Anejo 23

Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales Proyecto de estructuras sometidas al fuego

Contenido

1. GENERALIDADES 1222

1.1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN 1222
1.1.2 Objeto y campo de aplicación de este anejo 1222
1.2 NORMATIVA DE REFERENCIA 1222
1.3 CONSIDERACIONES 1222
1.5 TÉRMINOS Y DEFINICIONES 1222
1.5.1 Términos especiales relacionados con el proyecto en general 1223
1.5.1.1 Entramado arriostrado 1223
1.5.1.2 Parte de la estructura 1223
1.5.2 Términos relacionados con las acciones térmicas 1223
1.5.2.1 Curva normalizada tiempo-temperatura 1223
1.5.3 Términos relacionados con materiales y productos 1223
1.5.3.1 Acero al carbono 1223
1.5.3.2 Material de protección frente al fuego 1223
1.5.3.3 Acero inoxidable 1223
1.5.4 Términos relacionados con el análisis de transferencia de calor 1223
1.5.4.1 Factor de configuración 1223
1.5.4.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección 1223
1.5.4.3 Emisividad 1223
1.5.4.4 Flujo neto de calor 1223
1.5.4.5 Factor de sección 1224
1.5.4.6 Factor de sección de un cajón envolvente 1224
1.5.5 Términos relacionados con el análisis del comportamiento mecánico 1224
1.5.5.1 Temperatura crítica del elemento de acero estructural 1224
1.5.5.2 Límite elástico eficaz 1224
1.6 SÍMBOLOS 1224

2 BASES DE CÁLCULO 1228

2.1 REQUISITOS 1228
2.1.1 Requisitos básicos 1228
2.1.2 Exposición a fuegos nominales 1229
2.1.3 Exposición al fuego paramétrico 1229
2.2 ACCIONES 1229
2.3 VALORES DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES 1229
2.4 MÉTODOS DE VERIFICACIÓN 1230
2.4.1 Generalidades 1230
2.4.2 Cálculo del elemento estructural 1230
2.4.3 Cálculo de una parte de la estructura 1232
2.4.4 Cálculo de la estructura global 1232

3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES 1232

3.1 GENERALIDADES 1232
3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS AL CARBONO 1233
3.2.1 Propiedades de resistencia y deformación 1233
3.2.2 Densidad 1233
3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES 1236
3.4 PROPIEDADES TÉRMICAS 1236
3.4.1 Aceros al carbono 1236
3.4.1.1 Dilatación térmica 1236
3.4.1.2 Calor específico 1236
3.4.1.3 Conductividad térmica 1237
3.4.2 Aceros inoxidables 1238
3.4.3 Materiales de protección frente al fuego 1238

4 CÁLCULO ESTRUCTURAL FRENTE AL FUEGO 1238

4.1 GENERALIDADES 1238
4.2 MODELOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS 1239
4.2.1 Generalidades 1239
4.2.2 Clasificación de las secciones transversales 1240
4.2.3 Resistencia 1240
4.2.3.1 Elementos sometidos a tracción 1240
4.2.3.2 Elementos sometidos a compresión con secciones transversales de Clases 1, 2 o 3 1241
4.2.3.3 Vigas con secciones transversales de clase 1 o de clase 2 1242
4.2.3.4 Vigas con secciones transversales de clase 3 1245
4.2.3.5 Elementos con secciones transversales de clase 1, 2 o 3, sometidos a flexocompresión 1246
4.2.3.6 Elementos con secciones transversales de clase 4 1248
4.2.4 Temperatura crítica 1248
4.2.5 Evolución de la temperatura del acero 1249
4.2.5.1 Estructuras interiores de acero sin protección 1249
4.2.5.2 Estructuras interiores de acero aisladas mediante material de protección frente al fuego 1251
4.2.5.3 Estructuras interiores de acero en un volumen protegido mediante pantallas térmicas 1252
4.2.5.4 Estructuras exteriores de acero 1253
4.3 MODELOS DE FUEGO AVANZADOS 1254
4.3.1 Generalidades 1254
4.3.2 Respuesta térmica 1254
4.3.3 Respuesta mecánica 1254
4.3.4 Validación de los modelos de fuego avanzados 1255

APÉNDICE A. ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN DEL ACERO AL CARBONO A TEMPERATURAS ELEVADAS 1256

APÉNDICE B. TRANSFERENCIA DE CALOR A ESTRUCTURAS DE ACERO EXTERNAS 1258

APÉNDICE C. RECOMENDACIONES PARA EL ACERO INOXIDABLE 1277

APÉNDICE D. RECOMENDACIONES SOBRE UNIONES 1284

APÉNDICE E. RECOMENDACIONES PARA LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE CLASE 4 1288

1. Generalidades

1.1 Objeto y campo de aplicación

1.1.2 Objeto y campo de aplicación de este anejo

(1) Este anejo trata el proyecto de estructuras de acero en la situación accidental de exposición al fuego, y está concebido para su uso conjunto con el Anejo 22 y con la reglamentación específica vigente. Esta norma solo identifica diferencias o complementa a los proyectos a temperatura normal.

(2) Este anejo solo cubre los métodos pasivos de protección frente al fuego. No se contemplan métodos activos.

(3) Este anejo se aplica a estructuras de acero que deben cumplir su función portante cuando están sometidas al fuego, para evitar su colapso prematuro.

NOTA: Este anejo no incluye reglas para los elementos de compartimentación.

(4) Este anejo establece los principios y las reglas de aplicación para el proyecto de estructuras con requisitos concretos respecto a la función portante y a los niveles de prestaciones.

(5) Este anejo se aplica a estructuras, o partes de estructuras, dentro del objeto y campo de aplicación del Anejo 22 y proyectadas de acuerdo con la misma.

(6) Los métodos dados se aplican al acero estructural de tipos S235, S275, S355, S420 y S460 según la serie de normas UNE-EN 10025 y a todos los tipos dados en las normas UNE-EN 10210-1 y UNE-EN 10219-1.

(7) Los métodos dados también son aplicables a los elementos de acero conformado en frío y de revestimiento.

(8) Los métodos dados son aplicables a cualquier tipo de acero para el que se las propiedades materiales a temperaturas elevadas en base a normas europeas armonizadas.

(9) Los métodos incluidos también son aplicables a elementos y chapas de acero inoxidable dentro del campo de aplicación del Anejo 24.

NOTA 1: Para la resistencia al fuego de estructuras mixtas de acero y hormigón, véase el Anejo 30.

NOTA 2: La numeración de los apartados de este Anejo en ocasiones no es consecutiva, a semejanza de la estructura de la correspondiente norma de Eurocódigo.

1.2 Normativa de referencia

(1) Las normas citadas en este anejo deben utilizarse en la versión indicada en el Anejo 1 del Código Estructural.

1.3 Consideraciones

(1) Se aplican las consideraciones generales del Anejo 18, junto con la siguiente:

- Cualquier sistema pasivo de protección contra incendios considerado en el proyecto debería mantenerse adecuadamente.

1.5 Términos y definiciones

(1) Se aplican las reglas establecidas en el apartado 1.5 del Anejo 18.

(2) Los términos y definiciones siguientes se emplean en este anejo con los significados que se indican a continuación.

1.5.1 Términos especiales relacionados con el proyecto en general

1.5.1.1 Entramado arriostrado

Un entramado (pórtico) puede clasificarse como arriostrado si la resistencia frente a un modo de fallo traslacional proporcionada por el sistema de arriostramiento en respuesta a cargas horizontales en el plano le hace lo suficientemente rígido como para poder suponer que todas las cargas horizontales se resisten por dicho sistema.

1.5.1.2 Parte de la estructura

Parte aislada de una estructura completa con condiciones adecuadas de contorno y de apoyos.

1.5.2 Términos relacionados con las acciones térmicas

1.5.2.1 Curva normalizada tiempo-temperatura

Curva nominal definida en la norma UNE-EN 13501-2 para representar un modelo de fuego totalmente desarrollado en un sector de incendio.

1.5.3 Términos relacionados con materiales y productos

1.5.3.1 Acero al carbono

En esta norma: tipos de acero de acuerdo con el Anejo 22, excepto los aceros inoxidables.

1.5.3.2 Material de protección frente al fuego

Cualquier material o combinación de materiales aplicados a un elemento estructural con el fin de aumentar su resistencia al fuego.

1.5.3.3 Acero inoxidable

Todos los aceros citados en el Anejo 24.

1.5.4 Términos relacionados con el análisis de transferencia de calor

1.5.4.1 Factor de configuración

El factor de configuración para la transferencia de calor por radiación desde superficie A a la superficie B se define como la fracción de la energía de radiación difusa desprendida por la superficie A que incide sobre la superficie B.

1.5.4.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección

Flujo de calor recibido por convección por el elemento, definido como la diferencia entre la temperatura global del gas que rodea a la superficie c del elemento considerada y la temperatura de dicha superficie.

1.5.4.3 Emisividad

Equivale al coeficiente de absorción de una superficie, es decir, a la relación entre el calor radiante absorbido por una superficie determinada y el absorbido por la superficie de un cuerpo negro.

1.5.4.4 Flujo neto de calor

Energía total absorbida por los elementos, por unidad de tiempo y de superficie.

1.5.4.5 Factor de sección

Para un elemento de acero, relación entre la superficie expuesta y el volumen de acero; para un elemento protegido relación entre la superficie interna del revestimiento expuesto y el volumen de acero.

1.5.4.6 Factor de sección de un cajón envolvente

Relación entre la superficie expuesta de un cajón teórico envolvente de la sección y el volumen de acero de la misma.

1.5.5 Términos relacionados con el análisis del comportamiento mecánico

1.5.5.1 Temperatura crítica del elemento de acero estructural

Para un nivel de carga dado, la temperatura en que se prevé el fallo en un elemento de acero estructural para una distribución de temperatura uniforme.

1.5.5.2 Límite elástico eficaz

Para una temperatura determinada, el nivel de tensión en el cual la relación tensión-deformación del acero alcanza el estado de fluencia.

1.6 Símbolos

(1) A los efectos de este anejo, se aplican los siguientes símbolos:

Letras latinas mayúsculas

A_i	superficie elemental de la sección transversal con una temperatura θ_i
A_m	superficie de un elemento por unidad de longitud
A_m/V	factor de sección para elementos de acero no protegidos
C_i	coeficiente de protección de la cara *i* del elemento
A_p	superficie apropiada del material de protección frente al fuego, por unidad de longitud del elemento [m²/m]
E_a	módulo de elasticidad del acero para el dimensionamiento a temperatura ambiente
$E_{a,\theta}$	pendiente de la región elástica lineal para el acero a temperatura elevada θ_a
$E_{fi,d}$	efecto de cálculo de las acciones para la situación de incendio, determinado de acuerdo con la reglamentación específica vigente, incluyendo los efectos de las expansiones y deformaciones térmicas
$F_{b,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a aplastamiento de los tornillos
$F_{b,t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a aplastamiento de los tornillos en situación de incendio
$F_{v,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a cortante de un tornillo por el plano de cortante, calculada considerando que el plano del cortante atraviesa la rosca del tornillo
$F_{v,t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a cortante de los tornillos en situación de incendio
$F_{w,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia por unidad de longitud de una soldadura en ángulo
$F_{w,t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia por unidad de longitud de una soldadura en ángulo en situación de incendio
G_k	valor característico de una acción permanente
I_f	flujo de calor radiante desde una abertura
I_z	flujo de calor radiante de una llama

$I_{z,i}$	flujo de calor radiante de una llama hacia la cara *i* de una columna
L	longitud del sistema de una columna en la planta considerada
$M_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo del momento resistente frente a pandeo lateral en el instante *t*
$M_{fi,t,Rd}$	valor de cálculo del momento resistente en el instante *t*
$M_{fi,\theta,Rd}$	valor de cálculo del momento resistente por la sección transversal para una temperatura uniforme θ_a, que equivale a la temperatura uniforme θ_a para el instante *t* en una sección transversal que no está influida térmicamente por los apoyos
M_{Rd}	momento resistente plástico resistido de la sección transversal bruta $M_{pl,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente; momento resistente elástico de la sección transversal bruta $M_{el,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente
$N_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a pandeo de un elemento sometido a compresión para el instante *t*
N_{Rd}	valor de cálculo de la resistencia de la sección transversal $N_{pl,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22
$N_{fi,\theta,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia de un elemento sometido a tracción a una temperatura uniforme θ_a
$N_{fi,t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia para el instante *t* de un elemento sometido a tracción con una distribución no uniforme de temperatura a través de la sección transversal
$Q_{k,1}$	carga variable principal
$R_{fi,d,t}$	valor de cálculo de la resistencia correspondiente en situación de incendio
$R_{fi,d,0}$	valor de $R_{fi,d,t}$ para el instante $t = 0$
T_f	temperatura de un fuego [K]
T_o	temperatura de la llama en la abertura [K]
T_x	temperatura de la llama en su punta [813 K]
T_z	temperatura de la llama [K]
$T_{z,1}$	temperatura de la llama [K], según reglamentación específica vigente, al nivel de la parte baja de una viga
$T_{z,2}$	temperatura de la llama [K] según reglamentación específica vigente, al nivel de la parte alta de una viga
V	volumen de un elemento por unidad de longitud
$V_{fi,t,Rd}$	valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo cortante en el instante *t*
V_{Rd}	resistencia a esfuerzo cortante de la sección transversal bruta para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22
X_k	valor característico de una propiedad de resistencia o deformación (generalmente f_k o E_k) para el dimensionamiento a temperatura normal siguiendo el Anejo 22

Letras latinas minúsculas

a_z	coeficiente de absorción de la llama
c	calor específico
c_a	calor específico del acero
c_p	calor específico del material de protección frente al fuego, independiente de la temperatura

d_i	dimensión de la sección transversal de la cara *i* del elemento
d_p	espesor del material de protección frente al fuego
d_f	espesor del material de protección frente al fuego (d_f = 0 para elementos sin protección)
$f_{p,\theta}$	límite de proporcionalidad del acero a la temperatura elevada θ_a
f_y	límite elástico a 20 ºC
$f_{y,\theta}$	límite elástico eficaz del acero a la temperatura elevada θ_a
$f_{y,i}$	límite elástico nominal f_y para la superficie elemental A_i, tomada como positiva en la cara sometida a compresión sobre el eje neutro plástico y como negativa en la cara sometida a tracción
$f_{u,\theta}$	resistencia última a temperatura elevada, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación
$\dot{h}_{net,d}$	valor de cálculo del flujo neto de calor por unidad de superficie
h_z	altura de la punta de la llama por encima de la parte inferior de la viga
i	índice de la cara de la columna (1), (2), (3) o (4)
$k_{b,\theta}$	coeficiente de reducción determinado para la temperatura apropiada del tornillo
$k_{E,\theta}$	coeficiente de reducción indicado en el apartado 3 para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura del acero θ_a alcanzada en el instante *t*
$k_{E,\theta,com}$	coeficiente de reducción indicado en el apartado 3 para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura máxima del acero en el ala sometida a compresión $\theta_{a,com}$ alcanzada en el instante *t*
k_{sh}	coeficiente de corrección del efecto sombra
k_θ	valor relativo de una propiedad de resistencia o deformación del acero a la temperatura elevada θ_a
k_θ	coeficiente de reducción para una propiedad de resistencia o deformación ($X_{k,\theta}/X_k$), dependiente de la temperatura del material, véase el apartado 3
$k_{w,\theta}$	coeficiente de reducción de la resistencia para soldaduras
$k_{y,\theta}$	coeficiente de reducción indicado en el apartado 3 para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_a alcanzada en el instante *t*
$k_{y,\theta,com}$	coeficiente de reducción indicado en el apartado 3 para el límite elástico del acero a la temperatura máxima en el ala sometida a compresión $\theta_{a,com}$ alcanzada en el instante *t*
$k_{y,\theta,i}$	coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura θ_i
$k_{y,\theta,máx.}$	coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura máxima del acero $\theta_{a,máx.}$ alcanzada en el instante *t*
$k_{y,\theta,\,web}$	coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_{web}; véase el apartado 3
k_y	factor de interacción
k_z	factor de interacción
k_{LT}	factor de interacción
m	número de aberturas en la cara *m*

n	número de aberturas en la cara *n*
l	longitud a 20 ºC; distancia desde una abertura medida a lo largo del eje de llama
l_{fi}	longitud de pandeo de una columna para el dimensionamiento en la situación de incendio
s	distancia horizontal desde el eje de una columna hasta una pared de un sector de incendio
t	tiempo de exposición al fuego
w_i	anchura de una abertura de fachada
z_i	distancia desde el eje neutro plástico hasta el centro de gravedad de la superficie elemental A_i

Letras griegas mayúsculas

Δt	intervalo de tiempo
Δl	expansión inducida por la temperatura
$\Delta\theta_{g,t}$	incremento de la temperatura del gas ambiental durante el intervalo de tiempo Δt
$\phi_{f,i}$	factor de configuración de la cara *i* de un elemento para una determinada abertura
ϕ_f	coeficiente global de configuración de un elemento para la transferencia de calor por radiación desde una abertura
ϕ_z	coeficiente global de configuración de un elemento para la transferencia de calor por radiación desde una llama
$\phi_{z,i}$	factor de configuración de la cara *i* de un elemento para una determinada llama
$\phi_{z,m}$	factor de configuración global de la columna para la transmisión de calor por radiación desde la llama en la cara *m*
$\phi_{z,n}$	factor de configuración global de la columna para la transmisión de calor por radiación desde la llama en la cara *n*

Letras griegas minúsculas

α	coeficiente de transferencia de calor por convección
β_M	coeficientes del momento uniforme equivalente
γ_G	coeficiente parcial para las acciones permanentes
γ_{M2}	coeficiente parcial a temperatura ambiente
$\gamma_{M,fi}$	coeficiente parcial para la propiedad del material pertinente en situación de incendio
$\gamma_{Q,1}$	coeficiente parcial para la acción variable 1
ε_f	emisividad de una llama; la emisividad de una abertura
ε_z	emisividad de una llama
$\varepsilon_{z,m}$	emisividad total de la llama en la cara *m*
$\varepsilon_{z,n}$	emisividad total de la llama en la cara *n*
ξ	coeficiente de reducción para las acciones permanentes desfavorables *G*
η_{fi}	coeficiente de reducción para el valor de cálculo del nivel de carga en situación de incendio
θ	temperatura
θ_a	temperatura del acero [ºC]

$\theta_{a,cr}$	temperatura crítica del acero
$\theta_{g,t}$	temperatura del gas ambiental para el instante *t*
θ_{web}	temperatura media en alma de la sección
θ_i	temperatura en la superficie elemental A_i
κ	factor de adaptación
κ_1	factor de adaptación para una distribución no uniforme de la temperatura en la sección transversal
κ_2	factor de adaptación para una distribución no uniforme de la temperatura a lo largo de la viga
λ	conductividad térmica
λ_i	espesor de la llama para la abertura *i*
λ_p	conductividad térmica del sistema de protección frente al fuego
λ_f	conductividad térmica eficaz del material de protección frente al fuego
μ_0	grado de utilización para el instante $t = 0$
σ	constante de Stefan Boltzmann [$5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m^{2}K^4]
ρ_a	densidad del acero
ρ_p	densidad del material de protección frente al fuego
χ_{fi}	coeficiente de reducción para el pandeo por flexión para el dimensionamiento en la situación de incendio
$\chi_{LT,fi}$	coeficiente de reducción para el pandeo lateral (o torsional) para el dimensionamiento en la situación de incendio
$\chi_{min,fi}$	valor mínimo de $\chi_{y,fi}$ y $\chi_{z,fi}$
$\chi_{z,fi}$	coeficiente de reducción para el pandeo por flexión sobre el eje z, para el dimensionamiento en la situación de incendio
$\chi_{y,fi}$	coeficiente de reducción para el pandeo por flexión sobre el eje y, para el dimensionamiento en la situación de incendio
ψ_{fi}	factor de combinación para valores frecuentes, obtenido de $\psi_{1,1}$ o de $\psi_{2,1}$

2 Bases de cálculo

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos básicos

(1) Cuando se requiera resistencia mecánica en caso de incendio, las estructuras de acero se deben proyectar y construir de forma que mantengan su función portante durante el tiempo de exposición al fuego requerido.

(2) Los criterios de deformación deberían aplicarse cuando los objetivos de protección, o los criterios de cálculo para los elementos de compartimentación, requieran que se tenga en cuenta la deformación de la estructura portante.

(3) Con la excepción de las disposiciones del punto (2) no es necesario, según proceda, considerar la deformación de la estructura portante en los siguientes casos:

- la eficacia de los medios de protección se ha evaluado de acuerdo con el apartado 3.4.3; y
- los elementos separadores tienen que cumplir los requisitos correspondientes a una exposición a fuego nominal.

2.1.2 Exposición a fuegos nominales

(1) Para la exposición al fuego normalizado, los elementos deberían cumplir los criterios R del modo siguiente:

- solamente capacidad portante: resistencia mecánica (criterio R).

(2) Se considera que se satisface el criterio “R” cuando la función portante se mantiene durante el tiempo de exposición al fuego requerido.

(3) Se debería aplicar el mismo criterio con la curva de exposición a fuego de hidrocarburo, aunque la referencia a dicha curva específica debería identificarse mediante las letras "HC".

2.1.3 Exposición al fuego paramétrico

- La función portante está asegurada si se evita el fallo durante la duración total del incendio, incluyendo la fase de extinción, o durante un periodo de tiempo determinado.

2.2 Acciones

(1) Las acciones térmicas y mecánicas deberían tomarse de la reglamentación específica vigente.

- Además de lo indicado en la reglamentación específica vigente, la emisividad en relación a la superficie del acero debería tomarse como 0,7 para el acero al carbono y 0,4 para los aceros inoxidables, de acuerdo con el Apéndice C.

2.3 Valores de cálculo de las propiedades de los materiales

(1) Los valores de cálculo de las propiedades mecánicas de los materiales (resistencia y deformación) $X_{d,fi}$ se definen de la siguiente forma:

$$X_{d,fi} = k_\theta \, X_k / \gamma_{M,fi} \qquad (2.1)$$

donde:

X_k es el valor característico de una propiedad de resistencia o deformación (generalmente f_k o E_k) para el dimensionamiento a temperatura ambiente siguiendo el Anejo 22

k_θ es el coeficiente de reducción para una propiedad de resistencia o deformación ($X_{k,\theta}/X_k$), dependiendo de la temperatura del material, véase el apartado 3

$\gamma_{M,fi}$ es el coeficiente parcial para la propiedad del material pertinente en la situación de incendio, cuyo valor es $\gamma_{M,fi} = 1{,}0$.

(2) Los valores de cálculo de las propiedades térmicas del material $X_{d,fi}$ se definen de la siguiente forma:

- si el incremento de la propiedad es favorable para la seguridad:

$$X_{d,fi} = X_{k,\theta}/\gamma_{M,fi} \qquad (2.2a)$$

- si el incremento de la propiedad es desfavorable para la seguridad:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \, X_{k,\theta} \qquad (2.2b)$$

donde:

$X_{k,\theta}$ es el valor de una propiedad material para el dimensionamiento en la situación de incendio, generalmente dependiente de la temperatura del material, véase el apartado 3

$\gamma_{M,fi}$ es el coeficiente parcial para la propiedad del material pertinente en situación de incendio, cuyo valor es $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

2.4 Métodos de verificación

2.4.1 Generalidades

(1) El modelo del sistema estructural adoptado para proyectar con este anejo debería reflejar las prestaciones frente al fuego esperadas de la estructura.

NOTA: Cuando las reglas incluidas en este anejo sean válidas únicamente para la exposición al fuego normalizado, esto se identifica en los apartados pertinentes.

(2) Se debe verificar que, durante la duración pertinente de la exposición al fuego *t*:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \qquad (2.3)$$

donde:

$E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para la situación de incendio determinado de acuerdo con la reglamentación específica vigente, incluyendo los efectos de las expansiones y deformaciones térmicas

$R_{fi,d,t}$ es el valor de cálculo de la resistencia correspondiente en situación de incendio.

(3) El cálculo estructural para la situación de incendio debería efectuarse de acuerdo con el punto (2) del apartado 5.1.4 del Anejo 18.

NOTA 1: Para el cálculo de un elemento, véase el apartado 2.4.2.

Para el cálculo de una parte de la estructura, véase el apartado 2.4.3.

Para el cálculo de la estructura global, véase el apartado 2.4.4.

NOTA 2: Para verificar los requisitos de resistencia al fuego normalizado, es suficiente con un cálculo del elemento estructural.

(4) Como alternativa al dimensionamiento mediante cálculos, el proyecto frente al fuego puede basarse en los resultados de ensayos de fuego, o también en ensayos de fuego combinados con cálculos.

2.4.2 Cálculo del elemento estructural

(1) El efecto de las acciones debería determinarse para el instante *t*=0, utilizando los factores de combinación $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$, de acuerdo con la reglamentación específica vigente.

(2) Como simplificación al punto (1), el efecto de las acciones $E_{d,fi}$ puede obtenerse a partir de un cálculo estructural para el dimensionamiento a temperatura ambiente del modo siguiente:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \qquad (2.4)$$

donde:

E_d es el valor de cálculo del esfuerzo correspondiente para el dimensionamiento a temperatura normal, para una combinación fundamental de acciones (véase la reglamentación específica vigente)

η_{fi} es el coeficiente de reducción para el valor de cálculo del nivel de carga en situación de incendio.

(3) El coeficiente de reducción η_{fi} para la combinación de cargas (6.10) del Anejo 18, debería tomarse como:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi}\, Q_{k,1}}{\gamma_G\, G_k + \gamma_{Q,1}\, Q_{k,1}} \qquad (2.5)$$

o para las combinaciones de cargas (6.10a) y (6.10b) del Anejo 18, tomado como el menor de los valores obtenidos en las dos expresiones siguientes:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi}\, Q_{k,1}}{\gamma_G\, G_k + \gamma_{Q,1}\, \psi_{0,1}\, Q_{k,1}} \qquad (2.5a)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi}\, Q_{k,1}}{\xi\gamma_G\, G_k + \gamma_{Q,1}\, Q_{k,1}} \qquad (2.5b)$$

donde:

$Q_{k,1}$ es el valor característico de la acción variable principal

G_k es el valor característico de una acción permanente

γ_G es el coeficiente parcial para las acciones permanentes

$\gamma_{Q,1}$ es el coeficiente parcial para la acción variable 1

ψ_{fi} es el factor de combinación de valores, obtenido bien de $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$, véase la reglamentación específica vigente

ξ es un coeficiente de reducción de acciones permanentes desfavorables *G.*

NOTA 1: Un ejemplo de variación del coeficiente de reducción η_{fi} frente a la relación de carga $Q_{k,1}/G_k$ para diferentes valores del factor de combinación $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$, de acuerdo con la expresión (2.5), se muestra en la figura A23.2.1 con las siguientes hipótesis: γ_G = 1,35 y γ_Q = 1,5. Los coeficientes parciales se especifican en el Anejo 18. Las ecuaciones (2.5a) y (2.5b) proporcionan valores ligeramente superiores.

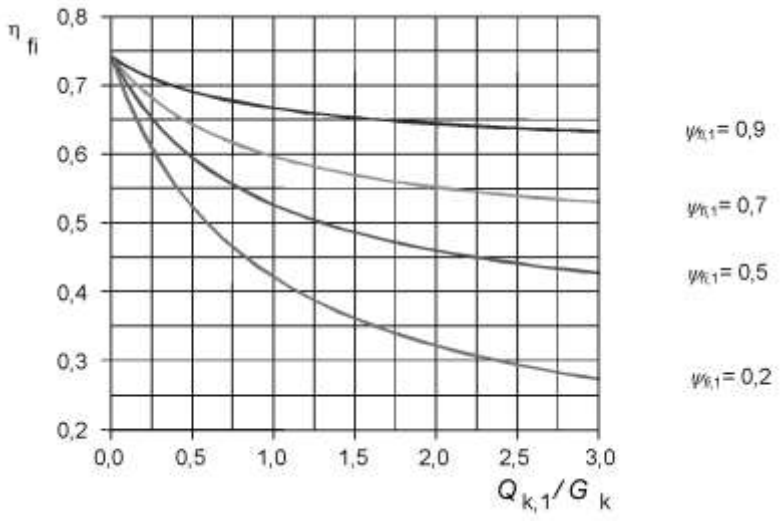


Figura A23.2.1 Variación del coeficiente de reducción η_{fi} con la relación de carga $Q_{k,1}/G_k$

NOTA 2: Como simplificación puede utilizarse el valor de η_{fi} = 0,65 excepto para sobrecargas de acuerdo con la categoría de carga E (zonas susceptibles de la acumulación de objetos, incluyendo las zonas de acceso), donde el valor es 0,7.

(4) Es necesario considerar únicamente los efectos de las deformaciones térmicas producidas por los gradientes térmicos a través de la sección transversal. Pueden despreciarse los efectos de las expansiones térmicas axiales o en el plano.

(5) Se puede suponer que las condiciones de contorno en los apoyos y en los extremos de un elemento permanecen constantes durante toda la exposición al fuego.

(6) Los métodos de cálculo simplificados o avanzados proporcionados en los apartados 4.2 y 4.3 respectivamente son apropiados para la verificación de los elementos en la situación de incendio.

2.4.3 Cálculo de una parte de la estructura

(1) Se aplica el punto (1) del apartado 2.4.2.

(2) Como alternativa a la realización de un cálculo estructural para la situación de incendio para el instante t = 0, las reacciones en los apoyos y los esfuerzos en los contornos de una parte de la estructura pueden obtenerse mediante un dimensionamiento estructural a temperatura normal, como se indica en el apartado 2.4.2.

(3) La parte de la estructura a analizar debería definirse teniendo en cuenta las expansiones y deformaciones térmicas potenciales de forma que su interacción con otras partes de la estructura pueda aproximarse mediante las condiciones de contorno y de apoyo independientes del tiempo durante la exposición al fuego.

(4) En el interior de la parte de la estructura a analizar se deberían tener en cuenta el modo de fallo potencial debido a la exposición al fuego, las propiedades de los materiales dependientes de la temperatura y la rigidez del elemento, así como los efectos de las expansiones y deformaciones térmicas (acciones indirectas del fuego).

(5) Se puede suponer que las condiciones de contorno en los apoyos y las fuerzas y momentos en el contorno de una parte de la estructura permanecen constantes durante toda la exposición al fuego.

2.4.4 Cálculo de la estructura global

(1) Cuando se realiza un cálculo de la estructura global para la situación de incendio, deberían tenerse en cuenta el modo de fallo potencial debido a la exposición al fuego, las propiedades de los materiales dependientes de la temperatura y la rigidez del elemento, así como los efectos de las deformaciones térmicas (acciones indirectas del fuego).

3 Propiedades de los materiales

3.1 Generalidades

(1) A menos que se den como valores de cálculo, los valores de las propiedades de los materiales incluidos en este capítulo deberían tratarse como valores característicos.

(2) Deberían tomarse las propiedades mecánicas del acero a 20 °C iguales a las dadas en el Anejo 22 para el dimensionamiento a temperatura normal.

3.2 Propiedades mecánicas de los aceros al carbono

3.2.1 Propiedades de resistencia y deformación

(1) Para velocidades de calentamiento entre 2 y 50 K/min, las propiedades de resistencia y deformación del acero a temperaturas elevadas deberían obtenerse de la relación tensión-deformación representada en la figura A23.3.1.

NOTA: Para las reglas de esta norma se supone que las velocidades de calentamiento están dentro de los límites especificados.

(2) La relación dada en la figura A23.3.1 debería utilizarse para determinar las resistencias a tracción, compresión, momento flector o esfuerzo cortante.

(3) La tabla A23.3.1 incluye los coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación del acero a temperaturas elevadas representada en la figura A23.3.1. Dichos coeficientes de reducción se definen como sigue:

- límite elástico eficaz, respecto al límite elástico a 20 ºC: $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$,
- límite de proporcionalidad, respecto al límite elástico a 20 ºC: $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$,
- pendiente de la región elástica lineal, respecto a la pendiente a 20 ºC: $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$.

NOTA: La variación de estos coeficientes de reducción con la temperatura se representa en la figura A23.3.2.

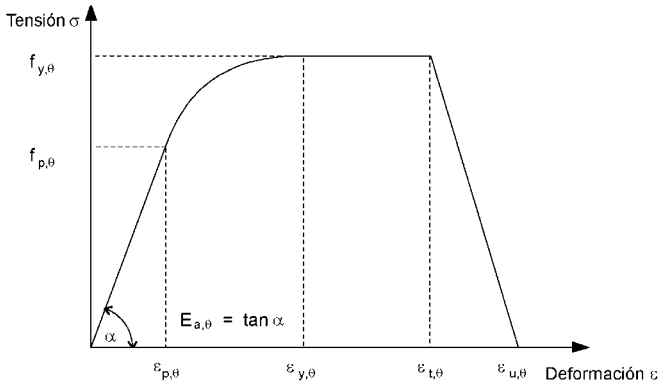
(4) Como alternativa, para temperaturas menores de 400 ºC la relación tensión-deformación especificada en el punto (1) puede extenderse mediante la opción del endurecimiento por deformación, dada en el Apéndice A, siempre que el pandeo local o del elemento no conduzca al fallo prematuro.

3.2.2 Densidad

(1) La densidad del acero ρ_a puede considerarse independiente de la temperatura del acero. Puede tomarse el siguiente valor:

$\rho_a = 7850$ kg/m^3

Zonas de deformación	Tensión σ		Módulo tangente	
$\varepsilon \le \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$		$E_{a,\theta}$	
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a)\left[a^2 - \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon\right)^2\right]^{0,5}$		$\dfrac{b\left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon\right)}{a\left[a^2 - \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon\right)^2\right]^{0,5}}$	
$\varepsilon_{y,\theta} \le \varepsilon \le \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$		0	
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta}\left[1 - \left(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}\right)/\left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}\right)\right]$		–	
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00		–	
Parámetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta}/E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$	$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Funciones	$a^2 = \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}\right)\left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta}\right)$ $b^2 = c\left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}\right)E_{a,\theta} + c^2$ $c = \dfrac{\left(f_{y,\theta} - f_{p,\theta}\right)^2}{\left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}\right)E_{a,\theta} - 2\left(f_{y,\theta} - f_{p,\theta}\right)}$			



$f_{y,\theta}$ límite elástico eficaz;

$f_{p,\theta}$ límite de proporcionalidad;

$E_{a,\theta}$ pendiente de la región elástica lineal;

$\varepsilon_{p,\theta}$ deformación en el límite de proporcionalidad;

$\varepsilon_{y,\theta}$ deformación en el límite elástico;

$\varepsilon_{t,\theta}$ deformación en el límite elástico;

$\varepsilon_{u,\theta}$ deformación de rotura.

Figura A23.3.1 Relación tensión-deformación para el acero al carbono a temperaturas elevadas

Tabla A23.3.1 Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas

Temperatura del acero θ_a	Coeficientes de reducción a temperatura θ_a respecto al valor de f_y o E_a a 20 ºC		
	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite elástico eficaz $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite de proporcionalidad $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 ºC	1,000	1,000	1,000
100 ºC	1,000	1,000	1,000
200 ºC	1,000	0,807	0,900
300 ºC	1,000	0,613	0,800
400 ºC	1,000	0,420	0,700
500 ºC	0,780	0,360	0,600
600 ºC	0,470	0,180	0,310
700 ºC	0,230	0,075	0,130
800 ºC	0,110	0,050	0,090
900 ºC	0,060	0,0375	0,0675
1000 ºC	0,040	0,0250	0,0450
1100 ºC	0,020	0,0125	0,0225
1200 ºC	0,000	0,0000	0,0000
NOTA: Puede emplearse una interpolación lineal para valores intermedios de temperatura del acero.			

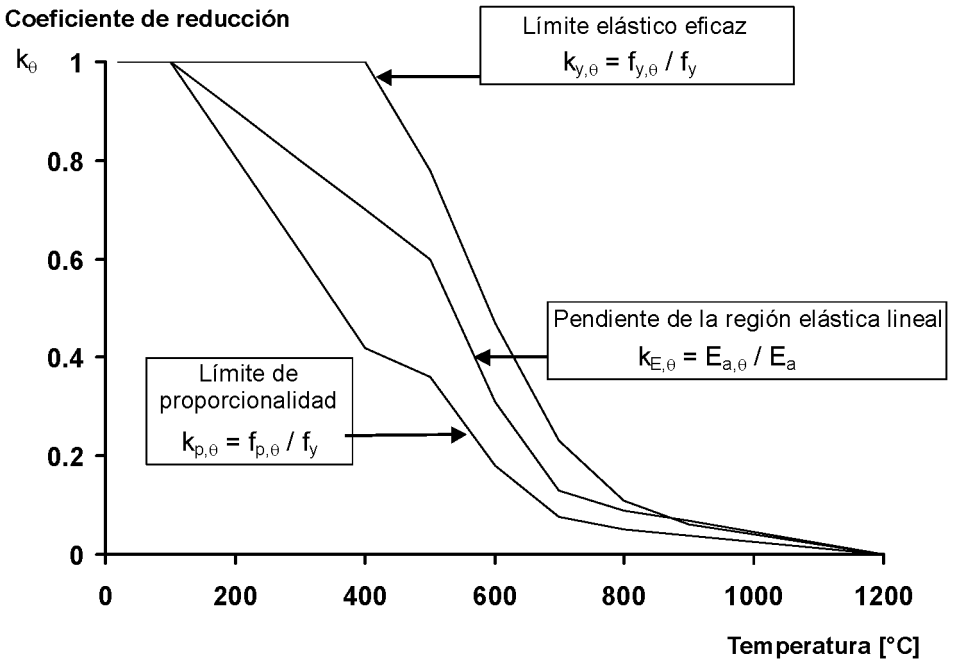


Figura A23.3.2 Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas

3.3 Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables

(1) Las propiedades mecánicas del acero inoxidable pueden tomarse del Apéndice C.

3.4 Propiedades térmicas

3.4.1 Aceros al carbono

3.4.1.1 Dilatación térmica

(1) La deformación térmica unitaria del acero $\Delta l/l$ debería determinarse a partir de lo siguiente:

- para 20 ºC $\leq \theta_a <$ 750 ºC:

$$\Delta l/l = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \theta_a + 0{,}4 \times 10^{-8}\ \theta_a^2 - 2{,}416 \times 10^{-4} \quad (3.1a)$$

- para 750 ºC $\leq \theta_a \leq$ 860 ºC:

$$\Delta l/l = 1{,}1 \times 10^{-2} \quad (3.1b)$$

- para 860 ºC $< \theta_a \leq$ 1200 ºC:

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5}\ \theta_a - 6{,}2 \times 10^{-3} \quad (3.1c)$$

donde:

l es la longitud a 20 ºC

Δl es la dilatación producida por la temperatura

θ_a es la temperatura del acero [ºC].

NOTA: La variación de la deformación térmica unitaria con la temperatura se representa en la figura A23.3.3.

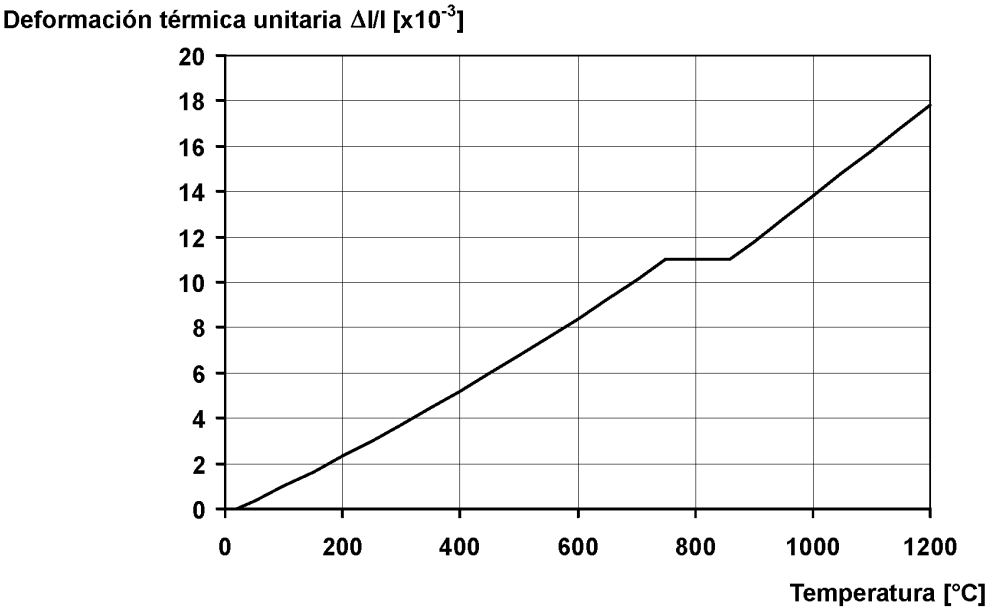


Figura A23.3.3 Deformación térmica unitaria del acero al carbono en función de la temperatura

3.4.1.2 Calor específico

(1) El calor específico del acero c_a debería determinarse como sigue:

- para 20 ºC $\leq \theta_a <$ 600 ºC:

$$c_a = 425 + 7{,}73 \times 10^{-1}\ \theta_a - 1{,}69 \times 10^{-3}\ \theta_a^2 + 2{,}22 \times 10^{-6}\ \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (3.2a)$$

– para 600 ºC ≤ θ_a < 735 ºC:

$$c_a = 666 + \frac{13\,002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK} \quad (3.2b)$$

– para 735 ºC ≤ θ_a < 900 ºC:

$$c_a = 545 + \frac{17\,820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK} \quad (3.2c)$$

– para 900 ºC ≤ θ_a ≤ 1200 ºC:

$$c_a = 650 \text{ J/kgK} \quad (3.2d)$$

donde:

θ_a es la temperatura del acero [ºC].

NOTA: La variación del calor específico con la temperatura se representa en la fgura A23.3.4.

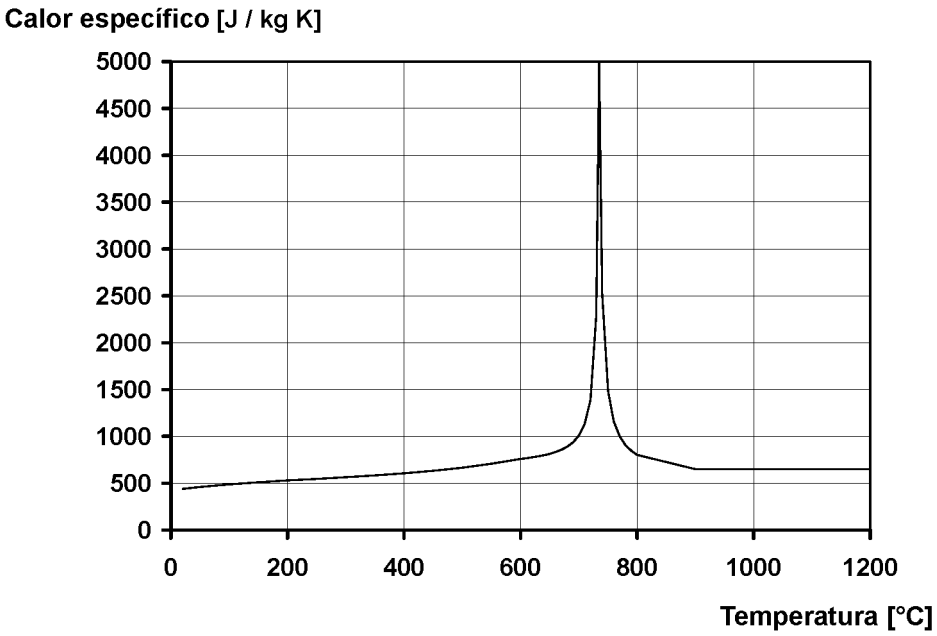


Figura A23.3.4 Calor específico del acero al carbono en función de la temperatura

3.4.1.3 Conductividad térmica

(1) La conductividad térmica del acero λ_a debería determinarse como sigue:

– para 20 ºC ≤ θ_a < 800 ºC:

$$\lambda_a = 54 - 3{,}33 \times 10^{-2}\ \theta_a \text{ W/mK} \quad (3.3a)$$

– para 800 ºC ≤ θ_a ≤ 1200 ºC:

$$\lambda_a = 27{,}3 \text{ W/mK} \quad (3.3b)$$

donde:

θ_a es la temperatura del acero [ºC].

NOTA: La variación de la conductividad térmica con la temperatura se representa en la figura A23.3.5.

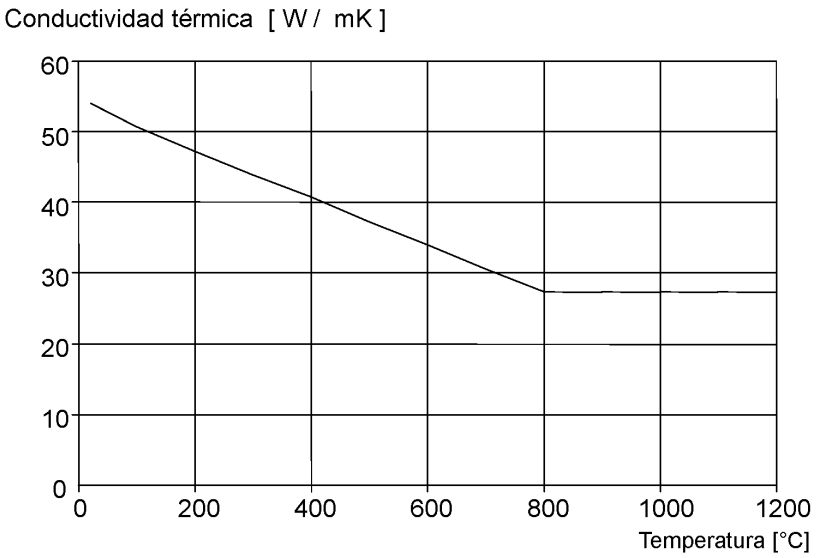


Figura A23.3.5 Conductividad térmica del acero al carbono en función de la temperatura

3.4.2 Aceros inoxidables

(1) Las propiedades térmicas de los aceros inoxidables pueden tomarse del Apéndice C.

3.4.3 Materiales de protección frente al fuego

(1) Las propiedades y prestaciones de los materiales de protección frente al fuego utilizados en el cálculo se deberían haber valorado empleando los procedimientos de ensayo proporcionados en las normas UNE-EN 13381-1, UNE-EN 13381-2 o UNE-EN 13381-4, según proceda.

NOTA: Estas normas incluyen el requisito de que los materiales de protección frente al fuego deberían conservar su cohesión y mantenerse adheridos a sus apoyos durante todo el tiempo de exposición al fuego pertinente.

4 Cálculo estructural frente al fuego

4.1 Generalidades

(1) Este apartado proporciona reglas para estructuras de acero que pueden estar:

- sin protección;
- aislados mediante materiales de protección frente al fuego;
- protegidos mediante pantallas térmicas.

NOTA: Otros ejemplos de métodos de protección son el llenado con agua o la protección parcial en paredes y suelos.

(2) Para determinar la resistencia al fuego, se permiten los siguientes métodos de cálculo:

- modelos de cálculo simplificados;
- modelos de cálculo avanzados;
- ensayos.

(3) Los modelos de cálculo simplificados son métodos de cálculo simplificados para elementos individuales, los cuales se fundamentan en hipótesis conservadoras.

(4) Los modelos de cálculo avanzados son métodos de cálculo en los cuales se aplican principios de ingeniería a aplicaciones específicas de una manera realista.

4.2 Modelos de cálculo simplificados

4.2.1 Generalidades

(1) Se debe suponer que la función portante de un elemento de acero se mantiene en una situación de incendio determinada después de un instante *t* si:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \qquad (4.1)$$

donde:

$E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para el dimensionamiento en la situación de incendio, de acuerdo con la reglamentación específica vigente;

$R_{fi,d,t}$ es el valor de cálculo de la resistencia correspondiente del elemento de acero, para el dimensionamiento en la situación de incendio en el instante *t*.

(2) El valor de cálculo de la resistencia $R_{fi,d,t}$ en el instante *t* debería determinarse, generalmente, sobre la hipótesis de una temperatura uniforme en la sección transversal, modificando el valor de cálculo de la resistencia para el dimensionamiento a temperatura ambiente según el Anejo 22, para tener en cuenta las propiedades mecánicas del acero a temperaturas elevadas, véase el apartado 4.2.3.

NOTA: En el apartado 4.2.3, $R_{fi,d,t}$ pasa a ser $M_{fi,t,Rd}$, $N_{fi,t,Rd}$, etc. (por separado o en combinación) y los valores correspondientes de $M_{fi,Ed}$, $N_{fi,Ed}$, etc. representan $E_{fi,d}$

(3) Si se emplea una distribución no uniforme de la temperatura, el valor de cálculo de la resistencia para el dimensionamiento a temperatura ambiente, según el Anejo 22, se modifica en base a dicha distribución de temperatura.

(4) Como alternativa al punto (1), empleando una distribución de temperatura uniforme, la verificación puede llevarse a cabo en el dominio de la temperatura, véase el apartado 4.2.4.

(5) No es necesario considerar el fallo de la sección neta en los taladros de los elementos de fijación, siempre y cuando exista un elemento de fijación en cada taladro, ya que la temperatura del acero es inferior en las uniones debido a la presencia de material adicional.

(6) La resistencia al fuego de una unión atornillada o soldada puede considerarse suficiente siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

1.- La resistencia térmica $(d_f/\lambda_f)_c$ de la protección frente al fuego de la unión debería ser mayor o igual que el valor mínimo de la resistencia térmica $(d_f/\lambda_f)_m$ de la protección frente al fuego aplicada a cualquiera de los elementos unidos;

donde:

d_f es el espesor del material de protección frente al fuego (d_f = 0 para elementos sin protección)

λ_f es la conductividad térmica eficaz del material de protección frente al fuego.

2.- El grado de utilización de la unión debería ser menor o igual que el grado de utilización máximo de cualquiera de los elementos conectados.

3.- La resistencia de la unión a temperatura ambiente debería cumplir las recomendaciones dadas en el Anejo 26.

(7) Como alternativa al método dado en el punto 6 del apartado 4.2.1, la resistencia al fuego de una unión puede determinarse utilizando el método que se incluye en el Apéndice D.

NOTA: Como simplificación, la comparación del grado de utilización en las uniones y en los elementos unidos puede llevarse a cabo a temperatura ambiente.

4.2.2 Clasificación de las secciones transversales

(1) Al efecto de estas reglas simplificadas, las secciones transversales pueden clasificarse como para el dimensionamiento a temperatura ambiente, con un valor reducido de ε, como se indica en la expresión (4.2).

$$\varepsilon = 0{,}85\,[235/f_y]^{0,5} \tag{4.2}$$

donde:

f_y es el límite elástico a 20 ºC.

NOTA 1: Véase el Anejo 22.

NOTA 2: El coeficiente de reducción 0,85 tiene en cuenta las influencias del aumento de temperatura.

4.2.3 Resistencia

4.2.3.1 Elementos sometidos a tracción

(1) El valor de cálculo de la resistencia $N_{fi,\theta,Rd}$ de un elemento sometido a tracción con una temperatura uniforme θ_a debería determinarse mediante:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta}\, N_{Rd}\, [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \tag{4.3}$$

donde:

$k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a una temperatura θ_a, alcanzada en un instante t; véase el apartado 3

N_{Rd} es el valor de cálculo de la resistencia de la sección transversal $N_{pl,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22.

(2) El valor de cálculo de la resistencia $N_{fi,t,Rd}$ para un instante *t* de un elemento sometido a tracción con una distribución no uniforme de la temperatura a través de la sección transversal puede determinarse mediante:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^{n} A_i\, k_{y,\theta,i}\, f_y / \gamma_{M,fi} \tag{4.4}$$

donde:

A_i es un área elemental de la sección transversal con una temperatura θ_i

$k_{y,\theta,i}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura θ_i, véase el apartado 3

θ_i es la temperatura en el área elemental A_i.

(3) El valor de cálculo de la resistencia $N_{fi,t,Rd}$ en el instante t de un elemento sometido a tracción con una distribución no uniforme de la temperatura puede, de manera conservadora, considerarse igual al valor de cálculo de la resistencia $N_{fi,\theta,Rd}$ de un elemento sometido a tracción con una temperatura uniforme del acero θ_a equivalente a la temperatura máxima del acero $\theta_{a,máx.}$ alcanzada en el instante t.

4.2.3.2 Elementos sometidos a compresión con secciones transversales de Clases 1, 2 o 3

(1) El valor de cálculo de la resistencia a pandeo $N_{b,fi,t,Rd}$ en el instante t de un elemento sometido a compresión con una sección transversal de clase 1, de clase 2 o de clase 3 con una temperatura uniforme θ_a, debería determinarse mediante:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A\, k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \qquad (4.5)$$

donde:

χ_{fi} es el coeficiente de reducción del pandeo por flexión para el dimensionamiento en la situación de incendio

$k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción dado en el apartado 3 para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_a alcanzada en el instante t.

(2) El valor de χ_{fi} debería tomarse como el menor de los valores entre $\chi_{y,fi}$ y $\chi_{z,fi}$ determinados de acuerdo con la expresión:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \qquad (4.6)$$

con

$$\phi_\theta = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha\bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2\right]$$

y

$$\alpha = 0{,}65\sqrt{235/f_y}$$

La esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_\theta$ para la temperatura θ_a se obtiene de la expresión:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}\left[k_{y,\theta}/k_{E,\theta}\right]^{0,5} \qquad (4.7)$$

donde:

$k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción dado en el apartado 3 para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_a alcanzada en el instante t

$k_{E,\theta}$ es el coeficiente de reducción dado en el apartado 3 para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura del acero θ_a alcanzada en el instante t.

(3) La longitud de pandeo l_{fi} de una columna para la situación de cálculo ante incendio debería determinarse generalmente igual que para el dimensionamiento a temperatura ambiente. Sin embargo, en un entramado arriostrado, la longitud de pandeo l_{fi} de una columna puede determinarse considerándolo como empotrado en las uniones continuas o semicontinuas con los tramos de la columna en los sectores

de incendio superiores e inferiores, siempre que la resistencia al fuego de los componentes del edificio que separan estos sectores de incendio no sea menor que la resistencia al fuego de la columna.

(4) En el caso de un entramado arriostrado en la que cada planta contenga un sector de incendio separado con resistencia suficiente al fuego, la longitud de pandeo l_{fi} de una columna continua en una planta intermedia puede tomarse como $l_{fi} = 0{,}5L$ y la longitud de pandeo en la planta más alta puede tomarse como $l_{fi} = 0{,}7L$, donde L es la longitud del sistema en la planta pertinente, véase la figura A23.4.1.

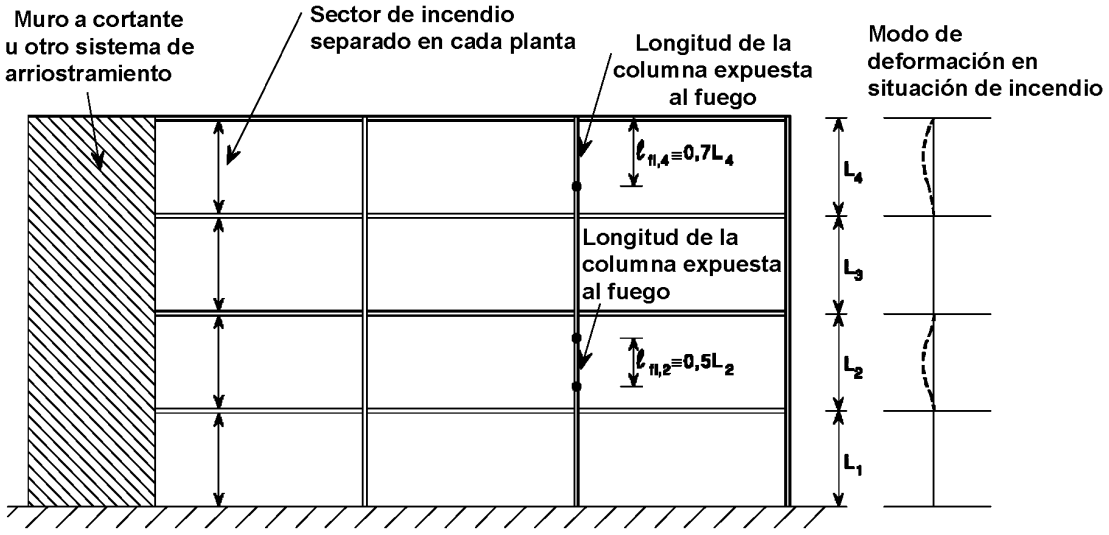


Figura A23.4.1 Longitudes de pandeo l_{fi} de columnas en entramados (pórticos) arriostrados

(5) Al realizar el cálculo utilizando la exposición a fuego nominal, el valor de cálculo de la resistencia $N_{b,fi,t,Rd}$ en el instante t de un elemento sometido a compresión con una distribución no uniforme de la temperatura puede considerarse igual al valor de cálculo de la resistencia $N_{b,fi,\theta,Rd}$ de un elemento sometido a compresión con una temperatura uniforme del acero θ_a equivalente a la temperatura máxima del acero $\theta_{a,máx.}$ alcanzada en el instante t.

4.2.3.3 Vigas con secciones transversales de clase 1 o de clase 2

(1) El valor de cálculo del momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ de una sección transversal de clase 1 o de clase 2 con una temperatura uniforme θ_a debería determinarse mediante:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta}\,[\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}]\,M_{Rd} \qquad (4.8)$$

donde:

M_{Rd} es el momento resistente plástico resistido de la sección transversal bruta $M_{pl,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22, o el momento resistente reducido para el dimensionamiento a temperatura ambiente, teniendo en cuenta cuando sea necesario los efectos del esfuerzo cortante, de acuerdo con el Anejo 22

$k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura θ_a, véase el apartado 3.

(2) El valor de cálculo del momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ en el instante t de una sección transversal de clase 1 o de clase 2 con una distribución no uniforme de la temperatura a través de la sección transversal puede determinarse mediante:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^{n} A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi} \quad (4.9)$$

donde:

z_i es la distancia desde el eje neutro plástico al centro de gravedad del área elemental A_i

$f_{y,i}$ es el límite elástico nominal f_y para el área elemental A_i, considerada positiva en la cara sometida a compresión sobre el eje neutro plástico y negativa en la cara sometida a tracción del mismo

A_i y $k_{y,\theta,i}$ son tal y como se define en el punto (2) del apartado 4.2.3.1.

(3) Como alternativa, el valor de cálculo del momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ en el instante t de una sección transversal de clase 1 o de clase 2 en un elemento con una distribución no uniforme de temperatura, puede determinarse mediante:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd}/(\kappa_1 \kappa_2) \quad (4.10)$$

con la condición $M_{fi,\theta,Rd} \leq M_{Rd}$

donde:

$M_{fi,\theta,Rd}$ es el valor de cálculo del momento resistente de la sección transversal para una temperatura uniforme θ_a, equivalente a la temperatura uniforme θ_a en el instante t en una sección transversal que no se encuentra afectada térmicamente por los apoyos

κ_1 es un factor de adaptación para distribuciones no uniformes de la temperatura en la sección transversal, véase el punto (7)

κ_2 es un factor de adaptación para temperaturas no uniformes a lo largo de la viga, véase el punto (8).

(4) El valor de cálculo del momento resistente frente a pandeo lateral $M_{b,fi,t,Rd}$ en el instante t de un elemento sin coacción frente a los desplazamientos laterales en una sección transversal de clase 1 o de clase 2 debería determinarse mediante:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (4.11)$$

donde:

$\chi_{LT,fi}$ es el coeficiente de reducción para el pandeo lateral para el dimensionamiento en la situación de incendio

$k_{y,\theta,com}$ es el coeficiente de reducción indicado en el apartado 3 para el límite elástico del acero a temperatura máxima en el ala comprimida $\theta_{a,com}$ alcanzada en el instante t.

NOTA: De forma conservadora, $\theta_{a,com}$ puede considerarse equivalente a la temperatura uniforme θ_a.

(5) El valor de $\chi_{LT,fi}$ debería determinarse de acuerdo con las ecuaciones siguientes:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (4.12)$$

con

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2\right] \quad (4.13)$$

y

$$\alpha = 0,65\sqrt{235 / f_y} \quad (4.14)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT}\,[k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}]^{0,5} \quad (4.15)$$

donde:

$k_{E,\theta,com}$ es el coeficiente de reducción, dado en el apartado 3 para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura máxima del acero en el ala comprimida $\theta_{a,com}$ alcanzada en el instante *t*.

(6) El valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo cortante $V_{fi,t,Rd}$ en el instante *t* de una sección transversal de clase 1 o de clase 2 debería determinarse mediante:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web}\, V_{Rd}\, [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \quad (4.16)$$

donde:

V_{Rd} es la resistencia a esfuerzo cortante de la sección transversal bruta para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22

θ_{web} es la temperatura media en el alma de la sección

$k_{y,\theta,web}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_{web}, véase el apartado 3.

(7) El valor del factor de adaptación κ_1 para una distribución no uniforme de la temperatura en la sección transversal debería ser uno de los siguientes:

- para una viga expuesta en sus cuatro caras: $\kappa_1 = 1,0$
- para una viga sin protección expuesta en tres de sus caras, con una losa mixta o de hormigón en su cuarta cara: $\kappa_1 = 0,70$
- para una viga protegida expuesta en tres de sus caras, con una losa mixta o de hormigón en su cuarta cara: $\kappa_1 = 0,85$

(8) Para una distribución no uniforme de la temperatura a lo largo de una viga, el factor de adaptación κ_2 debería adoptar uno de los siguientes valores:

- en los apoyos de una viga hiperestática: $\kappa_2 = 0,85$
- en todos los demás casos: $\kappa_2 = 1,0$.

4.2.3.4 Vigas con secciones transversales de clase 3

(1) El valor de cálculo del momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ en el instante *t* de una sección transversal de clase 3 con una temperatura uniforme debería determinarse mediante:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \quad (4.17)$$

donde:

M_{Rd} es el momento resistente elástico resistido de la sección transversal bruta $M_{el,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22 o el momento resistente reducido, considerando en caso de ser necesario los efectos del esfuerzo cortante, de acuerdo con el Anejo 22

$k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_a, véase el apartado 3.

(2) El valor de cálculo del momento resistente $M_{fi,t,Rd}$ en el instante *t* de una sección transversal de clase 3 con una distribución no uniforme de la temperatura puede determinarse mediante:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,máx.} M_{Rd} [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}]/(k_1 k_2) \quad (4.18)$$

con la condición $M_{fi,\theta,Rd} \leq M_{Rd}$

donde:

M_{Rd} es el momento resistente elástico de la sección transversal bruta $M_{el,Rd}$ para el dimensionamiento a temperatura ambiente o el momento resistente reducido, considerando en caso de ser necesario los efectos del esfuerzo cortante, de acuerdo con el Anejo 22

$k_{y,\theta,máx.}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura máxima del acero $\theta_{a,máx.}$ alcanzada en el instante *t*

k_1 es un factor de adaptación para distribuciones de temperatura no uniformes en una sección transversal, véase el punto (7) del apartado 4.2.3.3

k_2 es un factor de adaptación para distribuciones de temperatura no uniformes a lo largo de la viga, véase el punto (8) del apartado 4.2.3.3.

(3) El valor de cálculo del momento resistente frente a pandeo lateral $M_{b,fi,t,Rd}$ en el instante *t* de una viga sin restricción lateral al desplazamiento con una sección transversal de clase 3 debería determinarse mediante:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{y,\theta,com} f_y/\gamma_{M,fi} \quad (4.19)$$

donde:

$\chi_{LT,fi}$ se indica en el punto (5) del apartado 4.2.3.3.

NOTA: De manera conservadora, $\theta_{a,com}$ se puede considerar equivalente a la temperatura máxima $\theta_{a,máx.}$.

(4) El valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo cortante $V_{fi,t,Rd}$ en el instante *t* de una sección transversal de clase 3 debería determinarse mediante:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web}\, V_{Rd}\, [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \quad (4.20)$$

donde:

V_{Rd} es la resistencia a esfuerzo cortante de la sección transversal bruta para el dimensionamiento a temperatura ambiente, de acuerdo con el Anejo 22.

4.2.3.5 Elementos con secciones transversales de clase 1, 2 o 3, sometidos a flexocompresión

(1) El valor de cálculo de la resistencia a pandeo $R_{fi,t,d}$ en el instante t de un elemento sometido a flexocompresión debería verificarse con el cumplimiento de las expresiones (4.21a) y (4.21b) para un elemento con sección transversal de clase 1 o de clase 2, o las expresiones (4.21c) y (4.21d) para un elemento con sección transversal de clase 3.

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{mín.,fi}\, A\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y\, M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z\, M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \le 1 \quad (4.21a)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi}\, A\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT}\, M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_{pl,y}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z\, M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \le 1 \quad (4.21b)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{mín.,fi}\, A\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y\, M_{y,fi,Ed}}{W_{el,y}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z\, M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \le 1 \quad (4.21c)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi}\, A\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT}\, M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi}\, W_{el,y}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z\, M_{z,fi,Ed}}{W_{el,z}\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \le 1 \quad (4.21d)$$

donde:

$\chi_{min,fi}$ se define en el apartado 4.2.3.2

$\chi_{z,fi}$ se define en el apartado 4.2.3.2

$\chi_{LT,fi}$ se define en el punto (5) del apartado 4.2.3.3

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT}\, N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi}\, A\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \le 1$$

con: $\mu_{LT} = 0{,}15\, \bar{\lambda}_{z,\theta}\, \beta_{M,LT} - 0{,}15 \le 0{,}9$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y\, N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi}\, A\, k_{y,\theta}\, \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \le 3$$

Para el eje fuerte: $\mu_y = \left(2\beta_{M,y} - 5\right)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0{,}44\beta_{M,y} + 0{,}29 \le 0{,}8$ con $\bar{\lambda}_{y,20\,^{o}C} \le 1{,}1$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \, N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \, A \, k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

Para el eje débil: $\mu_z = (1,2\beta_{M,z} - 3)\bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71\beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8$

NOTA: Para los coeficientes del momento uniforme equivalente β_M, véase la figura A23.4.2.

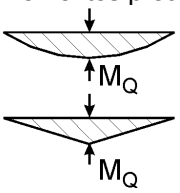
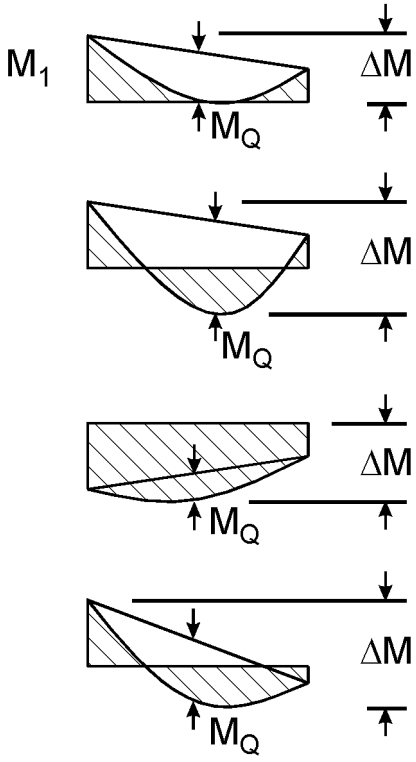
Diagrama de momentos	Coeficiente del momento uniforme equivalente β_M
Momentos en los extremos $-1 \leq \psi \leq 1$	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\,\psi$
Momentos producidos por las cargas laterales en el plano  	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
Momentos producidos por la suma de cargas laterales en el plano y momentos en los extremos  	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M}(\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ M_Q = | máx. M | producido solo por la carga lateral ΔM { $\|\text{máx. M}\|$ para un diagrama de momentos sin cambio de signo; $\|\text{máx. M}\| + \|\text{mín. M}\|$ para un diagrama de momentos con cambio de signo

Figura A23.4.2 Coeficientes del momento uniforme equivalente

4.2.3.6 Elementos con secciones transversales de clase 4

(1) Para elementos con secciones transversales de clase 4 que no sean elementos sometidos a tracción, puede considerarse que el punto (1) del apartado 4.2.1 se cumple si, en el instante *t*, la temperatura del acero θ_a en todas las secciones transversales no supera la temperatura θ_{crit} de 350°C.

NOTA 1: Para más información, véase el Apéndice E.

4.2.4 Temperatura crítica

(1) Como alternativa al apartado 4.2.3, la verificación puede realizarse en el dominio de la temperatura.

(2) Excepto cuando se tienen en cuenta los criterios de deformación o cuando deben tenerse en cuenta los fenómenos de inestabilidad, la temperatura crítica $\theta_{a,cr}$ del acero al carbono, de acuerdo con el punto (6) del apartado 1.1.2, en el instante *t* para una distribución uniforme de la temperatura en un elemento puede determinarse para cualquier grado de utilización μ_0 en el instante $t = 0$ utilizando:

$$\theta_{a,cr} = 39{,}19 \ln\left[\frac{1}{0{,}9674\,\mu_0^{3{,}833}} - 1\right] + 482 \qquad (4.22)$$

donde μ_0 no debe ser menor de 0,013.

NOTA: En la tabla A23.4.1 se incluyen ejemplos de valores de $\theta_{a,cr}$ para valores de μ_0 entre 0,22 y 0,80.

(3) Para elementos con secciones transversales de clase 1, de clase 2 o de clase 3 y para todos los elementos sometidos a tracción, el grado de utilización μ_0 en el instante $t = 0$ puede obtenerse con:

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0} \qquad (4.23)$$

donde:

$R_{fi,d,0}$ es el valor de $R_{fi,d,t}$ para el instante $t = 0$ del apartado 4.2.3

$E_{fi,d}$ y $R_{fi,d,t}$ se definen en el punto (1) del apartado 4.2.1.

(4) Como alternativa del lado de la seguridad, μ_0 puede obtenerse para elementos sometidos a tracción y para vigas en las que el pandeo lateral no es un modo de fallo potencial, mediante:

$$\mu_0 = \eta_{fi}\,[\gamma_{M,fi}/\gamma_{M0}] \qquad (4.24)$$

donde:

η_{fi} es el coeficiente de reducción definido en el punto (3) del apartado 2.4.2.

Tabla A23.4.1 Temperatura crítica $\theta_{a,cr}$ para diversos valores del grado de utilización μ_0

μ_0	$\theta_{a\ a,cr}$	μ_0	$\theta_{a\ a,cr}$	μ_0	$\theta_{a\ a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526

0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

NOTA: No se proporcionan valores por defecto para las temperaturas críticas.

4.2.5 Evolución de la temperatura del acero

4.2.5.1 Estructuras interiores de acero sin protección

(1) Para una distribución uniforme equivalente de la temperatura en la sección transversal, el aumento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ en un elemento de acero sin protección durante un intervalo de tiempo Δt debería determinarse mediante:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh}\frac{A_m/V}{c_a\rho_a}\dot{h}_{net,d}\,\Delta\theta_t \qquad (4.25)$$

donde:

k_{sh} es el coeficiente de corrección del efecto sombra, véase el punto (2)

A_m/V es el factor de sección para elementos de acero sin protección [1/m]

A_m es la superficie del elemento por unidad de longitud [m²/m]

V es el volumen del elemento por unidad de longitud [m³/m]

c_a es el calor específico del acero, dado en el apartado 3 [J/kgK]

$\dot{h}_{net,d}$ es el valor de cálculo del flujo neto de calor por unidad de superficie [W/m^2]

Δt es el intervalo de tiempo [segundos]

ρ_a es la densidad del acero, dada en el apartado 3 [kg/m^3].

(2) Para perfiles de secciones abiertas sometidas a las acciones de un fuego nominal, el coeficiente de corrección del efecto sombra puede determinarse como:

$$k_{sh} = 0{,}9\,[A_m/V]_b/[A_m/V] \qquad (4.26a)$$

donde:

$[A_m/V]_b$ es el factor de sección de un cajón envolvente.

En todos los demás casos, el valor de k_{sh} debería tomarse como:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V] \qquad (4.26b)$$

NOTA 1: Para secciones transversales con forma convexa (por ejemplo, secciones huecas rectangulares o circulares) completamente envueltas por el fuego, el efecto sombra no interviene y, en consecuencia, el coeficiente de corrección k_{sh} equivale a la unidad.

NOTA 2: Al ignorar el efecto sombra (es decir: $k_{sh} = 1$), se obtienen soluciones conservadoras.

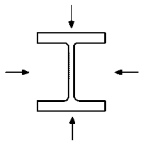
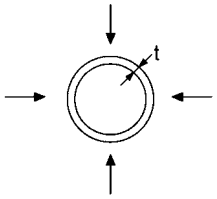
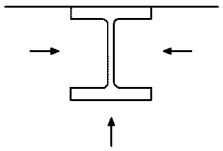
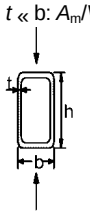
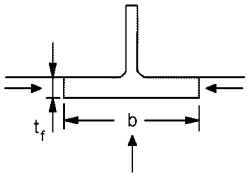
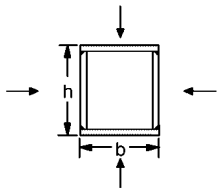
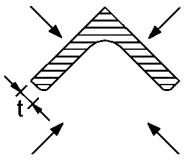
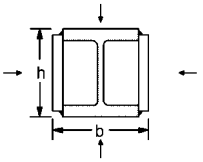
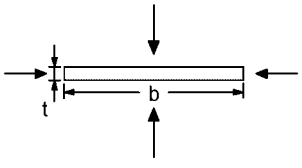
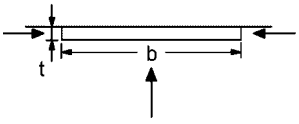
(3) El valor de $\dot{h}_{net,d}$ debería tomarse de la reglamentación específica vigente.

(4) El valor de Δt no debería superar los 5 segundos.

(5) En la expresión (4.26), el valor del factor de sección A_m/V no debería ser menor de $10\ m^{-1}$.

NOTA: En la tabla A23.4.2 se incluyen algunas expresiones para obtener los valores de cálculo del factor de sección A_m/V para elementos de acero sin protección.

Tabla A23.4.2 Factor de sección A_m/V para elementos de acero sin protección

Sección abierta expuesta al fuego en todas sus caras: $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{superficie de la sección transversal}}$ 	Tubo expuesto al fuego en todas sus caras: $A_m/V = 1/t$ 
Sección abierta expuesta al fuego en tres de sus caras: $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superficie expuesta al fuego}}{\text{superficie de la sección transversal}}$ 	Sección hueca (o sección en cajón soldada con espesor uniforme) expuesta al fuego en todas sus caras: Si $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$ 
Sección abierta en T expuesta al fuego en tres de sus caras: $A_m/V = (b + 2t_f)/(bt_f)$ Si $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$ 	Sección en cajón soldada expuesta al fuego en todas sus caras: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{superficie de la sección transversal}}$ Si $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$ 
Perfil angular expuesto al fuego en todas sus caras: $A_m/V = 2/t$ 	Sección en doble T reforzada en cajón, expuesta al fuego en todas sus caras: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área de la sección transversal}}$ 
Chapa expuesta al fuego en todas sus caras: $A_m/V = 2(b + t)/(bt)$ Si $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$ 	Chapa expuesta al fuego en tres de sus caras: $A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ Si $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$ 

4.2.5.2 Estructuras interiores de acero aisladas mediante material de protección frente al fuego

(1) Para una distribución uniforme de la temperatura en una sección transversal, el incremento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ de un elemento protegido de acero durante un intervalo de tiempo Δt debería obtenerse de:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1+\phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1)\Delta\theta_{g,t} \text{ (pero } \Delta\theta_{a,t} \geq \text{si } \Delta\theta_{g,t} > 0) \quad (4.27)$$

con:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

donde:

A_p/V es el factor de sección para elementos de acero protegidos mediante un material de protección frente al fuego

A_p es la superficie pertinente del material de protección frente al fuego por unidad de longitud del elemento [m²/m]

V es el volumen del elemento por unidad de longitud [m³/m]

c_a es el calor específico del acero, dependiente de la temperatura, dado en el apartado 3 [J/kgK]

c_p es el calor específico del material de protección frente al fuego, independiente de la temperatura [J/kgK]

d_p es el espesor del material de protección frente al fuego [m]

Δt es el intervalo de tiempo [segundos]

$\theta_{a,t}$ es la temperatura del acero en el instante t [°C]

$\theta_{g,t}$ es la temperatura del gas ambiental en el instante t [°C]

$\Delta\theta_{g,t}$ es el incremento de la temperatura del gas ambiental durante el intervalo de tiempo Δt [K]

λ_p es la conductividad térmica del sistema de protección frente al fuego [W/mK]

ρ_a es la densidad del acero, dada en el apartado 3 [kg/m³]

ρ_p es la densidad del material de protección frente al fuego [kg/m³].

(2) Los valores de c_p, λ_p y ρ_p deberían determinarse según se especifica en el apartado 3.

(3) El valor de Δt no debería ser mayor de 30 s.

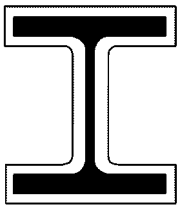
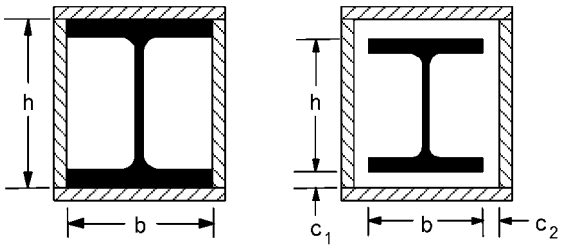
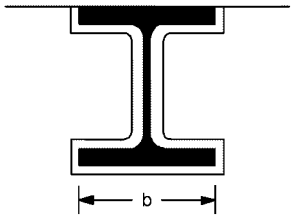
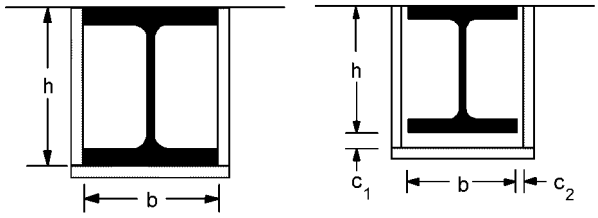
(4) La superficie A_p del material de protección frente al fuego debería tomarse, en general, como el área de su superficie interna, pero para revestimientos huecos con holgura alrededor del elemento de acero, puede tomarse el mismo valor que se usa para revestimientos huecos sin holgura.

NOTA: En la tabla A23.4.3 se incluyen algunos valores de cálculo del factor de sección A_p/V para elementos de acero protegidos.

(5) Para los materiales húmedos de protección frente al fuego, el cálculo del incremento de temperatura del acero $\Delta\theta_a$ puede modificarse para tener en cuenta un retraso en el aumento de la temperatura del acero cuando ésta alcanza 100 ºC. Este tiempo de retardo debería determinarse mediante un método de acuerdo con la norma UNE-EN 13381-4.

(6) Como alternativa a lo expuesto en el punto (1) del apartado 4.2.5.2, la temperatura uniforme de un elemento de acero protegido después de una duración determinada de su exposición al fuego normalizado puede obtenerse utilizando diagramas de flujo de cálculo obtenidos de acuerdo con la norma UNE-EN 13381-4.

Tabla A23.4.3 Factor de sección A_p/V para elementos de acero aislados mediante material de protección frente al fuego

Diseño	**Descripción**	**Factor de sección (A_p/V)**
	Revestimiento de contorno con espesor uniforme	perímetro de acero / superficie de la sección transversal de acero
	Revestimiento hueco con espesor uniforme [1)]	$2\,(b + h)$ / superficie de la sección transversal de acero
	Revestimiento de contorno con espesor uniforme, expuesto al fuego en tres de sus caras	perímetro de acero - b / superficie de la sección transversal de acero
	Revestimiento con espesor uniforme, expuesto al fuego en tres de sus caras)[1)]	$2h + b$ / superficie de la sección transversal de acero

1) Las dimensiones de la holgura c_1 y c_2 no deberían, por lo general, ser superiores a $h/4$.

4.2.5.3 Estructuras interiores de acero en un volumen protegido mediante pantallas térmicas

(1) Las disposiciones incluidas a continuación son aplicables a los dos casos siguientes:

- elementos de acero situados en un volumen delimitado en la parte superior por un forjado y en la parte inferior por una pantalla térmica horizontal; y

- elementos de acero situados en un volumen delimitado por pantallas térmicas horizontales en ambas caras;

en ambos casos, siempre y cuando exista una separación entre la pantalla térmica y el elemento. No son aplicables si la pantalla térmica se encuentra en contacto directo con el elemento.

(2) En el caso de estructuras interiores de acero protegidos mediante pantallas térmicas, el cálculo del incremento de temperatura del acero $\Delta\theta_a$ debería basarse en los métodos dados en los apartados 4.2.5.1 o 4.2.5.2, según proceda, tomando la temperatura del gas ambiental $\theta_{g,t}$ como equivalente a la temperatura del gas en el volumen.

(3) Las propiedades y prestaciones de las pantallas térmicas utilizadas en el cálculo deberían determinarse utilizando un procedimiento de ensayo de acuerdo con las normas UNE- EN 13381-1 o UNE-EN 13381-2, según proceda.

(4) La evolución de la temperatura en el volumen en que están situados los elementos de acero debería determinarse a partir de mediciones, de acuerdo con las normas UNE-EN 13381-1 o UNE-EN 13381-2, según proceda.

4.2.5.4 Estructuras exteriores de acero

(1) La temperatura de las estructuras exteriores de acero debería determinarse teniendo en cuenta:

- el flujo de calor por radiación desde el sector de incendio;
- el flujo de calor por radiación y el flujo del calor por convección de las llamas procedentes de las aberturas;
- la pérdida de calor por radiación y por convección de los elementos de acero hacia la atmósfera;
- las dimensiones y la localización de los elementos estructurales.

(2) Las pantallas térmicas pueden aplicarse a una, dos o tres de las caras de un elemento externo de acero con el fin de proteger al mismo de la transferencia de calor por radiación.

(3) Las pantallas térmicas deberían:

- aplicarse directamente a la cara del elemento que se pretende proteger, o bien
- ser lo suficientemente grandes como para proteger completamente dicha cara del flujo de calor de radiación esperado.

(4) Las pantallas térmicas a las que se hace referencia en el Apéndice B deberían ser incombustibles y poseer una resistencia al fuego mínima de EI 30 de acuerdo con la norma UNE-EN 13501-2.

(5) La temperatura en los elementos de acero protegidos mediante pantallas térmicas debería determinarse como se requiere en el punto (1) del apartado 4.2.5.4, suponiendo que no existe transferencia de calor por radiación hacia aquellas caras que se encuentran protegidas mediante pantallas térmicas.

(6) Los cálculos pueden basarse en las condiciones de estado estacionario resultantes de un equilibrio de calor estacionario, utilizando los métodos incluidos en el Apéndice B.

(7) El cálculo utilizando en el Apéndice B de este anejo debería basarse en el modelo dado en el Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, que describe las condiciones compartimentación frente de incendios y las llamas que se proyectan desde las aberturas, en las cuales debería basarse el cálculo de los flujos de calor por radiación y de convección.

4.3 Modelos de fuego avanzados

4.3.1 Generalidades

(1) Los métodos de cálculo avanzados deberían proporcionar un análisis realista de las estructuras expuestas al fuego. Dichos métodos deberían basarse en el comportamiento físico fundamental, de forma que conduzcan a una aproximación fiable del comportamiento esperado del elemento estructural relevante en la situación de incendio.

(2) Cualquier modo de fallo potencial no cubierto por el método de cálculo avanzado (incluyendo el pandeo local y el fallo por cortante) debería evitarse utilizando los medios apropiados.

(3) Los métodos de cálculo avanzados deberían incluir modelos de cálculo diferenciados para determinar:

- la evolución y distribución de la temperatura en el interior de los elementos estructurales (modelo de respuesta térmica);
- el comportamiento mecánico de la estructura o de cualquiera de sus partes (modelo de respuesta mecánica).

(4) Los métodos de cálculo avanzados pueden utilizarse asociados a cualquier curva de calentamiento, siempre que se conozcan las propiedades de los materiales en la región térmica relevante.

(5) Los métodos de cálculo avanzados pueden utilizarse con cualquier tipo de sección transversal.

4.3.2 Respuesta térmica

(1) Los métodos de cálculo avanzados de respuesta térmica deberían basarse en los principios e hipótesis reconocidos de la teoría de la transferencia de calor.

(2) El modelo de respuesta térmica debería considerar:

- las acciones térmicas pertinentes especificadas en la reglamentación específica vigente;
- la variación de las propiedades térmicas del material con la temperatura, véase el apartado 3.

(3) Los efectos de la exposición térmica no uniforme y de la transferencia de calor a los elementos de construcción adyacentes pueden incluirse si se considera apropiado.

(4) Se puede despreciar de forma conservadora la influencia de cualquier contenido de humedad y de cualquier migración de la misma en el interior del material de protección frente al fuego.

4.3.3 Respuesta mecánica

(1) Los métodos de cálculo avanzados de respuesta mecánica deberían basarse en principios e hipótesis reconocidos de la teoría de la mecánica estructural, teniendo en cuenta los cambios de las propiedades mecánicas con la temperatura.

(2) Los efectos de las tensiones y deformaciones inducidos por la temperatura, producidos tanto por el aumento de temperatura como por los gradientes de temperatura, se deberían tener en cuenta.

(3) El modelo de respuesta mecánica debería también tener en cuenta:

- los efectos combinados de las acciones mecánicas, las imperfecciones geométricas y las acciones térmicas;
- las propiedades mecánicas del material dependientes de la temperatura, véase el apartado 3;
- los efectos geométricos no lineales;
- los efectos de las propiedades materiales no lineales, incluyendo los efectos desfavorables sobre la rigidez estructural de los procesos de carga y descarga.

(4) No es necesario, siempre que se utilicen las relaciones tensión-deformación indicadas en el apartado 3, considerar explícitamente los efectos de la fluencia térmica transitoria.

(5) Las deformaciones en el estado límite último que implica el método de cálculo deberían limitarse para asegurar que se mantiene la compatibilidad entre todas las partes de la estructura.

(6) El cálculo debería tener en cuenta el estado límite último más allá del cual las deformaciones calculadas de la estructura causarían el fallo debido a la pérdida de apoyo adecuado de uno de los elementos.

(7) Para el cálculo del elemento estructural vertical protegido debería emplearse una imperfección inicial sinusoidal con un valor máximo de h/1000 a media altura, cuando no existan especificaciones en las normas de producto pertinentes.

4.3.4 Validación de los modelos de fuego avanzados

(1) Debería realizarse una verificación de la precisión de los modelos de cálculo en base a los resultados de los ensayos pertinentes.

(2) Los resultados de los cálculos de validación pueden referirse a las temperaturas, las deformaciones y los tiempos de resistencia al fuego.

(3) Los parámetros críticos deberían comprobarse, mediante un análisis de sensibilidad, para asegurar que el modelo cumple principios de ingeniería reconocidos.

(4) Los parámetros críticos pueden referirse, por ejemplo, a la longitud de pandeo, las dimensiones de los elementos o el nivel de carga.

Apéndice A. Endurecimiento por deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas

(1) Para temperaturas menores de 400 ºC, puede utilizarse la opción alternativa al endurecimiento por deformación mencionada en el apartado 3.2 de la siguiente forma:

- para $0,02 < \varepsilon < 0,04$:

$$\sigma_a = 50\,(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})\,\varepsilon + 2\,f_{y,\theta} - f_{u,\theta} \qquad \text{(A.1a)}$$

- para $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,15$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta} \qquad \text{(A.1b)}$$

- para $0,15 < \varepsilon < 0,20$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta}\,[\,1 - 20\,(\varepsilon - 0,15)] \qquad \text{(A.1c)}$$

- para $\varepsilon \geq 0,20$:

$$\sigma_a = 0,00 \qquad \text{(A.1d)}$$

donde:

$f_{u,\theta}$ es la resistencia última a temperaturas elevadas, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación.

NOTA: Los distintos diagramas tensión-deformación para el acero, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación, se representan en la figura A23.A.1.

(2) La tensión de rotura a temperaturas elevadas, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación, debería determinarse de la siguiente forma:

- para $\theta_a < 300$ ºC:

$$f_{u,\theta} = 1,25\,f_{y,\theta} \qquad \text{(A.2a)}$$

- para 300 ºC $\leq \theta_a < 400$ ºC:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}\,(2 - 0,0025\,\theta_a) \qquad \text{(A.2b)}$$

- para $\theta_a \geq 400$ ºC:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} \qquad \text{(A.2c)}$$

NOTA: Los distintos diagramas tensión-deformación con la temperatura se representan en la figura A23.A.2.

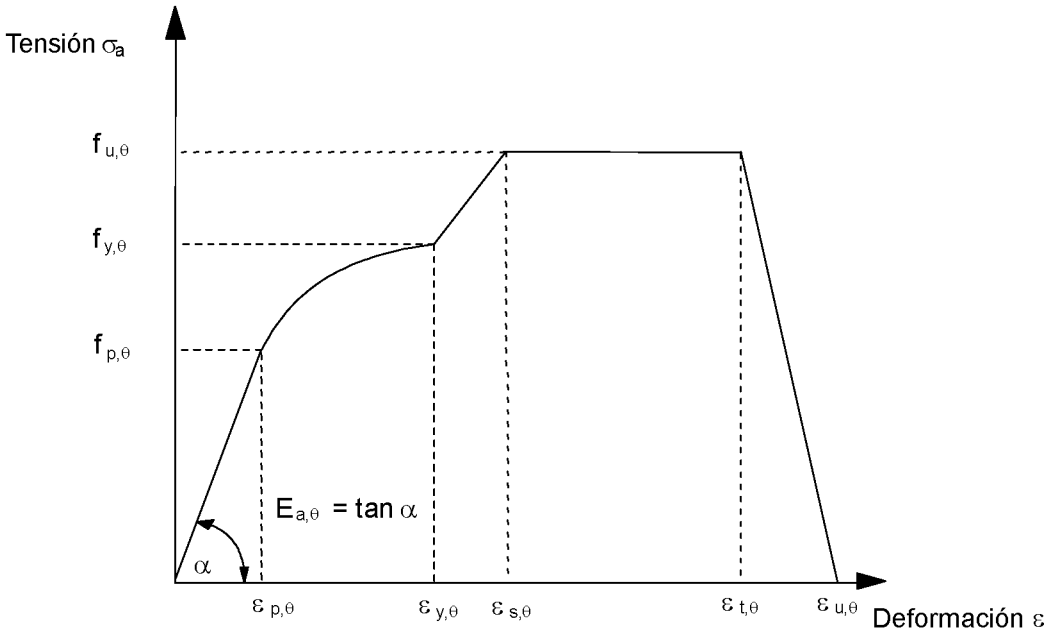


Figura A23.A.1 Diagrama tensión-deformación para el acero, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación

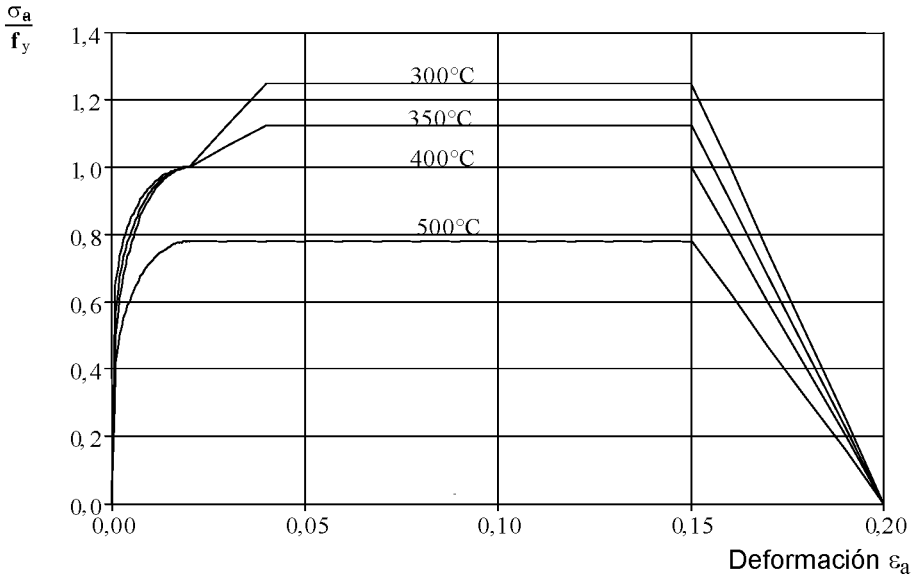


Figura A23.A.2 Diagramas tensión-deformación para el acero a temperaturas elevadas, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación

Apéndice B. Transferencia de calor a estructuras de acero externas

B.1 Generalidades

B.1.1 Fundamentos

(1) En este Apéndice B, el sector de incendio se considera limitado a una única planta. Se supone que todas las ventanas u otras aberturas similares (huecos en fachada) en el sector de incendio son rectangulares.

(2) La determinación de la temperatura del fuego en el sector, de las dimensiones y temperaturas de las llamas que escapan por las aberturas, así como de los parámetros de radiación y convección, deberían realizarse de acuerdo con el Apéndice B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(3) Debería distinguirse entre los elementos no envueltos en llamas y los elementos envueltos en llamas, dependiendo de sus posiciones relativas a las aberturas del sector de incendio.

(4) Debería suponerse que un elemento que no esté envuelto en llamas recibe una transferencia de calor por radiación desde todas las aberturas en esa cara del sector de incendio y desde las llamas que salen desde dichas aberturas.

(5) Debería suponerse que un elemento envuelto en llamas recibe una transferencia de calor por convección de la llama y por radiación de dichas llamas y de las aberturas en el sector de incendio de las cuales salen las llamas. Puede despreciarse la transferencia de calor por radiación desde otras llamas y desde otras aberturas.

B.1.2 Convenciones para las dimensiones

(1) La convención para los datos geométricos puede tomarse de la figura A23.B.1.

B.1.3 Equilibrio de calor

(1) Para un elemento que no esté envuelto en llamas, la temperatura media del elemento de acero T_m [K] debería determinarse a partir de la solución de la siguiente ecuación de equilibrio de calor (balance térmico):

$$\sigma T_m^4 + \alpha T_m = \Sigma I_z + \Sigma I_f + 293\,\alpha \qquad \text{(B.1)}$$

donde:

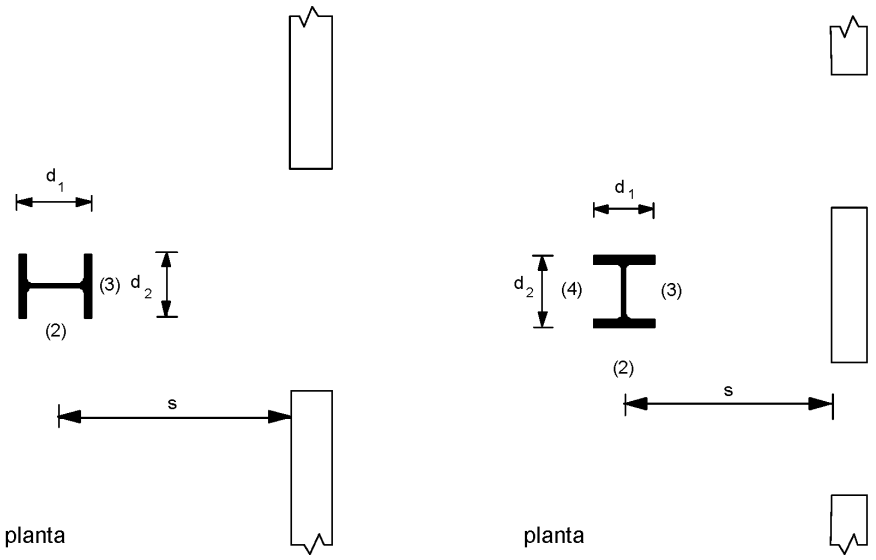
σ es la constante de Stefan Boltzmann [$56{,}7 \times 10^{-12}$ kW/m^{2}K^4]

α es el coeficiente de transferencia de calor por convección [kW/m^{2}K]

I_z es el flujo de calor por radiación desde una llama [kW/m^2]

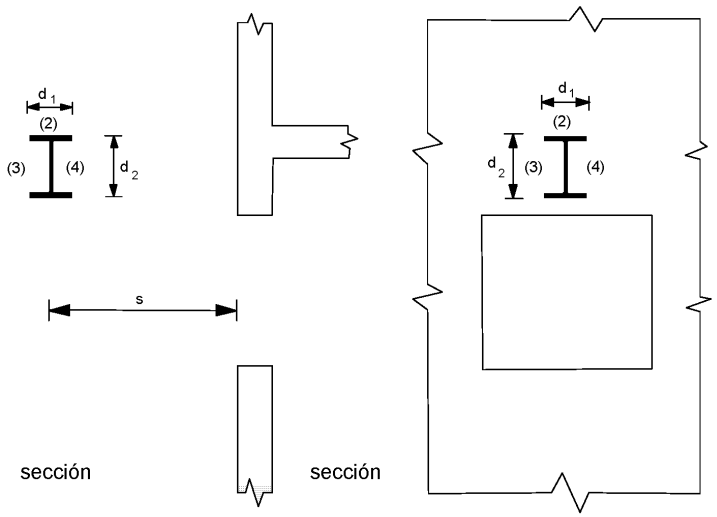
I_f es el flujo de calor por radiación desde una abertura [kW/m^2].

(2) El coeficiente de transferencia de calor por convección α debería tomarse del Apéndice B de la norma UNE-EN 1991-1-2 para la condición de 'ventilación no forzada' o para la condición de 'ventilación forzada', según proceda, utilizando una dimensión eficaz de la sección transversal $d = (d_1 + d_2)/2$.



1) Columna frente a una abertura 2) Columna entre aberturas

a) Columnas



1) Viga paralela a una pared 2) Viga perpendicular a una pared

a) Vigas

Figura A23.B.1 – Dimensiones y situación de los elementos

(3) Para un elemento envuelto en llamas, la temperatura media del elemento de acero T_m [K] debería determinarse a partir de la solución de la siguiente ecuación de equilibrio de calor:

$$\sigma T_m^4 + \alpha T_m = I_z + I_f + \alpha T_z \qquad \text{(B.2)}$$

donde:

T_z es la temperatura de la llama [K]

I_z es el flujo de calor por radiación desde la llama [kW/m^2]

I_f es el flujo de calor por radiación desde la abertura correspondiente [kW/m^2].

(4) El flujo de calor por radiación I_z desde la llama debería determinarse de acuerdo con la situación y el tipo de elemento del modo siguiente:

- columnas no envueltas en llamas: véase el apartado B.2;
- vigas no envueltas en llamas: véase el apartado B.3;
- columnas envueltas en llamas: véase el apartado B.4;
- vigas total o parcialmente envueltas en llamas: véase el apartado B.5.

De forma análoga podrían tratarse otros casos, utilizando adaptaciones apropiadas de los tratamientos incluidos en los apartados B.2 a B.5.

(5) El flujo de calor por radiación I_f desde una abertura debería determinarse mediante:

$$I_f = \phi_f \varepsilon_f (1 - a_z) \sigma T_f^4 \quad \text{(B.3)}$$

donde:

ϕ_f es el coeficiente global de configuración del elemento para la transferencia de calor por radiación desde dicha abertura

ε_f es la emisividad de la abertura

a_z es el coeficiente de absorción de la llama

T_f es la temperatura del fuego [K], del Apéndice B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(6) La emisividad ε_f de una abertura debería tomarse como equivalente a la unidad, véase el Apéndice B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(7) El coeficiente de absorción a_z de la llama debería determinarse con los apartados B.2 a B.5, según proceda.

B.1.4 Coeficientes globales de configuración

(1) El coeficiente global de configuración ϕ_f de un elemento para la transferencia de calor por radiación desde una abertura debería determinarse mediante:

$$\phi_f = \frac{(C_1\varphi_{f,1} + C_2\varphi_{f,2})d_1 + (C_3\varphi_{f,3} + C_4\varphi_{f,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad \text{(B.4)}$$

donde:

$\phi_{f,i}$ es el factor de configuración de la cara *i* del elemento para dicha abertura, véase el Apéndice G de la norma UNE-EN 1991-1-2

d_i es la dimensión de la sección transversal de la cara *i* del elemento

C_i es el coeficiente de protección de la cara *i* del elemento del modo siguiente:
- para una cara con protección: $C_i = 0$
- para una cara sin protección: $C_i = 1$.

(2) El valor del factor de configuración $\phi_{r,i}$ para una cara del elemento desde la cual la abertura no resulta visible debería tomarse como cero.

(3) El coeficiente global de configuración ϕ_z de un elemento para la transferencia de calor por radiación desde una llama debería determinarse mediante:

$$\phi_z = \frac{(C_1\varphi_{z,1} + C_2\varphi_{z,2})d_1 + (C_3\varphi_{z,3} + C_4\varphi_{z,4})d_2}{(C_1 + C_2)d_1 + (C_3 + C_4)d_2} \quad \text{(B.5)}$$

donde:

$\phi_{z,i}$ es el factor de configuración de la cara *i* del elemento para dicha llama, véase el Apéndice G de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(4) Los coeficientes de configuración $\phi_{z,i}$ de las caras individuales del elemento para la transferencia de calor por radiación desde la llama pueden basarse en las dimensiones rectangulares equivalentes de la llama. Las dimensiones y localizaciones de los rectángulos equivalentes, que representan el frontal y los laterales de una llama para tal fin, deberían determinarse como se indica en B.2 para las columnas y como se indica en el apartado B.3 para las vigas. Para otros fines, deberían utilizarse las dimensiones de la llama incluidas en el Apéndice B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(5) El valor del factor de configuración $\phi_{z,i}$ para una cara del elemento desde la cual la llama no resulta visible debería tomarse como cero.

(6) Una cara de un elemento puede encontrarse protegida mediante una pantalla térmica, véase el apartado 4.2.5.4. Una cara de un elemento que se encuentre inmediatamente adyacente a la pared del sector de incendio puede también tratarse como si estuviese protegida, siempre que no existan aberturas en esa parte de la pared. El resto de las caras del elemento deberían tratarse como si no tuviesen protección.

B.2 Columna no envuelta en llamas

B.2.1 Transferencia de calor por radiación

(1) Debería distinguirse entre una columna situada frente a una abertura y una columna situada entre aberturas.

NOTA: Se incluyen ilustraciones en la figura A23.B.2.

(2) Si la columna se encuentra frente a una abertura, el flujo de calor por radiación I_z desde la llama debería determinarse mediante:

$$I_z = \phi_z \, \varepsilon_z \, \sigma \, T_z^4 \quad \text{(B.6)}$$

donde:

ϕ_z es el coeficiente global de configuración de la columna para la transmisión de calor por radiación desde la llama, véase el apartado B.1.4

ε_z es la emisividad de la llama, véase el apartado B.2.2

T_z es la temperatura de la llama [K], del apartado B.2.3.

NOTA: Se incluyen ilustraciones en la figura A23.B.3.

(3) Si la columna se encuentra entre aberturas, el flujo total de calor por radiación I_z desde la llama en cada una de las caras debería determinarse mediante:

$$I_z = (\phi_{z,m}\,\varepsilon_{z,m} + \phi_{z,n}\,\varepsilon_{z,n})\,\sigma T_z^4 \quad \text{(B.7)}$$

donde:

$\phi_{z,m}$ es el coeficiente global de configuración de la columna para la transmisión de calor por radiación desde la llama en la cara m, véase el apartado B.1.4

$\phi_{z,n}$ es el coeficiente global de configuración de la columna para la transmisión de calor por radiación desde la llama en la cara n, véase el apartado B.1.4

$\varepsilon_{z,m}$ es la emisividad total de la llama en la cara *m*, véase el apartado B.2.2

$\varepsilon_{z,n}$ es la emisividad total de la llama en la cara *n*, véase el apartado B.2.2.

NOTA: Se incluyen ilustraciones en la figura A23.B.4.

B.2.2 Emisividad de la llama

(1) Si la columna está situada frente a una abertura, la emisividad de la llama ε_z debería determinarse a partir de la expresión para ε dada en la Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, utilizando el espesor de llama λ a la altura de la parte superior de las aberturas. Siempre que no existan marquesinas ni balcones por encima de la abertura, λ puede tomarse como sigue:

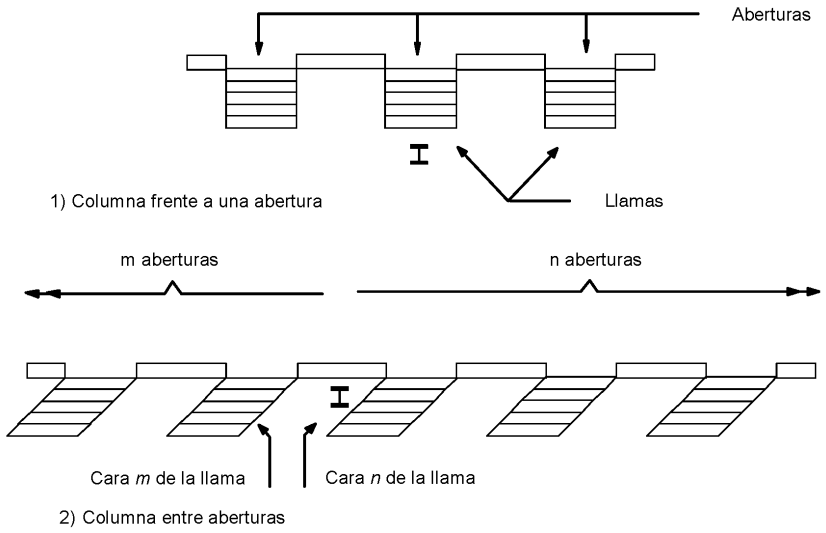
- para la condición de 'ventilación no forzada':

$$\lambda = 2h/3 \quad \text{(B.8a)}$$

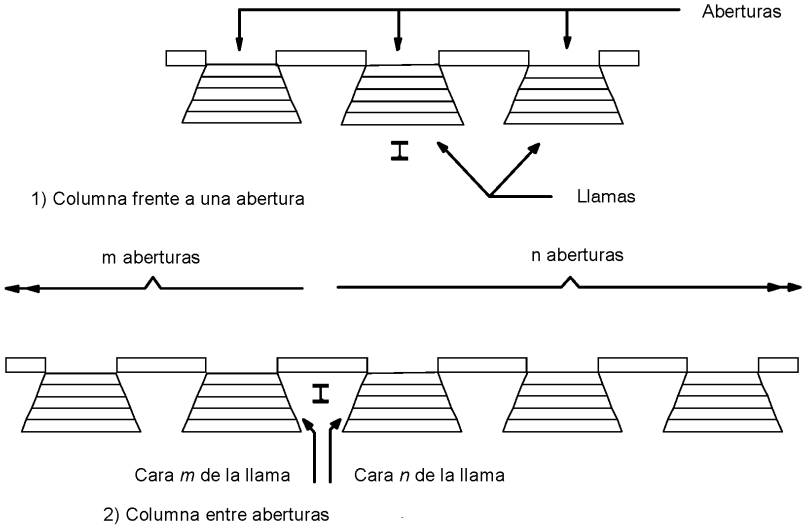
- para la condición de 'ventilación forzada':

$$\lambda = x \text{ pero } \lambda \leq hx/z \quad \text{(B.8b)}$$

donde *h, x* y *z* se toman del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

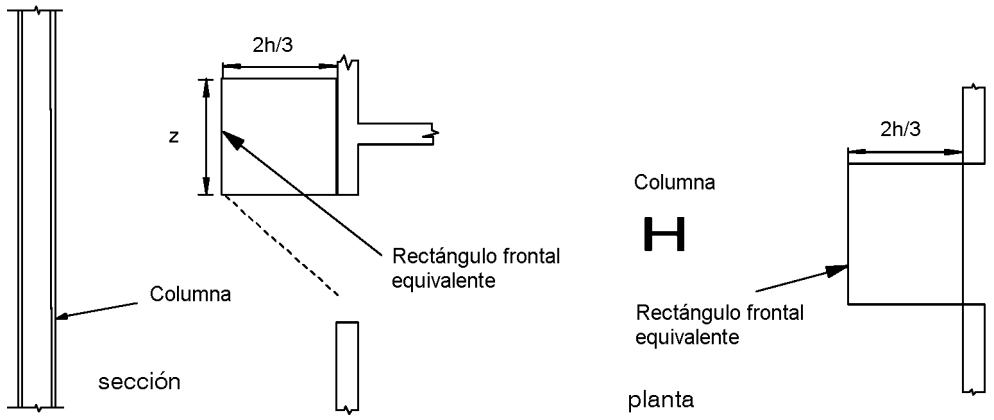


a) Condición de 'ventilación no forzada'

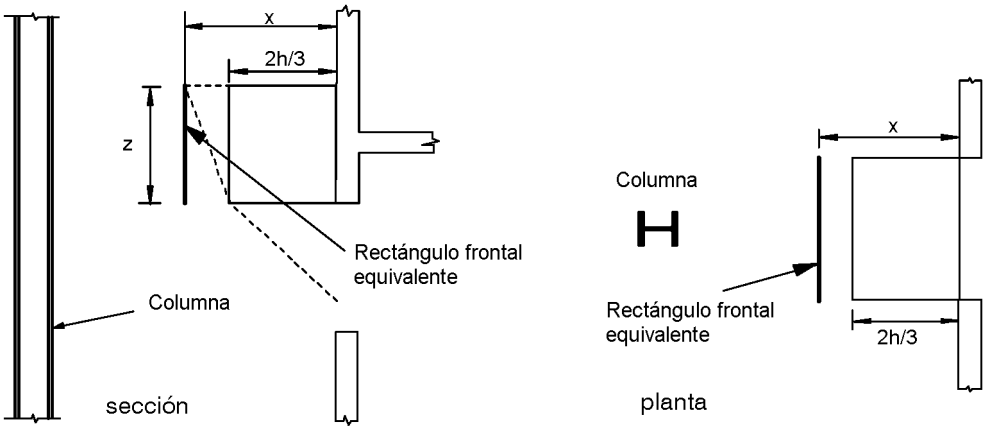


b) Condición de 'ventilación forzada'

Figura A23.B.2 Posiciones de las columnas

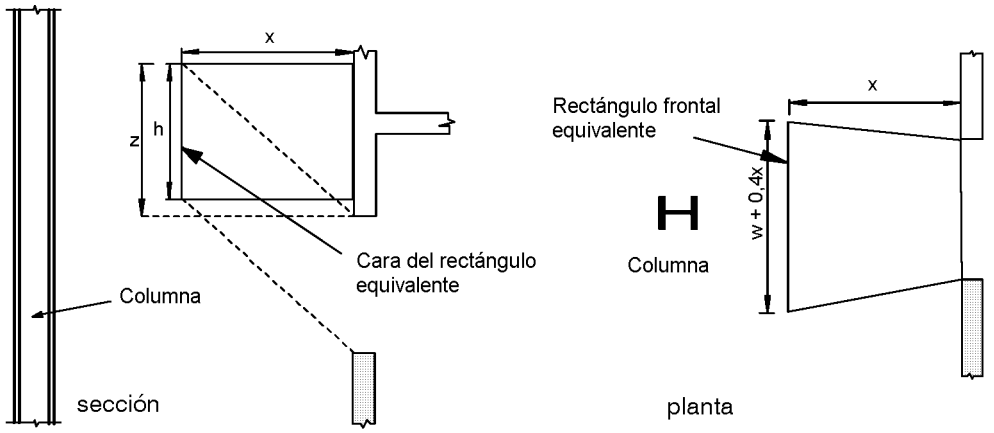


1) con pared por encima y h < 1,25 w



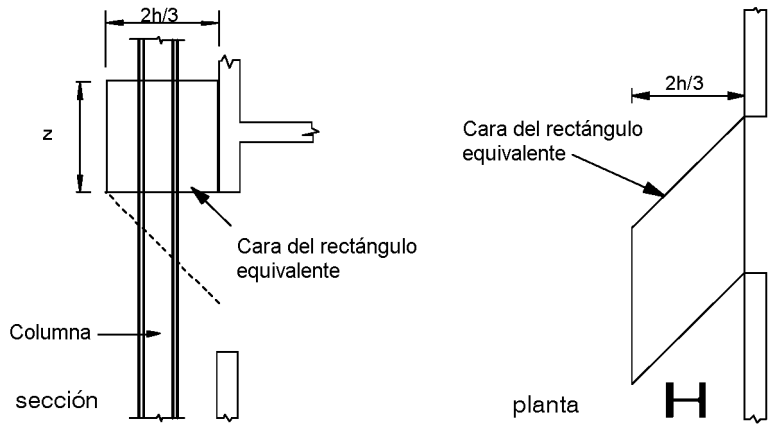
2) con pared por encima y h > 1,25 w o sin pared por encima

a) 'Ventilación no forzada'

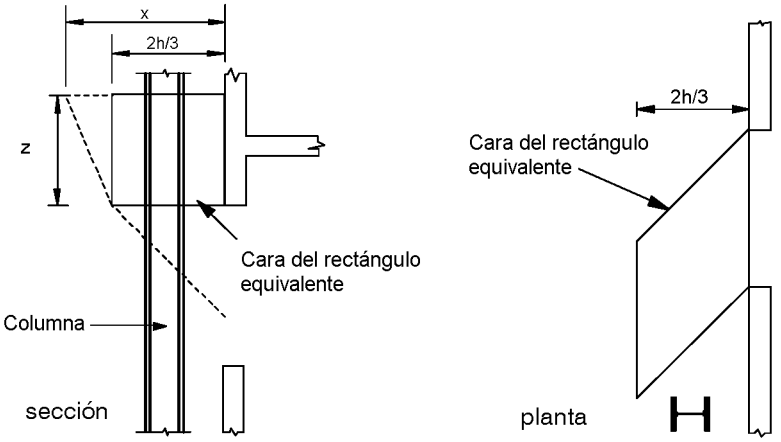


b) 'Ventilación forzada'

Figura A23.B.3 Columna frente a una abertura

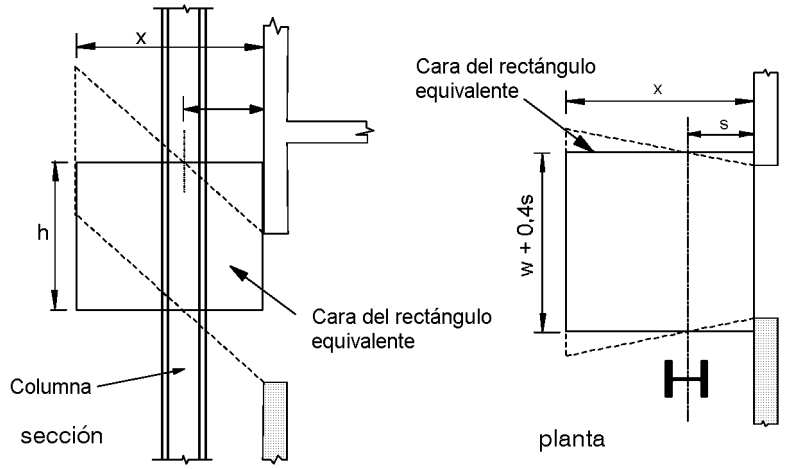


1) con pared por encima y h < 1,25 w



2) con pared por encima y h > 1,25 w o sin pared por encima

a) 'Ventilación no forzada'



b) 'Ventilación forzada'

Figura A23.B.4 Columna entre aberturas

(2) Si la columna se encuentra entre dos aberturas, las emisividades totales $\varepsilon_{z,m}$ y $\varepsilon_{z,n}$ de la llama en las caras *m* y *n* deberían determinarse a partir de la expresión para ε del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, empleando un valor para el espesor total de la llama λ del modo siguiente:

– para la cara *m*:
$$\lambda = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \qquad \text{(B.9a)}$$

– para la cara *n*:
$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \qquad \text{(B.9b)}$$

donde:

m es el número de aberturas en la cara *m*

n es el número de aberturas en la cara *n*

λ_i es el espesor de la llama para la abertura *i*.

(3) El espesor de la llama λ_i debería tomarse como sigue:

– para la condición de 'ventilación no forzada':

$$\lambda_i = w_i \qquad \text{(B.10a)}$$

– para la condición de 'ventilación forzada':

$$\lambda_i = w_i + 0{,}4\,s \qquad \text{(B.10b)}$$

donde:

w_i es la anchura de la abertura

s es la distancia horizontal del eje de la columna a la pared del sector de incendio, véase la figura A23.B.1.

B.2.3 Temperatura de la llama

(1) La temperatura de la llama T_z debería tomarse como la temperatura en el eje de la llama obtenida a partir de la expresión para T_z tomada del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, para la condición de 'ventilación no forzada' o para la condición de 'ventilación forzada', según proceda, a una distancia *l* de la abertura, medida a lo largo del eje de la llama del modo siguiente:

– para la condición de 'ventilación no forzada':

$$l = h/2 \qquad \text{(B.11a)}$$

– para la condición de 'ventilación forzada':

– para una columna situada frente a una abertura:

$$l = 0 \qquad \text{(B.11b)}$$

- para una columna situada entre aberturas, l es la distancia a lo largo del eje de la llama hasta un punto situado a una distancia horizontal s desde la pared del sector de incendio. Siempre que no existan marquesinas ni balcones por encima de la abertura:

$$l = s\,X/x \qquad \text{(B.11c)}$$

donde *X* y *x* se toman del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

B.2.4 Coeficiente de absorción de la llama

(1) Para la condición de 'ventilación no forzada', el coeficiente de absorción de la llama a_z debería tomarse como cero.

(2) Para la condición de 'ventilación forzada', el coeficiente de absorción de la llama a_z debería considerarse equivalente a la emisividad ε_z de la llama pertinente, véase el apartado B.2.2.

B.3 Viga no envuelta en llamas

B.3.1 Transferencia de calor por radiación

(1) En este apartado B.3 se supone que la altura de la parte inferior de la viga no se encuentra por debajo de la altura de la parte superior de las aberturas en el sector de incendio.

(2) Debería distinguirse entre una viga que se encuentra paralela a la pared exterior del sector de incendio y una viga que se encuentra perpendicular a la pared exterior del sector de incendio, véase la figura A23.B.5.

(3) Si la viga se encuentra paralela a la pared exterior del sector de incendio, la temperatura media del elemento de acero T_m debería determinarse en un punto en la longitud de la viga situado directamente por encima del centro de la abertura. En este caso, el flujo de calor por radiación I_z desde la llama debería determinarse mediante:

$$I_z = \phi_z \, \varepsilon_z \, \sigma \, T_z^4 \qquad \text{(B.12)}$$

donde:

ϕ_z es el coeficiente global de configuración de la llama que se encuentra directamente frente a la viga, véase el apartado B.1.4

ε_z es la emisividad de la llama, véase el apartado B.3.2

T_z es la temperatura de la llama del apartado B.3.3 [K].

(4) Si la viga se encuentra perpendicular a la pared exterior del sector de incendio, la temperatura media en la viga debería determinarse para una serie de puntos cada 100 mm a lo largo de la longitud de la viga. Para la temperatura media del elemento de acero T_m debería tomarse, entonces, el máximo de dichos valores. Para este caso, el flujo de calor por radiación I_z desde la llama debería determinarse mediante:

$$I_z = (\phi_{z,m} \, \varepsilon_{z,m} + \phi_{z,n} \, \varepsilon_{z,n}) \, \sigma \, T_z^4 \qquad \text{(B.13)}$$

donde:

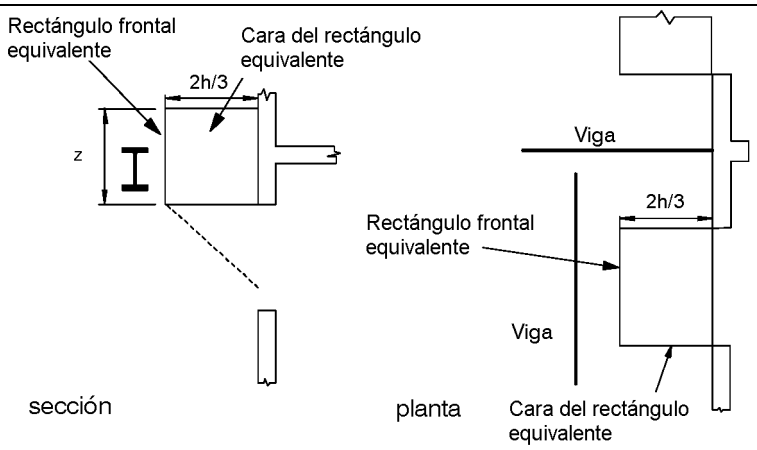
$\phi_{z,m}$ es el coeficiente global de configuración de la viga para la transmisión de calor por radiación desde la llama en la cara *m*, véase el apartado B.3.2

$\phi_{z,n}$ es el coeficiente global de configuración de la viga para la transmisión de calor por radiación desde la llama en la cara *n*, véase el apartado B.3.2

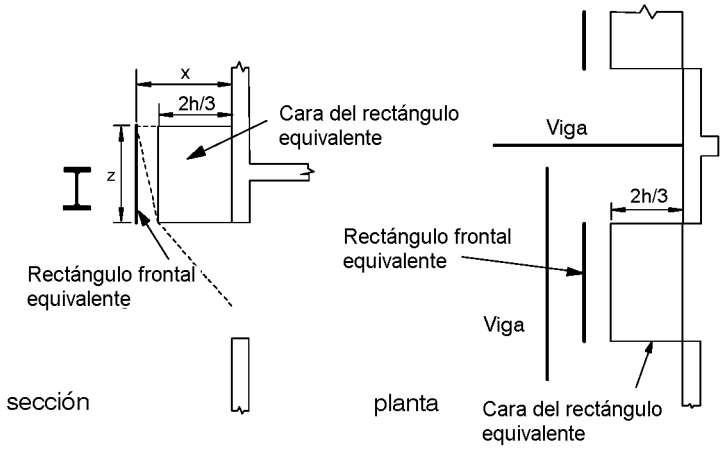
$\varepsilon_{z,m}$ es la emisividad total de la llama en la cara *m*, véase el apartado B.3.3

$\varepsilon_{z,n}$ es la emisividad total de la llama en la cara *n*, véase el apartado B.3.3

T_z es la temperatura de la llama [*k*], véase el apartado B.3.4.

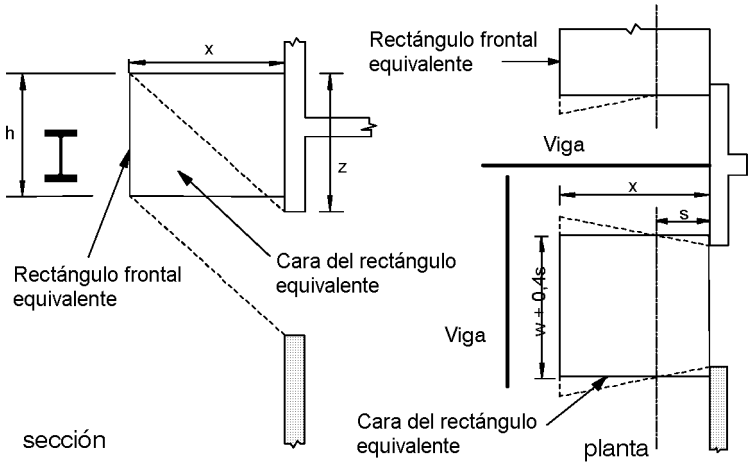


1) con pared por encima y h < 1,25 w



2) con pared por encima y h > 1,25 w o sin pared por encima

a) 'Ventilación no forzada'



b) 'Ventilación forzada'

Figura A23.B.5 Viga no envuelta en llamas

B.3.2 Emisividad de la llama

(1) Si la viga se encuentra paralela a la pared exterior del sector de incendio, encima de una abertura, la emisividad de la llama ε_z debería determinarse a partir de la expresión para ε tomado de la Anexo B de la

norma UNE-EN 1991-1-2, utilizando un valor para el espesor de la llama λ a la altura de la parte superior de las aberturas. Siempre que no existan marquesinas ni balcones por encima de la abertura, el valor de λ puede tomarse como sigue:

– para la condición de 'ventilación no forzada':

$$\lambda = 2h/3 \qquad \text{(B.14a)}$$

– para la condición de 'ventilación forzada':

$$\lambda = x \text{ pero } \lambda \leq hx/z \qquad \text{(B.14b)}$$

donde *h, x* y *z* se indican en el Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(2) Si la viga se encuentra perpendicular a la pared exterior del sector de incendio, entre dos aberturas, las emisividades totales $\varepsilon_{z,m}$ y $\varepsilon_{z,n}$ de la llama en las caras *m* y *n* deberían determinarse a partir de la expresión para ε tomada del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, utilizando un valor para el espesor de la llama λ del modo siguiente:

– para la cara *m*:
$$\lambda = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \qquad \text{(B.15a)}$$

– para la cara *n*:
$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \qquad \text{(B.15b)}$$

donde:

m es el número de aberturas en la cara *m*

n es el número de aberturas en la cara *n*

λ_i es la anchura de la abertura *i*.

(3) El espesor de la llama λ_i debería tomarse como sigue:

– para la condición de 'ventilación no forzada':

$$\lambda_i = w_i \qquad \text{(B.16a)}$$

– para la condición de 'ventilación forzada':

$$\lambda_i = w_i + 0{,}4\, s \qquad \text{(B.16b)}$$

donde:

w_i es la anchura de la abertura

s es la distancia horizontal desde la pared del sector de incendio hasta el punto considerado de la viga, véase la figura A23.B.5.

B.3.3 Temperatura de la llama

(1) La temperatura de la llama T_z debería tomarse como la temperatura en el eje de la llama obtenida de la expresión para T_z dada en el Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, para la condición de 'ventilación no forzada' o de 'ventilación forzada', según proceda, a una distancia *l* de la abertura, medida a lo largo del eje de la llama del modo siguiente:

– para la condición de 'ventilación no forzada':

$$l = h/2 \qquad \text{(B.17a)}$$

– para la condición de 'ventilación forzada':

– para una viga paralela a la pared exterior del sector de incendio, por encima de una abertura:

$$l = 0 \qquad \text{(B.17b)}$$

– para una viga perpendicular a la pared exterior del sector de incendio, entre aberturas, l es la distancia a lo largo del eje de la llama hasta un punto a una distancia horizontal s de la pared del sector de incendio. Siempre que no existan balcones o marquesinas por encima de la abertura:

$$l = s\,X/x \qquad \text{(B.17c)}$$

donde X y x se toman del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

B.3.4 Coeficiente de absorción de la llama

(1) Para la condición de 'ventilación no forzada', el valor del coeficiente de absorción de la llama a_z debería tomarse como cero.

(2) Para la condición de 'ventilación forzada', el valor del coeficiente de absorción de la llama a_z debería tomarse como equivalente a la emisividad ε_z de la llama, véase el apartado B.3.2.

B.4 Columna envuelta en llamas

(1) El flujo de calor por radiación I_z desde la llama debería determinarse mediante:

$$I_z = \frac{\left(I_{z,1} + I_{z,2}\right)\cdot d_1 + \left(I_{z,3} + I_{z,4}\right)\cdot d_2}{\left(C_1 + C_2\right)\cdot d_1 + \left(C_3 + C_4\right)\cdot d_2} \qquad \text{(B.18)}$$

con

$$I_{z,1} = C_1\ \varepsilon_{z,1}\ \sigma\ T_z^4$$
$$I_{z,2} = C_2\ \varepsilon_{z,2}\ \sigma\ T_z^4$$
$$I_{z,3} = C_3\ \varepsilon_{z,3}\ \sigma\ T_o^4$$
$$I_{z,4} = C_4\ \varepsilon_{z,4}\ \sigma\ T_z^4$$

donde:

$I_{z,i}$ es el flujo de calor por radiación desde la llama hacia la cara *i* de la columna

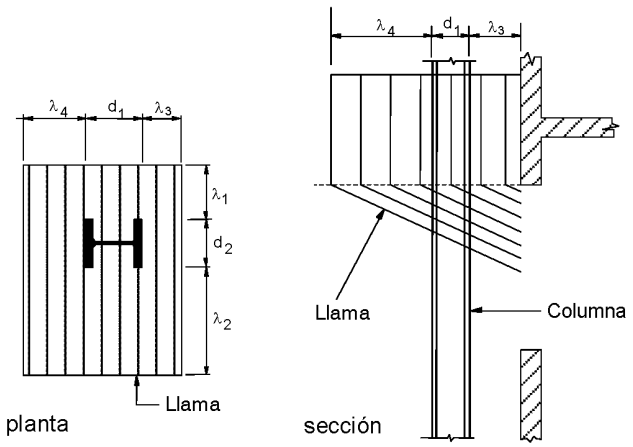
$\varepsilon_{z,i}$ es la emisividad de la llama respecto a la cara *i* de la columna

i es el índice de la cara de la columna (1), (2), (3) o (4)

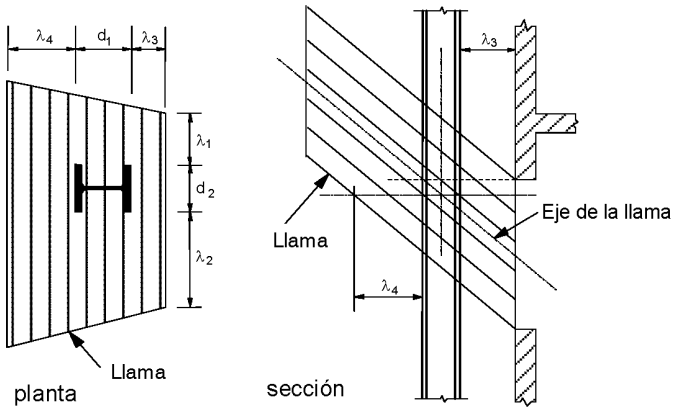
C_i es el coeficiente de protección de la cara *i* del elemento, véase el apartado B.1.4

T_z es la temperatura de la llama [K]

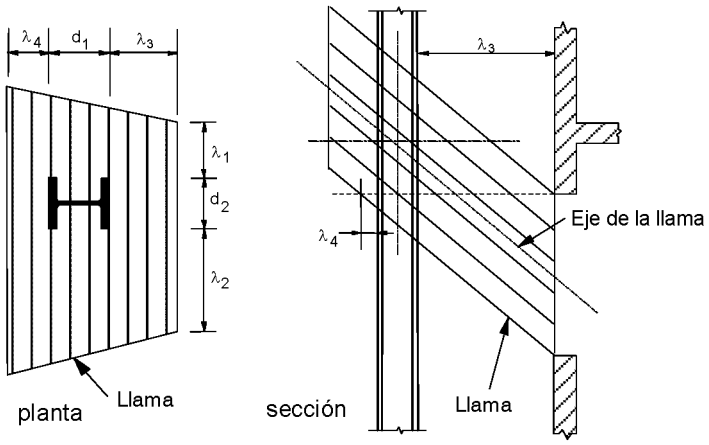
T_o es la temperatura de la llama en la abertura [K] del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2.



a) Condición de 'ventilación no forzada'



1) El eje de la llama corta al eje del pilar por debajo de la parte superior de la abertura



2) El eje de la llama corta al eje de la columna por encima de la parte superior de la abertura

b) Condición de 'ventilación forzada'

Figura A23.B.6 Columna envuelta en llamas

(2) La emisividad de la llama $\varepsilon_{z,i}$ para cada una de las caras 1, 2, 3 y 4 de la columna debería determinarse mediante la expresión para ε dada en el Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, utilizando

un espesor de llama λ equivalente a la dimensión λ_i indicada en la figura A23.B.6 correspondiente a la cara *i* de la columna.

(3) Para la condición de 'ventilación no forzada', deberían utilizarse los valores de λ_i a la altura de la parte superior de la abertura, véase la figura A23.B.6(a).

(4) Para la condición de 'ventilación forzada', si la altura de la intersección del eje de la llama con el eje de la columna se encuentra por debajo de la altura de la parte superior de la abertura, deberían utilizarse los valores de λ_i en el nivel de la intersección, véase la figura A23.B.6(b)(1). En caso contrario, deberían utilizarse los valores de λ_i a la altura de la parte superior de la abertura, véase la figura A23.B.6(b)(2), con la excepción de que si $\lambda_4 < 0$ a esta altura, deberían utilizarse los valores en el nivel en el que $\lambda_4 = 0$.

(5) La temperatura de la llama T_z debería tomarse como la temperatura en el eje de la llama obtenida de la expresión para T_z dada en el Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2 para la condición de `ventilación no forzada' o de `ventilación forzada', según proceda, a una distancia *l* de la abertura, medida a lo largo del eje de la llama del modo siguiente:

- para la condición de 'ventilación no forzada':

  $$l = h/2 \qquad \text{(B.19a)}$$

- para la condición de 'ventilación forzada', *l* es la distancia a lo largo del eje de la llama hasta el nivel donde se realiza la medición de λ_i. Siempre que no existan balcones o marquesinas por encima de la abertura:

  $$l = (\lambda_3 + 0{,}5\, d_1)X/x \text{ pero } l \leq 0{,}5\, hX/z \qquad \text{(B.19b)}$$

donde *h, X, x* y *z* se toman del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2.

(6) El coeficiente de absorción a_z de la llama debería determinarse mediante:

$$a_z = \frac{\varepsilon_{z,1} + \varepsilon_{z,2} + \varepsilon_{z,3}}{3} \qquad \text{(B.20)}$$

donde $\varepsilon_{z,1}$, $\varepsilon_{z,2}$ y $\varepsilon_{z,3}$ son las emisividades de la llama para las caras 1, 2, y 3 de la columna.

B.5 Viga total o parcialmente envuelta en llamas

B.5.1 Transferencia de calor por radiación

B.5.1.1 Generalidades

(1) En este apartado B.5 se supone que la altura de la parte inferior de la viga no se encuentra por debajo de la altura de la parte superior de las aberturas adyacentes del sector de incendio.

(2) Debería distinguirse entre una viga paralela a la pared exterior del sector de incendio y una viga perpendicular a la pared exterior del sector de incendio, véase la figura A23.B.7.

(3) Si la viga se encuentra paralela a la pared exterior del sector de incendio, su temperatura media T_m debería determinarse en un punto en la longitud de la viga situado directamente por encima del centro de la abertura.

(4) Si la viga se encuentra perpendicular a la pared exterior del sector de incendio, el valor de la temperatura media debería determinarse en una serie de puntos cada 100 mm a lo largo de la longitud de la viga. El máximo de estos valores debería, entonces, adoptarse como la temperatura media del elemento de acero T_m.

(5) El flujo de calor por radiación I_z desde la llama debería determinarse mediante:

$$I_z = \frac{\left(I_{z,1} + I_{z,2}\right)\cdot d_1 + \left(I_{z,3} + I_{z,4}\right)\cdot d_2}{\left(C_1 + C_2\right)\cdot d_1 + \left(C_3 + C_4\right)\cdot d_2} \quad \text{(B.21)}$$

donde:

$I_{z,i}$ es el flujo de calor por radiación desde la llama hacia la cara *i* de la viga

i es el índice de la cara de la viga (1), (2), (3) o (4).

B.5.1.2 Condición de 'ventilación no forzada'

(1) Para la condición de 'ventilación no forzada', debería distinguirse entre los casos en los que la parte superior de la llama se encuentra por encima de la altura de la parte superior de la viga y los casos en los que se encuentra por debajo de dicha altura.

(2) Si la parte superior de la llama se encuentra por encima del nivel de la parte superior de la viga, deberían aplicarse las siguientes ecuaciones:

$$I_{z,1} = C_1\ \varepsilon_{z,1}\ \sigma\ T_o^4 \quad \text{(B.22a)}$$

$$I_{z,2} = C_2\ \varepsilon_{z,2}\ \sigma\ T_{z,2}^4 \quad \text{(B.22b)}$$

$$I_{z,3} = C_3\ \varepsilon_{z,3}\ \sigma\ (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad \text{(B.22c)}$$

$$I_{z,4} = C_4\ \varepsilon_{z,4}\ \sigma\ (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad \text{(B.22d)}$$

donde:

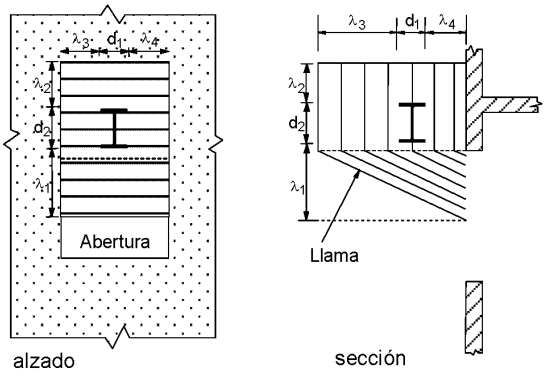
$\varepsilon_{z,i}$ es la emisividad de la llama respecto a la cara *i* de la viga, véase el apartado B.5.2

T_o es la temperatura en la abertura [K] del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2

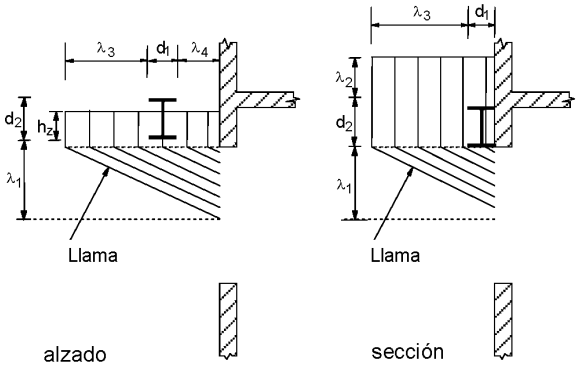
$T_{z,1}$ es la temperatura de la llama [K] del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, a la altura de la parte inferior de la viga

$T_{z,2}$ es la temperatura de la llama [K] del Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, a la altura de la parte superior de la viga.

(3) En el caso de una viga paralela a la pared exterior del sector de incendio, el valor C_4 puede tomarse como cero si la viga se encuentra inmediatamente adyacente a la pared, véase la figura A23.B.7.

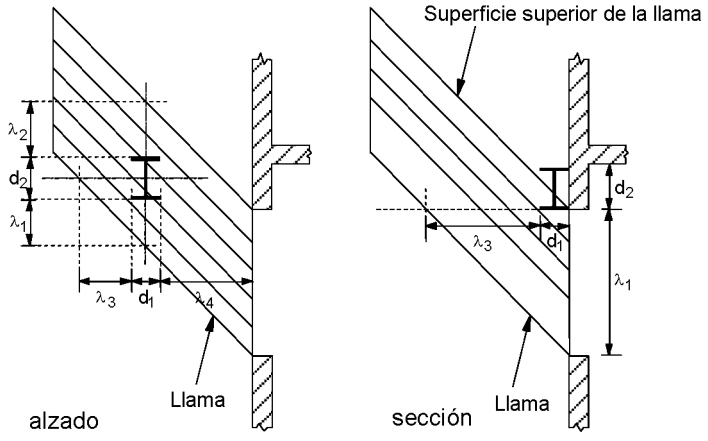


1) Viga perpendicular a la pared 2) Viga paralela a la pared



3) Parte superior de la llama por debajo de la parte superior de la viga 4) Viga adyacente a la pared

a) Condición de 'ventilación no forzada'



1) Viga no adyacente a la pared 2) Viga adyacente a la pared

b) Condición de 'ventilación forzada'

Figura A23.B.7 Viga envuelta en llamas

(4) Si la parte superior de la llama se encuentra por debajo de la altura de la parte superior de la viga, deberían aplicarse las siguientes ecuaciones:

$$I_{z,1} = C_1 \, \varepsilon_{z,1} \, \sigma \, T_o^4 \quad \text{(B.23a)}$$

$$I_{z,2} = 0 \quad \text{(B.23b)}$$

$$I_{z,3} = (h_z/d_2) \, C_3 \, \varepsilon_{z,3} \, \sigma \, (T_{z,1}^4 + T_x^4)/2 \quad \text{(B.23c)}$$

$$I_{z,4} = (h_z/d_2) \, C_4 \, \varepsilon_{z,4} \, \sigma \, (T_{z,1}^4 + T_x^4)/2 \quad \text{(B.23d)}$$

donde:

T_x es la temperatura de la llama en su punta [813 K]

h_z es la altura de la parte superior de la llama por encima de la parte inferior de la viga.

B.5.1.3 Condición de 'ventilación forzada'

(1) Para la condición de 'ventilación forzada', en el caso de vigas paralelas a la pared exterior del sector de incendio, debería distinguirse entre las que se encuentran inmediatamente adyacentes a la pared y las que no.

NOTA: Véanse las ilustraciones de la figura A23.B.7.

(2) Para una viga paralela a la pared pero no inmediatamente adyacente a ella, o para una viga perpendicular a la pared, deberían aplicarse las siguientes ecuaciones:

$$I_{z,1} = C_1 \, \varepsilon_{z,1} \, \sigma T_o^4 \quad \text{(B.24a)}$$

$$I_{z,2} = C_2 \, \varepsilon_{z,2} \, \sigma T_{z,2}^4 \quad \text{(B.24b)}$$

$$I_{z,3} = C_3 \, \varepsilon_{z,3} \, \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad \text{(B.24c)}$$

$$I_{z,4} = C_4 \, \varepsilon_{z,4} \, \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad \text{(B.24d)}$$

(3) Si la viga se encuentra paralela a la pared e inmediatamente adyacente a ella únicamente su cara inferior debería considerarse envuelta en llamas, pero una cara y la parte superior deberían considerarse expuestas a la transferencia de calor por radiación desde la superficie superior de la llama, véase la figura A23.B.7(b)(2). De este modo:

$$I_{z,1} = C_1 \, \varepsilon_{z,1} \, \sigma T_o^4 \quad \text{(B.25a)}$$

$$I_{z,2} = \phi_{z,2} \, C_2 \, \varepsilon_{z,2} \, \sigma T_{z,2}^4 \quad \text{(B.25b)}$$

$$I_{z,3} = \phi_{z,3} \, C_3 \, \varepsilon_{z,3} \, \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4)/2 \quad \text{(B.25c)}$$

$$I_{z,4} = 0 \quad \text{(B.25d)}$$

donde $\phi_{\zeta,i}$ es el factor de configuración respecto a la superficie superior de la llama, para la cara *i* de la viga, del Anexo G de la norma UNE-EN 1991-1-2.

B.5.2 Emisividad de la llama

(1) La emisividad de la llama ε_{zi} para cada una de las caras 1, 2, 3 y 4 de la viga debería determinarse con la expresión para ε dada en el Anexo B de la norma UNE-EN 1991-1-2, utilizando un espesor de llama λ equivalente a la dimensión λ_i indicada en la figura A23.B.7 correspondiente a la cara *i* de la viga.

B.5.3 Coeficiente de absorción de la llama

(1) El coeficiente de absorción de la llama a_z debería determinarse mediante:

$$a_z = 1 - e^{-0,3h} \quad \text{(B.26)}$$

donde:

h es la altura de la abertura. Véase la figura A23.B.7(b) (la altura se designa como λ_1).

Apéndice C. Recomendaciones para el acero inoxidable

C.1 Generalidades

(1) Las propiedades térmicas y mecánicas de las siguientes categorías del acero inoxidable se incluyen en este anexo: 1.4301, 1.4401, 1.4571, 1.4003 y 1.4462.

NOTA: Para otras categorías del acero inoxidable de acuerdo con el Anejo 24, pueden utilizarse las propiedades mecánicas incluidas en el apartado 3.2. Las propiedades térmicas pueden tomarse de este apéndice.

(2) Los valores de las propiedades materiales incluidos en el presente apéndice deberían tratarse como valores característicos.

(3) Se deberían tomar como propiedades mecánicas del acero a 20 ºC las indicadas en el Anejo 24 para el dimensionamiento a temperatura ambiente.

C.2 Propiedades mecánicas del acero

C.2.1 Propiedades de resistencia y deformación

(1) Para unos índices de calentamiento de entre 2 y 50 K/min, las propiedades de resistencia y deformación del acero inoxidable a temperaturas elevadas deberían obtenerse a partir de la relación tensión-deformación dada en la figura A23.C.1.

NOTA: Para las reglas de esta norma se considera que las velocidades de calentamiento están dentro de los límites especificados.

(2) Esta relación debería utilizarse para determinar las resistencias a tracción y compresión, el momento resistente o la resistencia a esfuerzo cortante.

(3) La tabla A23.C.1 proporciona los coeficientes de reducción, en relación al valor apropiado a 20 ºC, para la relación tensión-deformación de diversos tipos de acero inoxidable a temperaturas elevadas, de la siguiente forma:

- pendiente de la región elástica lineal, respecto a la pendiente a 20 ºC: $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
- límite elástico convencional, respecto al límite elástico a 20 ºC: $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_y$
- resistencia última a tracción, respecto última a la resistencia a tracción a 20 ºC: $k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u$

(4) Para el uso de métodos de cálculo simplificados, la tabla A23.C.1 proporciona el coeficiente de corrección $k_{2\%,\theta}$ para determinar el límite elástico, utilizando:

$$f_{y,\theta} = f_{0,2p,\theta} + k_{2\%,\theta}\,(f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta}) \qquad \text{(C.1)}$$

(5) Para el uso de métodos de cálculo avanzados, la tabla A23.C.2 proporciona unos valores adicionales para la relación tensión-deformación de diversos tipos de acero inoxidable a temperaturas elevadas, de la siguiente forma:

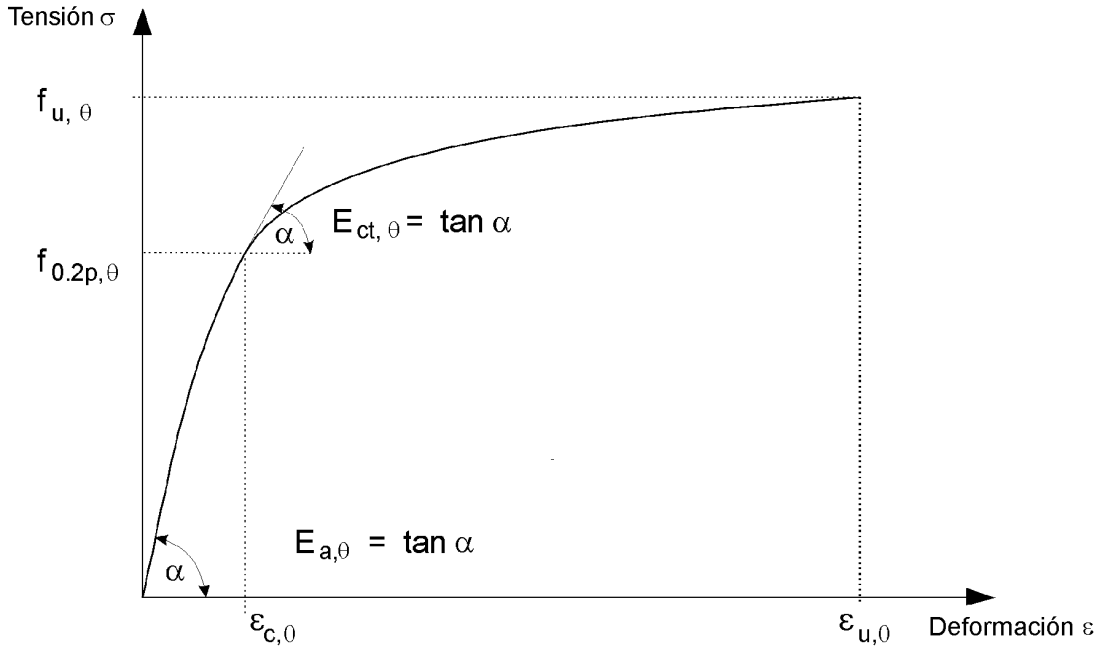
- pendiente en el límite elástico convencional, respecto a la pendiente a 20 ºC: $k_{Ect,\theta} = E_{ct,\theta}/E_a$
- deformación de rotura: $\varepsilon_{u,\theta}$

C.2.2 Densidad

(1) La densidad del acero ρ_a puede considerarse independiente de la temperatura del acero. Se puede tomar el siguiente valor:

$\rho_a = 7850\,kg/m^3$

Región de la deformación	Tensión σ	Módulo tangente E_t
$\varepsilon \le \varepsilon_{c,\theta}$	$\dfrac{E \cdot \varepsilon}{1 + a \cdot \varepsilon^b}$	$\dfrac{E\,(1 + a \cdot \varepsilon^b - a \cdot b \cdot \varepsilon^b)}{(1 + a \cdot \varepsilon^b)^2}$
$\varepsilon_{c,\theta} < \varepsilon \le \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{0,2p,\theta} - e + (d / c)\sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}$	$\dfrac{d \cdot (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)}{c\sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}}$
Parámetros	$\varepsilon_{c,\theta} = f_{0,2p,\theta}/E_{a,\theta} + 0{,}002$	
Funciones	$a = \dfrac{E_{a,\theta}\,\varepsilon_{c,\theta} - f_{0,2p,\theta}}{f_{0,2p,\theta}\,\varepsilon_{c,\theta}^{\,b}}$	$b = \dfrac{(1 - \varepsilon_{c,\theta}\,E_{ct,\theta} / f_{0,2p,\theta})\,E_{a,\theta}\,\varepsilon_{c,\theta}}{(E_{a,\theta}\,\varepsilon_{c,\theta} / f_{0,2p,\theta} - 1)\,f_{0,2p,\theta}}$
	$c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})\left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta} + \dfrac{e}{E_{ct,\theta}}\right)$	$d^2 = e\,(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})\,E_{ct,\theta} + e^2$
	$e = \dfrac{(f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})E_{ct,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta})}$	



$f_{u,\theta}$ es la resistencia última a tracción;
$f_{0,2p,\theta}$ es el límite elástico convencional al 0,2% de deformación plástica;
$E_{a,\theta}$ es la pendiente de la región elástica lineal;
$E_{ct,\theta}$ es la pendiente en el límite elástico convencional;
$\varepsilon_{c,\theta}$ es la deformación total en el límite elástico convencional;
$\varepsilon_{u,\theta}$ es la deformación de rotura.

Figura A23.C.1 Relación tensión-deformación para el acero inoxidable a temperaturas elevadas

Tabla A23.C.1 Coeficientes para la determinación de la deformación y la rigidez del acero inoxidable a temperaturas elevadas

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite elástico convencional $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_u) para la resistencia última a tracción $k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u$	Coeficiente para la determinación del límite elástico $f_{y,\theta}$ $k_{2\%\theta}$
Tipo 1.4301				
20	1,00	1,00	1,00	0,26
100	0,96	0,82	0,87	0,24
200	0,92	0,68	0,77	0,19
300	0,88	0,64	0,73	0,19
400	0,84	0,60	0,72	0,19
500	0,80	0,54	0,67	0,19
600	0,76	0,49	0,58	0,22
700	0,71	0,40	0,43	0,26
800	0,63	0,27	0,27	0,35
900	0,45	0,14	0,15	0,38
1000	0,20	0,06	0,07	0,40
1100	0,10	0,03	0,03	0,40
1200	0,00	0,00	0,00	0,40
Tipo 1.4401/1.4404				
20	1,00	1,00	1,00	0,24
100	0,96	0,88	0,93	0,24
200	0,92	0,76	0,87	0,24
300	0,88	0,71	0,84	0,24
400	0,84	0,66	0,83	0,21
500	0,80	0,63	0,79	0,20
600	0,76	0,61	0,72	0,19
700	0,71	0,51	0,55	0,24
800	0,63	0,40	0,34	0,35
900	0,45	0,19	0,18	0,38
1000	0,20	0,10	0,09	0,40
1100	0,10	0,05	0,04	0,40
1200	0,00	0,00	0,00	0,40
Tipo 1.4571				
20	1,00	1,00	1,00	0,25
100	0,96	0,89	0,88	0,25
200	0,92	0,83	0,81	0,25
300	0,88	0,77	0,80	0,24
400	0,84	0,72	0,80	0,22
500	0,80	0,69	0,77	0,21
600	0,76	0,66	0,71	0,21
700	0,71	0,59	0,57	0,25
800	0,63	0,50	0,38	0,35
900	0,45	0,28	0,22	0,38
1000	0,20	0,15	0,11	0,40
1100	0,10	0,075	0,055	0,40
1200	0,00	0,00	0,00	0,40
Tipo 1.4003				

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite elástico convencional $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_u) para la resistencia última a tracción $k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u$	Coeficiente para la determinación del límite elástico $f_{y,\theta}$ $k_{2\%\theta}$
20	1,00	1,00	1,00	0,37
100	0,96	1,00	0,94	0,37
200	0,92	1,00	0,88	0,37
300	0,88	0,98	0,86	0,37
400	0,84	0,91	0,83	0,42
500	0,80	0,80	0,81	0,40
600	0,76	0,45	0,42	0,45
700	0,71	0,19	0,21	0,46
800	0,63	0,13	0,12	0,47
900	0,45	0,10	0,11	0,47
1000	0,20	0,07	0,09	0,47
1100	0,10	0,035	0,045	0,47
1200	0,00	0,00	0,00	0,47
Tipo 1.4462				
20	1,00	1,00	1,00	0,35
100	0,96	0,91	0,93	0,35
200	0,92	0,80	0,85	0,32
300	0,88	0,75	0,83	0,30
400	0,84	0,72	0,82	0,28
500	0,80	0,65	0,71	0,30
600	0,76	0,56	0,57	0,33
700	0,71	0,37	0,38	0,40
800	0,63	0,26	0,29	0,41
900	0,45	0,10	0,12	0,45
1000	0,20	0,03	0,04	0,47
1100	0,10	0,015	0,02	0,47
1200	0,00	0,00	0,00	0,47

Tabla A23.C.2 Coeficiente de reducción y deformación de rotura para el uso de métodos de cálculo avanzados

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{Ect,\theta} = E_{ct,\theta}/E_a$	Deformación de rotura $\varepsilon_{u,\theta}$ [-]
Tipo 1.4301		
20	0,11	0,40
100	0,05	0,40
200	0,02	0,40
300	0,02	0,40
400	0,02	0,40
500	0,02	0,40
600	0,02	0,35
700	0,02	0,30
800	0,02	0,20
900	0,02	0,20
1000	0,02	0,20
1100	0,02	0,20

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{Ect,\theta} = E_{ct,\theta}/E_a$	Deformación de rotura $\varepsilon_{u,\theta}$ [-]
1200	0,02	0,20
Tipo 1.4401/1.4404		
20	0,050	0,40
100	0,049	0,40
200	0,047	0,40
300	0,045	0,40
400	0,030	0,40
500	0,025	0,40
600	0,020	0,40
700	0,020	0,30
800	0,020	0,20
900	0,020	0,20
1000	0,020	0,20
1100	0,020	0,20
1200	0,020	0,20
Tipo 1.4571		
20	0,060	0,40
100	0,060	0,40
200	0,050	0,40
300	0,040	0,40
400	0,030	0,40
500	0,025	0,40
600	0,020	0,35
700	0,020	0,30
800	0,020	0,20
900	0,020	0,20
1000	0,020	0,20
1100	0,020	0,20
1200	0,020	0,20
Tipo 1.4003		
20	0,055	0,20
100	0,030	0,20
200	0,030	0,20
300	0,030	0,20
400	0,030	0,15
500	0,030	0,15
600	0,030	0,15
700	0,030	0,15
800	0,030	0,15
900	0,030	0,15
1000	0,030	0,15
1100	0,030	0,15
1200	0,030	0,15
Tipo 1.4462		
20	0,100	0,20
100	0,070	0,20
200	0,037	0,20
300	0,035	0,20
400	0,033	0,20
500	0,030	0,20
600	0,030	0,20
700	0,025	0,15
800	0,025	0,15

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{Ect,\theta} = E_{ct,\theta}/E_a$	Deformación de rotura $\varepsilon_{u,\theta}$ [-]
900	0,025	0,15
1000	0,025	0,15
1100	0,025	0,15
1200	0,025	0,15

C.3 Propiedades térmicas

C.3.1 Dilatación térmica

(1) La dilatación térmica unitaria del acero inoxidable austenítico $\Delta l/l$ puede determinarse mediante:

$$\Delta l/l = (16 + 4{,}79 \times 10^{-3}\ \theta_a - 1{,}243 \times 10^{-6}\ \theta_a^2) \times (\theta_a - 20)\ 10^{-6} \qquad \text{(C.1)}$$

donde:

l es la longitud a 20 ºC

Δl es la dilatación producida por la temperatura

θ_a es la temperatura del acero [ºC].

NOTA: La variación de la deformación térmica unitaria con la temperatura se representa en la figura A23.C.2.

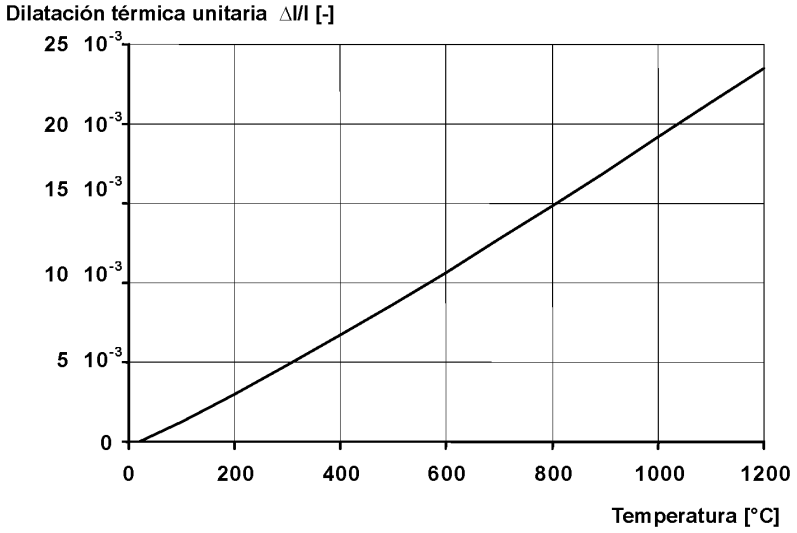


Figura A23.C.2 Dilatación térmica unitaria del acero inoxidable en función de la temperatura

C.3.2 Calor específico

(1) El calor específico del acero inoxidable c_a puede determinarse mediante:

$$c_a = 450 + 0{,}280 \times \theta_a - 2{,}91 \times 10^{-4}\ \theta_a^2 + 1{,}34 \times 10^{-7}\ \theta_a^3\ \text{J/kgK} \qquad \text{(C.2)}$$

donde:

θ_a es la temperatura del acero [ºC].

NOTA: La variación del calor específico con la temperatura se representa en la figura A23.C.3.

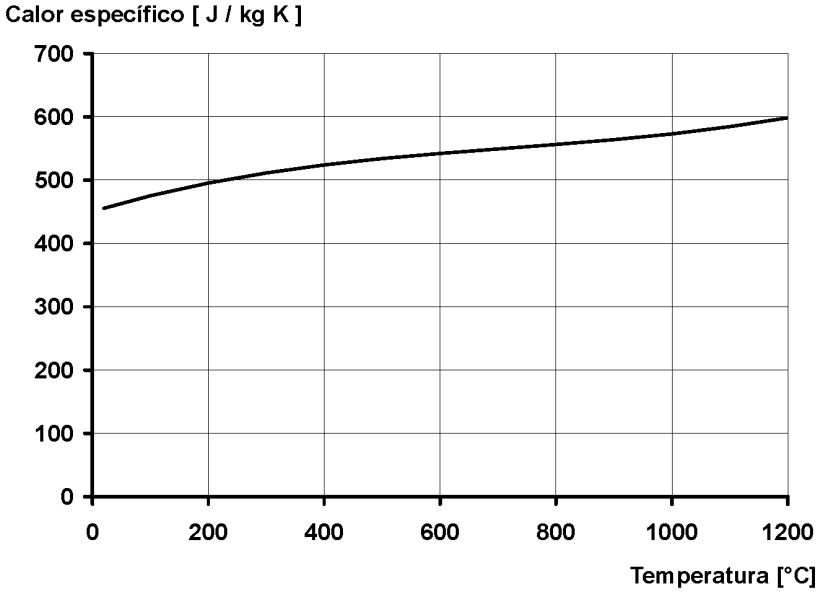


Figura A23.C.3 Calor específico del acero inoxidable en función de la temperatura

C.3.3 Conductividad térmica

(1) La conductividad térmica del acero inoxidable θ_a puede determinarse mediante:

$$\theta_a = 14{,}6 + 1{,}27 \times 10^{-2}\, \theta_a \text{ W/mK} \qquad \text{(C.3)}$$

donde:

θ_a es la temperatura del acero [ºC].

NOTA: La variación de la conductividad térmica con la temperatura se representa en la figura A23.C.4.

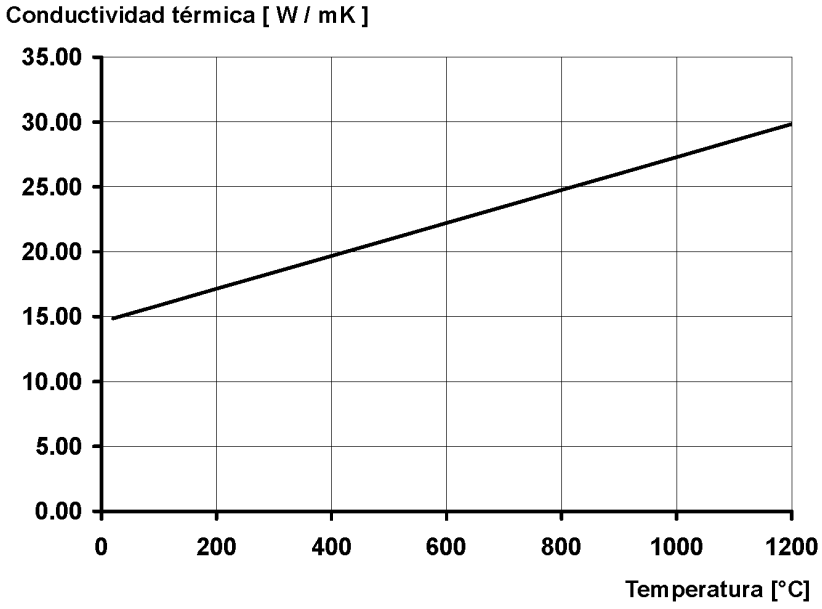


Figura A23.C.4 Conductividad térmica del acero inoxidable en función de la temperatura

Apéndice D. Recomendaciones sobre uniones

D.1 Uniones atornilladas

(1) No es necesario considerar el fallo de la sección neta en los taladros de los elementos de fijación, siempre y cuando exista un elemento de fijación en cada taladro, ya que la temperatura del acero es menor en las uniones debido a la presencia de material adicional.

D.1.1 Valor de cálculo de la resistencia de los tornillos a cortante

D.1.1.1 Categoría A: Resistentes al aplastamiento

(1) El valor de cálculo de la resistencia frente al fuego de los tornillos sometidos a cortante debería determinarse mediante:

$$F_{\mathrm{v,t,Rd}} = F_{\mathrm{v,Rd}}\, k_{\mathrm{b},\theta}\, \frac{\gamma_{\mathrm{M2}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{(D.1)}$$

donde:

$k_{\mathrm{b},\theta}$ es el coeficiente de reducción para la temperatura apropiada del tornillo según la tabla A23.D.1

$F_{\mathrm{v,Rd}}$ es el valor de cálculo de la resistencia a esfuerzo cortante del tornillo en el plano de cortante, calculada suponiendo que el plano de cortante atraviesa la rosca del tornillo (tabla A26.3.4 del Anejo 26)

γ_{M2} es el coeficiente parcial a temperatura ambiente

$\gamma_{\mathrm{M,fi}}$ es el coeficiente parcial en la situación de incendio.

(2) El valor de cálculo de la resistencia al aplastamiento de los tornillos frente al fuego debería determinarse mediante:

$$F_{\mathrm{b,t,Rd}} = F_{\mathrm{b,Rd}}\, k_{\mathrm{b},\theta}\, \frac{\gamma_{\mathrm{M2}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{(D.2)}$$

donde:

$F_{\mathrm{b,Rd}}$ se obtiene de la tabla A26.3.4 del Anejo 26

$k_{\mathrm{b},\theta}$ es el coeficiente de reducción para la temperatura apropiada del tornillo según la tabla A23.D.1.

D.1.1.2 Categoría B: Resistentes al deslizamiento en el estado límite de servicio; y Categoría C: Resistentes al deslizamiento en el estado límite último

(1) Debería considerarse que las uniones resistentes al deslizamiento han deslizado en la situación de incendio y la resistencia de un tornillo individual debería determinarse igual que para los tornillos resistentes al aplastamiento, véase el apartado D.1.1.1.

D.1.2 Valor de cálculo de la resistencia de los tornillos a tracción

D.1.2.1 Categorías D y E: Tornillos sin pretensar y pretensados

(1) El valor de cálculo de la resistencia a tracción de un tornillo individual en situación de incendio debería determinarse mediante:

$$F_{\text{ten,t,Rd}} = F_{\text{t,Rd}}\, k_{\text{b},\theta}\, \frac{\gamma_{\text{M2}}}{\gamma_{\text{M,fi}}} \qquad \text{(D.3)}$$

donde:

$F_{\text{t,Rd}}$ se obtiene de la tabla A26.3.4 en el Anejo 26

$k_{\text{b},\theta}$ es el coeficiente de reducción para la temperatura apropiada del tornillo según la tabla A23.D.1.

Tabla A23.D.1 Coeficientes de reducción de la resistencia para tornillos y soldaduras

Temperatura θ_a	Coeficiente de reducción para tornillos, $k_{b,\theta}$ (tracción y cortante)	Coeficiente de reducción para soldaduras, $k_{w,\theta}$
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
150	0,952	1,000
200	0,935	1,000
300	0,903	1,000
400	0,775	0,876
500	0,550	0,627
600	0,220	0,378
700	0,100	0,130
800	0,067	0,074
900	0,033	0,018
1000	0,000	0,000

D.2 Valor de cálculo de la resistencia de las soldaduras

D.2.1 Soldaduras a tope

(1) El valor de cálculo de la resistencia de una soldadura a tope con penetración total, para temperaturas hasta 700 ºC, debería considerarse equivalente a la resistencia de la parte más débil de la unión utilizando los coeficientes de reducción apropiados para el acero estructural.

Para temperaturas superiores a 700 ºC, los coeficientes de reducción para soldaduras en ángulo pueden también aplicarse a las soldaduras a tope.

D.2.2 Soldaduras en ángulo

(1) El valor de cálculo de la resistencia por unidad de longitud de una soldadura en ángulo en situación de incendio debería determinarse mediante:

$$F_{\text{w,t,Rd}} = F_{\text{w,Rd}}\, k_{\text{w},\theta}\, \frac{\gamma_{\text{M2}}}{\gamma_{\text{M,fi}}} \qquad \text{(D.4)}$$

donde:

$k_{w,\theta}$ se toma de la tabla A23.D.1 para la temperatura de soldadura apropiada

$F_{w,Rd}$ se determina en el apartado 4.5.3 del Anejo 26.

D.3 Temperatura de las uniones en un incendio

D.3.1 Generalidades

(1) La temperatura de una unión puede evaluarse utilizando el valor A/V local de las partes que constituyen dicha unión.

(2) Como simplificación, se puede considerar en el interior de la unión una distribución uniforme de la temperatura; dicha temperatura puede calcularse utilizando el valor máximo de las relaciones A/V de los elementos de acero conectados mediante la unión.

(3) Para uniones de viga con columna y de viga con viga, en las que las vigas soportan cualquier tipo de forjado de hormigón, la temperatura de la unión puede obtenerse a partir de la temperatura del ala inferior en el centro del vano.

(4) Para la aplicación del método del apartado 4.2.5, la temperatura de los componentes de la unión puede determinarse como sigue:

a) Si el canto de la viga es menor o igual de 400 mm

$$\theta_h = 0{,}88\ \theta_o\ [1 - 0{,}3(h/D)] \qquad \text{(D.5)}$$

donde:

θ_h es la temperatura a la altura h (mm) de la viga de acero (figura A23.D.1)

θ_o es la temperatura del ala inferior de la viga de acero en una sección alejada de la unión

h es la altura del componente de la unión considerada por encima de la parte inferior de la viga, en (mm)

D es el canto de la viga, en (mm).

b) Si el canto de la viga es mayor de 400 mm:

i) Si h es menor o igual que $D/2$

$$\theta_h = 0{,}88\ \theta_o \qquad \text{(D.6)}$$

ii) Si h es mayor que $D/2$

$$\theta_h = 0{,}88\ \theta_o\ [1 + 0{,}2\ (1 - 2h/D)] \qquad \text{(D.7)}$$

donde:

θ_o es la temperatura del ala inferior de la viga de acero en una sección alejada de la unión

h es la altura del componente considerada por encima de la parte inferior de la viga, en (mm)

D es el canto de la viga, en (mm).

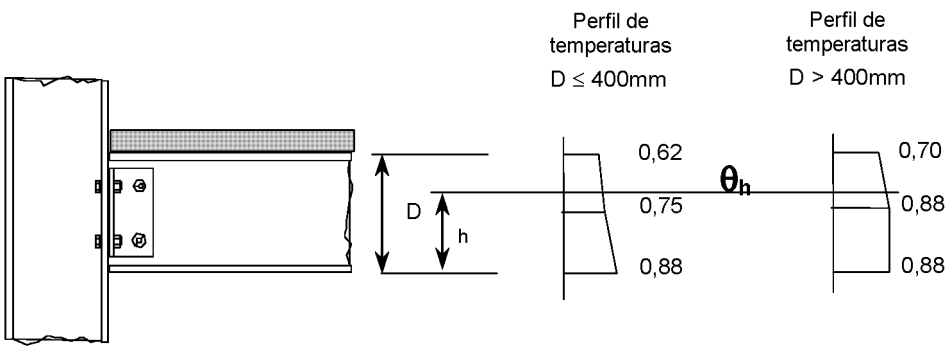


Figura A23.D.1 Gradiente térmico en el canto de una unión mixta

Apéndice E. Recomendaciones para las secciones transversales de clase 4

E.1 Modelos de cálculo avanzados

(1) Se pueden utilizar modelos de cálculo avanzados para el dimensionamiento de secciones de clase 4 cuando se tienen en cuenta todos los efectos sobre la estabilidad.

E.2 Modelos de cálculo simplificados

(1) La resistencia de los elementos con una sección transversal de clase 4 debería verificarse mediante las ecuaciones incluidas en el apartado 4.2.3.2 para elementos sometidos a compresión, en el apartado 4.2.3.4 para vigas a flexión, y en el apartado 4.2.3.5 para elementos sometidos a flexión y a compresión, en los cuales la superficie se sustituye por la superficie eficaz y el modulo resistente se sustituye por el modulo resistente eficaz.

(2) La superficie eficaz de la sección transversal y modulo resistente eficaz deberían determinarse de acuerdo con el Anejo 25, es decir, en base a las propiedades materiales a 20 °C.

(3) Para el dimensionamiento en la situación de incendio, el valor de cálculo del límite elástico del acero debería tomarse como el límite elástico convencional al 0,2% de deformación. Este valor de cálculo del límite elástico puede utilizarse para determinar las resistencias a tracción y a compresión, el momento resistente o la resistencia a esfuerzo cortante.

(4) Los coeficientes de reducción para el valor de cálculo del límite elástico de los aceros al carbono respecto al límite elástico a 20 °C pueden tomarse de la tabla A23.E.1:

- valor de cálculo del límite elástico, respecto al límite elástico a 20 ºC:

  $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_y$

- pendiente de la región elástica lineal, respecto a la pendiente a 20 ºC:

  $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$

NOTA: Estos coeficientes de reducción se representan en la figura A23.E.1.

(5) Los coeficientes de reducción para el valor de cálculo del límite elástico convencional de los aceros inoxidables respecto al límite elástico convencional a 20 °C pueden tomarse del Apéndice C.

Tabla A23.E.1 Coeficientes de reducción del acero al carbono para el dimensionamiento de secciones de clase 4 a temperaturas elevadas

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el valor de cálculo del límite elástico de las secciones de acero laminado en caliente y soldadas de clase 4 $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_{yb}) para el valor de cálculo del límite elástico de las secciones de acero conformado en frío de clase 4 $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_{yb}$
20 °C	1,00	
100 °C	1,00	
200 °C	0,89	
300 °C	0,78	
400 °C	0,65	
500 °C	0,53	

Temperatura del acero θ_a	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el valor de cálculo del límite elástico de las secciones de acero laminado en caliente y soldadas de clase 4 $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_{yb}) para el valor de cálculo del límite elástico de las secciones de acero conformado en frío de clase 4 $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_{yb}$
600 °C	0,30	
700 °C	0,13	
800 °C	0,07	
900 °C	0,05	
1000 °C	0,03	
1100 °C	0,02	
1200 °C	0,00	
NOTA 1: Para valores intermedios de la temperatura del acero puede utilizarse una interpolación lineal. NOTA 2: La definición de f_{yb} debería tomarse de la norma UNE-EN 1993-1-3.		

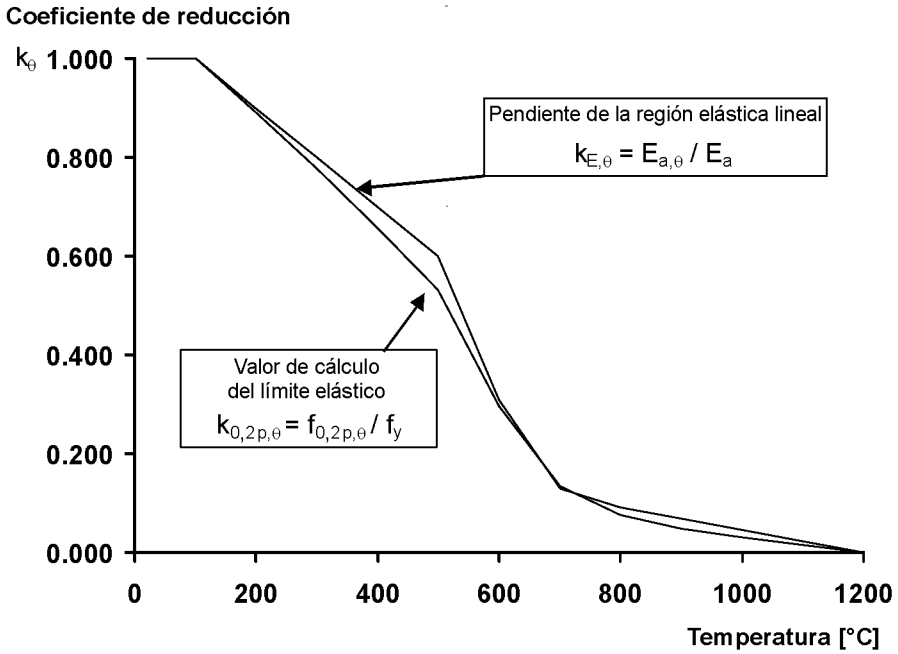


Figura A23.E.2 Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación de las secciones de acero conformado en frío y laminado en caliente de clase 4 a temperaturas elevadas