

NOMOGRAMAS

Método gráfico para determinar la resistencia al fuego de las estructuras de acero según EN 1993-1-2:2005

1 INTRODUCCIÓN

Las exigencias en materia de resistencia al fuego de las estructuras de acero varían entre 30 y 180 minutos (están recogidas en la reglamentación nacional). Dicha reglamentación tiene en cuenta el número de plantas, el uso del edificio, la carga de fuego, el número de usuarios y el efecto favorable de las medidas de protección activas (rociadores, detectores automáticos de incendio.....)

La resistencia al fuego de los elementos estructurales se evalúa, bien mediante ensayos de fuego normalizado en horno o bien mediante cálculo.

Este documento técnico describe los métodos de cálculo para estructuras de acero protegidas y sin protección según el Eurocódigo EN 1993-1-2:2005.

2 BASES DE CÁLCULO

2.1 Principios generales

El instante de colapso de una estructura de acero depende de:

- **La temperatura crítica del acero $\theta_{u,cr}$:** las propiedades del acero dependen de la temperatura - ver figura 1. La temperatura crítica es la temperatura de colapso de la estructura de acero. Ésta depende del grado de utilización μ_0 :

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

$E_{fi,d}$ Efecto de cálculo de las acciones para la situación de incendio;

$R_{fi,d,0}$ Resistencia de cálculo en situación de incendio en el instante $t = 0$. Para las vigas y los elementos sometidos a tracción, $R_{fi,d,0}$ es igual a la resistencia a temperatura ambiente R_d ya que $\gamma_M = \gamma_{M,fi} = 1,0$. Para los soportes continuos de varias plantas en el caso de que cada planta sea un sector de incendio distinto, la longitud de pandeo considerada en el cálculo puede reducirse a un valor:

$$l_{fi} = \alpha \cdot L_{cr}, \text{ donde}$$

$\alpha = 0,5$ para los soportes de plantas intermedias;

$\alpha = 0,7$ para los soportes de la planta superior;

En el resto de los casos la longitud de pandeo permanece igual a la considerada a temperatura ambiente ($\alpha = 1$).

- **La velocidad de calentamiento**, que depende de tres factores:
 - La evolución de la temperatura del incendio;
 - El factor de sección $P [m^{-1}]$, cociente entre la superficie expuesta al fuego (A) y el volumen de acero (V) por unidad de longitud;
 - La contribución a la resistencia del acero al fuego de los posibles materiales de protección. Dicha contribución viene determinada por su espesor d_p y por sus características térmicas:
 - Conductividad térmica λ_p [W/mK]
 - Calor específico c_p [J/kgK]
 - Densidad ρ_p [kg/m³]
- La influencia sobre la resistencia al fuego se determinará según ENV 13381-4 o ENV 13381-8, o según la normativa nacional.

2.2 Ámbito de aplicación

El método de cálculo es válido cuando se cumple:

- **Estructura arriostrada:**
 - Elementos sometidos a tracción pura;
 - Vigas isostáticas e hiperestáticas sometidas a flexión;
 - Soportes sometidos exclusivamente a esfuerzo axial;
 - No se incluyen en el ámbito de aplicación de este método los elementos susceptibles de pandeo lateral o sometidos a una combinación de cargas axiales, transversales y/o momentos. Se puede considerar que no existe riesgo de pandeo lateral cuando el alma comprimida de la viga esté arriostrada lateralmente, por ejemplo, por una losa de forjado.
- **Tipos de acero:** Todos los tipos según EN 10025;
- **Clase de la sección:** Clases 1, 2 o 3, ver tabla 1 para la clasificación. Para las secciones clase 4, la temperatura crítica estándar es 350 °C. El factor de sección debe ser superior a 10 m⁻¹.

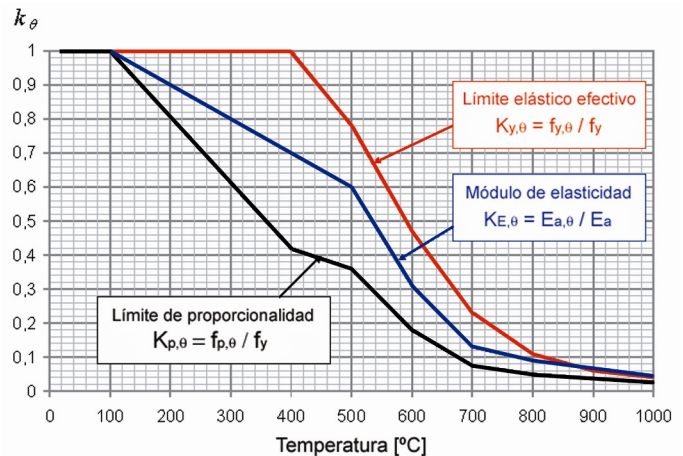


Figura 1: Coeficientes de corrección de las características mecánicas del acero en función de la temperatura.

Tabla 1 : Clasificación de secciones sometidas a compresión.

Paneles interiores comprimidos					
Clase de sección	Flexión	Compresión			
1	$c/t \leq 72 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 33 \cdot \epsilon$			
2	$c/t \leq 83 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 38 \cdot \epsilon$			
3	$c/t \leq 124 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 42 \cdot \epsilon$			
Paneles en ménsula					
Clase de sección	Compresión				
1	$c/t \leq 9 \cdot \epsilon$				
2	$c/t \leq 10 \cdot \epsilon$				
3	$c/t \leq 14 \cdot \epsilon$				
Otros perfiles					
	Angulares	Tubos			
Clase de sección	Compresión	Compresión y/o flexión			
1	-	$d/t \leq 50 \cdot \epsilon^2$			
2	-	$d/t \leq 70 \cdot \epsilon^2$			
3	$h/t \leq 15 \cdot \epsilon$	$d/t \leq 90 \cdot \epsilon^2$ Para $d/t \geq 90 \cdot \epsilon^2$, ver EN 1993-1-6			
Valores de ϵ y ϵ^2 en caso de incendio					
f_y	S235	S275	S355	S420	S460
ϵ	0,85	0,79	0,69	0,64	0,61
ϵ^2	0,72	0,62	0,48	0,40	0,37

2.3 Hipótesis

- La evolución de la temperatura del incendio sigue la curva de incendio normalizada [ISO 834].
- Las acciones mecánicas son constantes durante el incendio. Los efectos de la dilatación térmica se consideran despreciables.
- La temperatura en la estructura de acero es uniforme. Para considerar una distribución no uniforme de la temperatura se emplea el coeficiente corrector $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$. κ es igual a 0,6 / 0,7 / 0,85 o 1,0 con :
 - κ_1 : tiene en cuenta una distribución no uniforme de la temperatura en la sección de la viga:
 - $\kappa_1 = 0,70$: viga no protegida, calentamiento de tres caras;
 - $\kappa_1 = 0,85$: viga protegida, calentamiento de tres caras;
 - $\kappa_1 = 1,00$: viga con calentamiento de todas sus caras;
 - κ_2 : tiene en cuenta una distribución no uniforme de la temperatura a lo largo de la longitud de la viga:
 - $\kappa_2 = 0,85$: en las secciones de apoyo de vigas hiperestáticas;
 - $\kappa_2 = 1,00$: en otro caso

3 ACCIONES EN CASO DE INCENDIO

Según el Eurocódigo 1 y los valores recomendados por el mismo para los parámetros a incluir en el Anejo Nacional, en caso de incendio, la sobrecarga vertical variable $Q_{k,i}$ se considera como el valor cuasi-permanente a partir del valor representativo de la acción a temperatura ambiente mediante el coeficiente de reducción $\psi_{2,i}$. Además, los coeficientes de seguridad aplicados a las cargas son la unidad.

$$E_{f_i,d} = \sum_j G_{k,j} + \sum_i \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

En la tabla 2 se incluyen las sobrecargas de uso $Q_{k,i}$, y los valores del coeficiente $\psi_{2,i}$ utilizado para obtener la parte cuasi-permanente de las mismas. En función de la relación entre $Q_{k,i}$ y las cargas permanentes $G_{k,j}$, y del número de plantas n que soporta el pilar, se representa en la tabla un coeficiente η_{fi} que permite obtener la carga total en caso de incendio en función de la carga total a temperatura ambiente. Simplificadamente los efectos de las acciones en caso de incendio $E_{d,fi}$ se pueden obtener del análisis a temperatura ambiente corregidos con este coeficiente $E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d$. Por tanto η_{fi} es un valor aproximado (del lado de la seguridad) del grado de utilización μ_0 . Para aplicar la tabla a vigas no debe realizarse reducción de sobrecargas en el dimensionamiento a temperatura ambiente de las mismas aunque soporten superficies importantes. Para los pilares se considera que todas las plantas que soportan pertenecen a la misma categoría de uso.

Tabla 2 : Coeficiente η_{fi} en función de la relación entre Q_k y G_k .

Uso	Q_k kN/m ²	$Q_k/G_k =$	0.5			1			2		
			$\psi/2$	Vigas Soportes ($n < 2$)		Soportes ($n > 2$)		Soportes ($n > 2$)			
A: Residencial	2.0	0.3	0.55	0.46	0.37	0.61	0.53	0.45			
B: Oficinas	3.0	0.3	0.55	0.46	0.37	0.61	0.53	0.45			
C: Zonas de acceso público	5.0	0.6	0.62	0.56	0.51	0.69	0.65	0.62			
D: Comercial	5.0	0.6	0.62	0.56	0.51	0.69	0.65	0.62			
E: Almacenamiento	7.5	0.8	0.67	0.63	0.60	0.67	0.63	0.60			
F: Aparcamientos veh. < 30 kN	2.5	0.6	0.62	0.56	0.51	0.62	0.56	0.51			
G: Aparcamientos veh. 30-160 kN	5.0	0.3	0.55	0.46	0.37	0.55	0.46	0.37			
H: Cubiertas accesibles sólo conservación											
	H < 1000 m *)		0	0.48	0.35	0.23					
	H > 1000 m **)		0.2	0.52	0.42	0.32					

*) Sobrecarga de nieve (EN 1991-1-3) o sobrecarga de conservación.

**) Sólo sobrecarga de nieve. Para la sobrecarga de conservación tomar los valores η_{fi} correspondientes a H < 1000m.

4 MÉTODO DE CÁLCULO

4.1 Cálculo de la temperatura crítica

El método simplificado se puede aplicar a vigas y a elementos sometidos a tracción pura. También se puede utilizar en soportes, pero los resultados serán muy conservadores. Para un dimensionamiento más afinado de lo mismos es recomendable aplicar el método incluido en el apartado 4.1.2.

4.1.1 Método simplificado

Etap 1a: Determinar el grado de utilización en caso de incendio

$$\mu_0 = E_{f_i,d} / R_{f_i,d,0}$$

Según el Eurocódigo pueden adoptarse como valores del lado de la seguridad $\mu_0 = 0,70$ para los forjados de categoría E en la EN 1990 (almacenes y uso industrial) y $\mu_0 = 0,65$ en el resto de los casos. Para los elementos comprimidos, el grado de utilización puede estimarse a partir del valor de cálculo de la resistencia del elemento a temperatura ambiente R_d : $\mu_0 = E_{f_i,d} / R_d$

Etap 2a: Para las vigas, determinar el coeficiente corrector κ en función de la uniformidad de la distribución de temperatura. Para los soportes, calcular el coeficiente reductor de la longitud de pandeo en caso de incendio α de la planta considerada y las vinculaciones entre los soportes de las diferentes plantas.

Etap 3a: Determinar gráficamente la temperatura crítica en la figura 2.

4.1.2 Método avanzado para elementos comprimidos

Etap 1b: Se pueden obtener valores menos conservadores utilizando el coeficiente reductor admisible plástico:

$$\mu_{pl} = E_{f_i,d} / (A_a \cdot f_y)$$

Donde A_a es el área de la sección transversal y f_y el límite elástico a temperatura ambiente.

Etap 2b: Calcular la esbeltez a tiempo $t = 0$, teniendo en cuenta el coeficiente reductor de la longitud de pandeo en caso de incendio α :

$$\lambda_{f_i,0} = \alpha \cdot \bar{\lambda} = \alpha \cdot \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{93,9 \cdot \varepsilon}, \text{ donde } \varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

Etap 3b: Obtener la temperatura crítica de la tabla 4 a partir de los valores de μ_{pl} y de $\lambda_{f_i,0}$.

4.2 Cálculo de la temperatura del acero

Etap 4: Calcular el factor de sección $P = A/V$

En el caso de perfiles no protegidos o de perfiles con una protección rectangular, se considerará como valor de la superficie expuesta al fuego A el perímetro rectangular, ver tabla 3 (incluye el efecto sombra). Para los perfiles con protecciones que se ajusten a su geometría, se considerará el contorno del perfil como valor de A . Los factores de sección en caso de exposición en todas sus caras o en tres de ellas se recogen en la tabla 6.

Etap 5: Corregir el factor de sección. Los valores de la tabla 6 deben multiplicarse por un coeficiente de 0,9 en el caso de perfiles en I sin proteger.

Para los perfiles protegidos, el calentamiento se calcula partiendo de un factor de sección modificado P_{mod} :

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3}, \text{ donde } \phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V}$$

ϕ representa la inercia térmica relativa del material aislante, ρ_a la densidad del acero (7850 kg/m³), y c_a el calor específico del acero. Para el cálculo se puede adoptar de manera aproximada $c_a = 600$ J/kgK. De manera conservadora también se puede despreciar la contribución de ϕ y adoptar $\phi = 0$.

Etap 6: Determinar gráficamente – figura 2 – el tiempo en que se alcanza la temperatura crítica, en función del factor de sección modificado. Ese tiempo es el valor de la resistencia al fuego.

Tabla 3 : Factores de sección en función del tipo de perfil y del modo de calentamiento.

Perfil en I no protegido y expuesto en todas sus caras	Perfil en I protegido y expuesto en todas sus caras: protección rectangular	Perfil en I protegido y expuesto en todas sus caras: protección siguiendo el contorno
$P = 0,9 \cdot A/V = 0,9 \cdot (2 \cdot b + 2 \cdot h)/V$	$P = A/V = (2 \cdot b + 2 \cdot h)/V$	$P = A/V$
Perfil en I no protegido y expuesto en 3 caras	Perfil en I protegido y expuesto en 3 caras: protección rectangular	Perfil en I protegido y expuesto en 3 caras: protección siguiendo el contorno
$P = 0,9 \cdot A/V = 0,9 \cdot (b + 2 \cdot h)/V$	$P = A/V = (b + 2 \cdot h)/V$	$P = (A-b)/V$
Perfil en L no protegido y expuesto en todas sus caras	Perfil tubular hueco no protegido y expuesto en todas sus caras	Perfil macizo no protegido y expuesto en todas sus caras
$P = A/V \approx 2/t$	$P = A/V \approx 1/t$	$P = A/V = 4/d$

Tabla 4: Temperaturas críticas para elementos comprimidos.

$\lambda_{\theta,0}$	μ_{pl}	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0.2		918	796	745	697	673	649	625	601	582	564	546	528	509
0.4		892	777	714	678	650	622	595	574	553	532	512	485	452
0.6		867	747	685	651	617	588	564	539	515	483	441	391	164
0.8		829	699	657	615	581	552	522	486	430	320	117		
1		784	674	621	578	542	506	437	316	124				
1.2		738	645	585	541	492	385	197						
1.4		694	611	552	495	346	127							
1.6		674	582	516	364	116								
1.8		652	554	436	169									
2		628	524	294										
S235														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0.2		921	797	747	698	675	651	627	603	584	566	548	530	512
0.4		894	780	718	680	653	625	598	578	557	536	516	493	460
0.6		871	752	688	655	622	592	568	544	520	494	453	411	246
0.8		835	703	660	619	585	557	528	499	444	367	186		
1		788	677	625	582	547	512	452	353	177				
1.2		743	648	589	545	502	407	234						
1.4		695	614	556	503	370	162							
1.6		676	585	520	384	147								
1.8		654	557	447	195									
2		630	527	312										
S275														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0.2		924	798	749	700	677	653	630	606	587	569	551	533	515
0.4		897	783	724	684	657	630	603	582	562	542	522	502	472
0.6		878	758	692	660	628	598	575	552	529	506	470	431	356
0.8		845	713	666	627	591	564	537	509	466	413	278		
1		795	681	632	588	555	521	474	403	250				
1.2		752	653	594	552	511	430	288	101					
1.4		698	620	562	511	403	213							
1.6		679	589	526	409	191								
1.8		658	562	465	230									
2		634	532	337										
S355														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0.2		926	799	750	702	678	654	631	608	588	571	553	535	517
0.4		899	786	727	686	660	633	607	585	566	546	526	506	479
0.6		881	762	694	663	632	602	579	556	534	511	481	442	404
0.8		851	719	669	631	595	569	542	515	479	428	329	144	
1		800	683	636	592	559	527	488	419	292	117			
1.2		757	656	597	556	516	444	318	143					
1.4		700	623	565	515	416	241	292	111					
1.6		681	591	530	422	216	217							
1.8		660	564	475	250	194								
2		636	535	351	395	171								
S420														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0.2		927	799	751	703	678	655	632	609	589	571	554	536	518
0.4		900	787	729	687	661	635	609	587	567	548	528	509	483
0.6		883	764	695	665	635	604	581	559	536	514	486	448	411
0.8		853	722	670	633	597	571	545	519	485	435	354	181	
1		803	685	638	594	562	530	495	426	312	145			
1.2		759	657	598	558	519	451	332	164					
1.4		702	625	567	518	423	255							
1.6		682	592	532	428	228								
1.8		661	566	481	260									
2		637	536	358	241									
S460														

5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE PROTECCIÓN

Los valores de referencia de las características térmicas de los diferentes materiales de protección – ver tabla 5 – pueden utilizarse para un cálculo aproximado del calentamiento del acero. Para el cálculo definitivo del espesor necesario de material de protección se utilizarán las propiedades obtenidas a partir de ensayos suministradas por el fabricante del mismo.

Tabla 5: Valores de referencia de las características térmicas de diferentes materiales de protección

Material de protección	ρ_p [kg/m³]	λ_p [W/mK]	c_p [J/kgK]
Proyectado, baja densidad:			
- fibras minerales	300	0,12	1200
- cemento y vermiculita o perlita	350	0,12	1200
Proyectado, alta densidad:			
- vermiculita o perlita con cemento	550	0,12	1100
- vermiculita o perlita con yeso	650	0,12	1100
Paneles o placas:			
- vermiculita o perlita con cemento	800	0,20	1200
- fibras de silicato (de calcio)	600	0,15	1200
- fibro-cemento	800	0,15	1200
- yeso	800	0,20	1700
Lana mineral, lana de roca	150	0,20	1200
Pintura intumescente	0	0,005 -0,012	0

6 SÍMBOLOS

α	Coefficiente de minoración de la longitud de pandeo de los soportes en caso de incendio
ε	Parámetro adimensional para inestabilidad local y global
ϕ	Inercia térmica relativa del material aislante
γ_M	Coefficiente parcial del material a temperatura ambiente = 1
$\gamma_{M,fi}$	Coefficiente parcial del material en caso de incendio = 1
κ	Coefficiente corrector de distribución no uniforme de temperatura
κ_1	Coefficiente corrector del gradiente de temperatura en la sección
κ_2	Coefficiente corrector del gradiente de temperatura a lo largo de la longitud del elemento
$\bar{\lambda}$	Esbeltéz relativa a temperatura ambiente
$\lambda_{fi,0}$	Esbeltéz relativa en caso de incendio para $t = 0$
λ_p	Conductividad térmica del material de protección [W/mK]
μ_0	Grado de utilización
μ_{pl}	Grado de utilización plástico
ρ_a	Densidad del acero = 7850 [kg/m³]
ρ_p	Densidad del material de protección [kg/m³]
θ_{cr}	Temperatura crítica [°C]
$\psi_{2,i}$	Coefficiente de minoración de la sobrecarga cuasi-permanente i
A	Superficie del perfil de acero expuesto al fuego [m²]
A_a	Área de la sección transversal del perfil de acero [m²]
$E_{fi,d}$	Efecto de cálculo de las acciones en caso de incendio
$G_{k,i}$	Valor característico de las cargas permanentes i
L_{cr}	Longitud de pandeo a temperatura ambiente [m]
$M_{fi,Ed}$	Valor de cálculo del momento flector solicitante en caso de incendio [kNm]
$M_{fi,Rd}$	Valor de cálculo del momento resistente en caso de incendio [kNm]
P	Factor de sección [m⁻¹]
P_{mod}	Factor de sección modificado para un perfil protegido [W/m³K]
$Q_{k,i}$	Valor característico de las sobrecargas variables i
R_d	Valor de cálculo de la resistencia a temperatura ambiente
$R_{fi,d,0}$	Valor de cálculo de la resistencia en caso de incendio para $t = 0$
V	Volumen del perfil de acero [m³]
b	Ancho del perfil [m]
c	Altura del alma para la clasificación de secciones [m]
c_a	Calor específico del acero ≈ 600 [J/kgK]
c_p	Calor específico del material de protección [J/kgK]
d	Diámetro del tubo [mm]
d_p	Espesor en seco del material de protección [m]
f_y	Límite elástico del acero a temperatura ambiente [N/mm²]
h	Altura o canto del perfil [m]
i	Radio de giro alrededor del eje débil o del eje principal [m]
$k_{E,\theta}$	Coefficiente de minoración del módulo de deformación en caso de incendio
$k_{p,\theta}$	Coefficiente de minoración del límite de proporcionalidad en caso de incendio
$k_{y,\theta}$	Coefficiente de minoración del límite elástico en caso de incendio
l_{fi}	Longitud de pandeo en caso de incendio [m]
n	Número de plantas que solicitan el soporte
$q_{fi,Ed}$	Sobrecarga lineal uniformemente repartida en caso de incendio [kN/m]
t	Tiempo transcurrido desde el comienzo del incendio [min]
t	Espesor de la pared para la clasificación de la sección [m]

7 REFERENCIAS

- EN 10025-1: 2005, *Hot rolled products of structural steels - Part 1: General technical delivery conditions*, CEN, Bruxelles, Belgique
- EN 1990: 2005, *Eurocode 0: Basis of design*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1991-1-2: 2002, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1991-1-3: 2003, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1993-1-1: 2005, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- EN 1993-1-2: 2005, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*, CEN, Bruxelles, Belgique.
- ISO 834: 1999, *Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements*, ISO, Genève, Suisse.

8 CONTACTO

APTA Asociación para la Promoción Técnica del Acero
 Paseo de la Castellana 135, 3º B. 28046, Madrid
info@apta.org.es www.apta.org.es



9 EJEMPLOS DE CÁLCULO

9.1 Viga isostática

Datos: Viga IPE300 de acero S235 sobre la que apoya un forjado colaborante de un edificio de oficinas. Su momento plástico a temperatura ambiente es $M_{fi,0,Rd} = 147,7 \text{ kNm}$. La viga está protegida por una pintura intumescente de 1 mm de espesor en seco. La luz de la viga es 6 m. La distancia entre ejes de vigas es 3 m. La carga permanente del forjado es $G_k = 3 \text{ kN/m}^2$. El peso propio de la viga es 0,4 kN/m. El valor recomendado en el Eurocódigo 1 para las sobrecargas variables en un edificio de oficinas es $Q_k = 3 \text{ kN/m}^2$.

Se pide: Determinar la resistencia al fuego de la viga.

9.1.1 Cálculo simplificado

Etapas 1: Determinar el grado de utilización. La aproximación más sencilla y del lado de la seguridad es adoptar $\mu_0 = 0,65$.

Etapas 2: Determinar el coeficiente de corrección κ . La parte superior del alma está comprimida pero al estar arriostrada por la losa del forjado no se considera riesgo de pandeo lateral. Por tanto podemos aplicar los coeficientes κ . Para una viga isostática protegida y con una losa de hormigón en su cara superior:

$$\kappa = 0,85.$$

Etapas 3: Determinar la temperatura crítica en la figura 2.

$$\theta_{cr} = 573 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Etapas 4: Determinar el factor de sección P en la tabla 6. Para una protección que se ajusta al contorno del perfil y losa en la cara superior, se obtiene $P = 188 \text{ m}^{-1}$.

Etapas 5: Corregir el factor de sección, con $\lambda_p = 0,01 \text{ W/mK}$. La inercia térmica de la pintura intumescente es despreciable ($\phi = 0$).

Etapas 6: Determinar gráficamente en la figura 2 el tiempo en que se alcanza la temperatura crítica: $t = 50 \text{ min}$. Por tanto la viga satisface una resistencia al fuego R30.

9.1.2 Cálculo más preciso

Etapas 1: Determinar el grado de utilización:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

La sobrecarga en caso de incendio es:

$$q_{fi,Ed} = 1,0 \cdot (3 \cdot 3 + 0,4) + 1,0 \cdot 0,3 \cdot 3 \cdot 3 = 12,1 \text{ kN/m}$$

$$M_{fi,Ed} = \frac{1}{8} \cdot 12,1 \cdot 6^2 = 54,5 \text{ kNm}$$

$$\mu_0 = \frac{54,5}{147,7} = 0,37$$

Etapas 2: Ver 9.1.1: $\kappa = 0,85$.

Etapas 3: Ver figura 2: $\theta_{cr} = 665 \text{ }^\circ\text{C}$.

Etapas 4 y 5: Ver 9.1.1: $P_{mod} = 1880 \text{ W/m}^3\text{K}$.

Etapas 6: El tiempo en que se alcanza la temperatura crítica es $t = 66 \text{ min}$. La viga satisface una resistencia al fuego R60.

9.2 Viga hiperestática

Datos: La misma viga del ejemplo 9.1, pero hiperestática.

Se pide: Determinar el espesor necesario de material de protección (placas de silicato de calcio) para obtener una resistencia al fuego de 120 minutos.

Etapas 1: Aproximadamente el momento flector es:

$$M_{fi,Ed} = \frac{1}{12} \cdot 12,1 \cdot 6^2 = 36,3 \text{ kNm}$$

Se obtiene por tanto $\mu_0 = 36,3 / 147,7 = 0,25$.

Etapas 2: Se trata de una viga hiperestática protegida con calentamiento en tres caras, por tanto $\kappa = 0,85 \cdot 0,85 = 0,7$.

Etapas 3: Ver figura 2: $\theta_{cr} = 748 \text{ }^\circ\text{C}$

Etapas 4: Para una disposición rectangular del material de protección, la tabla 6 indica $P = 139 \text{ m}^{-1}$.

Para satisfacer R120, se necesita un factor de sección modificado $P_{mod} = 1350 \text{ W/m}^3\text{K}$ (ver figura 2). Para una primera aproximación se desprecia la inercia térmica del material de protección ($\phi = 0$). Con $\lambda_p = 0,15 \text{ W/mK}$, se necesita un espesor:

$$d_p = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{P_{mod}} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 139 \cdot \frac{0,15}{1350} \cdot \frac{1}{1 + 0} = 15,4 \text{ mm}$$

Si tenemos en cuenta la inercia térmica del material de protección, con $d_p = 15,4 \text{ mm}$ y los valores de la tabla 5, se obtiene:

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V} = \frac{600 \cdot 1200}{600 \cdot 7850} \cdot 0,0154 \cdot 139 = 0,33$$

Con este valor se obtiene un espesor mínimo:

$$d_p = 15,4 / (1 + 0,33 / 3) = 13,9 \text{ mm}$$

9.3 Viga hiperestática no protegida

Datos: La misma viga del apartado 9.2 pero sin proteger y de acero de calidad superior.

Se pide: Comprobar si la viga satisface R30.

Etapas 1: Al utilizar acero S355, el grado de utilización se modifica:

$$\mu_0 = 235 / 355 \cdot 0,25 = 0,16$$

Etapas 2: Se trata de una viga hiperestática sin proteger con calentamiento en tres caras, por tanto:

$$\kappa = 0,7 \cdot 0,85 = 0,6$$

Etapas 3: Ver figura 2: $\theta_{cr} = 825 \text{ }^\circ\text{C}$.

Etapas 4: Se utiliza como referencia el factor de sección de perfil con protección rectangular:

$$P = 139 \text{ m}^{-1}$$

Etapas 5: El factor de sección de un perfil en I sin proteger debe reducirse con un coeficiente de 0,9: $P = 0,9 \cdot 139 = 125 \text{ m}^{-1}$.

Etapas 6: La resistencia al fuego es 32 minutos (figura 2). Por tanto la viga satisface R30.

9.4 Soporte sometido a esfuerzo axial

Datos: Soporte HEA 200 de acero S235, sometido exclusivamente a esfuerzos axiales. El radio de giro alrededor del eje débil es $i = 49,8 \text{ mm}$ y el área de la sección transversal es $A_a = 5383 \text{ mm}^2$. El soporte está protegido por placas de yeso de 20 mm de espesor. La altura de la planta es 3 m. La capacidad portante del soporte a temperatura ambiente vale $R_d = 962 \text{ kN}$. Se considera un soporte continuo de una planta intermedia del edificio. El soporte sustenta 5 plantas y en cada extremo del mismo se dispone la viga del ejemplo 9.1.

Se pide: Determinar la resistencia al fuego del soporte.

9.4.1 Método simplificado mediante aproximación del grado de utilización

Etapas 1: Determinar el grado de utilización. La relación entre sobrecargas y cargas permanentes Q_k / G_k es:

$$Q_k / G_k = (3 \cdot 3) / (3 \cdot 3 + 0,4) \approx 1.$$

La tabla 2 indica que en este caso las sollicitaciones en caso de incendio se minoran con $\mu_0 = 0,53$, valor conservador del lado de la seguridad.

Etapas 2: Determinar el coeficiente de corrección. Para un soporte situado en una planta intermedia, la longitud de pandeo puede reducirse a la mitad: $\alpha = 0,5$.

Etapas 3: Determinar la temperatura crítica en la figura 2.

$$\theta_{cr} = 560 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Etapas 4: Determinar el factor de sección. Para un perfil con protección rectangular, se obtiene de la tabla 6: $P = 145 \text{ m}^{-1}$.

Etapas 5: Corregir el factor de sección:

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V} = \frac{800 \cdot 1700}{600 \cdot 7850} \cdot 0,02 \cdot 145 = 0,84$$

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 145 \cdot \frac{0,2}{0,02} \cdot \frac{1}{1 + 0,84/3} = 1134 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Etapas 6: Determinar gráficamente en la figura 2 la resistencia al fuego: $t = 70 \text{ minutos}$. El soporte satisface R60.

9.4.2 Método simplificado mediante cálculo del grado de utilización

Etapas 1: Sobre el soporte cargan $5 \cdot 2 = 10$ vigas, descritas en el apartado 9.1.

$$E_{fi,d} = 10 \cdot 12,1 \cdot 6 / 2 = 363 \text{ kN}$$

Se calcula el grado de utilización para poder aplicar las curvas de la figura 2 ($\alpha = 0,5 / 0,7$ y 1):

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_d = 363 / 962 = 0,38$$

Etapas 2: Ver 9.4.1: $\alpha = 0,5$.

Etapas 3: Ver figura 2: $\theta_{cr} = 618 \text{ }^\circ\text{C}$.

Etapas 4 y 5: Ver 9.4.1: $P_{mod} = 1134 \text{ W/m}^3\text{K}$.

Etapas 6: La resistencia al fuego es 83 minutos. El soporte satisface por tanto R60.

9.4.3 Método avanzado

Etapas 1: Determinar el grado de utilización plástico:

$$\mu_{pl} = E_{fi,d} / (A_a \cdot f_y) = 363 / (5383 \cdot 235) = 0,29$$

Etapas 2: Calcular la esbeltez a tiempo $t = 0$:

$$\bar{\lambda}_{fi,0} = \alpha \cdot \bar{\lambda} = \alpha \cdot \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{93,9 \cdot \sqrt{235/f_y}} = 0,5 \cdot \frac{3000}{49,8} \cdot \frac{1}{93,9} = 0,32$$





Etapas 3: Determinar la temperatura crítica en la tabla 4:

$$\theta_{cr} = 639 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Etapas 4 y 5: Ver 9.4.1: $P_{mod} = 1134 \text{ W/m}^3\text{K}$.

Etapas 6: La resistencia al fuego es 88 minutos. El soporte satisface por tanto R60.

Tabla 6: Factores de sección para perfiles de acero. Para los perfiles en I y en H sin protección, los valores de la tabla para los perfiles con protección rectangular deben multiplicarse por un coeficiente de 0,9.

																			
HEAA					HEA					HEB					HEM				
100	181	288	245	353	100	137	217	185	264	100	115	180	154	219	100	65	97	85	116
120	182	296	247	361	120	137	221	185	268	120	106	168	141	203	120	61	92	80	111
140	172	282	233	343	140	129	207	174	251	140	98	156	130	189	140	58	89	76	107
160	150	244	203	296	160	120	193	161	235	160	88	140	118	170	160	54	83	71	100
180	141	230	190	279	180	115	186	155	225	180	83	132	110	159	180	52	80	68	96
200	130	211	175	256	200	108	175	145	212	200	77	122	102	147	200	49	76	65	91
220	122	200	165	243	220	99	162	134	196	220	72	115	97	139	220	47	73	62	88
240	114	185	154	225	240	91	147	122	178	240	68	108	91	130	240	39	61	52	73
260	108	175	146	213	260	88	141	117	170	260	66	105	88	127	260	39	60	51	72
280	104	168	139	204	280	84	136	113	165	280	64	102	85	123	280	38	58	50	70
300	97	159	131	192	300	78	126	105	153	300	60	96	80	116	300	33	50	43	60
320	95	152	127	184	320	74	117	98	141	320	58	91	77	110	320	33	50	43	60
340	94	147	123	177	340	72	112	94	135	340	57	88	75	106	340	34	50	43	60
360	92	142	120	170	360	70	107	91	128	360	56	86	73	102	360	34	51	44	61
400	90	135	115	161	400	68	101	87	120	400	56	82	71	98	400	36	52	45	61
450	90	132	114	156	450	66	96	83	113	450	55	79	69	93	450	38	53	47	63
500	91	130	113	152	500	65	92	80	107	500	54	77	67	89	500	39	54	48	63
550	88	123	108	143	550	65	90	79	104	550	55	76	67	87	550	41	56	50	64
600	88	120	106	138	600	65	89	79	102	600	56	75	67	86	600	42	57	51	65
650	88	118	105	135	650	65	87	78	100	650	56	74	66	85	650	44	58	52	66
700	86	114	102	129	700	64	85	76	96	700	55	72	65	82	700	45	59	53	67
800	84	108	98	122	800	66	84	76	94	800	57	72	66	81	800	48	61	55	68
900	81	102	93	113	900	65	81	74	90	900	57	70	65	78	900	50	62	57	69
1000	79	98	90	108	1000	66	81	74	89	1000	58	70	65	78	1000	52	64	59	70
IPE					IPE A					IPE O					HL				
80	270	369	330	429	80	317	429	389	502	180	168	228	202	262	1000 AA	71	93	83	105
100	247	334	300	388	100	286	393	349	456	200	158	212	190	244	1000 A	58	76	68	86
120	230	315	279	363	120	271	368	329	426	220	149	200	179	230	1000 B	51	66	59	74
140	215	290	259	335	140	260	356	314	411	240	139	185	167	213	1000 M	46	60	54	67
160	200	268	241	309	160	245	333	295	383	270	127	170	152	195	1000 x 477	40	52	47	58
180	188	254	226	292	180	227	306	274	352	300	121	162	145	186	1000 x 554	35	45	41	51
200	176	235	211	270	200	210	281	253	324	330	114	153	137	175	1000 x 642	31	39	36	44
220	165	222	198	255	220	192	258	231	297	360	107	142	127	163	1000 x 748	27	34	31	38
240	153	204	184	235	240	178	240	214	276	400	103	135	122	154	1100 A	59	76	68	85
270	147	197	176	226	270	171	231	205	266	450	94	121	110	138	1100 B	52	67	60	75
300	139	188	167	216	300	160	217	192	249	500	89	114	104	129	1100 M	47	61	55	68
330	131	174	157	200	330	149	199	178	228	550	85	107	98	121	1100 R	42	53	48	59
360	122	162	146	186	360	138	184	165	211	600	73	93	85	104					
400	116	153	137	174	400	133	175	158	200										
450	110	144	130	163	450	127	165	149	187										
500	104	133	121	151	500	118	152	138	172										
550	97	124	113	140	550	111	142	129	160										
600	91	115	105	129	600	103	131	119	147										
750 x 137	101	129	116	144															
750 x 147	94	120	109	134															
750 x 173	81	102	93	114															
750 x 196	72	91	83	102															
UPE					L					HD					HE				
80	209	291	258	341	90 x 90 x 9	143	168	201	226	260 x 54.1	108	175	146	213	400 x 299	31	45	40	53
100	204	278	248	322	100 x 100 x 8	159	187	223	251	260 x 68.2	88	141	117	170	400 x 347	28	40	35	47
120	195	259	233	298	100 x 100 x 10	129	151	181	204	260 x 93	66	105	88	127	400 x 403	25	35	31	41
140	187	247	223	282	100 x 100 x 12	109	128	153	172	260 x 114	55	86	73	104	400 x 468	22	31	27	36
160	180	235	212	267	110 x 110 x 10	128	151	180	203	260 x 142	46	71	60	85	450 x 312	33	46	40	53
180	173	225	203	254	110 x 110 x 12	108	127	152	171	260 x 172	39	60	51	72	450 x 368	28	39	35	46
200	165	213	193	240	120 x 80 x 8	174	201	225	252	260 x 225	31	47	40	56	450 x 436	25	34	30	40
220	155	198	180	223	120 x 80 x 10	141	163	183	204	260 x 299	25	37	32	44	450 x 519	22	29	26	34
240	148	188	171	211	120 x 120 x 11	117	138	164	185	320 x 74.2	95	152	127	184	500 x 320	34	47	41	54
270	142	178	163	199	120 x 120 x 12	108	127	151	170	320 x 97.6	74	117	98	141	500 x 379	29	40	36	47
300	124	153	141	171	120 x 120 x 13	100	118	141	158	320 x 127	58	91	77	110	500 x 451	25	34	31	40
330	113	138	128	153	120 x 120 x 15	88	103	123	138	320 x 158	48	74	63	89	500 x 534	22	30	27	35
360	107	130	121	144	130 x 130 x 12	107	126	150	170	320 x 198	39	60	51	73	550 x 330	35	48	42	55
400	100	120	112	133	140 x 140 x 13	99	116	139	157	320 x 245	33	50	43	60	550 x 393	30	41	37	47
					150 x 90 x 10	143	164	182	203	320 x 300	28	42	36	50	550 x 466	26	35	32	40
					150 x 90 x 11	131	150	166	185	320 x 368	24	35	30	42	550 x 552	23	30	28	35
					150 x 100 x 10	139	161	180	203	320 x 451	20	29	26	35	600 x 340	36	48	43	55
					150 x 100 x 12	117	136	152	170	360 x 134	63	104	85	125	600 x 402	31	42	38	48
					150 x 150 x 12	106	125	149	168	360 x 147	58	95	78	114	600 x 477	27	36	32	41
					150 x 150 x 14	92	108	129	145	360 x 162	53	87	71	105	600 x 564	24	31	28	35
					150 x 150 x 15	86	101	121	136	360 x 179	49	79	65	95	650 x 347	38	49	45	56
					150 x 150 x 18	73	85	102	115	360 x 196	45	72	60	87	650 x 410	33	42	39	48
					160 x 160 x 15	86	101	121	136	400 x 187	47	78	64	94	650 x 487	28	36	33	42
					160 x 160 x 17	76	90	107	121	400 x 216	42	68	56	82	650 x 579	24	31	29	36
					180 x 180 x 16	74	95	107	128	400 x 237	38	63	52	76	700 x 356	39	50	46	57
					180 x 180 x 18	66	85	96	114	400 x 262	35	57	47	69	700 x 421	34	43	39	49
					200 x 100 x 10	147	167	181	201	400 x 287	32	52	43	63	700 x 500	29	37	34	42
					200 x 100 x 12	124	140	153	169	400 x 314	30	48	40	58	700 x 594	25	32	29	36
					200 x 100 x 14	107	121	132	146	400 x 347	28	44	37	53	800 x 377	41	51	47	58
					200 x 200 x 16	80	95	112	127	400 x 382	25	40	34	49	800 x 448	35	44	40	49
					200 x 200 x 20	65	77	91	10										

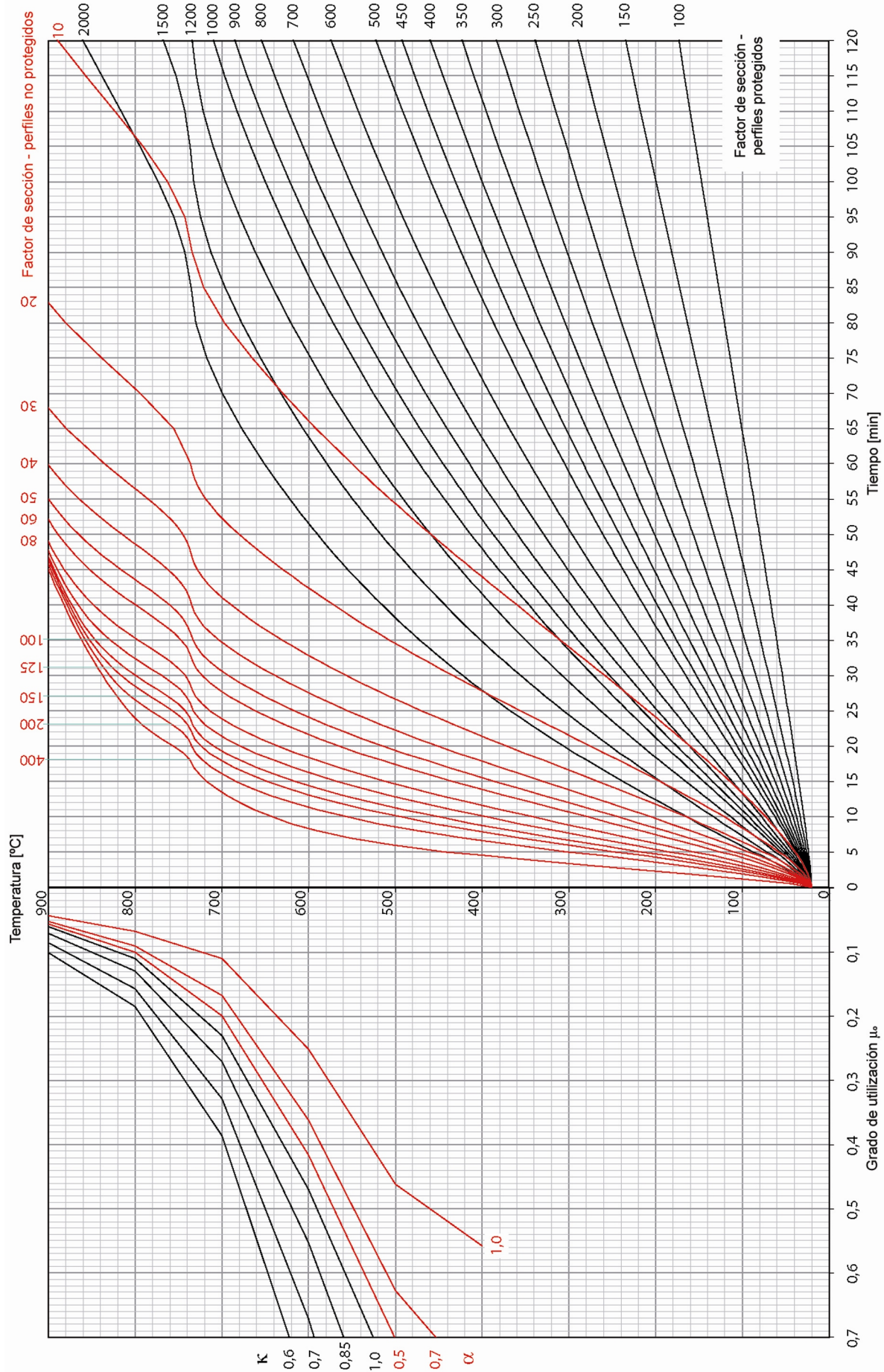


Figura 2: Nomogramas para determinar la temperatura crítica y la resistencia al fuego.