



LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAlised Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

6. Síntese da resistência ao fogo

6. Síntese da resistência ao fogo

6.1. Procedimento Geral

Passo 1: Definição da carga térmica

Passo 2: Análise térmica

Passo 3: Análise mecânica

O procedimento geral é passo a passo (Passo 1 → Passo 2 → Passo 3) mas, mais precisamente, a conexão deve ser nas duas direções. Se estas duas conexões não forem consideradas, o engenheiro deve estar ciente dos pressupostos associados!

- As deflexões/deslocamentos de um elemento estrutural podem influenciar o desenvolvimento do fogo
- As deflexões/deslocamentos de um elemento estrutural podem influenciar a exposição térmica
- A elevação de temperatura nos elementos pode influenciar a absorção de energia absorvida em paredes/pavimentos
- A plasticidade e fissuração podem induzir geração ou perda de calor
- ...

6. Síntese da resistência ao fogo

6.2. Definição do cenário de incêndio

6.2.1. Incêndios em compartimentos

- Curva de incêndio nominal (ISO-834, Hidrocarbonetos,...)
- Curva de incêndio natural (curva paramétrica de acordo com o Anexo A da NP EN 1991-1-2:2010, software OZone baseado na NP EN 1991-1-2:2010 Anexos D e E)

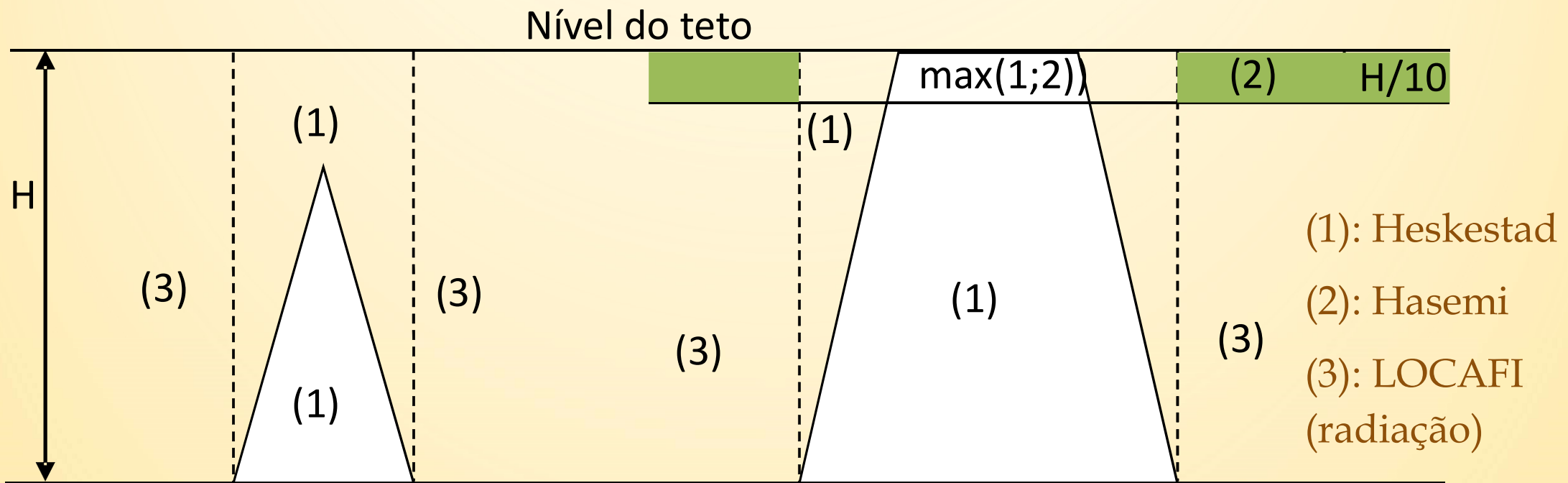
6.2.2. Incêndios localizados

- Cenário de incêndio definido pelo engenheiro/autoridades (diâmetro, RHR)

6. Síntese da resistência ao fogo

6.2. Definição do cenário de incêndio

6.2.2. Incêndio localizado



6. Síntese da resistência ao fogo

6.3. Análise térmica

6.3.1. Temperatura estacionária

A temperatura estacionária θ é a temperatura em que o fluxo absorvido é equilibrado pelo fluxo emitido (convectivo e radiação)

$$0 = \underbrace{\alpha_c(\theta - 20)}_{\text{Fluxo convectivo emitido}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Fluxo de radiação emitido}} - \underbrace{\varepsilon * \dot{h}_{m,r}}_{\text{Fluxo absorvido}}$$

No caso de incêndios em compartimentos, o fluxo incidente médio por radiação $\dot{h}_{m,r}$ deve ser substituído por $\dot{h}_{m,tot}$, incluindo os fluxos convectivos e por radiação.

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

Esta abordagem simplificada ignora a inércia térmica do elemento

6. Síntese da resistência ao fogo

6.3. Análise térmica

6.3.2. Procedimento incremental (temperatura uniforme)

A temperatura do elemento é calculada formulando-se o balanço térmico do elemento

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

ρ_a , c_a , e A_m/V são densidade [kg.m^{-3}], calor específico [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] e massividade [m^{-1}] do elemento

A NP EN 1993-1-2:2010 impõe que o passo de tempo Δt não seja superior a 5 segundos

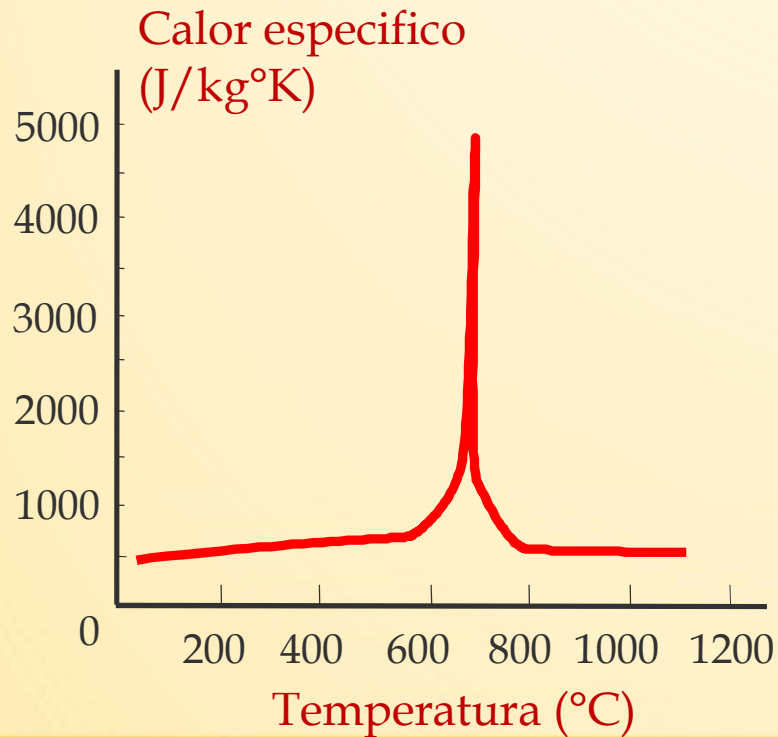
No caso de incêndios em compartimentos, o fluxo por radiação incidente médio $\dot{h}_{m,r}$ deve ser substituído por \dot{h}_{tot} , incluindo os fluxos convectivos e por radiação.

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

6. Síntese da resistência ao fogo

6.3. Análise térmica

6.3.2. Procedimento incremental (temperatura uniforme)



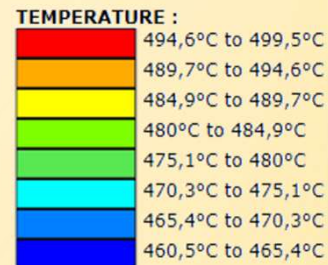
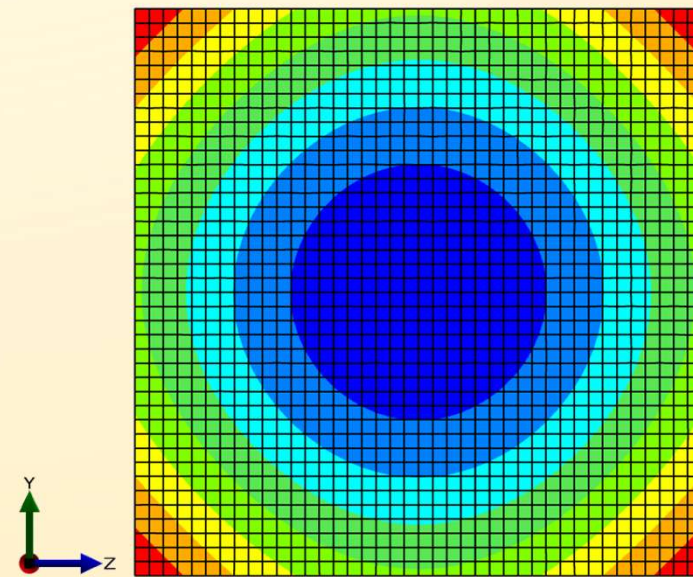
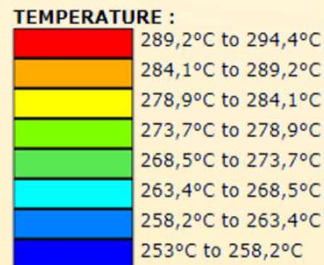
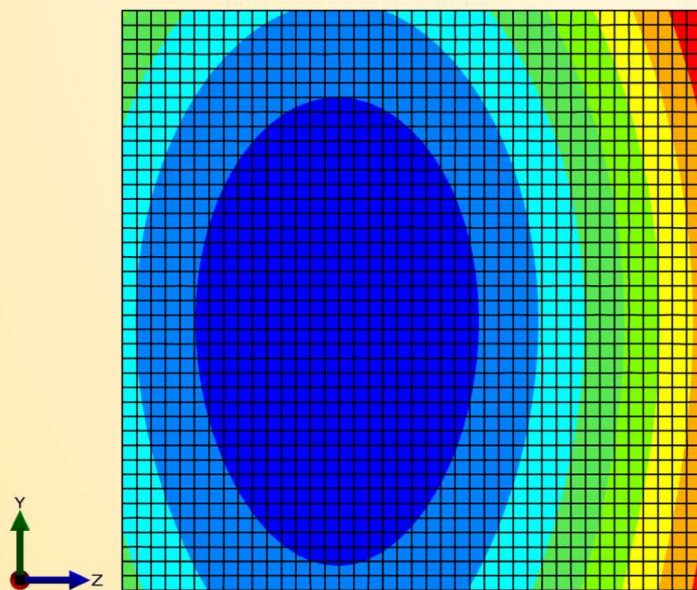
Massa volúmica do aço: 7850 kg/m³

Independente da temperatura

6. Síntese da resistência ao fogo

6.3. Análise térmica

6.3.3. Análise térmica de E.F. (temperatura não uniforme)



Distribuição de temperatura [°C] após 33 minutos para uma coluna de 3.36 [m] com uma secção transversal quadrada 130[mm]x130[mm] rodeada por 3 carros e uma 1 carrinha a a) uma altura de 0.94[m]; b) uma altura de 3.1[m]

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.1. Regras gerais da NP EN 1993-1-2:2010

As regras de dimensionamento de estruturas metálicas em situação de incêndio do Eurocódigo 3 apenas abrangem a função de resistência estrutural R

A função de resistência estrutural de uma estrutura apenas é garantida se durante a duração relevante de exposição ao fogo t

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

onde $E_{fi,d,t}$: efeito de cálculo das ações (Eurocódigos 0 e 1)
 $R_{fi,d,t}$: correspondente resistência de cálculo da estrutura no instante t

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.1. Regras gerais da NP EN 1993-1-2:2010

Combinação de ULS

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

Combinação de ACC

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

Nota: dependendo do país deve ser aplicado $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$.

Ações	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Categoria A : zonas de habitação	0.7	0.5	0.3
Categoria B : zonas de escritórios	0.7	0.5	0.3
Categoria C : zonas de reunião de pessoas	0.7	0.7	0.6
Categoria D : zonas comerciais	0.7	0.7	0.6
Categoria E : zonas de armazenamento	1	0.9	0.8
...

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.1. Regras gerais da NP EN 1993-1-2:2010

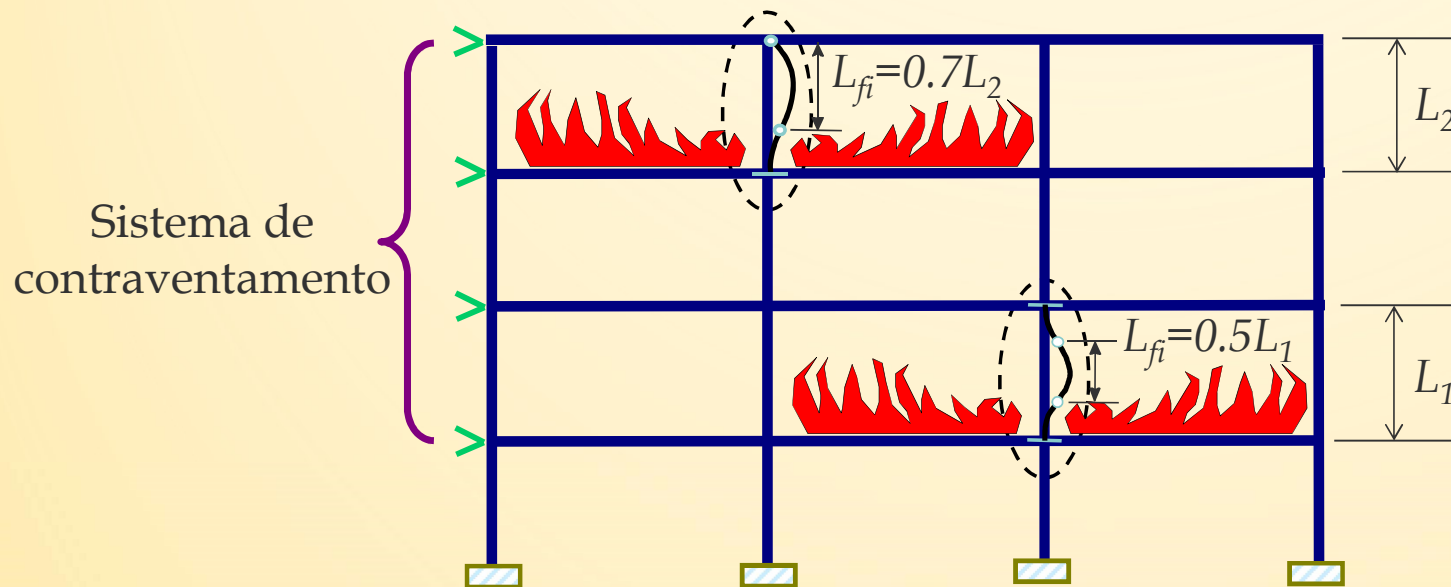
Fatores parciais do aço a elevadas temperaturas

Tipo de elementos	Dimensionamento à temperatura normal	Dimensionamento em situação de incêndio
Secções transversais	$\gamma_{M0} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Elementos sujeitos a instabilidade	$\gamma_{M1} = 1.0$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Elementos tracionados à rotura	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$
Ligações	$\gamma_{M2} = 1.25$	$\gamma_{M,fi} = 1.0$

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.1. Regras gerais da NP EN 1993-1-2:2010



Condições :

- Estruturas contraventadas
- Colunas contínuas ou extremidades
- A mesma resistência ao fogo R entre colunas e os pisos

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.1. Regras gerais da NP EN 1993-1-2:2010

Verificação da resistência ao fogo de acordo com um dos 3 métodos seguintes :

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

O método mais simples e mais usado, sendo apenas válido para temperatura uniforme T°

Capacidade de carga: $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

Viável para cálculo manual (capacidade reduzida no tempo requerido)

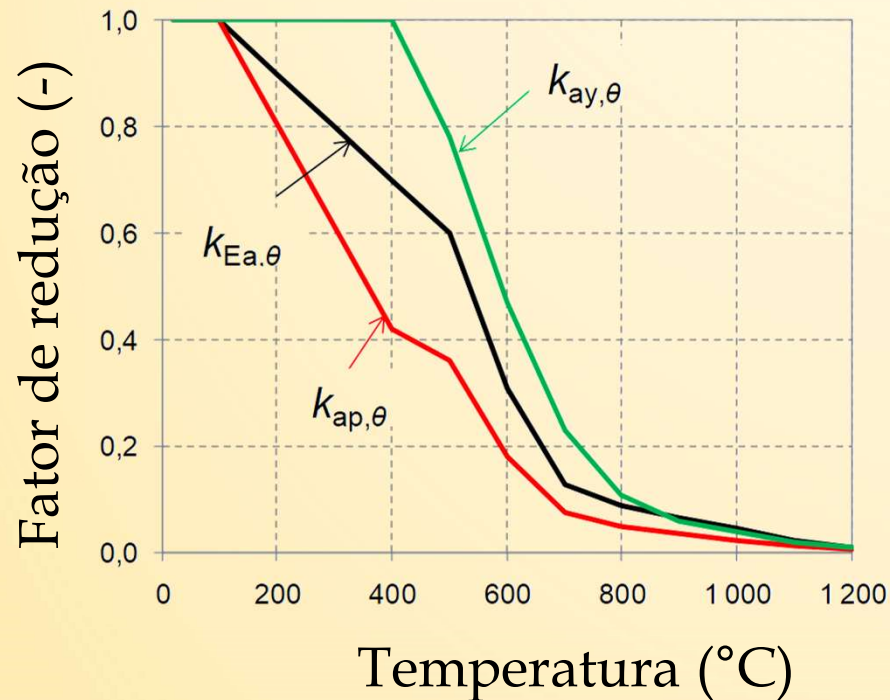
Tempo: $t_{fi,d} \geq t_{fi,required}$

Apenas é realizável utilizando-se ferramentas avançadas, como Modelos de Elementos Finitos

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010



Temperatura

$k_{y,\theta}$: redução da tensão de cedência efetiva

$k_{E,\theta}$: redução do módulo de Young

$k_{p,\theta}$: redução do limite de proporcionalidade

A atual versão da NP EN 1993-1-2:2010 aplica-se às classes de aço S235 a S460

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

Temperatura

Combinação de acidente

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

Nota: dependendo do país deve ser aplicado $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$.

Fator de redução para o nível de carregamento

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

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

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

Temperatura

Fator de redução para o nível de carregamento

Dimensionamento estrutural em situação de incêndio ACC

γ_{GA} = 1.0 Cargas permanentes;

$\psi_{2.1}$ = 0.3 Fator de combinação; cargas variáveis, escritórios

Dimensionamento à temperatura ambiente ELU

γ_G = 1.35 Cargas permanentes;

$\gamma_{Q.1}$ = 1.50 Fator de combinação; cargas variáveis

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

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

A NP EN 1993-1-2:2010 recomenda $\eta_{fi} = 0.65$ (exceto para a Categoria E, $\eta_{fi} = 0.7$)

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

Temperatura

Combinação de acidente

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

Nota: dependendo do país deve ser aplicado $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$.

Fator de redução para o nível de carregamento

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

Resistência de cálculo à temperatura ambiente

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

Temperatura

Grau de Utilização

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

- Representa os fatores de segurança parciais à temperatura normal e elevada temperatura (normalmente os dois são 1.0)
- Permite o cálculo direto da temperatura crítica θ
- No caso do modo de rotura incluir instabilidades, é necessário reduzir a esbelteza normalizada

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

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				
...				

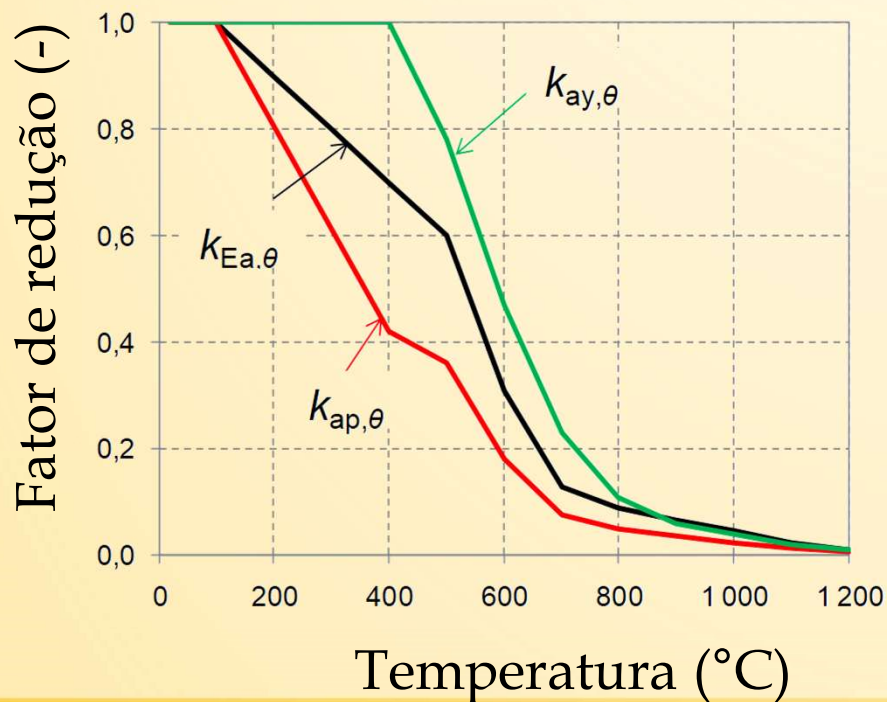
A temperatura crítica de elementos de aço sujeitos a instabilidade utilizando dados tabelados específicos baseia-se em:

- Esbelteza normalizada no instante 0
- e um nível de carga específico $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$
- cada classe de aço tem os seus próprios dados tabelados

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010



Capacidade de carga

$k_{y,\theta}$: redução da tensão de cedência efetiva

$k_{E,\theta}$: redução do módulo de Young

$k_{p,\theta}$: redução do limite de proporcionalidade

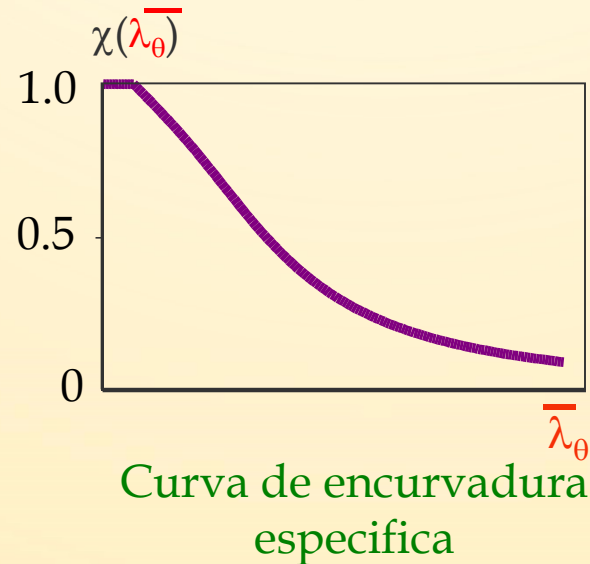
A atual versão da NP EN 1993-1-2:2010 aplica-se às classes de aço S235 a S460

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

Capacidade de carga



$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

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

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}}$$

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

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.2. Verificação analítica de coluna de acordo com a NP EN 1993-1-2:2010

Capacidade de carga

Combinação de acidente

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

Critério de dimensionamento

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

Nota: dependendo do país deve ser aplicado $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$.

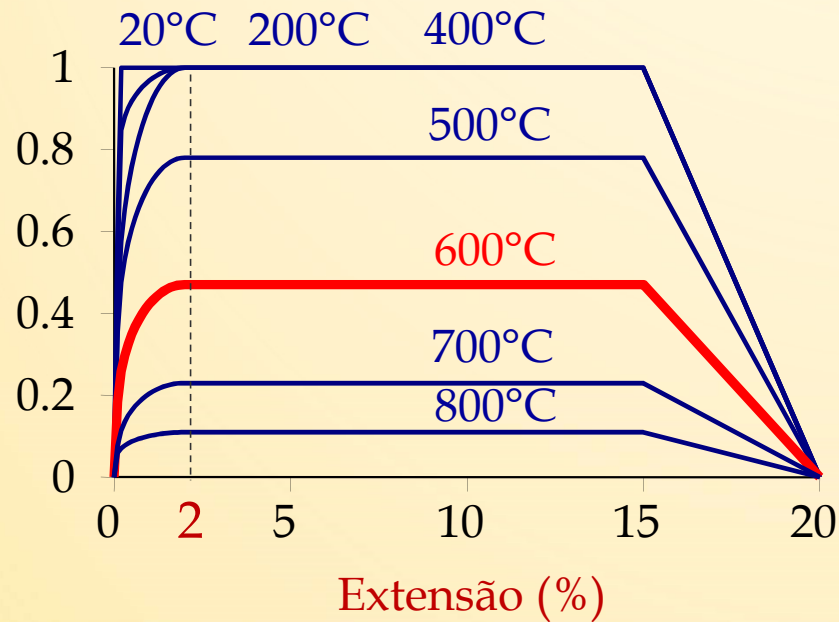
6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.3. Análise de elementos finitos

Tensão normalizada

Tempo

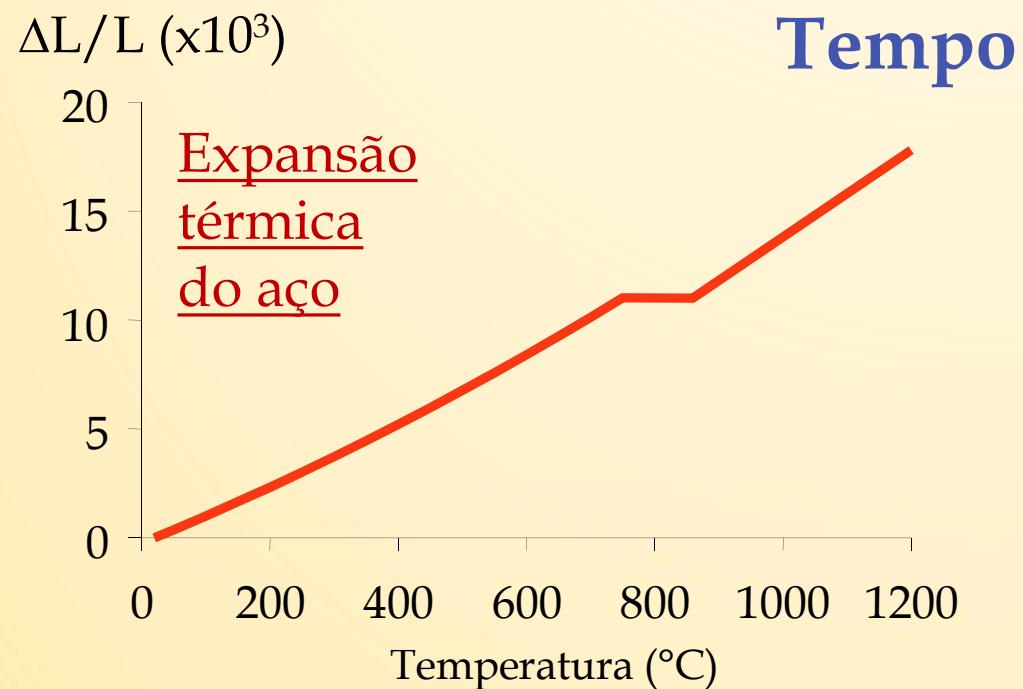


- ◆ O gráfico tensão-extensão do aço não é linear (elástico, parabólico, constante, ramo descendente)
- ◆ A tensão de cedência a 600°C reduz cerca de 50%

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.3. Análise de elementos finitos



6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.3. Análise de elementos finitos

Dimensionamento à temperatura normal

- Imperfeições iniciais
- Cargas aumentam até ao colapso



Dimensionamento em situação de incêndio

- Imperfeições iniciais
- Carga inicial
- Cargas aumentam até ao colapso

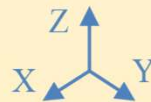
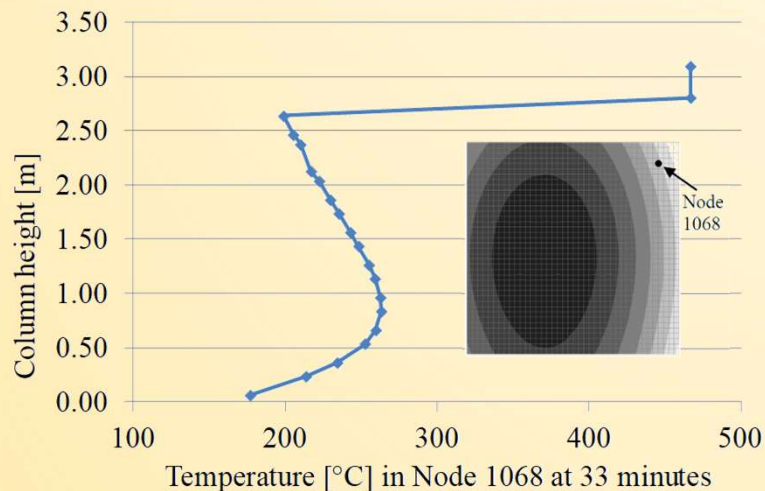


6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.3. Análise de elementos finitos

Tempo



Esquerda: Distribuição de temperatura no Nó 1068 após 33 minutos ao longo de uma coluna de 3.36 [m] com uma secção transversal quadrada com 130[mm]x130[mm] cercada por 3 carros e 1 carrinha

Direita: Forma do deslocamento no colapso (fator de escala 1) de uma coluna de 3.36[m] com uma secção transversal quadrada com 130[mm]x130[mm] cercada por 3 carros e 1 carrinha