113	163	211	258	302	343	383	455	519	575	624
350	69	127	183	237	288	336	381	423	499	564	621	670
400	75	140	202	261	316	367	415	459	537	603	660	706
450	82	152	220	283	342	397	446	492	571	638	693	729
500	88	165	238	305	367	424	475	522	602	668	718	738
600	100	188	270	345	413	473	526	574	654	714	739	777
700	112	211	301	382	453	515	569	617	695	735	770	837
800	123	232	329	415	489	552	606	654	723	751	818	894
900	134	252	356	445	520	584	639	685	735	783	865	941
1000	145	271	380	472	549	613	667	709	747	822	908	978
1100	155	290	403	498	575	638	691	726	768	859	943	1008
1200	165	307	425	521	598	661	710	734	795	893	972	1031
1300	175	324	445	542	619	681	724	740	824	922	996	1050
1400	185	340	464	561	638	698	732	751	851	946	1015	1065

Instrucción EAE. Capítulo XII

1500	194	355	481	579	655	712	737	767	876	967	1031	1077
1600	203	369	498	596	671	723	743	786	899	985	1044	1087
1700	212	383	513	611	685	730	752	805	919	1000	1055	1095
1800	221	397	528	625	698	735	765	824	936	1012	1064	1102
1900	229	409	542	639	709	738	779	843	952	1023	1072	1107
2000	238	421	555	651	718	743	794	860	965	1032	1078	1112
2100	246	433	567	663	725	750	809	876	977	1040	1084	1115
2200	254	444	578	673	730	759	824	891	987	1047	1088	1118
2300	261	455	589	683	733	769	839	904	996	1053	1092	1121
2400	269	465	599	692	736	780	852	916	1003	1058	1095	1123
2500	276	475	609	700	738	791	865	927	1010	1062	1098	1125
2600	283	485	618	707	742	803	877	937	1016	1066	1100	1127
2700	290	494	627	714	746	814	888	945	1021	1069	1102	1128
2800	297	503	635	719	752	825	898	953	1026	1072	1104	1130
2900	304	511	643	724	759	835	907	960	1030	1074	1106	1131
3000	311	519	651	728	766	845	915	967	1034	1076	1107	1132
3100	317	527	658	731	773	855	923	973	1037	1078	1108	1133
3200	323	534	665	733	781	864	930	978	1040	1080	1110	1134
3300	330	542	671	735	789	872	937	982	1042	1081	1111	1134
3400	336	549	678	736	797	880	943	987	1045	1083	1112	1135
3500	342	555	683	738	805	887	948	991	1047	1084	1112	1136
3600	347	562	689	740	812	894	953	994	1049	1085	1113	1136
3700	353	568	694	743	820	901	958	997	1050	1086	1114	1137
3800	359	574	699	746	827	907	962	1000	1052	1087	1114	1137
3900	364	580	703	749	834	912	965	1003	1053	1088	1115	1138
4000	369	585	707	753	841	917	969	1005	1054	1089	1116	1138
4100	375	591	711	757	847	922	972	1007	1056	1089	1116	1139

Instrucción EAE. Capítulo XII

4200	380	596	715	761	853	927	975	1009	1057	1090	1117	1139
4300	385	601	718	766	859	931	978	1011	1058	1091	1117	1139
4400	390	606	721	771	865	934	980	1013	1058	1091	1117	1140
4500	395	611	723	775	870	938	983	1014	1059	1092	1118	1140
4600	399	615	726	780	875	941	985	1016	1060	1092	1118	1140
4700	404	620	728	785	880	944	987	1017	1061	1093	1119	1141
4800	409	624	730	790	884	947	989	1018	1061	1093	1119	1141
4900	413	628	731	795	888	950	990	1020	1062	1093	1119	1141
5000	417	633	732	800	892	952	992	1021	1062	1094	1120	1141
5100	422	637	734	804	896	955	993	1022	1063	1094	1120	1142
5200	426	640	734	809	900	957	995	1022	1063	1095	1120	1142
5300	430	644	735	814	903	959	996	1023	1064	1095	1120	1142
5400	434	648	736	818	906	961	997	1024	1064	1095	1121	1142
5500	438	651	737	822	909	963	998	1025	1065	1096	1121	1143
5600	442	655	738	826	912	964	999	1025	1065	1096	1121	1143
5700	446	658	739	830	915	966	1000	1026	1066	1096	1121	1143
5800	450	661	740	834	917	967	1001	1027	1066	1096	1122	1143
5900	453	664	741	838	919	969	1002	1027	1066	1097	1122	1143
6000	457	667	743	841	922	970	1003	1028	1067	1097	1122	1143

Figura 48.4.1. En ordenadas: temperaturas del acero θ_a , $0 \leq \theta_a \leq 1200$ °C. En abscisas: variable s , $0 \leq s \leq 6000$ W/(m³ °K). Cada curva corresponde al valor indicado de t , en minutos.

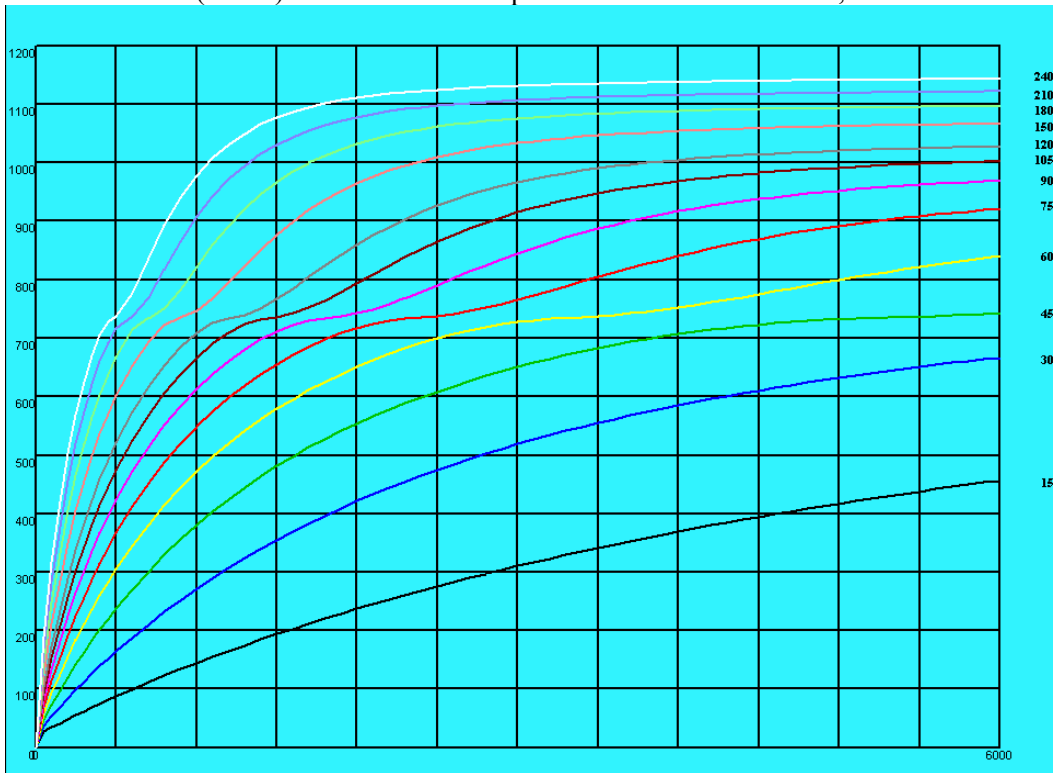


Figura 48.4.2. En ordenadas: temperaturas del acero θ_a , $0 \leq \theta_a \leq 1200$ °C. En abscisas: tiempo t , $0 \leq t \leq 240$ minutos. Cada curva corresponde al valor indicado de s , en W/(m³ °K)