LOCAFI+

Evaluación de la temperatura de un elemento vertical sometido a un fuego localizado
Difusión
Grant Agreement n° 754072

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.1. Procedimiento general

Paso 1 : Definición de la carga térmica

Paso 2 : Análisis térmico

Paso 3 : Análisis mecánico

El procedimiento general se realiza paso a paso (Paso 1 → Paso 2 → Paso 3) pero, con mayor precisión, el acoplamiento debería realizarse en las dos direcciones. De no considerarse este doble acoplamiento, el ingeniero debe ser consciente de los condicionantes asociados !

- Las deformaciones/desplazamientos de los elementos estructurales pueden influir en el desarrollo del fuego
- Las deformaciones/desplazamientos de un elemento estructural pueden influir sobre su exposición térmica
- El aumento de temperatura en los elementos puede influir sobre la energía absorbida por los muros/techos
- La plasticidad y la fisuración pueden inducir la generación de calor o de pérdidas de calor…

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.2. Definición del escenario de incendio

6.2.1. Fuego de sector

- Curva de fuego normalizada (ISO-834, hidrocarburos,…)
- Curva de fuego natural (curva paramétrica según el Anexo A del EN 1991-1-2, software OZone basado en los Anexos D y E del EN 1991-1-2)

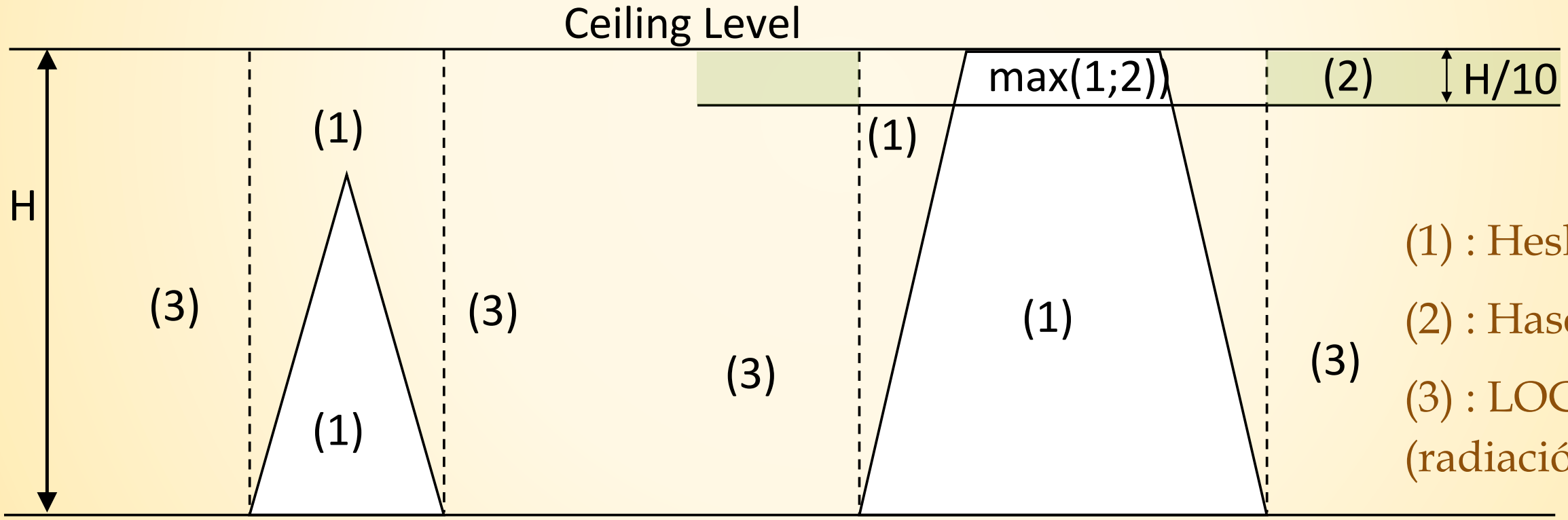
6.2.2. Fuego localizado

- Escenario de incendio definido por el ingeniero/autoridades (diámetro, RHR)

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.2. Definición del escenario de incendio

6.2.2. Fuego localizado



(1) : Heskestad

(2) : Hasemi

(3) : LOCAFI (radiación)

6.3. Análisis térmico

6.3.1. Temperatura estacionaria

La temperatura estacionaria θ es la temperatura a la cual el flujo absorbido se equilibra con los flujos emitido (convectivo y radiativo)

$$0 = \underbrace{\alpha_c(\theta - 20)}_{\text{Flujo neto por convección emitido}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Flujo neto por radiación emitido}} - \underbrace{\varepsilon * \dot{h}_{m,r}}_{\text{Flujo absorbido}} \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

En el caso de un fuego de sector, el flujo incidente medio por radiación $\dot{h}_{m,r}$ se debe reemplazar por $\dot{h}_{m,tot}$, incluyendo los flujos de radiación y convección.

$$\dot{h}_{m,tot} = min\left(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000\right) \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

El enfoque simplificado desprecia la inercia térmica del elemento.

6.3. Análisis térmico

6.3.2. Proceso incremental (temperatura uniforme)

La temperatura del elemento se calcula estableciendo el balance térmico del mismo:

$$\rho_a c_a(T)\frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V}\left[\varepsilon * \dot{h}_{m,r} + \alpha_c(20-\theta) + \varepsilon\left(\sigma(293^4 - (\theta+273)^4)\right)\right]$$

$\rho_a, c_a, y\, A_m/V$ son la densidad [kg.m^{-3}], calor específico [J.kg^{-1}.K^{-1}] y masividad [m^{-1}] del elemento

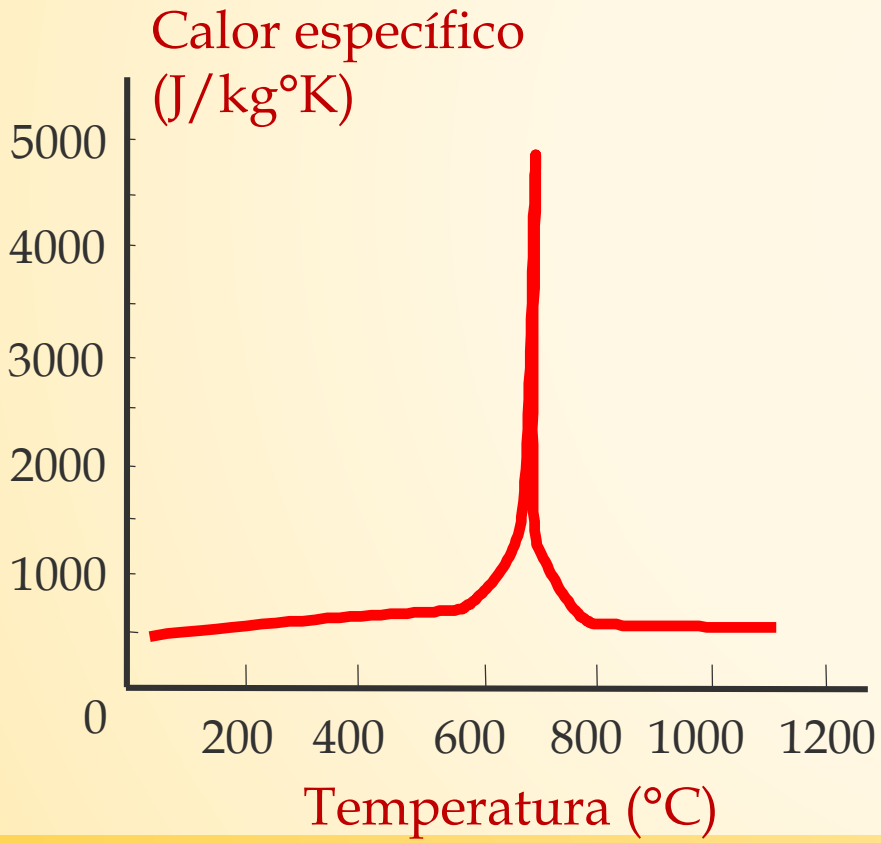
El EN 1993-1-2 impone que el paso de tiempo Δt no sea superior a 5 segundos

En el caso de fuego de sector, el flujo por radiación medio incidente $\dot{h}_{m,r}$ se debe reemplazar por $\dot{h}_{tot}$, incluyendo los flujos convectivo y radiativo.

$$\dot{h}_{m,tot} = min\left(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000\right) \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

6.3. Análisis térmico

6.3.2. Proceso incremental (temperatura uniforme)



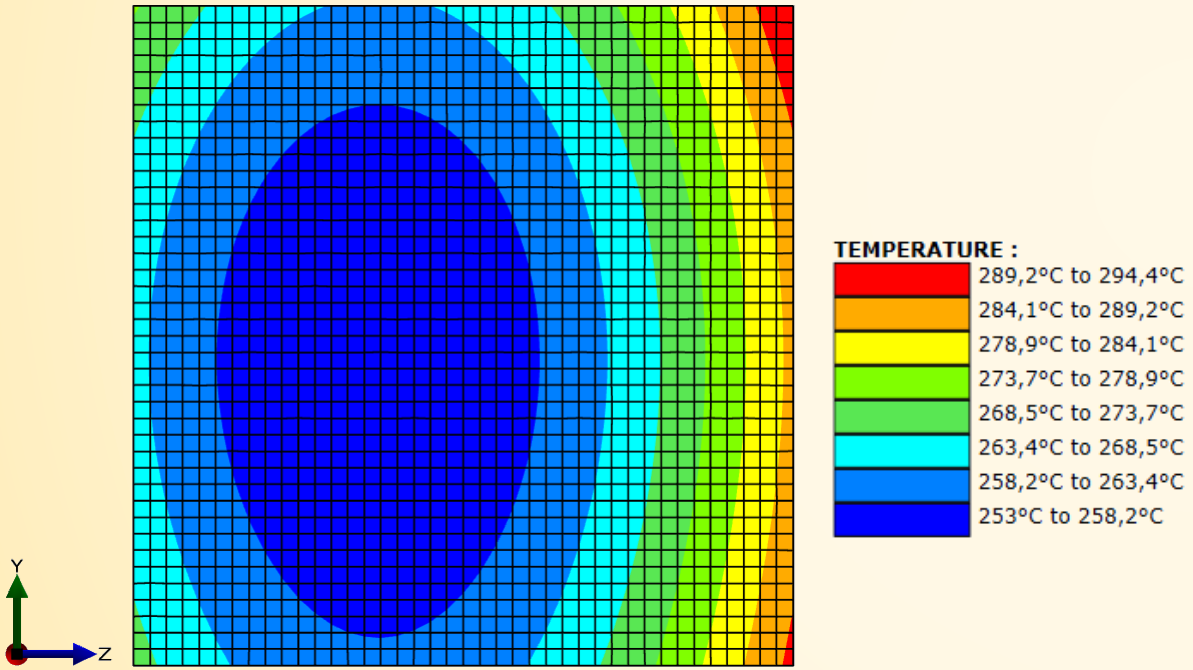
Densidad del acero: 7850 kg/m^3

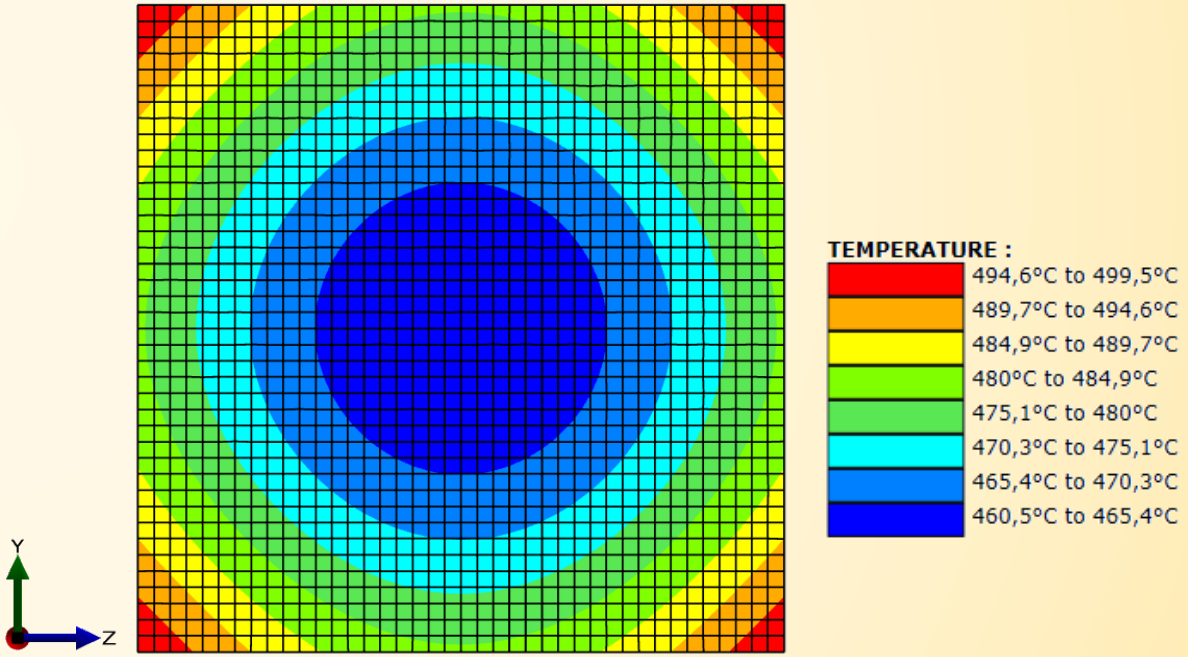
Independiente de la temperatura

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.3. Análisis térmico

6.3.3. Análisis térmico mediante MEF (temperatura no uniforme)





Distribución de temperatura [°C] tras 33 minutos para una columna de 3.36 [m] de altura con una sección cuadrada de 130[mm]x130[mm] rodeada por 3 coches y 1 furgoneta, a una altura de: a) 0.94[m] ; b) 3.1[m]

6.4. Análisis térmico

6.4.1. Reglas generales del EN 1993-1-2

En estructuras de acero, sólo la función portante R queda cubierta por las reglas de cálculo de la parte de fuego del Eurocódigo 3

La función portante de una estructura queda satisfecha sólo si durante el tiempo de exposición al fuego t

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

donde $E_{fi,d,t}$: efecto de cálculo de las acciones (Eurocódigos 0 y 1)

$R_{fi,d,t}$: resistencia de cálculo de la estructura en el instante t

6.4. Análisis mecánico

6.4.1. Reglas generales del EN 1993-1-2

Combinación ELU

$$E_d = 1.35*\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5*Q_{k,1} + 1.5*\sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i}\, Q_{k,i}$$

Combinación accidental

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Nota : Dependiendo del país, se debe emplear $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$.

Acciones	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Categoría A : vivienda, zonas residenciales	0.7	0.5	0.3
Categoría B : zonas de oficinas	0.7	0.5	0.3
Categoría C : zonas de pública concurrencia	0.7	0.7	0.6
Categoría D : zonas comenciales	0.7	0.7	0.6
Categoría E : zonas de almacenamiento	1	0.9	0.8
…	…	…	…

6.4. Análisis mecánico

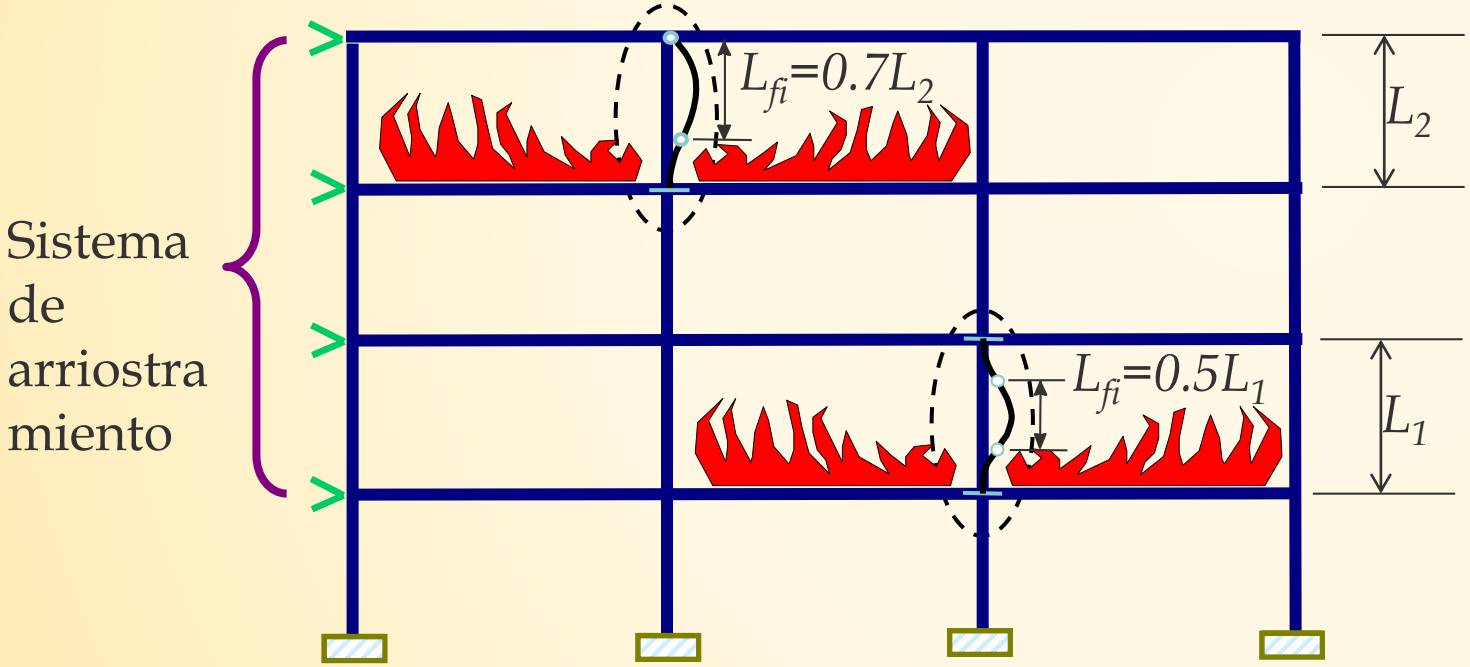
6.4.1. Reglas generales del EN 1993-1-2

Coeficientes parciales del acero a temperatura elevada

Tipo de elemento	Cálculo en frío	Cálculo en fuego
Secciones	$\gamma_{M0} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Elementos con inestabilidad	$\gamma_{M1} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Elementos a tracción	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Uniones	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$

6.4. Análisis mecánico

6.4.1. Reglas generales del EN 1993-1-2



Condiciones:

- Estructuras arriostradas
- Columnas continuas en sus extremos
- Misma resistencia al fuego R entre columnas y elementos horizontales

6.4. Análisis mecánico

6.4.1. Reglas generales del EN 1993-1-2

Verificación de la resistencia al fuego según uno de los 3 métodos siguientes:

Temperatura : $\theta_{cr,d} \geq \theta_d$

El método más simple y más comunmente empleado, válido sólo para Tª uniforme

Capacidad portante: $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

Cálculo a mano factible (capacidad reducida para el tiempo requerido)

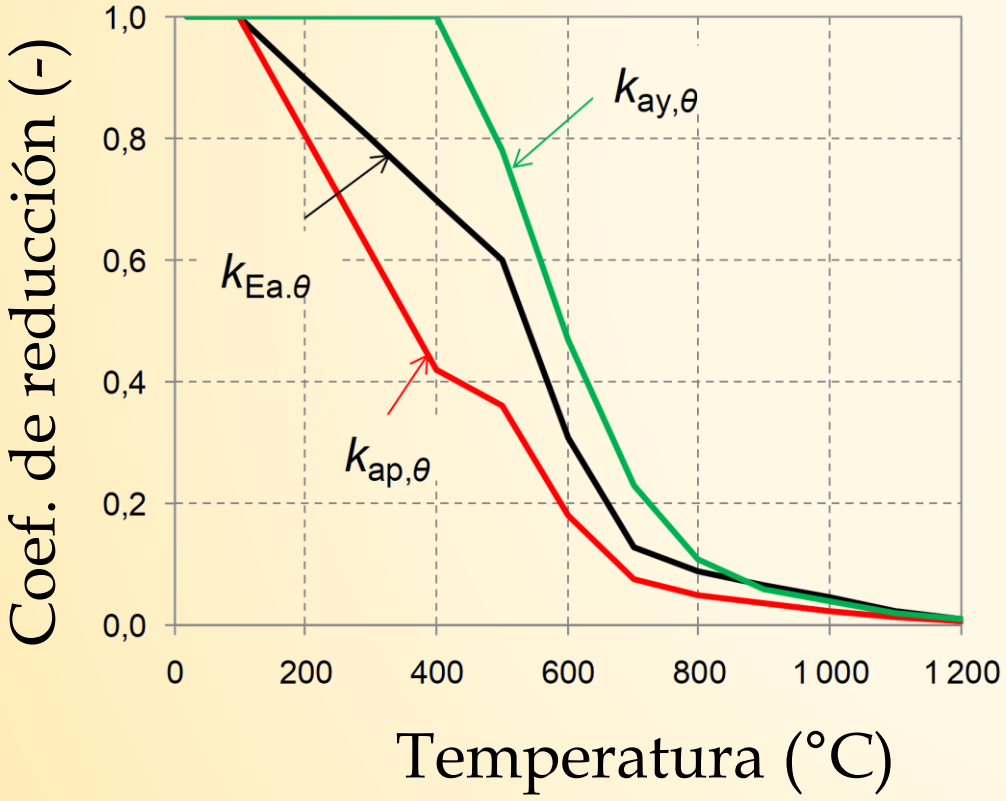
Tiempo: $t_{fi,d} \geq t_{fi,requerido}$

Sólo factible empleando herramientas avanzadas, como Modelos de Elementos Finitos

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2



Temperatura

$k_{y,\theta}$: reducción del límite elástico

$k_{E,\theta}$: reducción del módulo de Young

$k_{p,\theta}$: reducción del límite de proporcionalidad

La versión actual del EN 1993-1-2 es de aplicación para grados de acero entre S235 y S460

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Temperatura

Combinación de acciones accidental

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Nota : Dependiendo del país, se debe emplear $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$.

$$E_d = 1.35 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5 * Q_{k,1} + 1.5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i}\, Q_{k,i}$$

Factor de reducción para el nivel de carga:

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d,t}}{E_d}$$

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Temperatura

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{2.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}}$$

Note : Dependiendo del país, se debe emplear $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$.

Factor de reducción para el nivel de carga

En cálculo estructural en situación accidental

γ_{GA} = 1.0 Cargas permanentes;

$\psi_{2.1}$ = 0.3 Coef. de combinación; cargas variables, oficinas

Cálculo de ELU a temperatura ambiente

γ_G = 1.35 Cargas permanentes;

$\gamma_{Q.1}$ = 1.50 Coef. de combinación; cargas variables

$Q_{k,1}/G_k$	η_{fi}
0	0.74
1	0.53
2	0.46
4	0.41

El EN 1993-1-2 recomienda η_{fi} = 0.65 (salvo Categoría E, η_{fi} = 0.7)

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Temperatura

Combinación de acciones accidental

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Nota : Dependiendo del país, se debe emplear $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$.

Factor de reducción para el nivel de carga:

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} < \eta_{fi}$$

Resistencia de cálculo a temperatura ambiente

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Temperatura

Grado de utilización

$$\mu_0 = \left(\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} \right) = \eta_{fi,t} \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right)$$

- Tiene en cuenta los coeficientes parciales de seguridad a Tª ambiente y a Tª elevada (normalmente ambos valen 1.0)
- Permite un cálculo directo de la Tª crítica
- Si el modo de fallo incluye inestabilidades, se require la esbeltez adimensional

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Temperatura

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
μ_0											
0.04	1000	977	949	913	880	839	787	742	696	678	659
0.06	900	885	866	837	795	756	700	679	656	630	602
0.08	860	839	811	785	749	697	674	647	616	588	564
0.10	820	797	780	752	703	677	648	614	585	557	527
0.12	792	777	755	719	685	656	622	588	559	526	474
0.14	775	757	730	694	668	636	597	567	533	487	373
0.16	758	737	705	681	652	615	580	546	507	408	
0.18	742	717	691	668	636	596	563	524	453		
0.20	725	698	680	655	619	582	545	503	384		
0.22	708	689	669	641	603	568	528	457			
0.24	696	679	658	628	591	554	511	406			
0.26	688	670	647	615	579	540	485				
0.28	679	660	636	602	568	526	446				
…	…	…	…	…	…	…	…				

La temperatura crítica tabulada para los elementos de acero sustepcibles de experimentar inestabilidades se basa en:

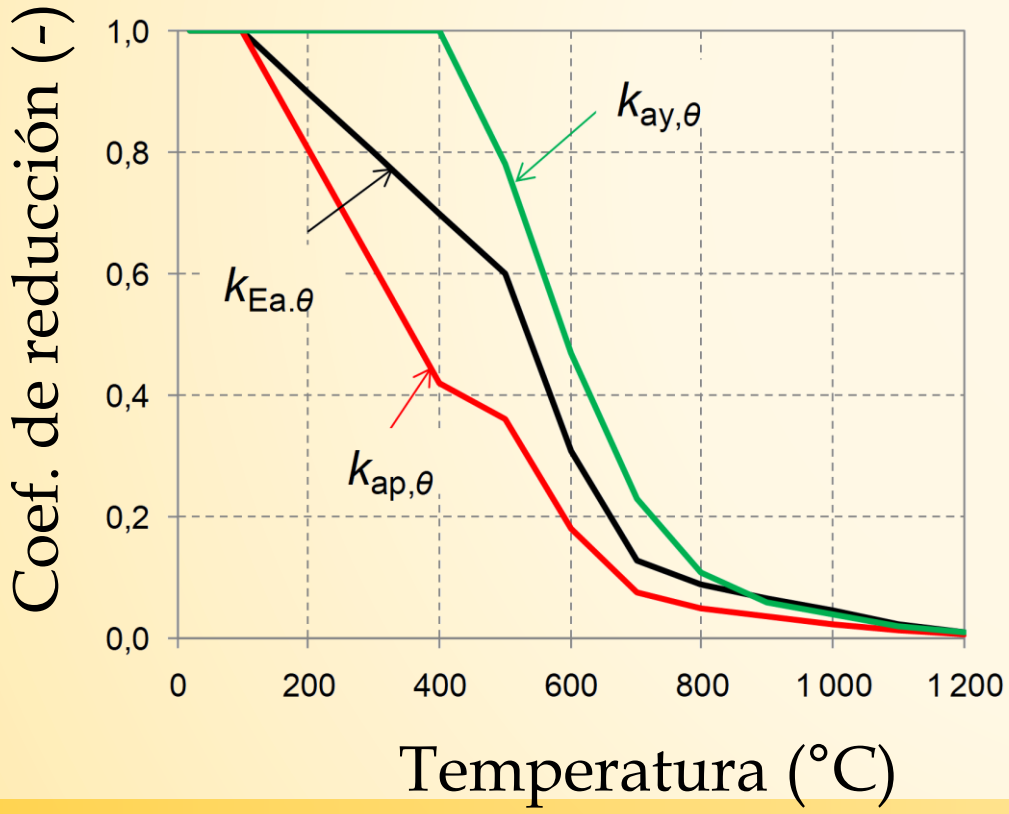
- Esbeltez adimensional en el instante 0
- Grado de utilización

  $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$
- Tablas propias para cada grado de acero

6. Síntesis Resistencia frente al fuego

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2



Capacidad portante

$k_{y,\theta}$: reducción del límite elástico

$k_{E,\theta}$: reducción del módulo de Young

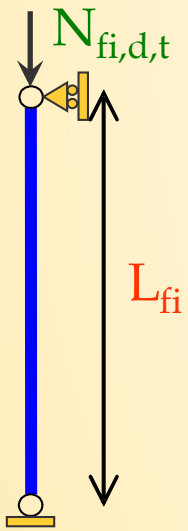
$k_{p,\theta}$: reducción del límite de proporcionalidad

La versión actual del EN 1993-1-2 es de aplicación para grados de acero entre S235 y S460

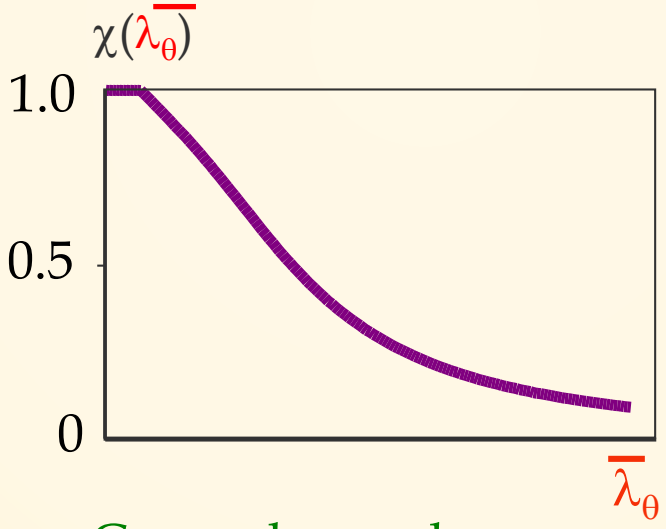
6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Capacidad portante



Sección y temperatura



Curva de pandeo

$$\alpha = 0.65\sqrt{\frac{235}{f_y}} \qquad \overline{\lambda_\theta} = \overline{\lambda}\sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha\overline{\lambda_\theta} + \overline{\lambda_\theta}^2\right]$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \overline{\lambda_\theta}^2}}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi}\, A\, k_{y,\theta}\, f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

6.4. Análisis mecánico

6.4.2. Verificación analítica de la columna según el EN 1993-1-2

Capacidad portante

Combinación de acciones accidental

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

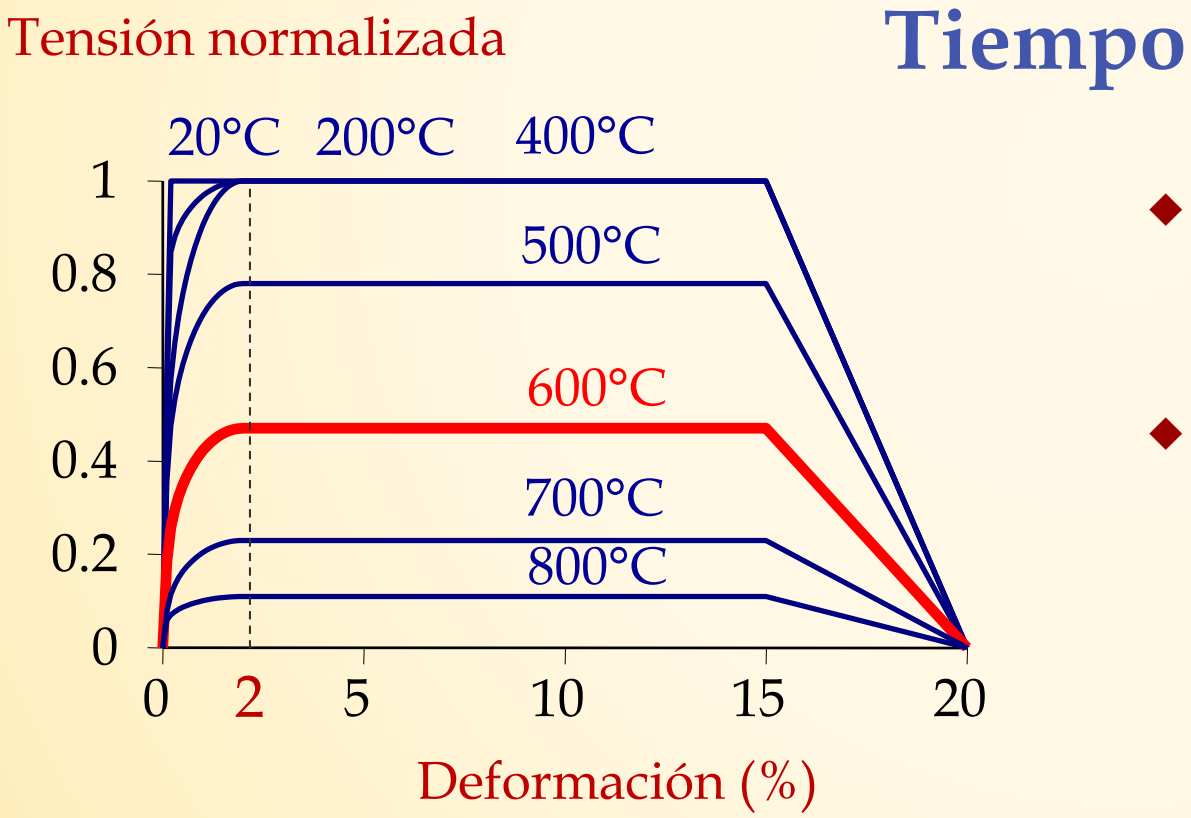
Nota : Dependiendo del país, se debe emplear $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$.

Criterio de diseño

$$\mathbf{R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}}$$

6.4. Análisis mecánico

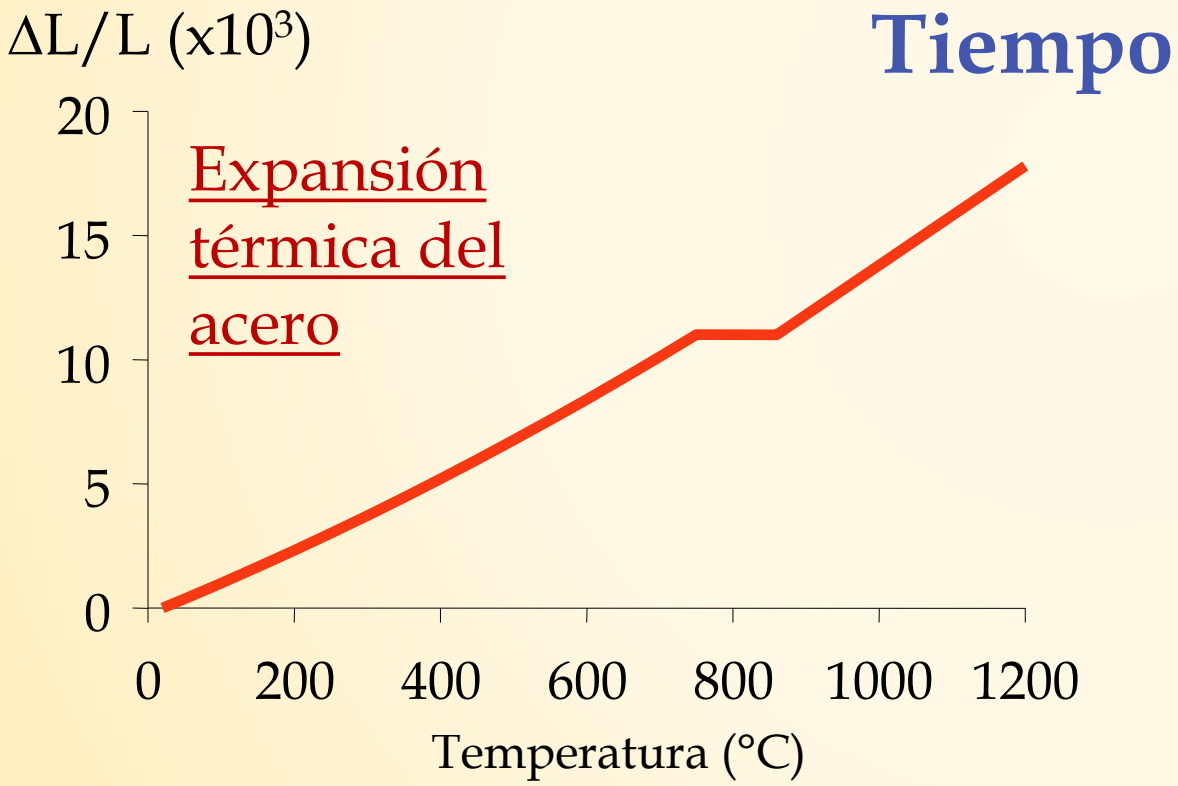
6.4.3. Análisis por elementos finitos



- El diagrama tensión-deformación del acero es no lineal (rama elástica, parabólica, meseta, rama descendiente)
- Límite elástico a 600°C reducido un 50%

6.4. Análisis mecánico

6.4.3. Análisis por elementos finitos

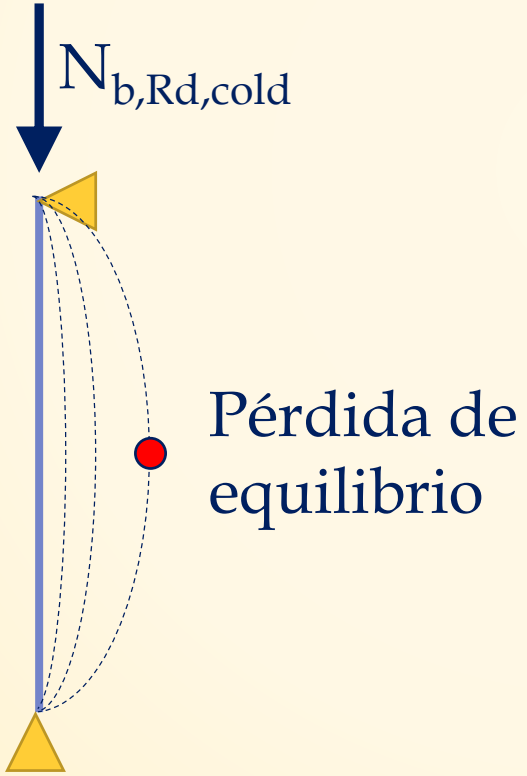


6.4. Análisis mecánico

6.4.3. Análisis por elementos finitos

<u>Cálculo en frío</u>

- Imperfección inicial
- Aumento de la carga hasta el fallo



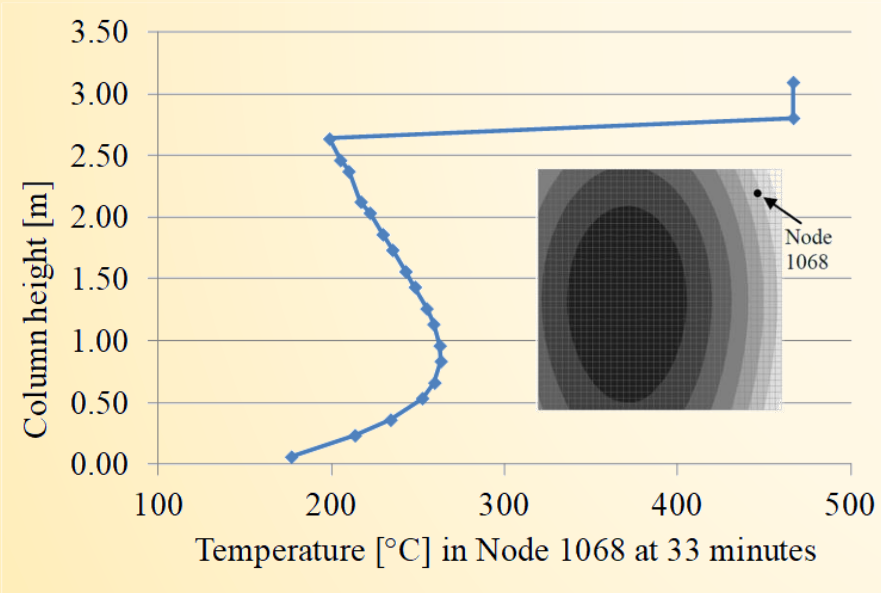
<u>Cálculo en fuego</u>

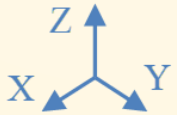
- Imperfección inicial
- Carga inicial
- Aumento de la temperatura hasta el fallo

6.4. Análisis mecánico

6.4.3. Análisis por elementos finitos

Tiempo





Izquierda: Distribución de temperatura en el Nodo 1068 tras 33 minutos a lo largo de una columna de 3.36 [m] de altura con una sección cuadrada de 130[mm]x130[mm] rodeada por 3 coches y 1 furgoneta

Derecha: Deformada en el instante de fallo (factor de escala 1) de una columna de 3.36[m] de altura con una sección cuadrada de 130[mm]x130[mm] rodeada por 3 coches y 1 furgoneta