



LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAlied Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

**1. Engenharia de Segurança Contra Incêndio:
contexto legal e documentos de referência**

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Quais os documentos de referência em Portugal?

- Documentos desenvolvidos a nível nacional → definição dos requisitos e métodos de cálculo que podem ser utilizados

<http://www.prociv.pt/pt->

[pt/SEGCINCENDEDEDIF/SEGURANCACONTRAINCENDIOSEDIFICIOS/Paginas/default.aspx](http://www.prociv.pt/pt-SEGCINCENDEDEDIF/SEGURANCACONTRAINCENDIOSEDIFICIOS/Paginas/default.aspx)

- Eurocódigo e Anexos Nacionais (NP EN 1991-1-2, NP EN 1992-1-2, NP EN 1993-1-2, NP EN 1994-1-2,...) → descrição dos métodos de cálculo

[IPQ, Instituto Português da Qualidade](#)

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

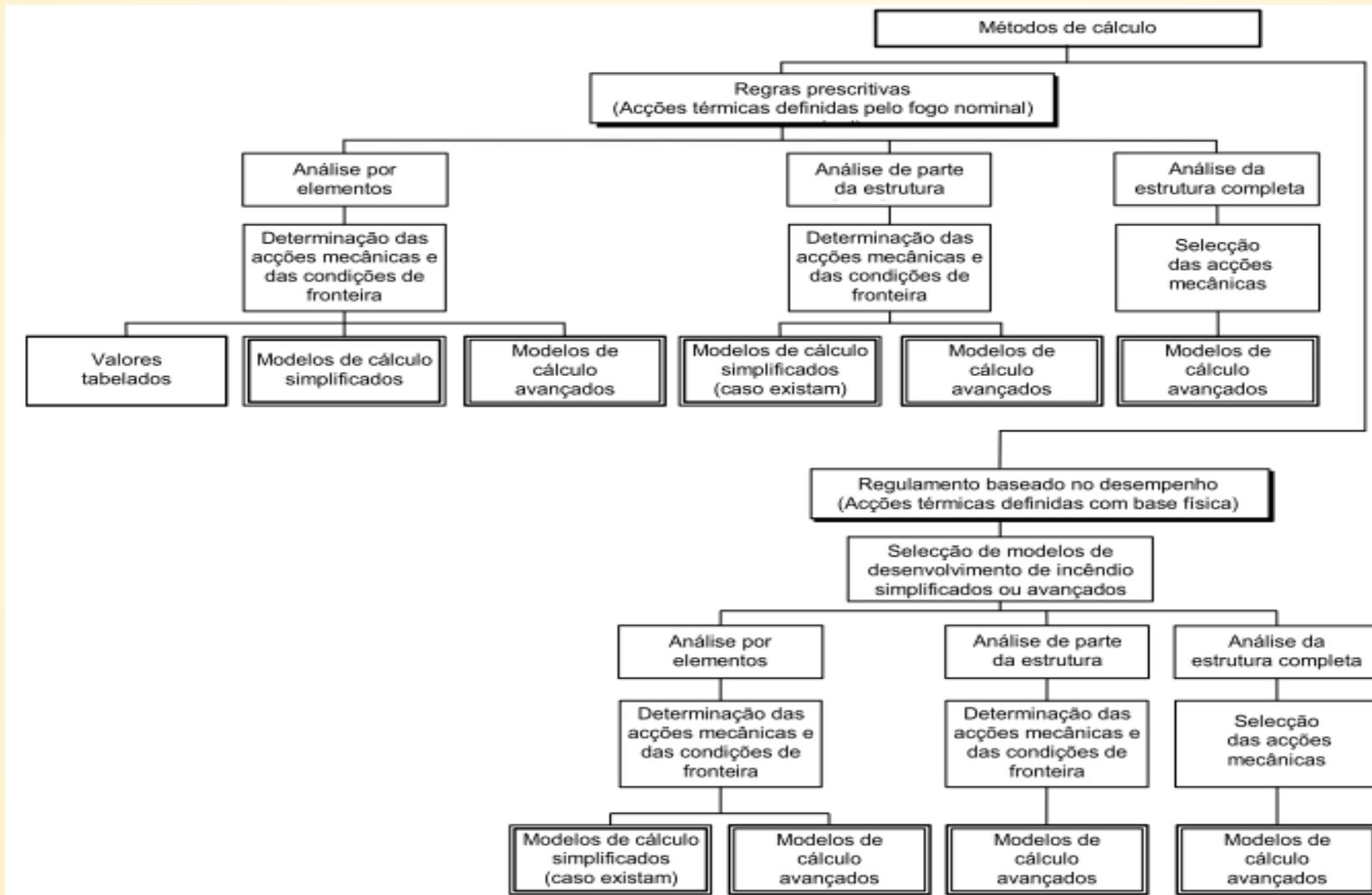
Abordagens de cálculo e modelos associados

Estabilidade ao fogo de uma estrutura		
Abordagem / Estrutura	Prescritiva	Baseada no desempenho
	Curva ISO 834 	Fogo natural 
Elemento 	Classificação	Engenharia de segurança estrutural ao fogo
Parte da estrutura 	Engenharia de segurança estrutural ao fogo	Engenharia de segurança estrutural ao fogo

(extraído e modificado de ITM-SST 1551.1)

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Abordagens de cálculo e modelos associados



(retirado da NP EN 1991-1-2)

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Regulamentação Nacional de Segurança contra Incêndios em Edifícios (SCIE)

Regime Jurídico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Decreto Lei nº 220/2008)

Decreto-Lei n.º 224/2015 - primeira alteração ao Decreto -Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, que aprova o regime jurídico da segurança contra incêndio em edifícios

Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Portaria n.º 1532/2008)

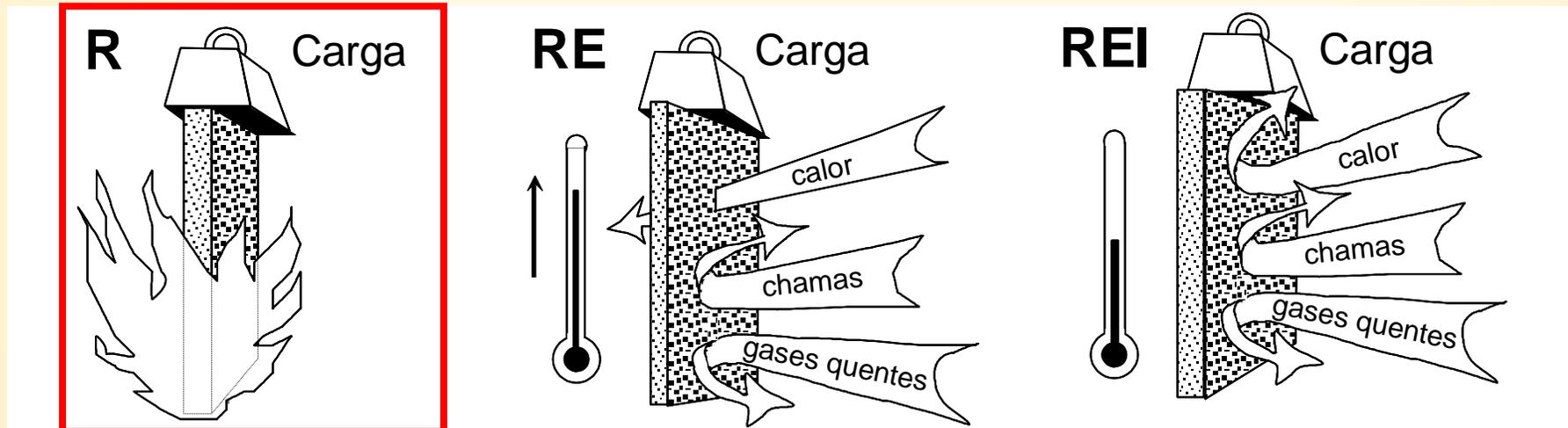
Critérios técnicos para determinação da densidade de carga de incêndio modificada (Despacho n.º 2074/2009)

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Qualificações de Resistência ao Fogo

□ Critérios de classificação

R – Resistência mecânica; **E** – Estanquidade; **I** – Isolamento térmico



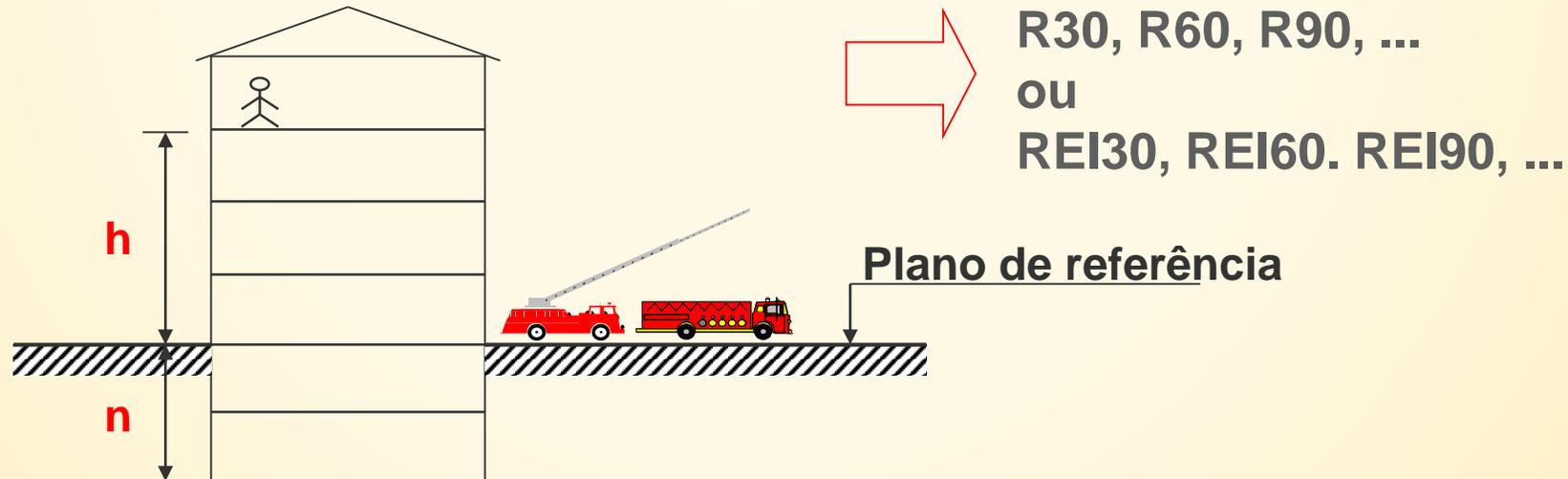
- Apenas capacidade de carga: critério R
- Capacidade de carga e compartimentação: critério R, E e quando requerido, I

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Abordagem prescritiva: Para cada utilização tipo (habitacionais, estacionamento, administrativos, escolares...)

□ Os fatores de risco são, entre outros:

- Altura do último piso ocupado do edifício (h) acima do plano de referência
- Número de pisos abaixo do plano de referência (n)
- Área bruta ocupada
- N° de ocupantes (efetivo)



1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Abordagem baseada no desempenho

- Abordagem baseada na definição de cenários de incêndio e tendo em conta parâmetros físicos: carga de incêndio, localização do fogo, dimensão do fogo, velocidade de propagação, condições de ventilação, características térmicas das paredes...
- Os parâmetros físicos devem ser selecionados de forma a serem representativos dos cenários mais desfavoráveis!
- Abordagem probabilística tendo em conta a probabilidade de ocorrência de um incêndio e a presença de medidas ativas de combate ao fogo.
- A aplicação desta abordagem é o âmbito Regulamento Técnico de SCIE (**Artigo 15º**)

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Portaria n.º 1532/2008)

- ❑ Resistência ao fogo de elementos estruturais e incorporados (Capítulo I)
 - Resistência ao fogo de elementos estruturais (Artigo 15º)

Consoante o seu tipo, os elementos estruturais de edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante todas as fases de combate ao incêndio, incluindo o rescaldo, ou, em alternativa, devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima indicada no quadro abaixo:

QUADRO IX

Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios

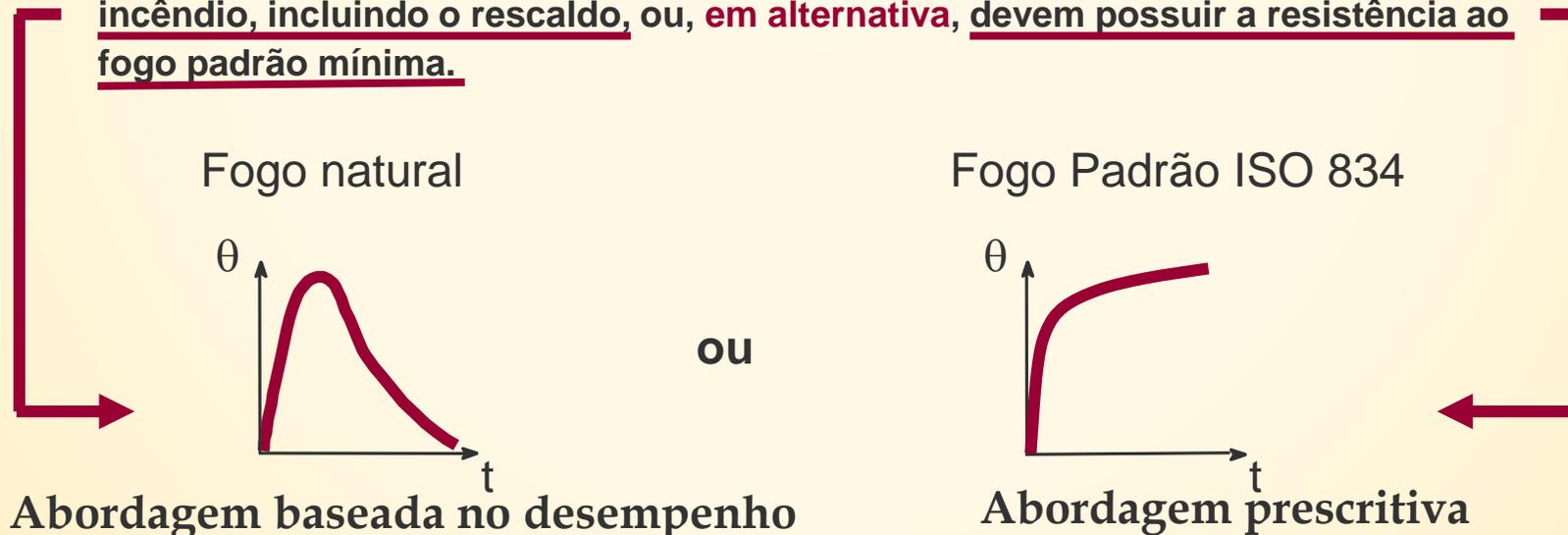
Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1.ª	2.ª	3.ª	4.ª	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X	R 30 REI 30	R 60 REI 60	R 90 REI 90	R 120 REI 120	Apenas suporte. Suporte e compartimentação.
II, XI e XII	R 60 REI 60	R 90 REI 90	R 120 REI 120	R 180 REI 180	Apenas suporte Suporte e compartimentação

1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Portaria n.º 1532/2008)

- Resistência ao fogo de elementos estruturais e incorporados (Capítulo I)
 - Resistência ao fogo de elementos estruturais (Artigo 15º)

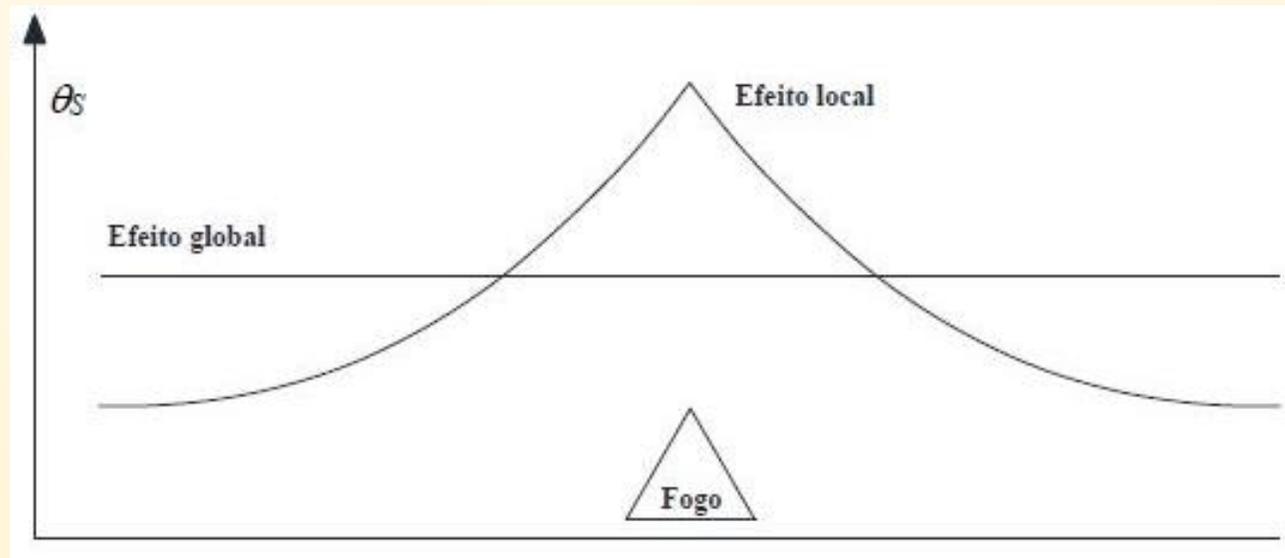
Consoante o seu tipo, os elementos estruturais de edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante todas as fases de combate ao incêndio, incluindo o rescaldo, ou, em alternativa, devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima.



1. Engenharia de segurança Contra Incêndio: Contexto legal e documentos de referência

Interação entre os efeitos locais e globais

- Os cenários de incêndio que não levam a uma conflagração generalizada devem ser analisados considerando os efeitos de incêndios localizados cuja posição levará aos efeitos mais desfavoráveis na estrutura.
- O Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010 indica as expressões a utilizar para determinar a ação térmica de um incêndio localizado num elemento estrutural.





LOCAFI+

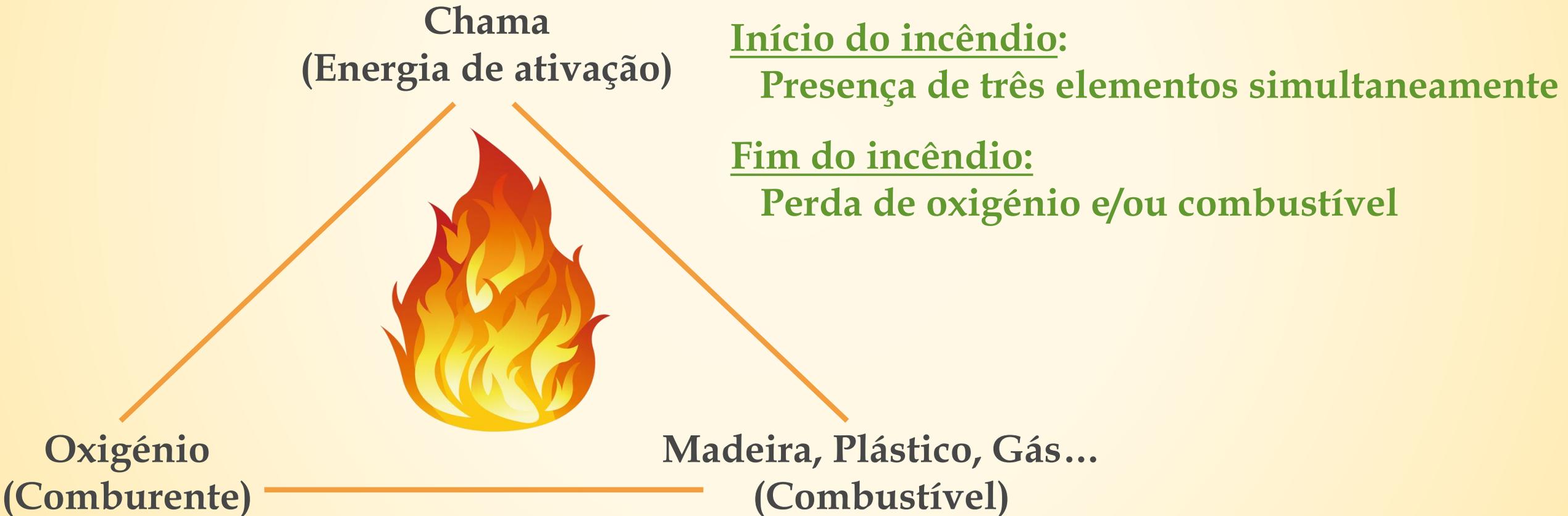
Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAIised Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

2. Estado de arte e justificação do projeto

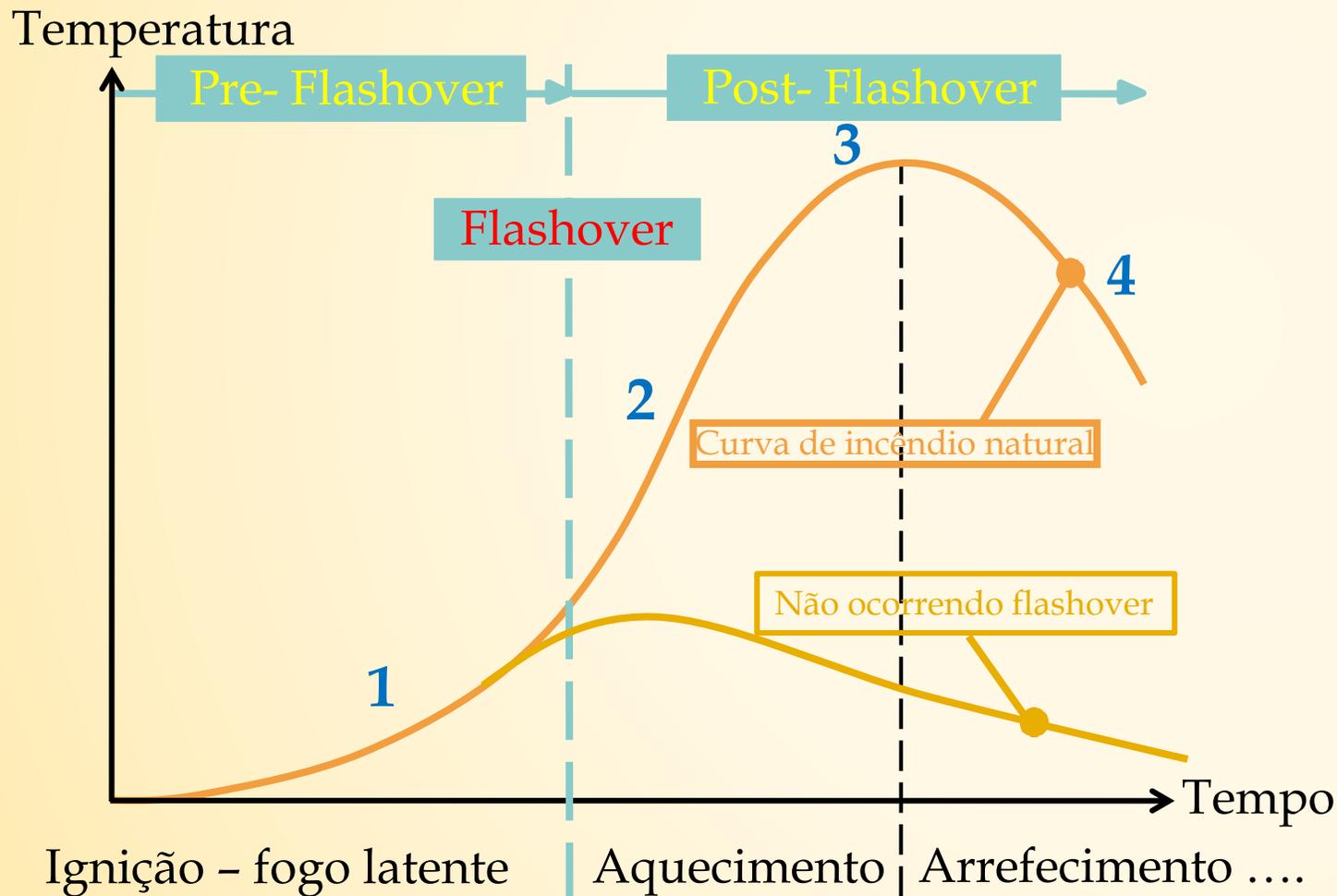
2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Desenvolvimento de um incêndio



2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Desenvolvimento de um incêndio



Fase 1: Ignição do incêndio (incêndio localizado, possível ação dos bombeiros/sprinklers)

Fase 2: Desenvolvimento do incêndio (dependendo da ventilação, carga de incêndio,...)

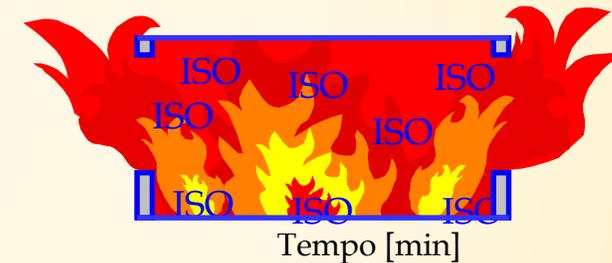
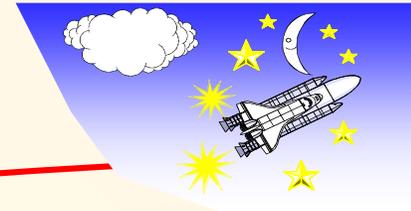
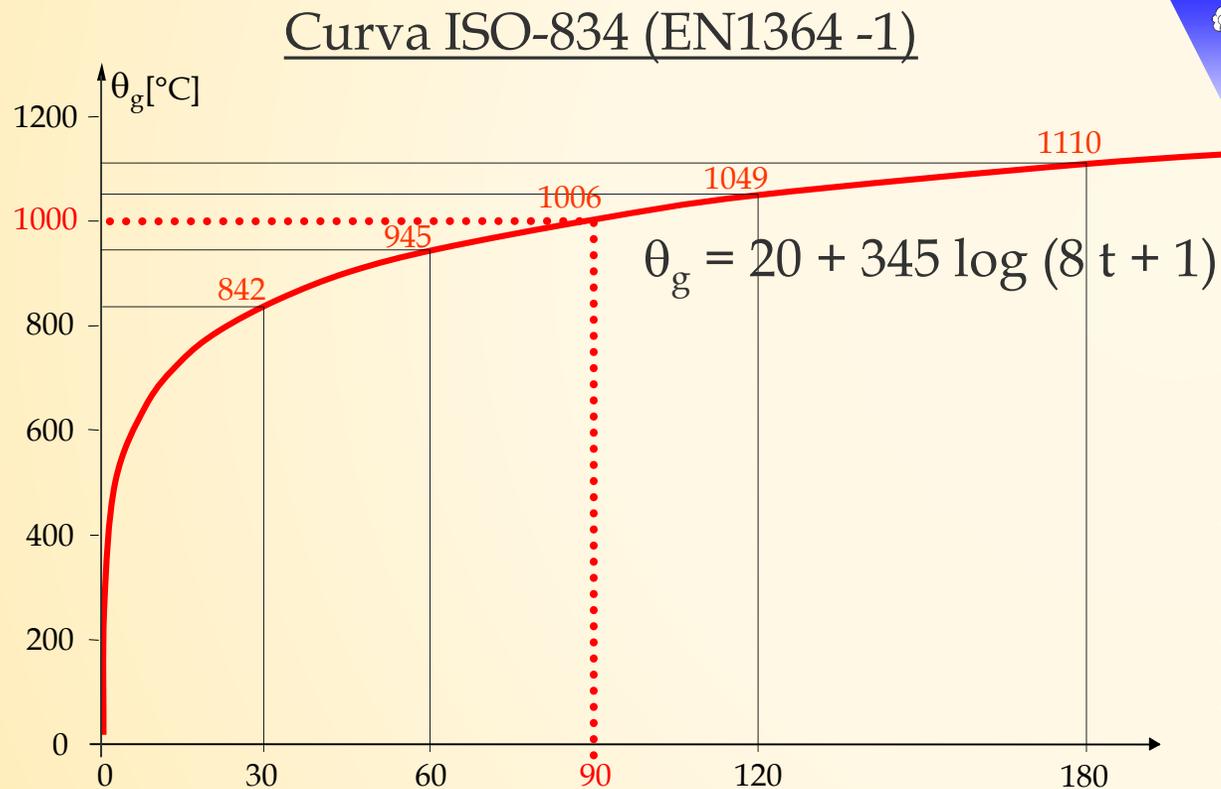
Entre 2 e 3: Flashover (de localizado a generalizado)

Fase 3: Incêndio totalmente desenvolvido

Fase 4: Fase de extinção (redução da RHR devido à perda de combustível)

2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Curva de incêndio prescritiva



- Considera TODO o compartimento, mesmo que o compartimento seja enorme
- Nunca DECRESCER
- Não considera a FASE DE PRE-FLASHOVER
- Não depende da CARGA DE INCÊNDIO e CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO

2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Incêndio baseado no desempenho

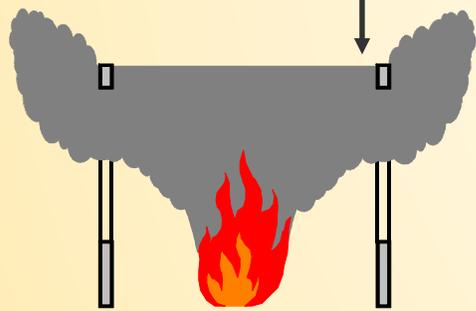
INCÊNDIO LOCALIZADO

Não acontece
flashover

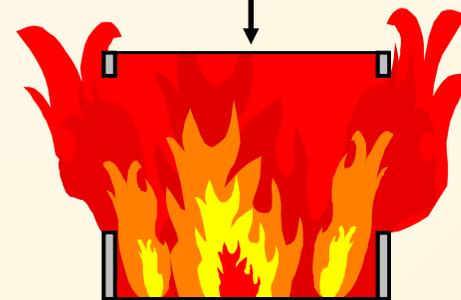
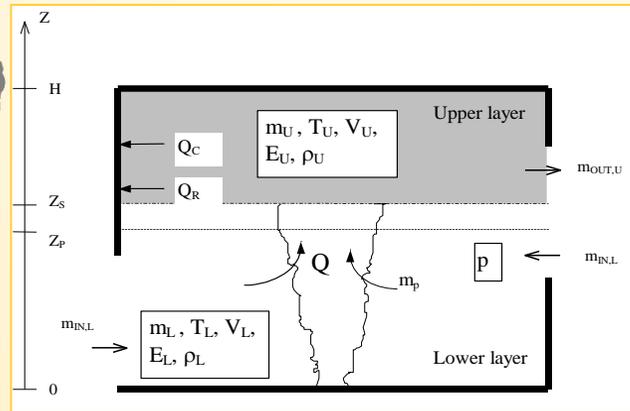
Acontece
flashover

O Incêndio permanece localizado

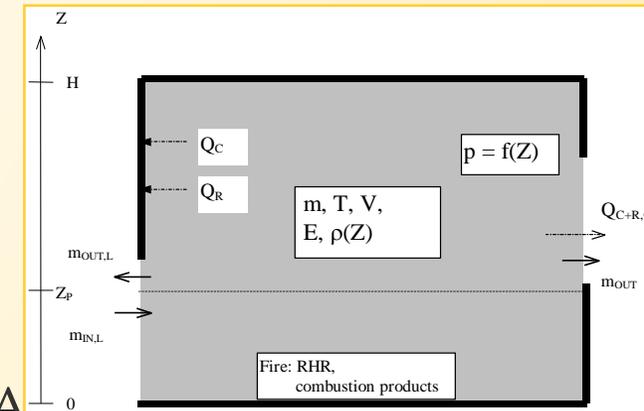
O Incêndio desenvolve-se
em todo o compartimento



INCÊNDIO
LOCALIZADO

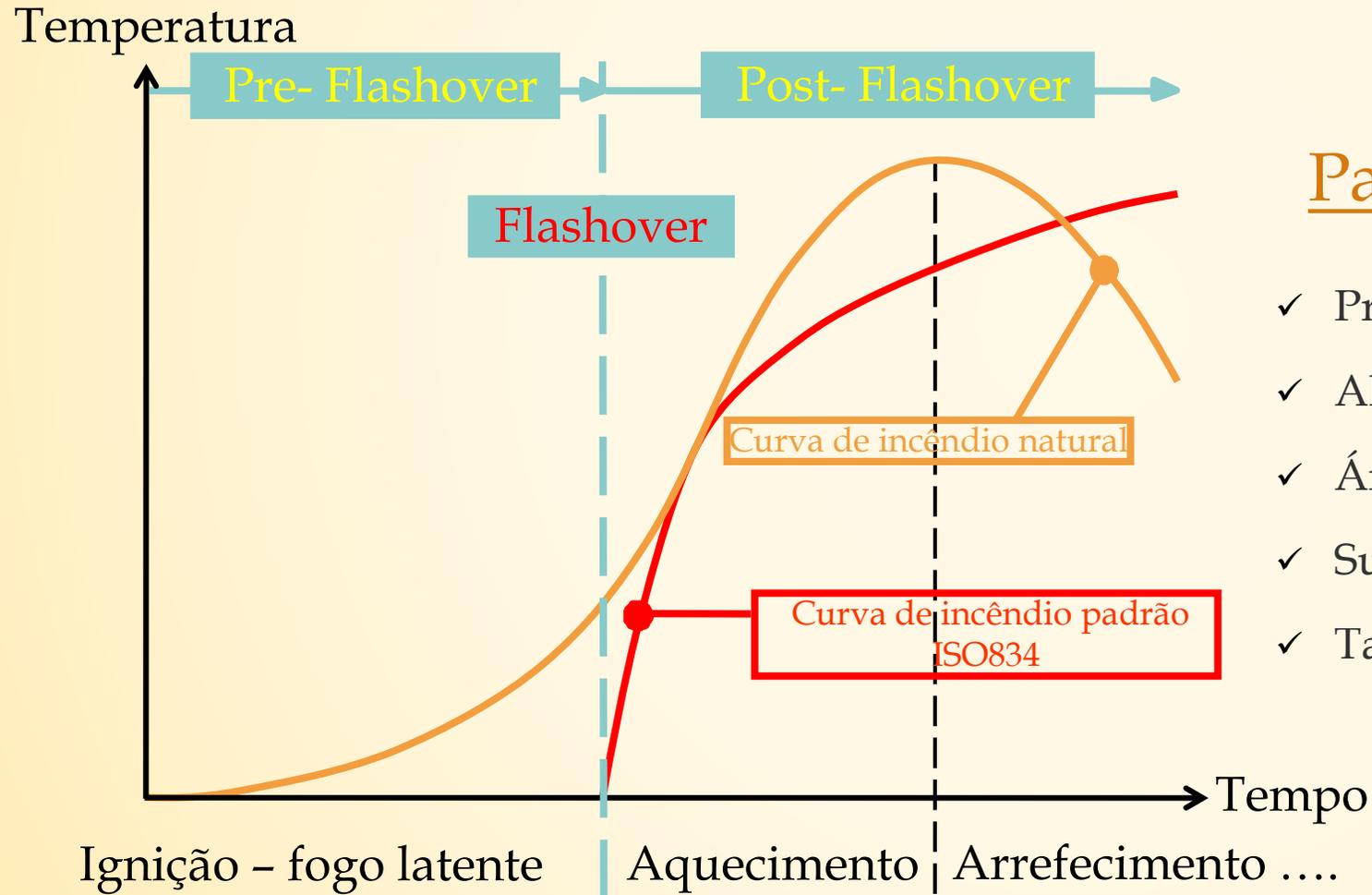


INCÊNDIO GENERALIZADO A
TODO O COMPARTIMENTO



2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Curva de incêndio baseada no desempenho



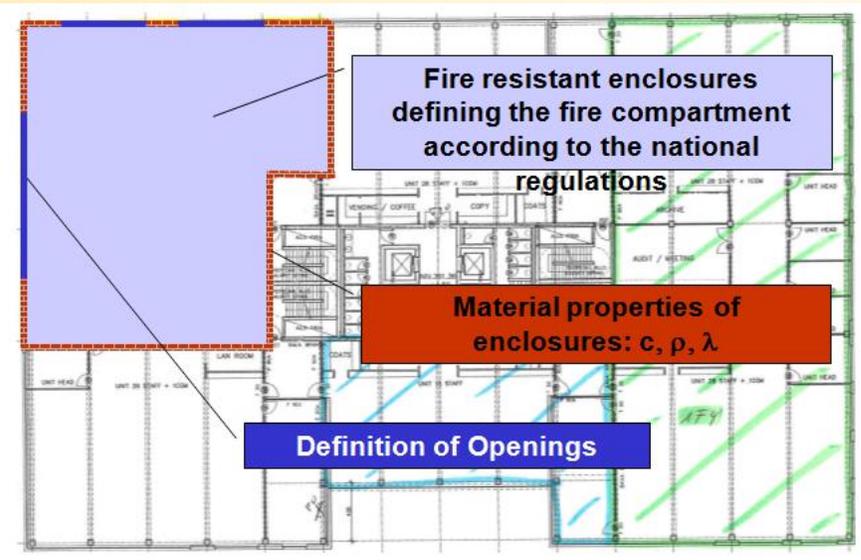
Parâmetros condicionantes

- ✓ Propriedades das fronteiras
 - ✓ Altura do teto
 - ✓ Área aberta
 - ✓ Superfície do incêndio
 - ✓ Taxa de libertação de calor
- Geometria
- Incêndio

2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Curva de incêndio baseada no desempenho

Passo 1: Divisão do edifício em compartimentos



Passo 2: Parâmetros físicos relacionados com a Ocupação

Ocupação	Taxa de crescimento de incêndio	RHR_f [kW/m ²]	Carga de incêndio $Q_{f,k}$ quantilho de 80% [MJ/m ²]
Habitação	Média	250	948
Hospital (quarto)	Média	250	280
Hotel (quarto)	Média	250	377
Biblioteca	Rápida	500	1824
Escritório	Média	250	511
Escola	Média	250	347
Centro comercial	Rápida	250	730
Teatro (cinema)	Rápida	500	365
Transporte (espaço público)	Lenta	250	122

2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Curva de incêndio baseada no desempenho

Passo 3: Perigo de ativação de incêndio

Área do pavimento do compartimento A_f [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Exemplos de ocupações	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}
25	1.10	Galeria de arte, museu, piscina	0.78
250	1.50	Residência, hotel, escritório	1.00
2500	1.90	Fábrica de máquinas e motores	1.22
5000	2.00	Laboratório químico, oficina de pintura	1.44
10000	2.13	Fábrica de pirotecnia ou tintas	1.66

Passo 4: Medidas ativas

Sist. automático de extinção com água	Redes independentes de fornecimento de água 0 1 2	Deteção de incêndio Calor Fumo	Trans. de alarme	Bombeiros no local	Bombeiros fora do local	Vias de acesso seguras	Dispositivos de combate a incêndio	Sist. de exaustão de fumos
0.61	1.0 0.87 0.7	0.87 0.73	0.87	0.61	0.78	0.9 1.0 1.5	1.0 1.5	1.0 1.5

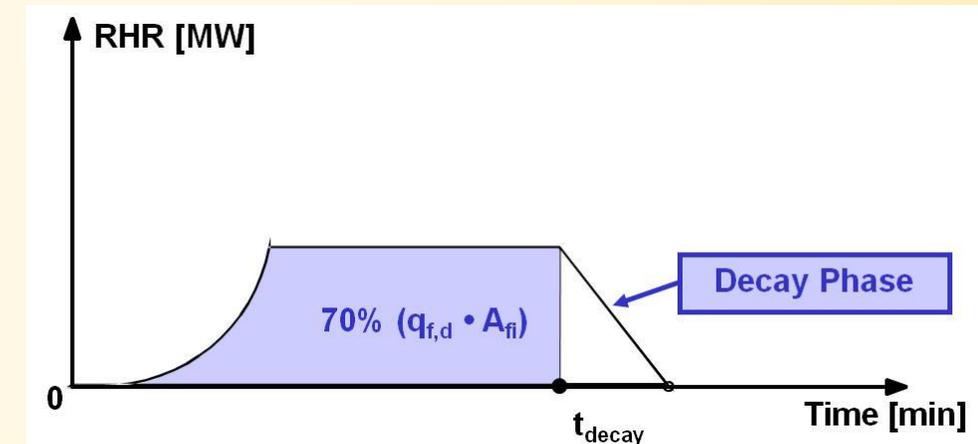
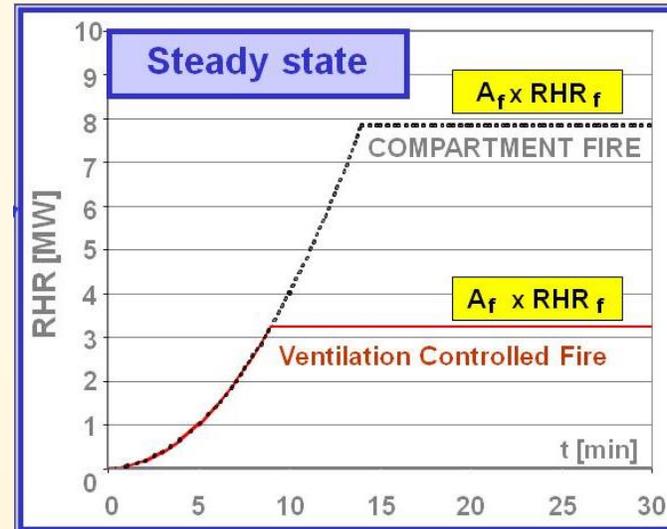
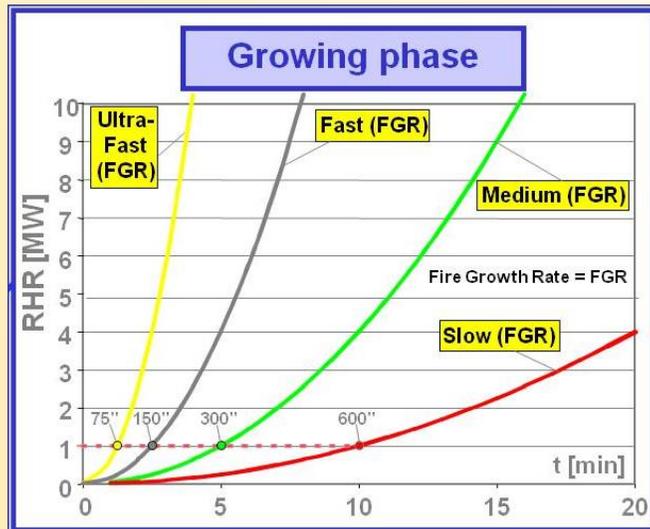
2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Curva de incêndio baseada no desempenho

Passo 5: Cálculo da carga de incêndio

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \prod \delta_{ni} \cdot m \cdot q_{f,k}$$

Passo 6: Diagrama RHR



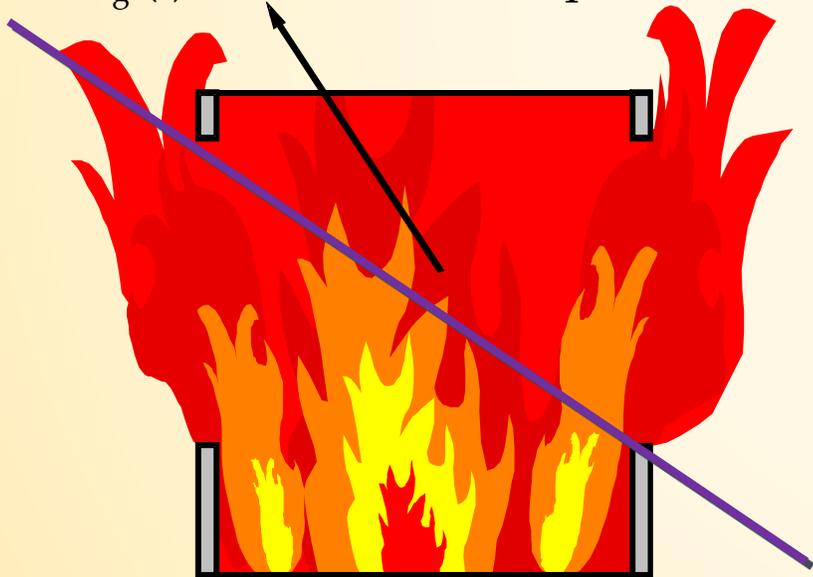
2. Estado de arte e justificação do projeto

Estado de arte: Incêndio localizado

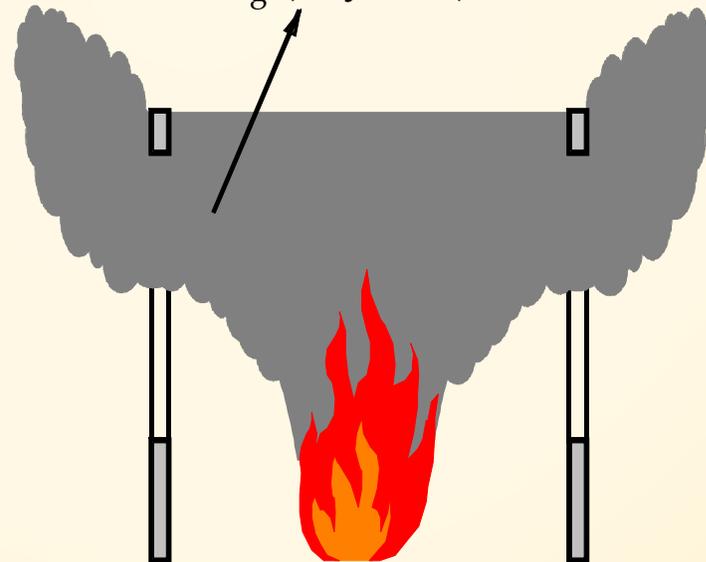
Em algumas circunstâncias, a análise da estrutura segundo um incêndio natural não é suficiente nem totalmente realística:

- Compartimento muito grande (ou complexo)
- Incêndio controlado pela ventilação
- A carga de incêndio é localizada (parque de estacionamento)

$\theta_g(t)$ uniforme no compartimento



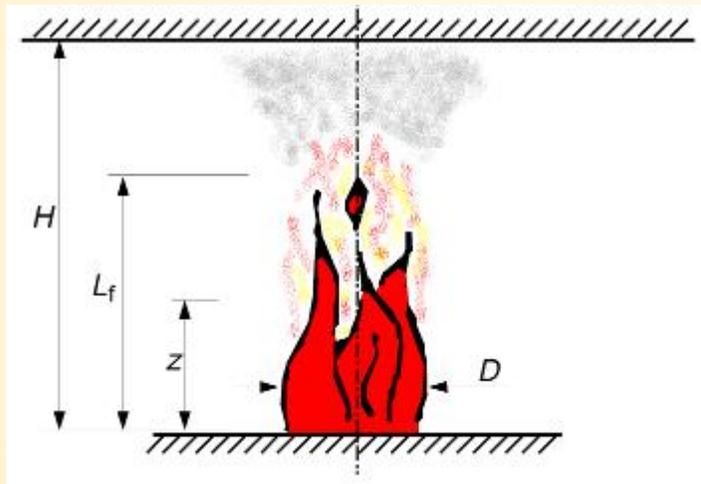
$\theta_g(x, y, z, t)$



2. Estado de arte e justificação do projeto

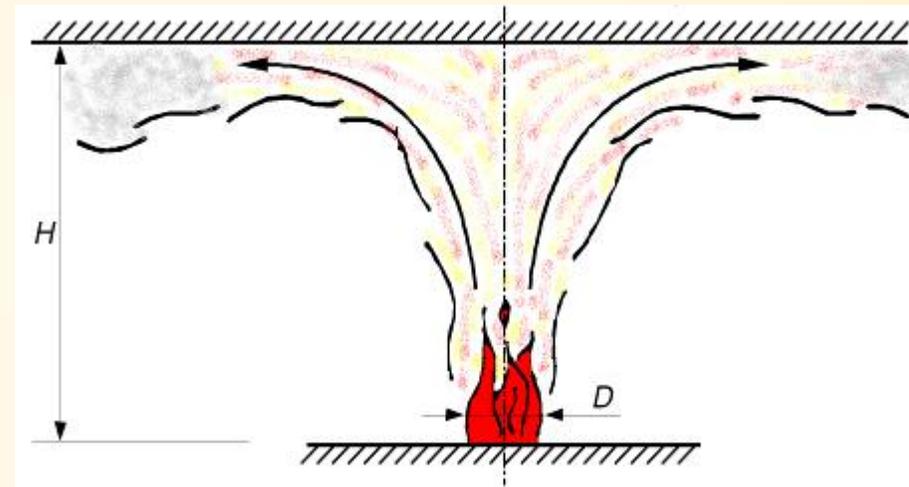
Estado de arte: Incêndio localizado

Actualmente são disponibilizados dois modelos no Anexo C da NP EN1991-1-2:2010 para descrever os efeitos de um incêndio localizado numa estrutura:



Modelo de Heskestad

para incêndios que não atingem o teto



Modelo de Hasemi

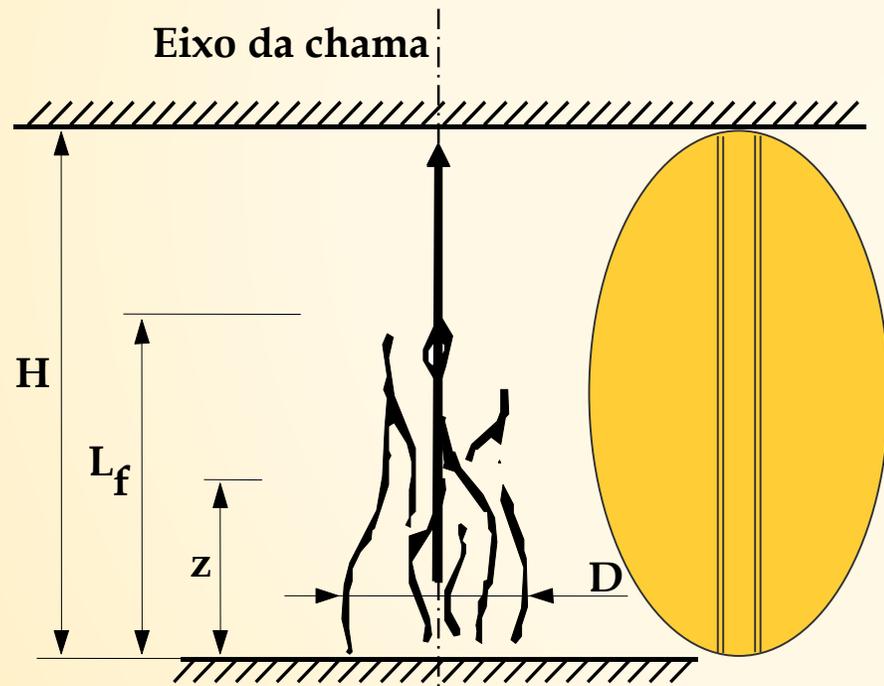
para incêndios que atingem o teto

Para estruturas de parques de estacionamento, foram utilizadas várias campanhas experimentais para validar o **modelo de Hasemi** como ferramenta de cálculo capaz de reproduzir com uma suficiente margem de segurança o campo de temperaturas em elementos estruturais horizontais causado pelo incêndio de carros.

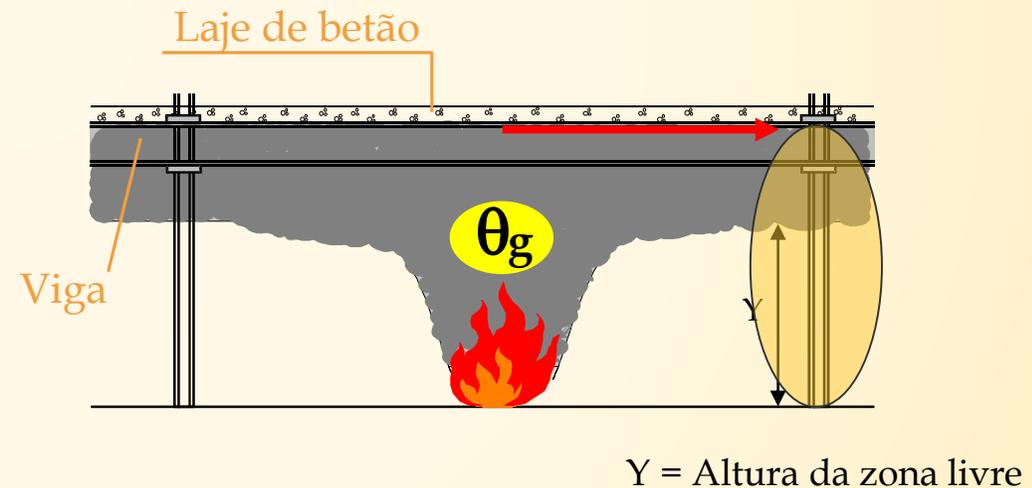
2. Estado de arte e justificação do projeto

Motivação para o projeto

Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010:
A chama não atinge o teto



Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010
A chama atinge o teto



Nesta situação, a temperatura da coluna é maioritariamente influenciada por fluxos de radiação.
Mas como abordar isso?

2. Estado de arte e justificação do projeto

Objetivos do Projeto LOCAFI

- Fornecer evidências científicas sobre a ação térmica imposta a uma coluna de aço rodeada por um incêndio localizado ou influenciada por um incêndio localizado a determinada distância da coluna (incluindo verificação das equações que fornecem a temperatura ao longo do eixo da fonte de incêndio);
- Fornecer equações de cálculo que permitam reproduzir esse ataque térmico tão bem como as temperaturas induzidas na coluna, publicação dessas equações e implementação em software existente (OZone, SAFIR,...);
- Fornecer regras que constituam as bases das equações de cálculo de forma a serem implementadas nos Eurocódigos, fazendo com que os modelos sejam automaticamente aceites sem nenhuma discussão das autoridades dos diferentes Estados Membros.



LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAIised Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Liège

Caracterização dos fluxos de calor recebidos por elementos envolvidos pelo incêndio

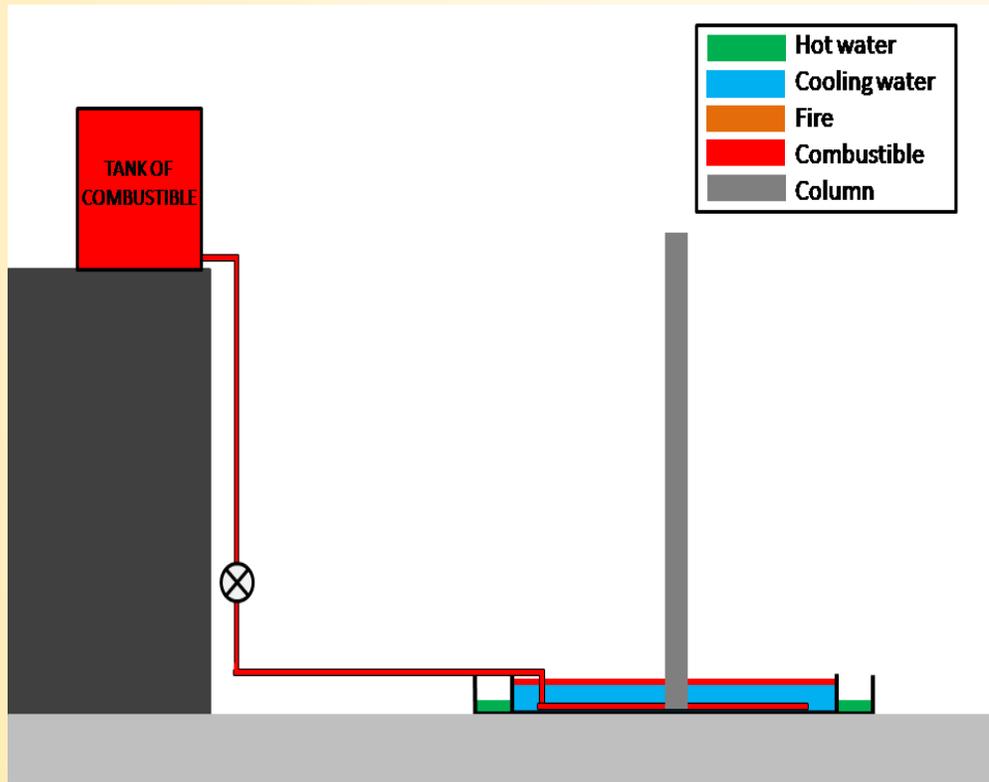


- Foram realizados 24 testes na Universidade de Liège variando:
 - O diâmetro do incêndio (5 diâmetros: 0.6m, 1.0m, 1.4m, 1.8m e 2.2m)
 - O tipo de combustível (2 combustíveis líquidos diferentes (diesel e N-heptano) + 1 carga de incêndio celulosa)
 - A presença de uma coluna envolvida pelo incêndio
- Para cada diâmetro e para os dois combustíveis líquidos:
 - Um teste sem coluna no incêndio
 - Um teste com uma coluna no centro da fonte de incêndio

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Liège

Configuração geral do teste

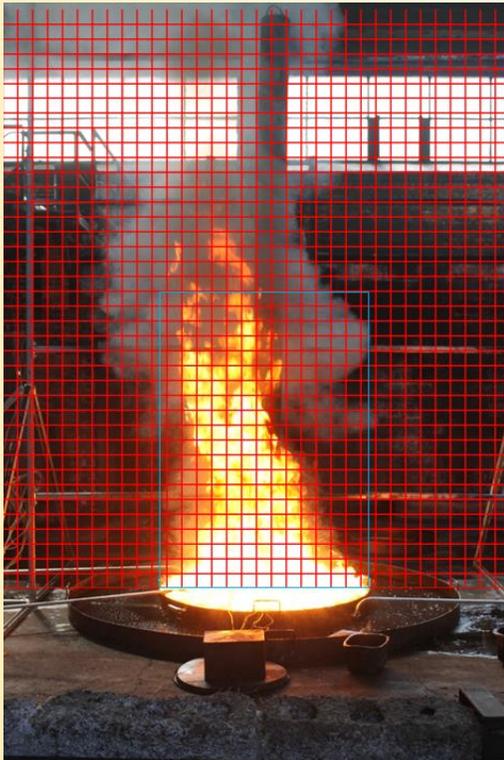


- Foram colocados dois tanques preenchidos com heptano e diesel a uma altura superior à altura do pavimento permitindo o escoamento do combustível por gravidade;
- A Taxa de Libertação de Calor da piscina de fogo foi controlada ajustando-se a descarga de combustível injetado através de uma válvula manual;
- O recipiente foi continuamente preenchido com água fria de forma a arrefecer a camada abaixo do combustível de queima, possibilitando assim um regime de incêndio mais estável evitando a ebulição da água.

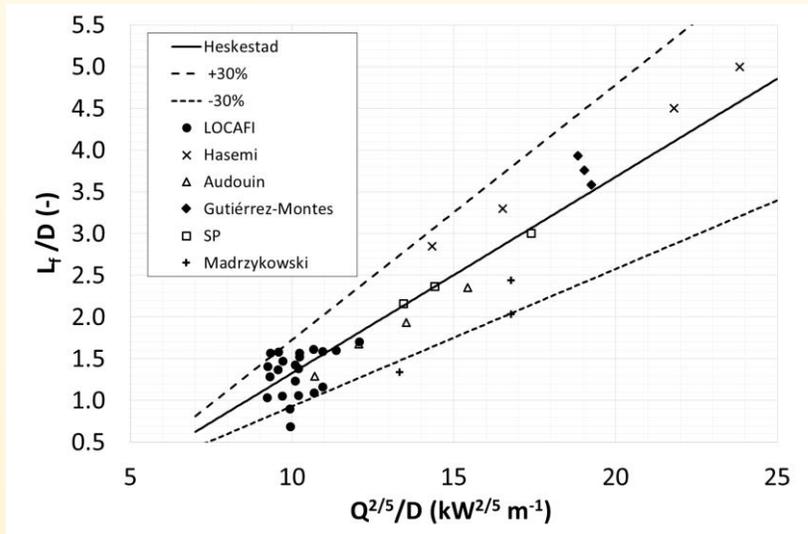
3. Ensaios experimentais e calibração CFD

Ensaios realizados na Universidade de Liège

Medições experimentais: comprimento da chama



O comprimento de chama médio L é a distância acima da fonte de incêndio onde a intermitência decai para 0.5, sendo a intermitência $I(z)$ definida como a fração de tempo em que a chama está acima da fonte de incêndio. Esta avaliação foi realizada através de análise de imagens digitais.



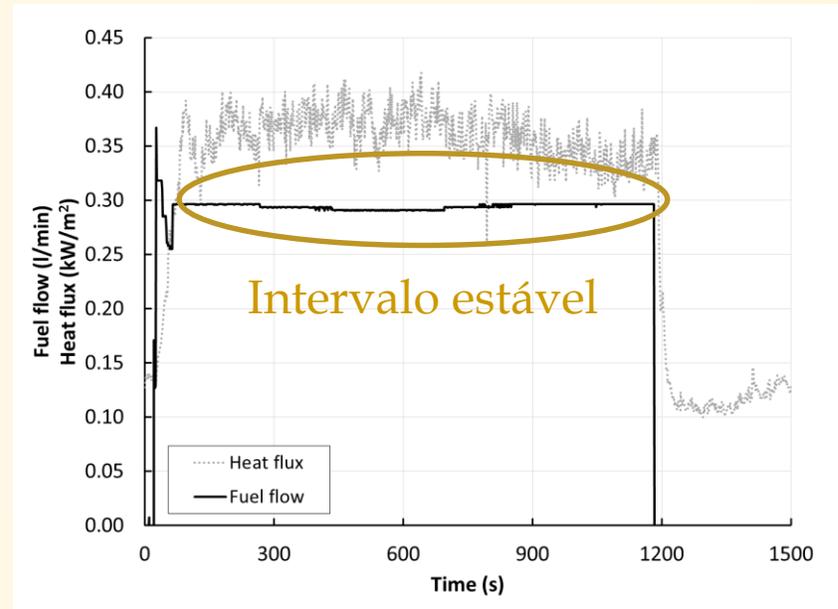
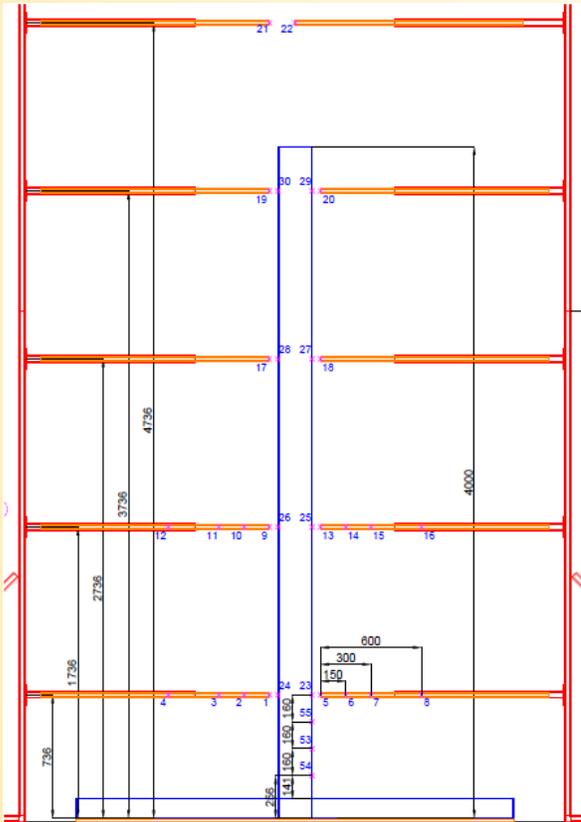
A diferença entre o comprimento de chama experimental e o comprimento de chama previsto por Heskestad é cerca de +30% e -30% mas isto está de acordo com outras investigações de piscina de fogo e sobretudo devido à incerteza relacionada com a eficiência da combustão e com a densidade do combustível.

N. Tondini, J.M. Franssen, "Analysis of experimental hydrocarbon localised fires with and without engulfed steel members", Fire Safety Journal 92 (2017), 9-22

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Liège

Medições experimentais: temperatura e fluxos

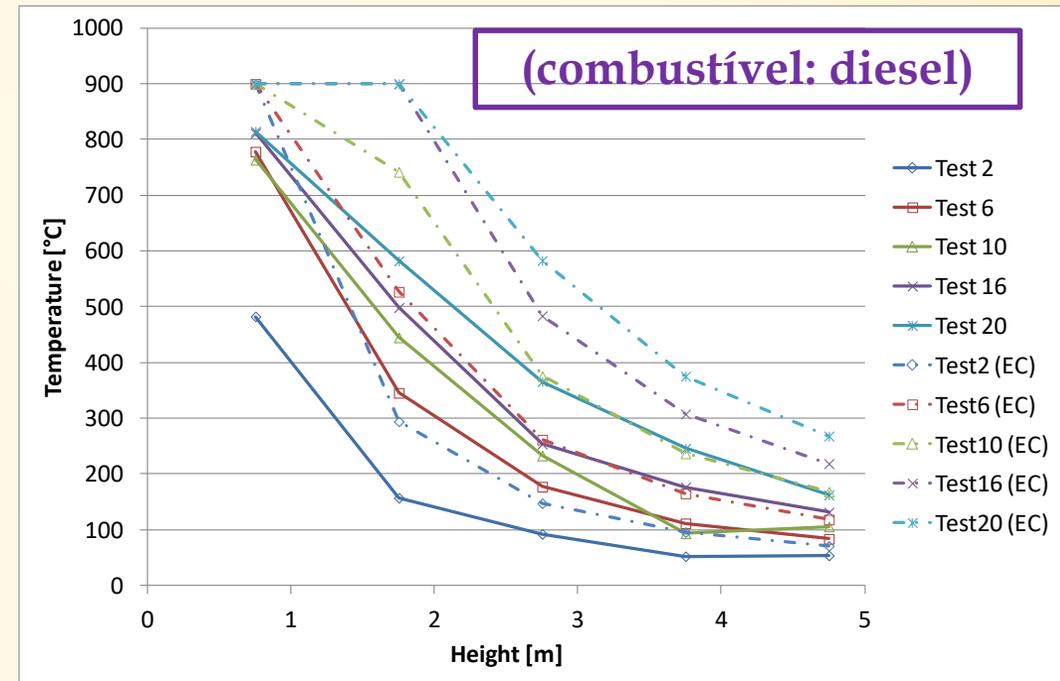
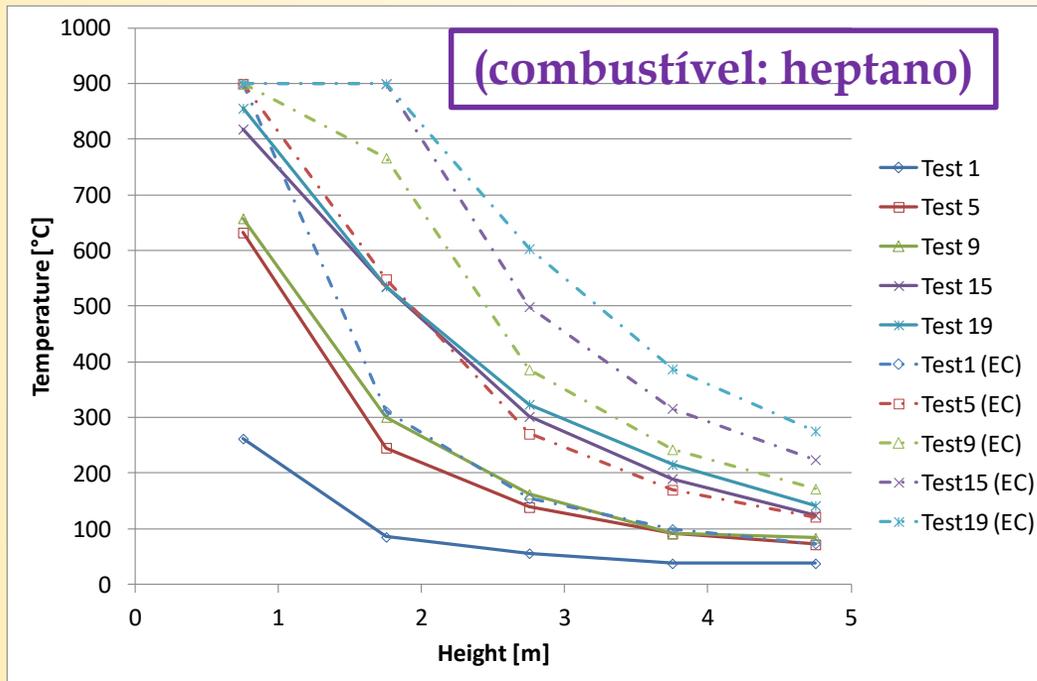


- Os testes são realizados até se atingir uma configuração estacionária (as medições da temperatura dos gases e dos fluxos de calor por radiação são estabilizados);
- De acordo com a configuração das colunas de aço, os termopares também fornecem a evolução da temperatura do aço.

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Liège

Medições experimentais: temperatura e fluxos

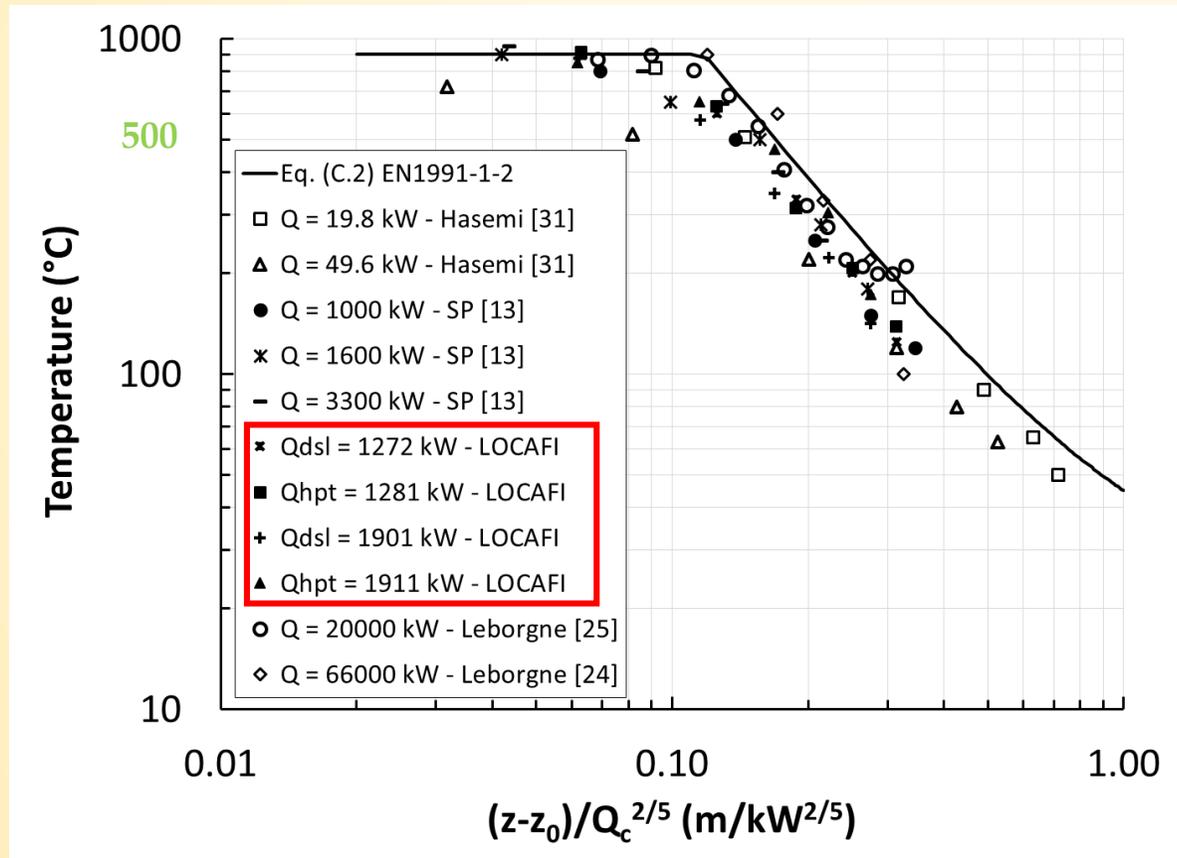


A correlação de Heskestad (NP EN 1991-1-2:2010) sobredimensiona as temperaturas da chama ($\theta_g \geq 500^\circ\text{C}$) e da pluma ($\theta_g < 500^\circ\text{C}$)

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Liège

Medições experimentais: temperatura e fluxos



A correlação da NP EN 1991-1-2:2010 fornece uma boa avaliação da temperatura tanto da chama ($\theta_g \geq 500^\circ\text{C}$) como da pluma ($\theta_g < 500^\circ\text{C}$).

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Ulster

Caracterização dos fluxos de calor recebidos por elementos exteriores ao incêndio



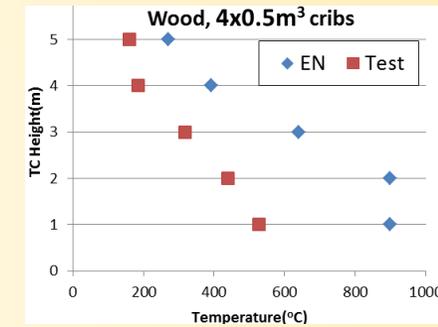
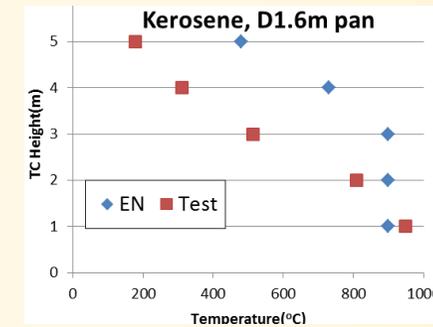
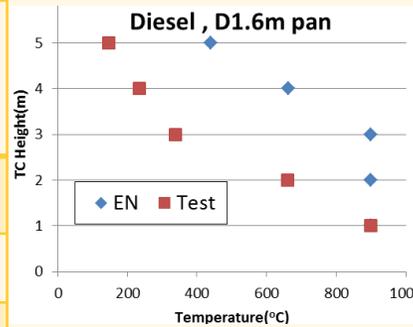
- Foram realizados 58 testes na Universidade de Ulster variando:
 - A presença ou não de teto (37 testes sem / 21 testes com)
 - O número de incêndios (*de 1 a 4*) e o seu diâmetro (*2 diâmetros: 0.7m e 1.6m*)
 - O tipo de combustível (*2 combustíveis líquidos diferentes (diesel e querosene) + 1 carga de incêndio celulosa*)
- A estrutura de 9mx9m é composta por três tipos de colunas (*secções em I, secções em H e secções em O*)
- A HRR variou com o tempo (não controlada) e foi medida por um calorímetro
- O comprimento de chama é avaliado utilizando uma câmara e com base na probabilidade da presença da chama

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Ulster

Medições experimentais: temperatura da chama

ALTURA	ENSAIOS O8, I9 (QUEROSENE, D 1.6 m)		ENSAIOS O10 (DIESEL, D 1.6 m)		ENSAIOS O1, O2 (QUEROSENE, D 0.7 m)		ENSAIOS O3, O4 (DIESEL, D 0.7 m)		ENSAIO O14 (GRADES DE MADEIRA)	
	EN	ENSAIO	EN	ENSAIO	EN	ENSAIO	EN	ENSAIO	EN	ENSAIO
1 m	900	949	900	899	900	686	900	652	900	527
2 m	900	810	900	660	845	223	697	208	900	440
3 m	900	515	900	339	381	90	325	89	640	317
4 m	730	312	663	235	228	-	198	-	391	185
5 m	479	179	440	146	157	-	139	-	271	159

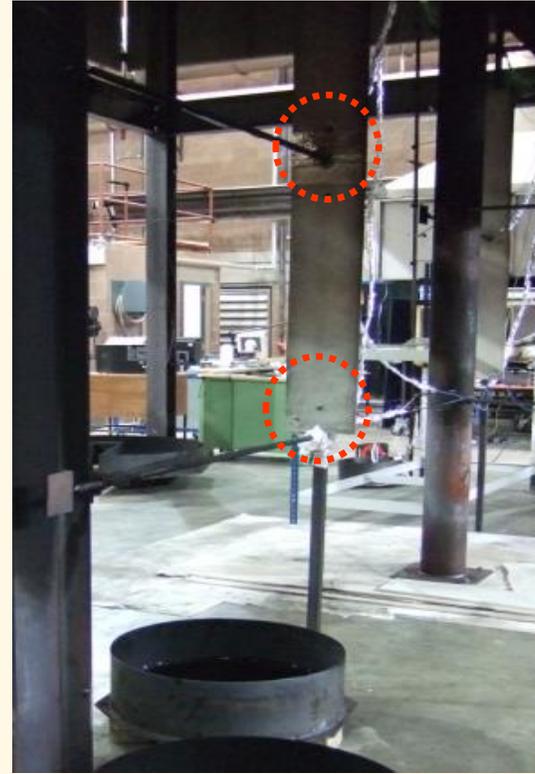
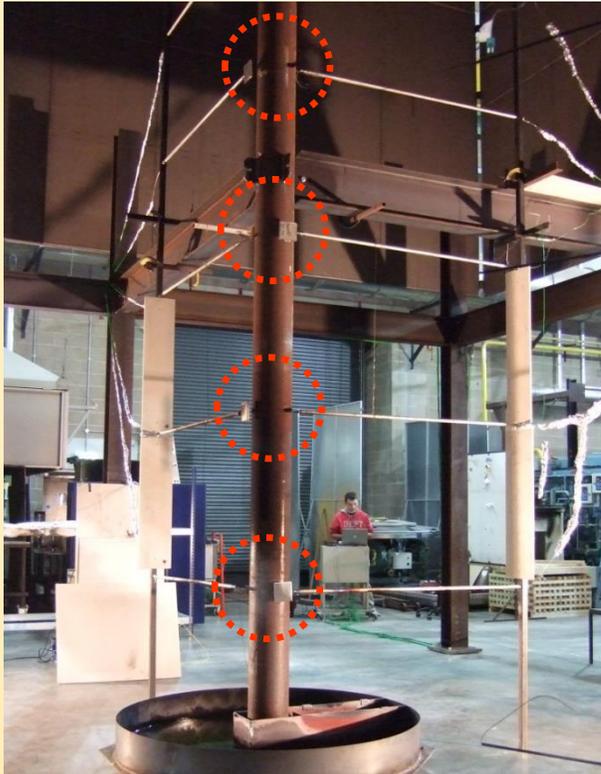


Estes testes confirmam que a correlação de Heskestad (NP EN 1991-1-2:2010) sobredimensiona as temperaturas tanto da chama ($\theta_g \geq 500^\circ\text{C}$) como da pluma ($\theta_g < 500^\circ\text{C}$).

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Ensaaios realizados na Universidade de Ulster

Medições experimentais: temperatura e fluxos fora do incêndio

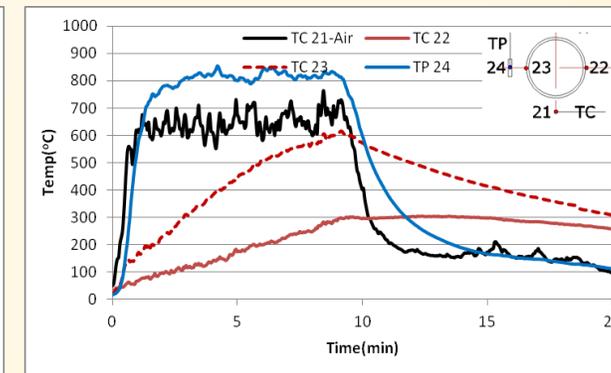
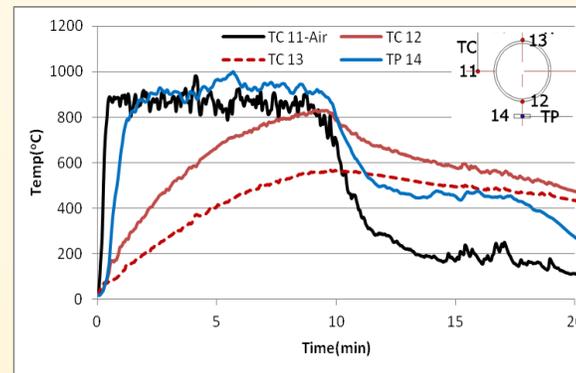
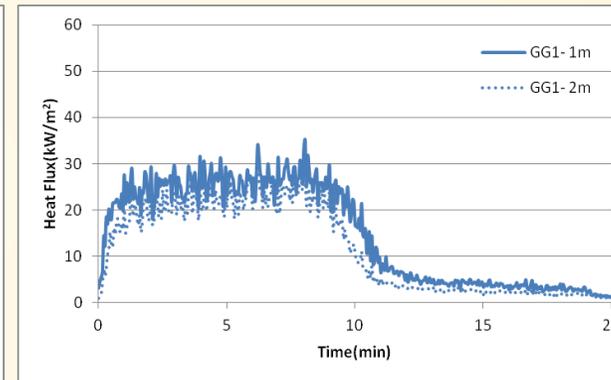
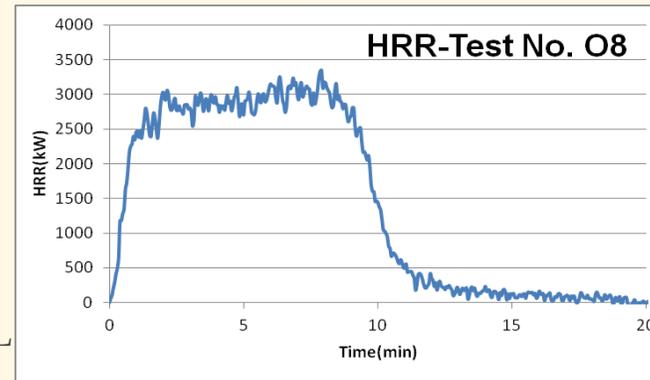


3. Ensaios experimentais e calibração CFD

Ensaios realizados na Universidade de Ulster

Medições experimentais: resultados obtidos através do teste O8

- Número de piscinas: 1
- Diâmetro da piscina: 1.6 m
- Tipo de combustível: Querosene
- Quantidade de combustível: 60 L
- Distância coluna-piscina: 0 m
- Distância medidores-coluna: 1.5m
- Sem teto



3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Calibração de um modelo CFD utilizando software FDS

Objetivos

- O **número de testes** é limitado e as **medições** realizadas durante esses testes também são **limitadas**.
 - Devido à dimensão do edifício/laboratório onde os testes experimentais foram realizados, **não foi possível abranger toda a gama de incêndios localizados** (o Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010 aplica-se até $D = 10$ m e $Q = 50$ MW)
- Após validação do modelo(s), a modelação CFD é uma ferramenta poderosa e económica capaz de fornecer um vasto conjunto de resultados para validação de métodos de cálculo analítico
- O **software FDS** é um software livre, desenvolvido pela NIST, e muito utilizado pela comunidade de engenheiros de segurança contra incêndios

A calibração dos modelos FDS foi processada através da reprodução de **5 testes** seleccionados de acordo com os seguintes critérios:

- Testes realizados sobre condições constantes e controladas (Liège) e condições livres (Ulster)
- Os testes exibiam longa estabilidade e resultados estáveis
- Diferentes tipos de combustíveis, diâmetros de incêndio pequenos e grandes, com e sem teto,...

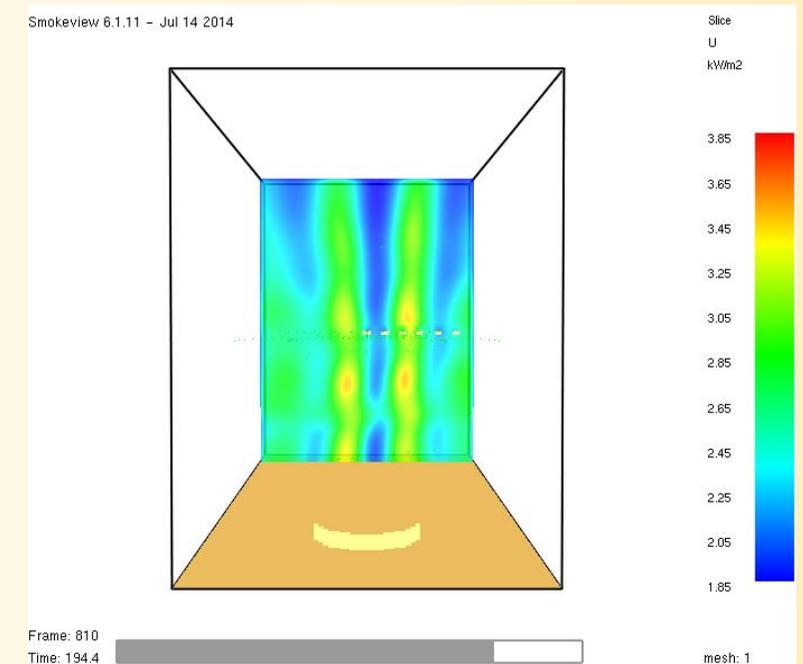
3. Ensaio experimentais e calibração CFD

Calibração de um modelo CFD utilizando software FDS

Parâmetros de calibração

Os parâmetros mais influentes ajustados durante o processo de calibração são:

- Modelo de turbulência (Smagorinski, $C_s = 0.1$)
- Propriedades do combustível, incluindo produção de fuligem, retirado da literatura (condições sobreventiladas)
- Número de ângulos de radiação (200)
- Parcela de perda de radiação (entre 0.2-0.5, maioritariamente dependente do tipo de combustível e do diâmetro do incêndio)
- Efeitos do vento (baseado em medições)
- Dimensões da malha da grelha (baseado no comprimento característico e medida de resolução da turbulência)



Exemplo de variação de fluxos devido a número insuficiente de ângulos de Radiação

3. Ensaio experimentais e calibração CFD

Calibração de um modelo CFD utilizando software FDS

Ensaio ULG 06 (D = 1m, Heptano, sem coluna)

Fluxo médio de combustível q_{fuel}	0.98 l/min
Produção de fuligem y_{soot}	0.037
Calor ideal de combustão $\Delta H_{c,ideal}$	44600 kJ/kg
Calor de combustão ΔH_c	41200 kJ/kg
RHR calculado com $\Delta H_{c,ideal}$	491.7 kW (626.1 kW/m ²)

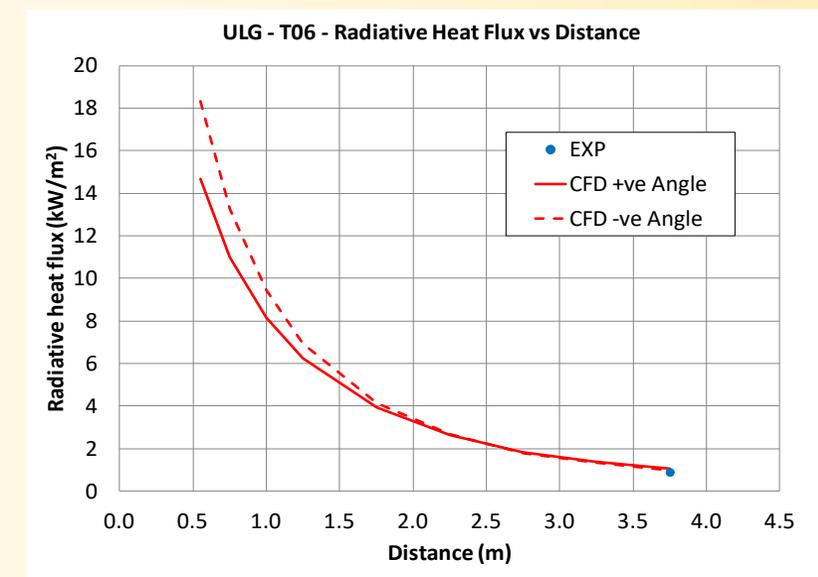
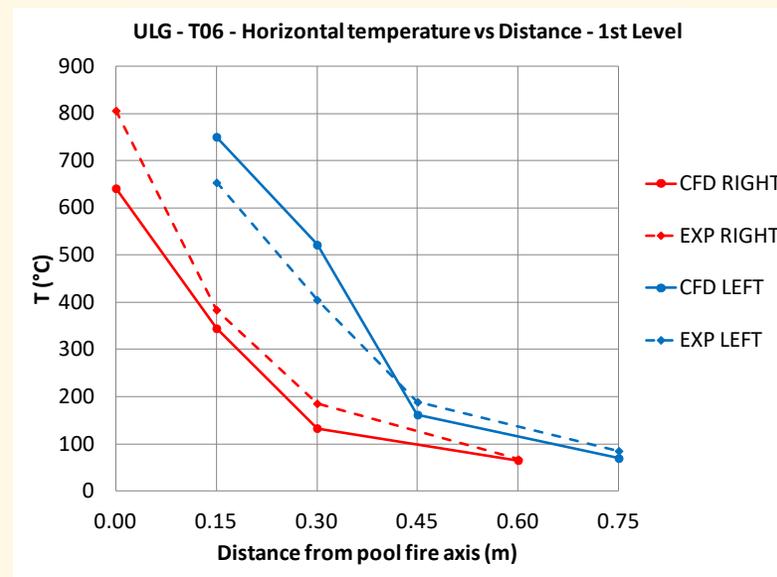
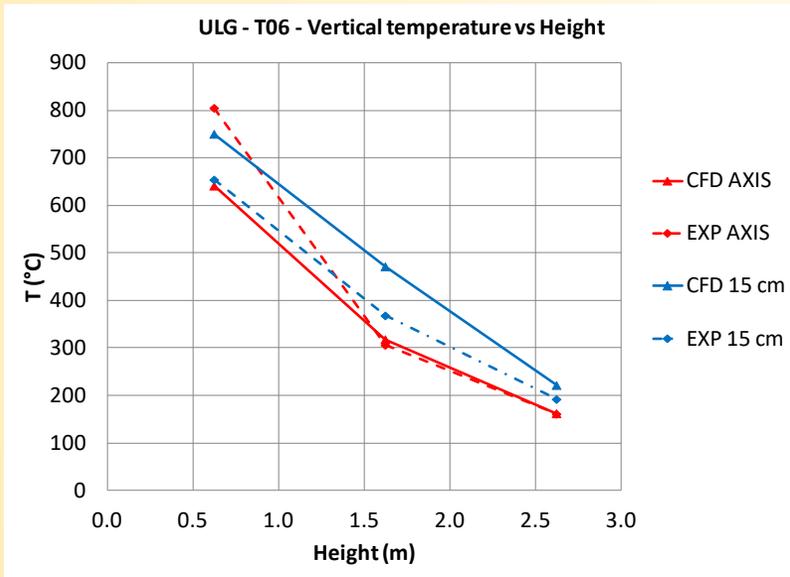
- Dimensão do domínio CFD: 5.75m x 3m x 4m
- Dimensão da grelha: 5cm x 5 cm x 5 cm
- Velocidade do vento: 0.22 m/s
- Parcela de perda de radiação: 0.45 (SFPE)



3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

Calibração de um modelo CFD utilizando software FDS

Ensaio ULG 06 (D = 1m, Heptano, sem coluna)



3. Ensaio experimentais e calibração CFD

Calibração de um modelo CFD utilizando software FDS

Ensaio Ulster O29 (D = 0.7m, Diesel, com teto a 3.5m)

Densidade do combustível ρ	823 kg/m ³
Produção de fuligem y_{soot}	0.10
Calor ideal de combustão $\Delta H_{c,\text{ideal}}$	44000 kJ/kg
Calor de combustão ΔH_c	41200 kJ/kg
RHR calculado com $\Delta H_{c,\text{ideal}}$	491.5 kW (1277.1 kW/m ²)

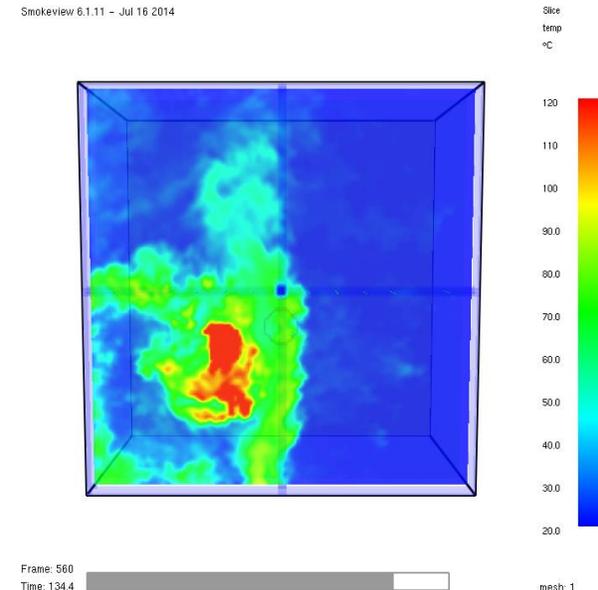
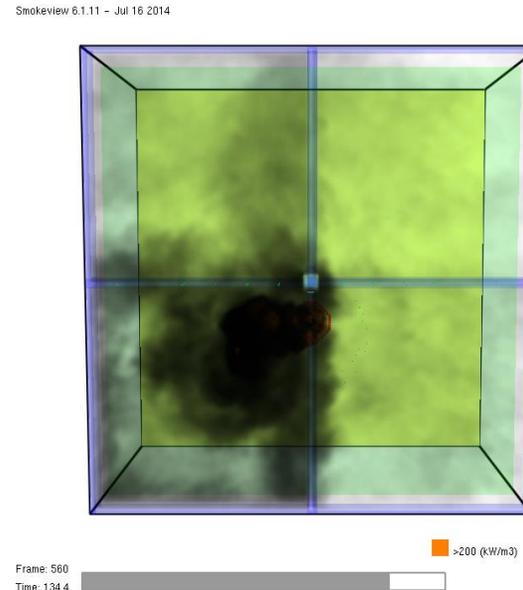
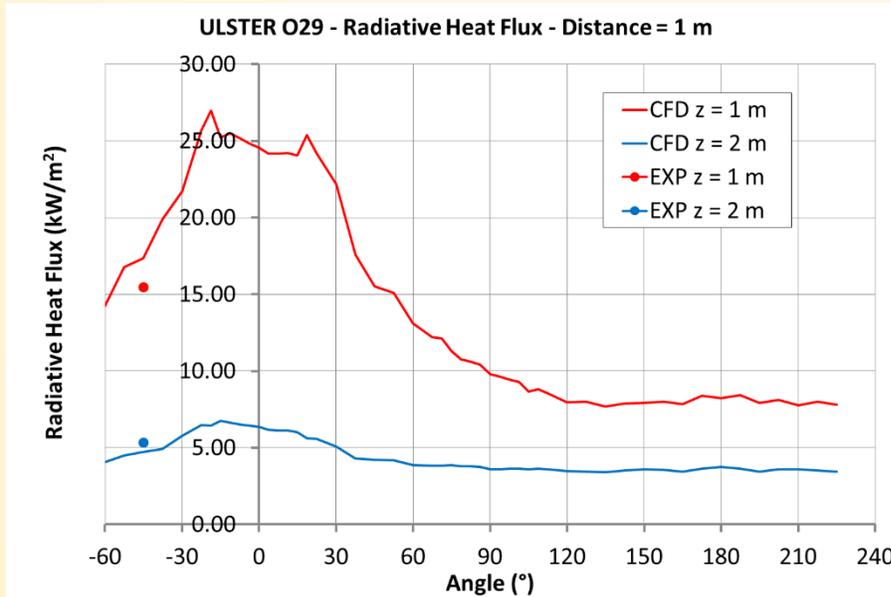
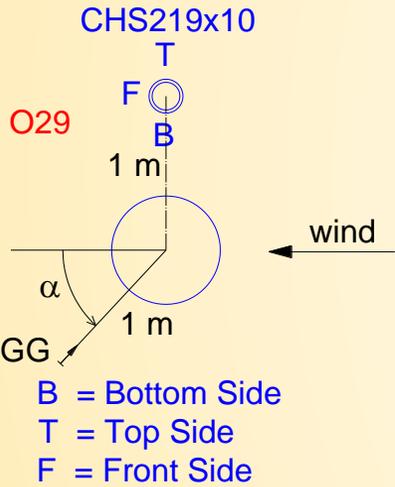
- Dimensão do domínio CFD: 7m x 7m x 3.5m
- Dimensão da grelha: 5cm x 5 cm x 5 cm
- Velocidade do vento: 0.76 m/s
- Parcela de perda de radiação: 0.45 (SFPE)



3. Ensaio experimentais e calibração CFD

Calibração de um modelo CFD utilizando software FDS

Ensaio Ulster O29 (D = 0.7m, Diesel, com teto a 3.5m)



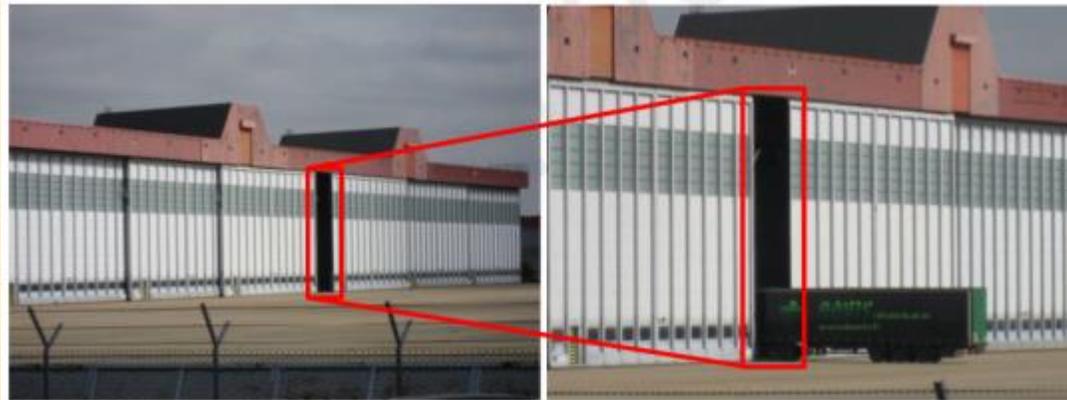
z (m)	CFD RHFG GG (kW/m ²)	EXP GG (kW/m ²)	Erro (%)
1	17.35	15.45	12.3
2	4.71	5.32	-11.5

3. Ensaaios experimentais e calibração CFD

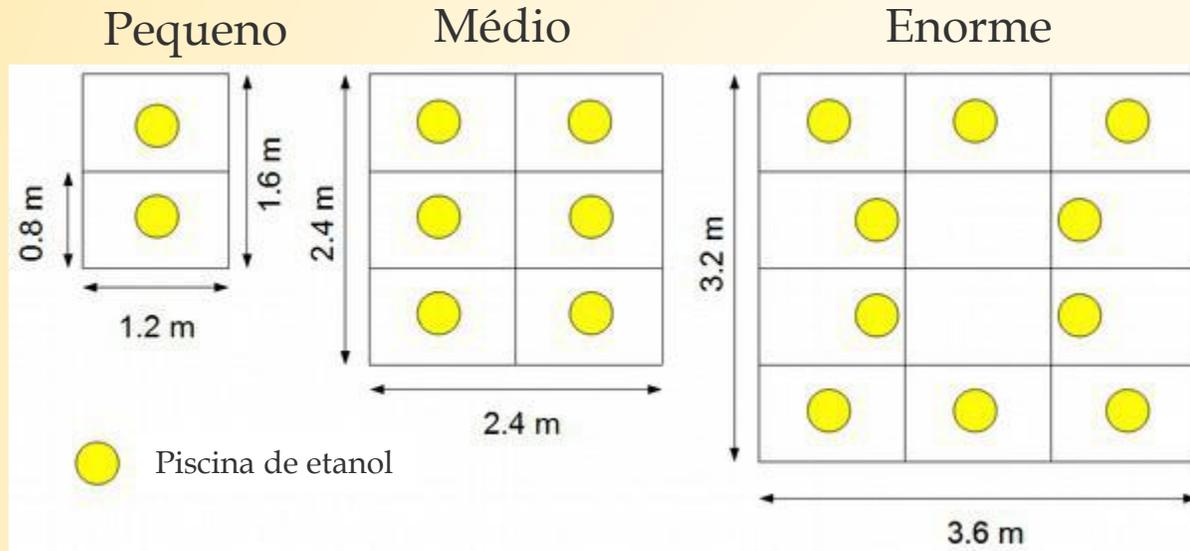
Ensaaios franceses (fora do âmbito do LOCAFI+)

Ensaaios iniciados por LCPP num grande volume:

- Sala principal: 300 m x 50 x 17 m
- 2 tipos de combustível: paletes de madeira / querosene
- Testes de fogo repetidos
- Muito instrumentados: termopares, medidores de fluxo de calor, vídeos (IR e normal)



3. Ensaaios experimentais e calibração CFD



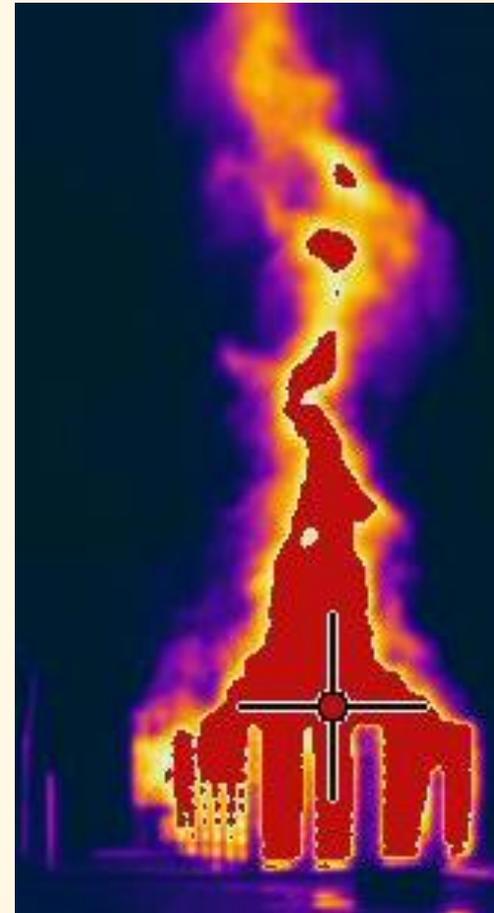
Ensaio pequeno: ~ 20 paletes
Ensaio médio: ~ 60 paletes
Ensaio enorme: ~ 110 paletes



3. Ensaaios experimentais e calibração CFD



HRR ~ 30 MW





LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCALised Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

4. Método analítico e validação

4. Método analítico e validação

4.1. Conceito de Chama Sólida Virtual

Modelação da chama

Passo 1: A superfície do fogo é transformada num disco equivalente

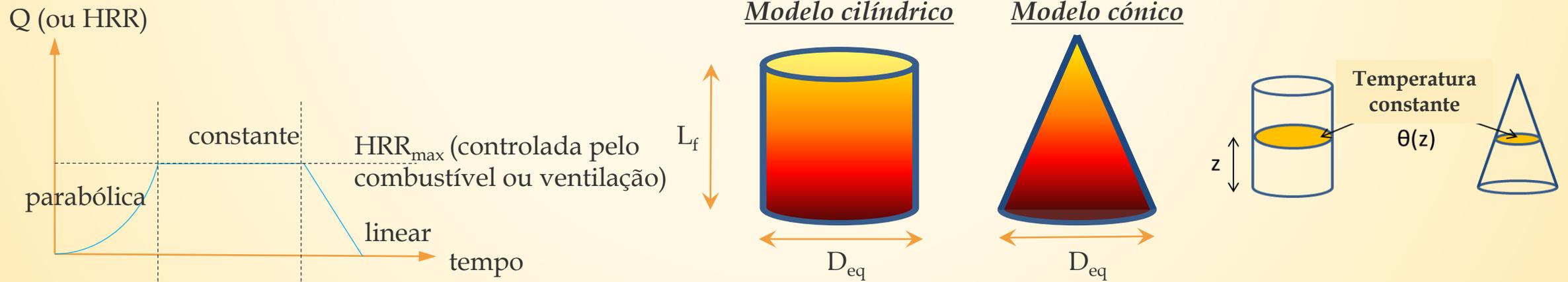
$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

Passo 2: A evolução da Taxa de Libertação de Calor é calculada de acordo com o Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010 (fase de crescimento, fase estacionária, fase de extinção)

Passo 3: O comprimento da chama L_f é calculado através da aplicação do Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010

$$L_f(t) = -1.02 D_{fire} + 0.0148 Q(t)^{0.4}$$

Passo 4: A ação do fogo é representada por uma chama sólida virtual, cónica ou cilíndrica, definida por D_{eq} e L_f

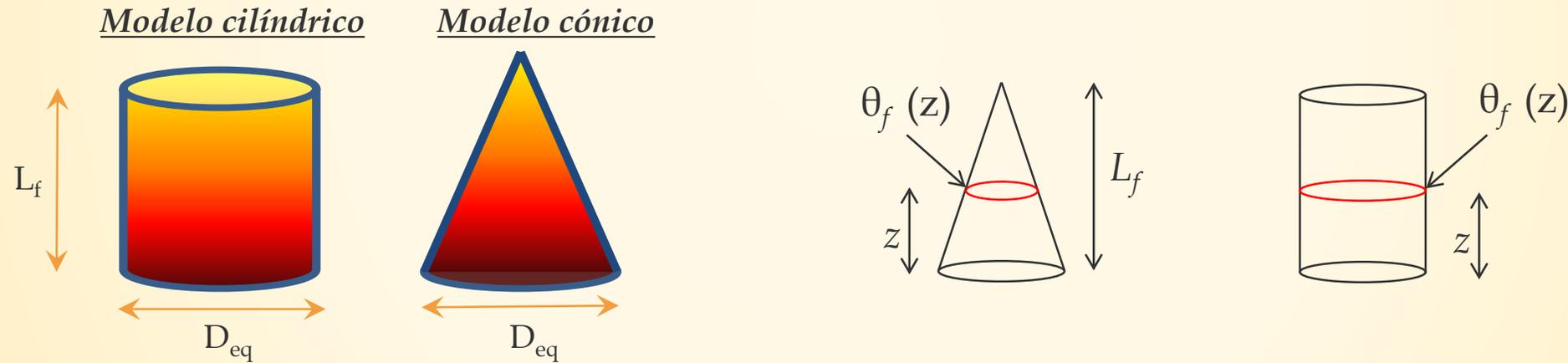


4. Método analítico e validação

4.1. Conceito de Chama Sólida Virtual

Modelação da chama

Se a chama não atinge o teto ($L_f < H_{ceiling}$ ou sem teto)



$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25(0.8Q(t))^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524 Q(t)^{0.4}$$

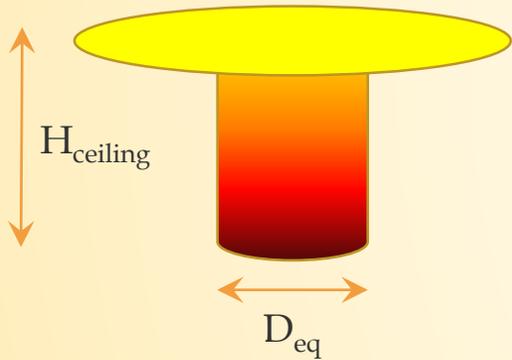
4. Método analítico e validação

4.1. Conceito de Chama Sólida Virtual

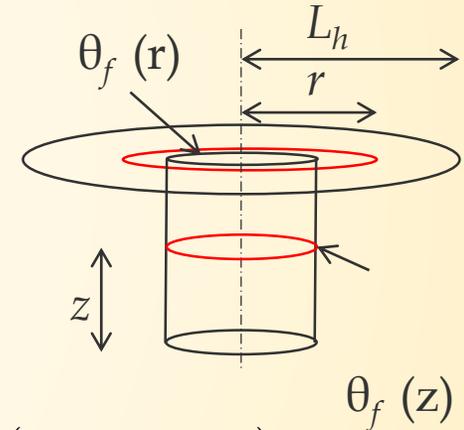
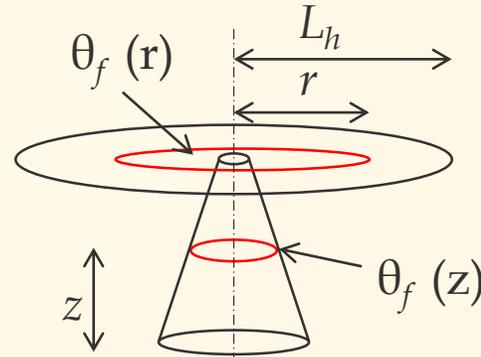
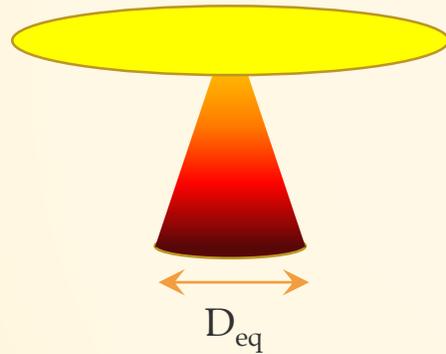
Modelação da chama

Se a chama atinge o teto ($L_f > H_{ceiling}$)

Modelo cilíndrico



Modelo cónico



$$\theta_f(z) = \min \left(900; 20 + 0.25(0.8Q(t))^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \right)$$

$$z_0 = -1.02D_{fire} + 0.00524 Q(t)^{0.4}$$

$$L_h(t) = H(2.9Q(t)_H^{0.33} - 1)$$

$\dot{h}(r)$ calculado através de Haseimi

$$\theta_f(r) \text{ satisfaz para } \dot{h}(r) = \sigma \left((\theta_f(r) + 273)^4 - 293^4 \right) + 35(\theta_f(r) - 20)$$

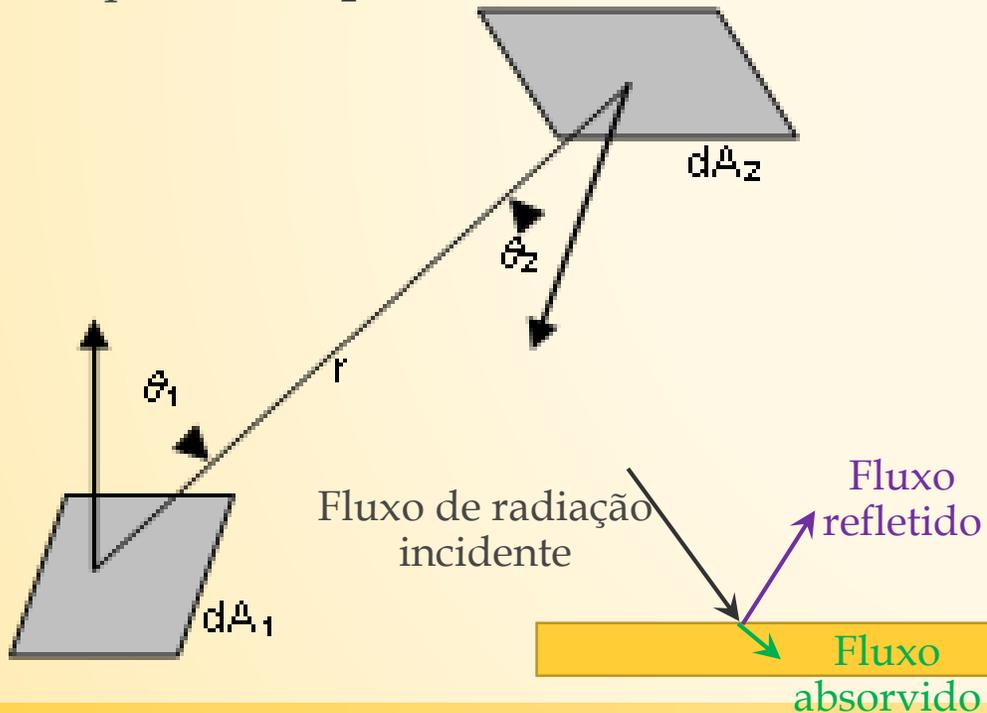
Nota: a contribuição dos anéis é bastante baixa, exceto se o elemento estiver situado no anel → considerado apenas para elementos ao nível do teto

4. Método analítico e validação

4.2. Método geométrico para fluxos de calor trocados

Avaliação dos fluxos de calor por radiação

O fluxo de calor por radiação que emana de uma dada superfície radiante dA_1 e que é recebido por uma superfície dA_2 é :



$$\Phi_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \alpha_2 \varepsilon_1 \sigma \cdot T^4 \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

- a emissividade ε_1 (da superfície emissora) é assumida igual a 1 para chamas
- a absorção α_2 depende das propriedades da superfície recetora
- Lei de Kirchoff: absorção (α) = emissividade (ε)
- para o aço, $\varepsilon = \alpha = 0.7$

4. Método analítico e validação

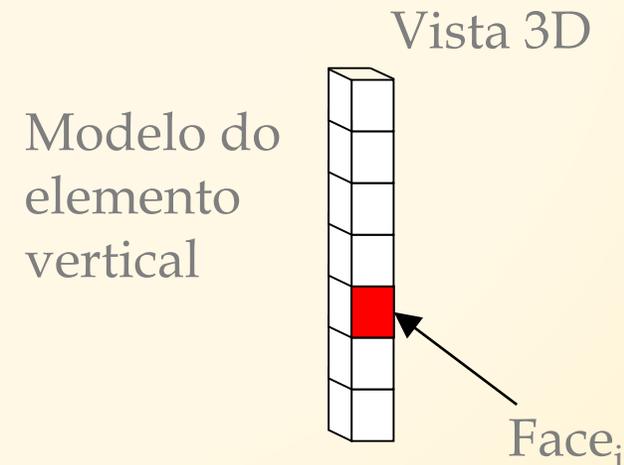
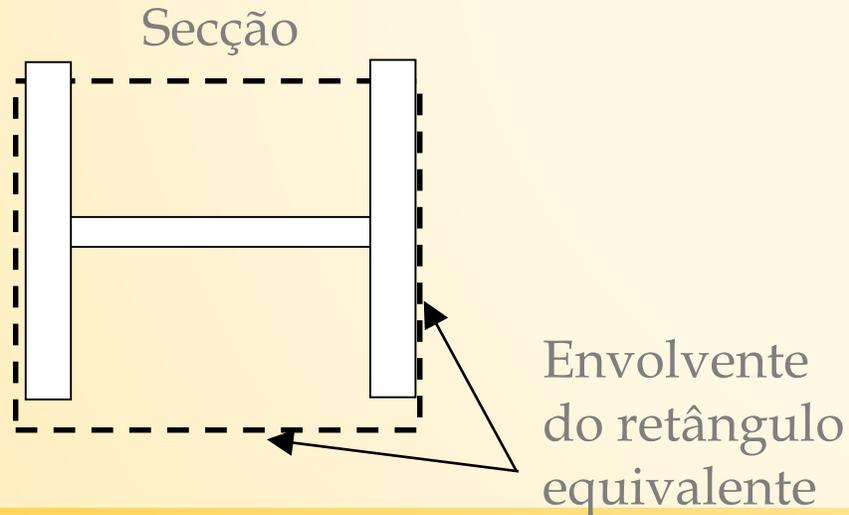
4.2. Geometrical method for exchanged heat fluxes

Modelação do elemento vertical

As secções côncavas implicam **efeito sombra** → Como simplificação, os fluxos de calor são calculados num perímetro convexo.

Para secções em I ou H, o elemento estrutural é transformado numa forma retangular com secção tubular (de acordo com o Anexo G da NP EN 1991-1-2:2010)

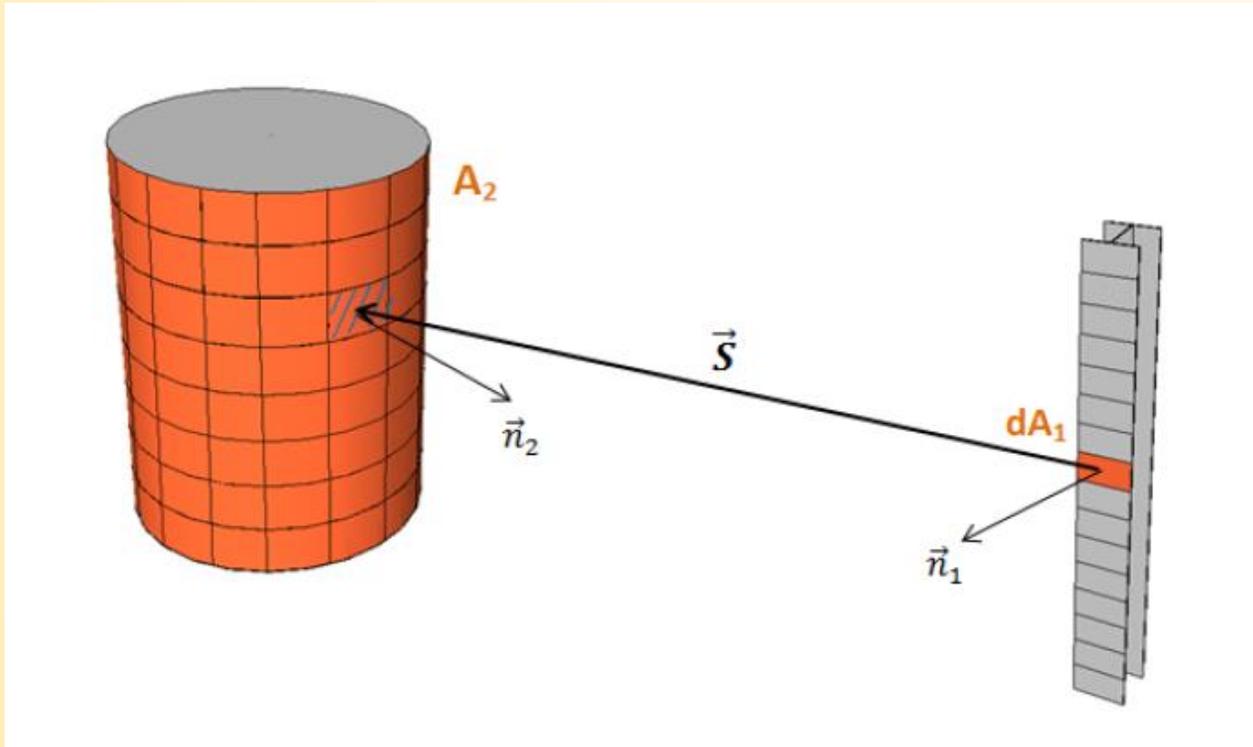
Assim, o perímetro da superfície é subdividido em faces



4. Método analítico e validação

4.2. Geometrical method for exchanged heat fluxes

Integração numérica



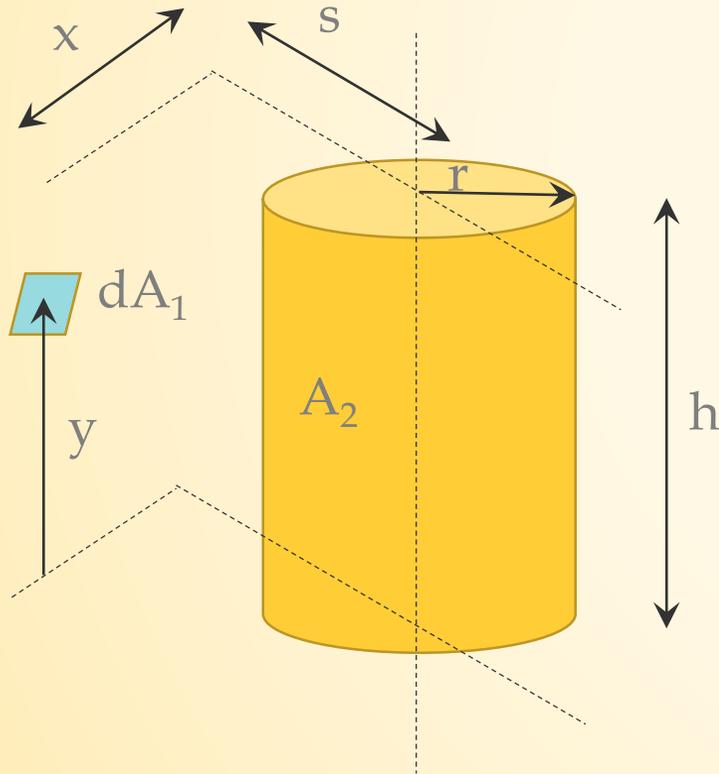
$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S} \cdot \vec{n}_1)(\vec{S} \cdot \vec{n}_2)}{S^4} \Delta A_i$$

- Cada troca de radiação “individual” é calculada (a cada passo de tempo).
- Necessita de um programa para aplicações reais.
- Permite a aplicação de condições não uniformes (fluxos de radiação) no perímetro da secção.

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Fator de vista entre uma superfície infinitesimal e um cilindro



$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) \\ -Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) \right] \\ -\sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right) \\ + H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B}} \right) \end{array} \right\}$$

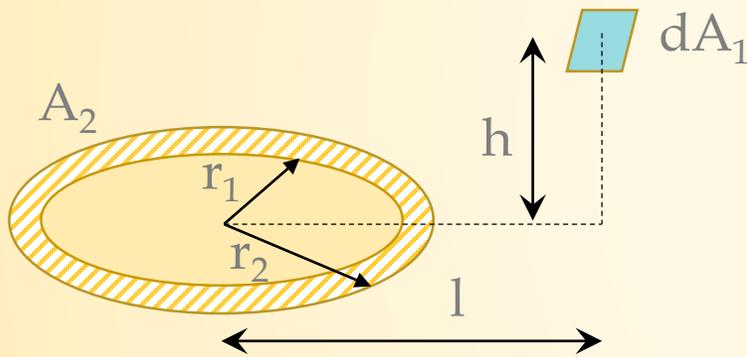
$$\begin{aligned} S &= s/r \\ X &= x/r \\ H &= h/r \\ A &= X^2 + Y^2 + S^2 \\ B &= S^2 + X^2 \\ C &= (H - Y)^2 \end{aligned}$$

Válido apenas se o plano definido por dA_1 não intersecta o cilindro!

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Fator de vista entre uma superfície infinitesimal e um cilindro



$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{H}{2} \left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right)$$

$$H = h/l$$

$$R = r/l$$

Válido apenas se $l > r_2$!

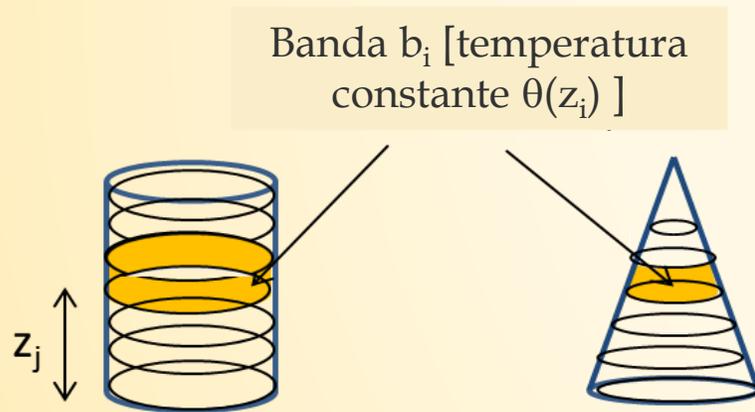
4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Subdivisão da chama em cilindros e anéis

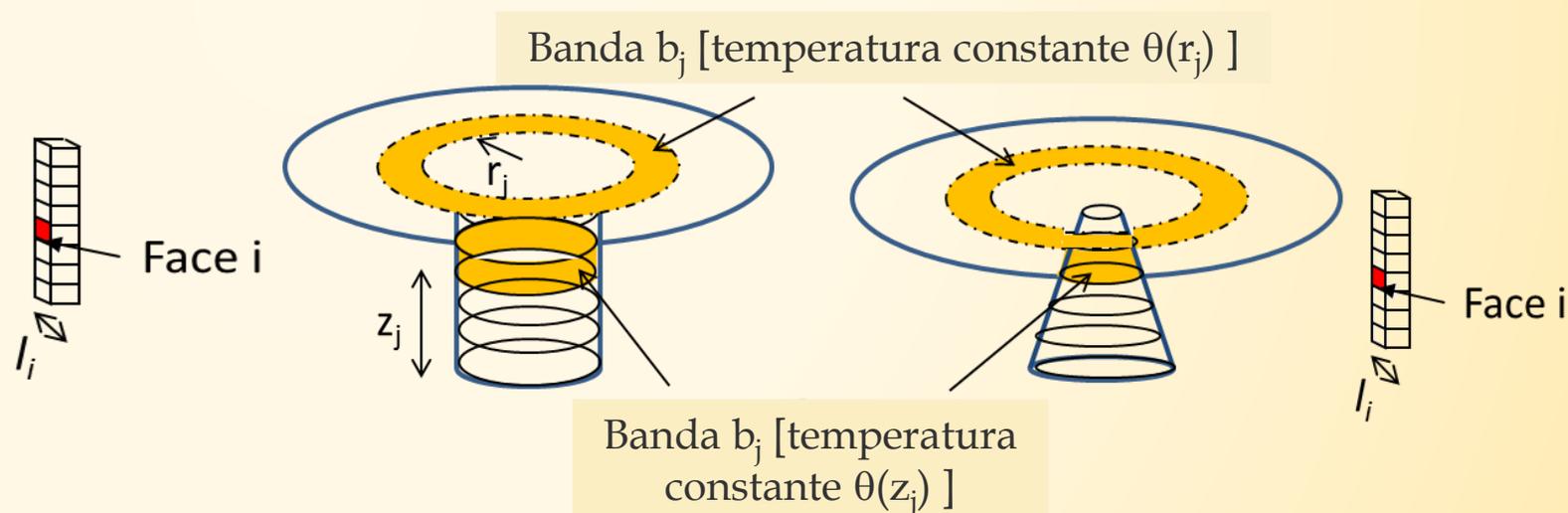
Se a chama não atinge o teto

$(L_f < H_{ceiling}$ ou sem teto)



Se a chama atinge o teto

$(L_f > H_{ceiling})$



Nota: a contribuição dos anéis é bastante baixa, exceto se o elemento estiver situado no anel → considerado apenas para elementos ao nível do teto

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Subdivisão da chama em cilindros e anéis (Adaptação 1)



Ignorando a contribuição dos anéis, subestimamos o fluxo recebido e podemos obter um fluxo incidente igual a 0 acima do incêndio!

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Subdivisão da chama em cilindros e anéis (Adaptação 2)

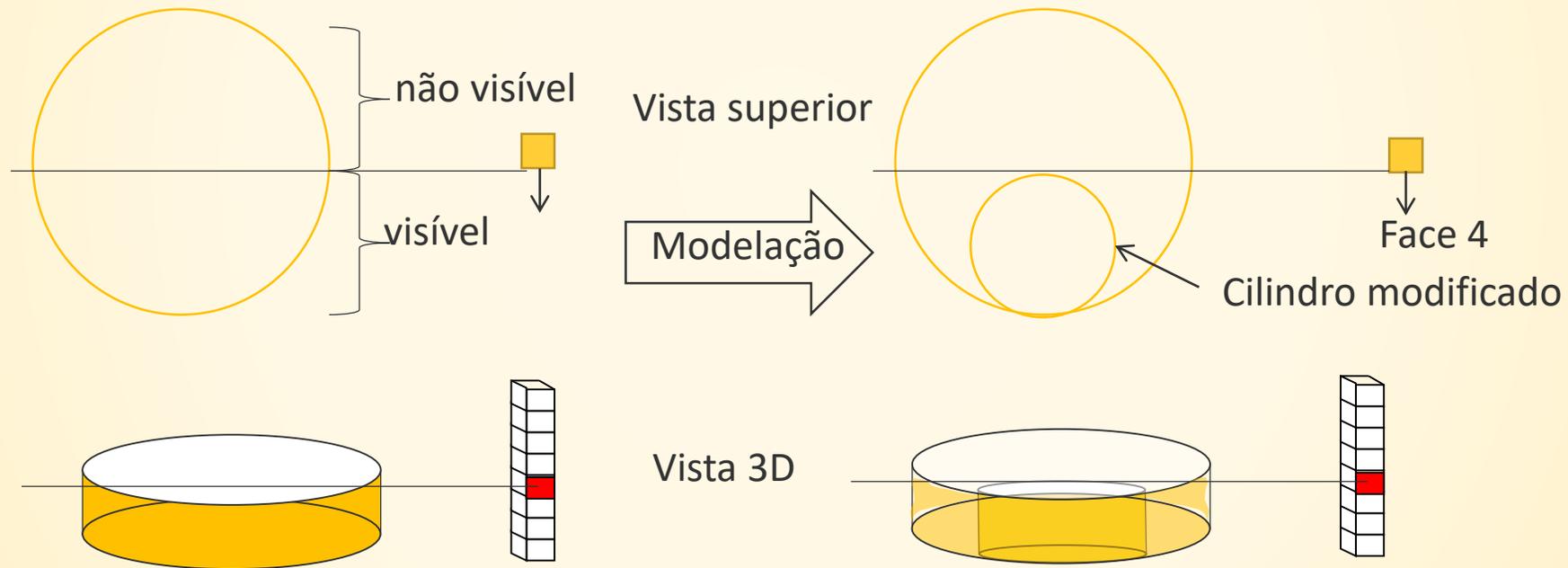


A fórmula para cilindro não é válida se a superfície recetora intersecta o cilindro!

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Subdivisão da chama em cilindros e anéis (Adaptação 2)

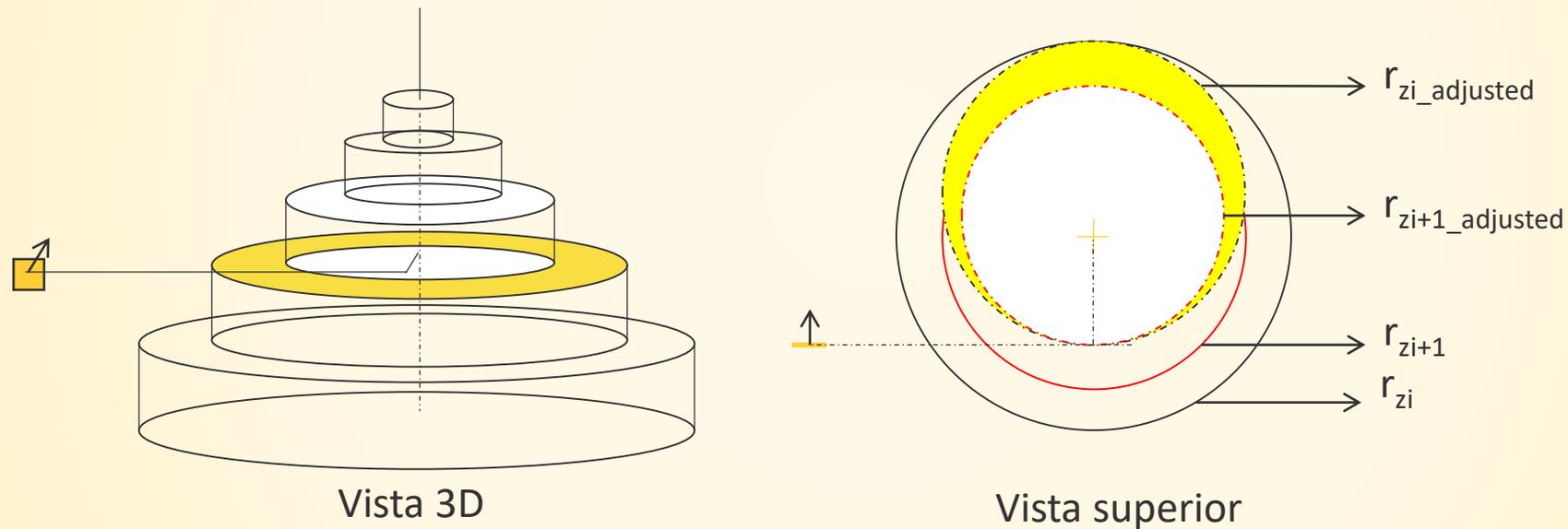


Neste caso, o cilindro inicial é transformado num cilindro modificado na zona visível

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Subdivisão da chama em cilindros e anéis (Adaptação 3)



Uma porção dos anéis é «escondida» pelo cilindro situado acima → Deve ser considerada uma zona reduzida (do lado da segurança se ignorar esta redução...)

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Notas adicionais

- O valor recomendado para a largura do cilindro é 50 cm
- Para elementos situados abaixo do teto, deve ser adicionada a convecção → Hasemi
- Para vários incêndios, os fluxos recebidos por cada incêndio devem ser adicionados. O fluxo total incidente é limitado a 100 kW/m²

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

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

$$\rho_a c_a(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} \left[\dot{h}_{z_j} + \alpha_c(20 - \theta) + \varepsilon(\sigma(293^4 - (\theta + 273)^4)) \right] \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

$\rho_a, c_a,$ e A_m/V são densidade [kg.m⁻³], calor específico [J.kg⁻¹.K⁻¹] e massividade [m⁻¹] do elemento

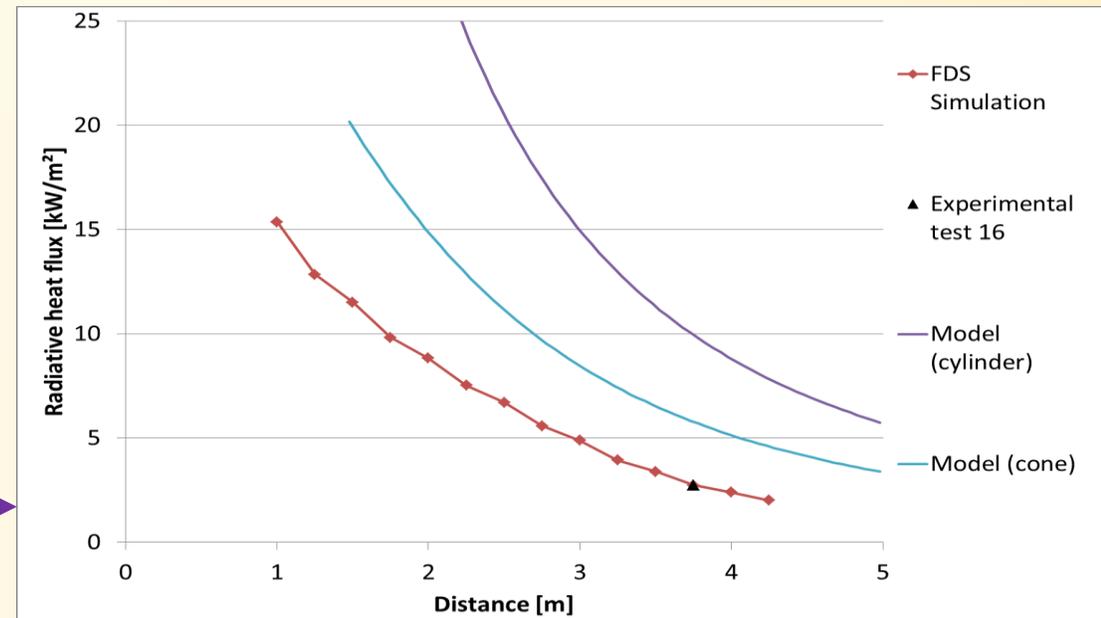
4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Validação do modelo baseado nos ensaios de Liège (e modelação FDS)

- Medidor situado a 3.75 m da fonte de incêndio (altura: 1.75 m)
- Orientação do medidor: perpendicular ao eixo fogo-medidor

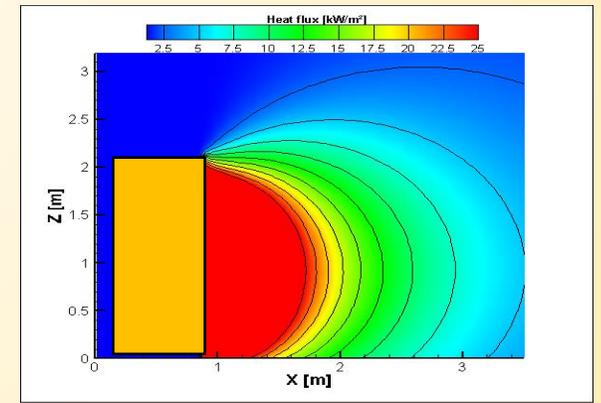
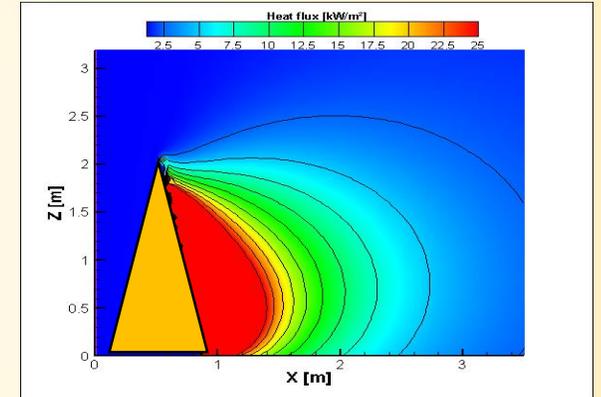
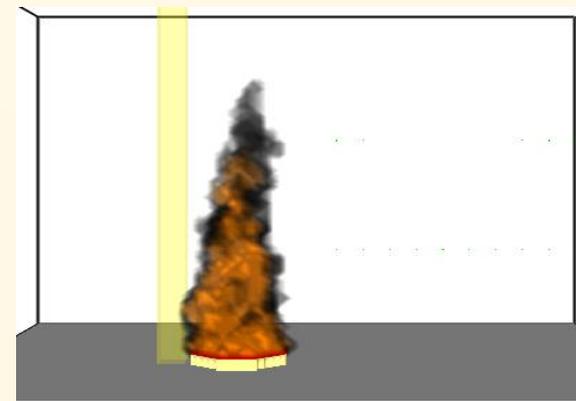
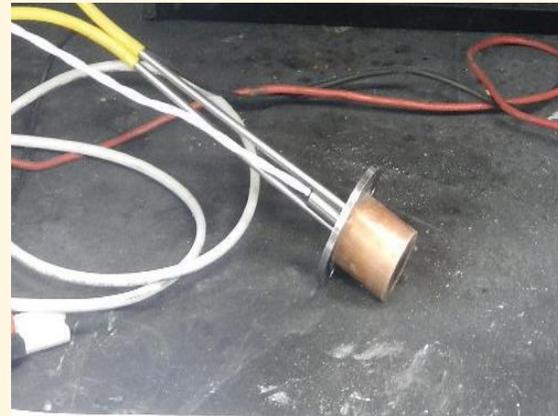
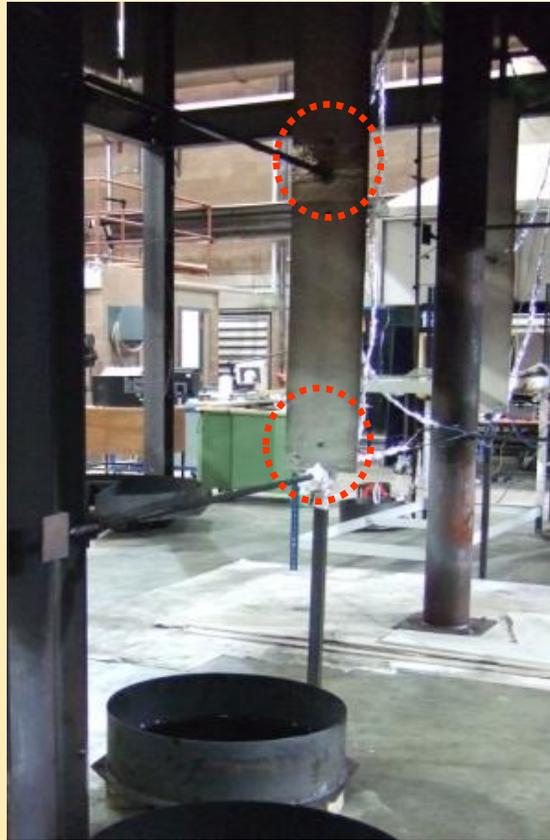
Diâm.	Valor médio experimental	Ensaio n°	Chama cilíndrica	Chama cónica
[m]	[kW/m ²]	[-]	[kW/m ²]	[kW/m ²]
0.60	0.31	1 a 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 a 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 a 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 a 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 a 22	14.55	8.30



4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

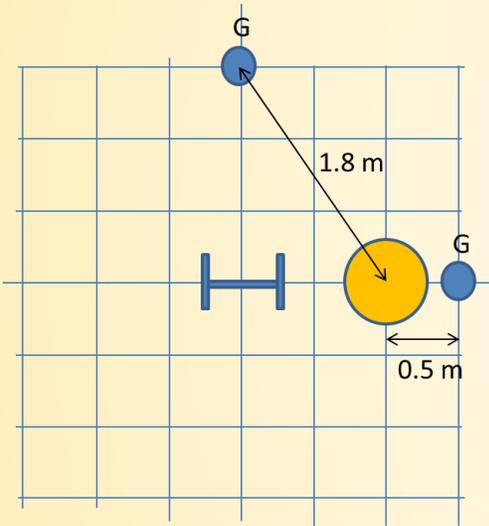
Validação do modelo baseado nos ensaios de Ulster (e modelação FDS)



4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Validação do modelo baseado nos ensaios de Ulster (e modelação FDS)

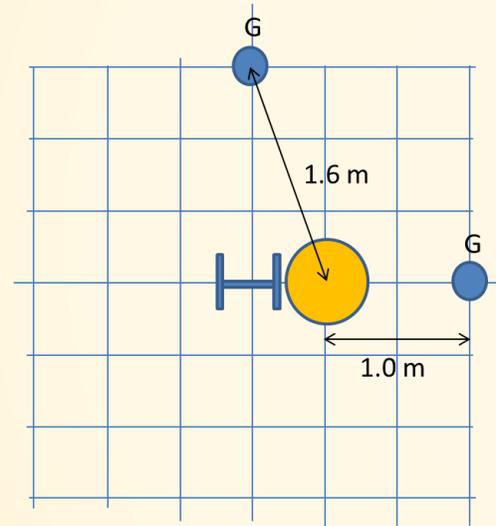


Caso 1a

1 incêndio

$D = 0.7 \text{ m}$

Medidores a 0.5/1.8 m



Caso 1b

1 incêndio

$D = 0.7 \text{ m}$

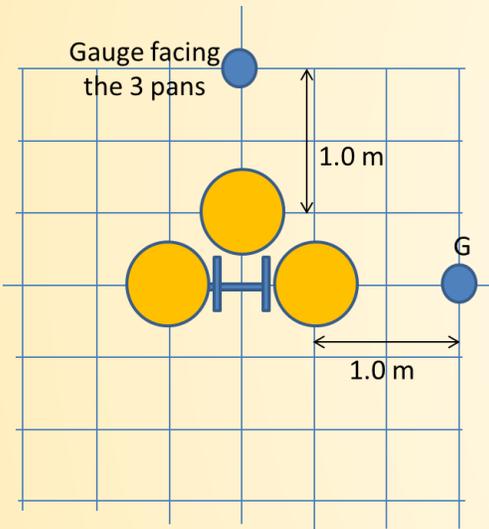
Medidores a 1.0/1.6 m

Localização do medidor		Média experimental	Simulação FDS	Chama cilíndrica	Chama cônica
Altura	Distância				
m	m	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²
1.0	<u>0.5</u>	30.6	28.5	74.0	39.0
1.0	<u>1.0</u>	13.8	12.9	33.2	17.9
1.0	<u>1.6</u>	5.9	5.5	15.5	8.5
1.0	<u>1.8</u>	4.2	3.8	10.8	6.0
2.0	<u>0.5</u>	6.2	11.2	22.0	5.9
2.0	<u>1.0</u>	4.5	5.9	14.1	5.5
2.0	<u>1.6</u>	3.0	3.7	8.8	4.1
2.0	<u>1.8</u>	2.3	2.6	6.7	3.3

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

Validação do modelo baseado nos ensaios de Ulster (e modelação FDS)

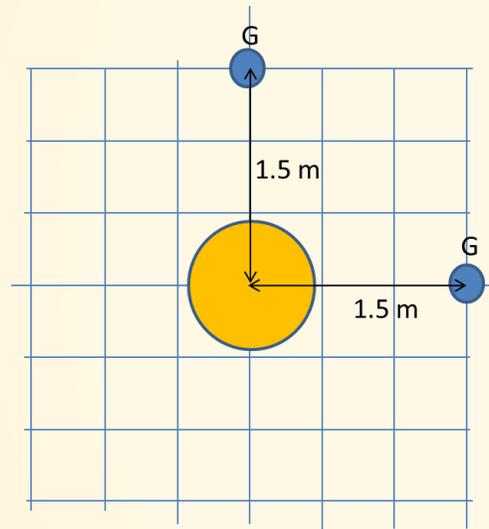


Caso 3

3 incêndios

$D = 0.7 \text{ m}$

Medidores a 1.0 m



Caso 5

1 incêndio

$D = 1.6 \text{ m}$

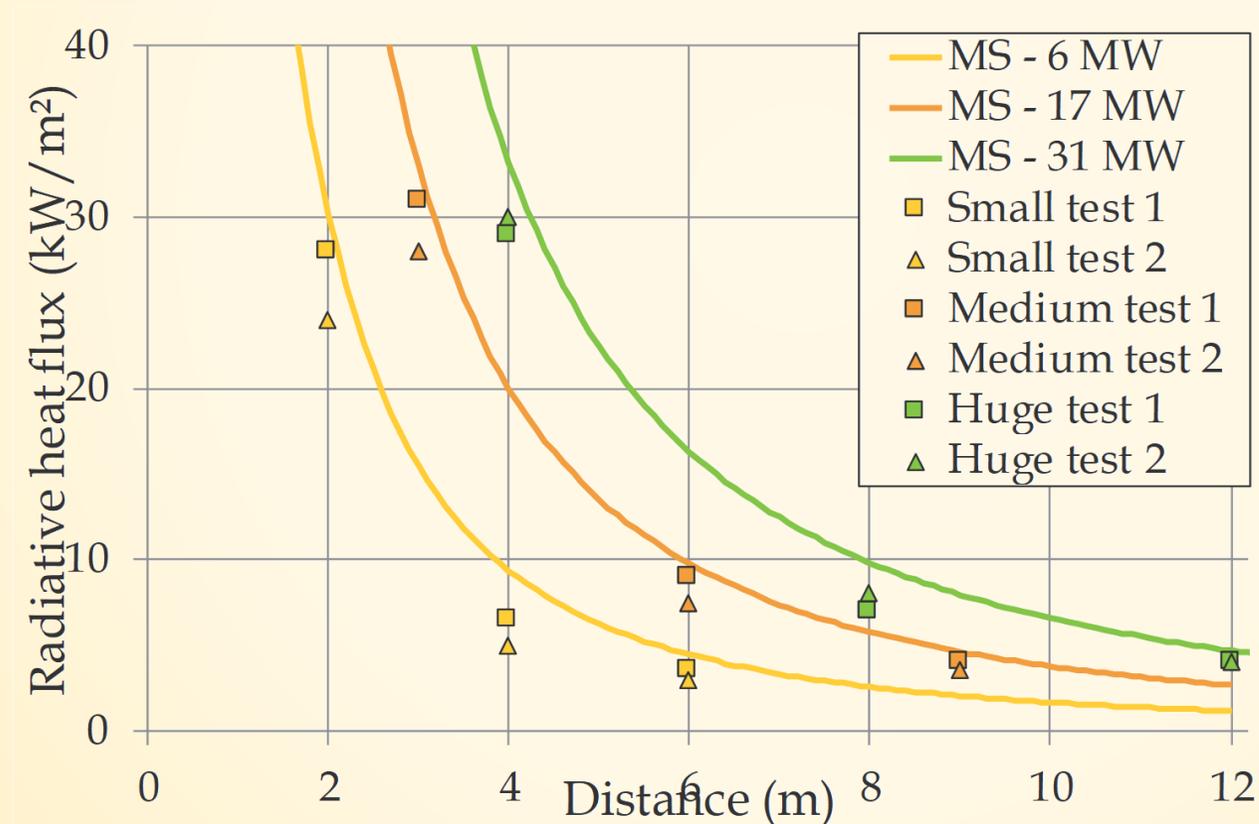
Medidores a 1.5 m

Localização do medidor		Média experimental	Média da simulação	Chama cilíndrica	Chama cónica
Altura	Distância				
m	m	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²
1.0	<u>1.0</u>	31.0	26.6	66.3	37.4
1.0	<u>1.0</u>	24.3	21.6	62.0	34.6
2.0	<u>1.0</u>	15.0	17.7	40.9	16.2
2.0	<u>1.0</u>	13.0	13.6	38.5	15.9
Localização do medidor		Média experimental	Média da simulação	Chama cilíndrica	Chama cónica
Altura	Distância				
m	m	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²
1.0	<u>1.5</u>	37.6	33.6	53.9	38.9
2.0	<u>1.5</u>	26.5	24.5	55.2	29.7

4. Método analítico e validação

4.3. Modelo simplificado

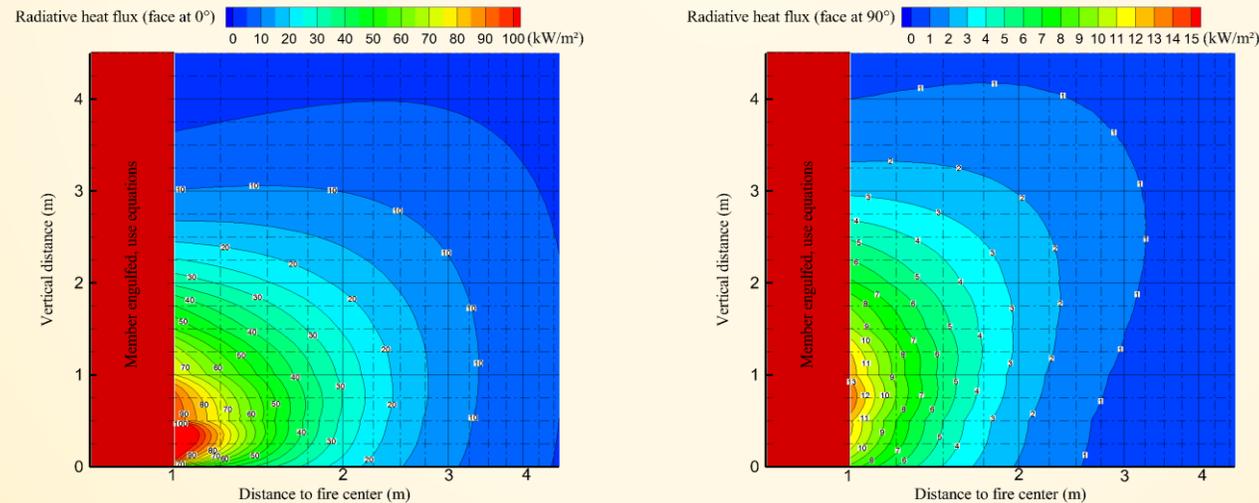
Validação do modelo para grandes diâmetros (testes LCPP)



4. Método analítico e validação

4.4. Nomogramas

- Fornece um novo conjunto de resultados para validação da implementação do SAFIR e do OZone
- Fornece resultados rápidos e seguros para uma ampla gama de configurações (pré dimensionamento) e um método de interpolação para aplicação a uma ainda mais vasta gama de configurações
- Fornece um conjunto de resultados para validação da implementação de métodos analíticos por profissionais (folhas de cálculo ou software)

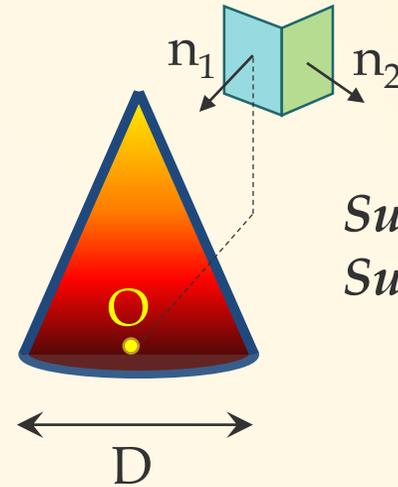


$D = 2\text{m}$, $\text{RHR} = 500 \text{ kW/m}^2$, $\theta = 0^\circ$ (esquerda) ou $\theta = 90^\circ$ (direita)

4. Método analítico e validação

4.4. Nomogramas

- Cada nomograma é caracterizado por:
 - o diâmetro do fogo (m)
 - a RHR (kW/m^2)
 - a orientação da superfície recetora ($^\circ$)
- Os nomogramas apenas representam a radiação. Não usar:
 - No interior do incêndio → HESKESTAD
 - Ao nível do teto → HASEMI
- Assume que a emissividade da chama é 1.0
- Fornecem o fluxo incidente, não o fluxo absorvido (deve ser multiplicado pela emissividade!)



Superfície Finita 1: $\theta = 0^\circ$
Superfície Finita 2: $\theta = 90^\circ$

4. Método analítico e validação

4.4. Nomogramas

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D (m)	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
HRR (kW/m ²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500
Potência (MW)	0.8	1.6	3.1	4.7	1.8	3.5	7.1	10.6	3.1	6.3	12.6	18.8

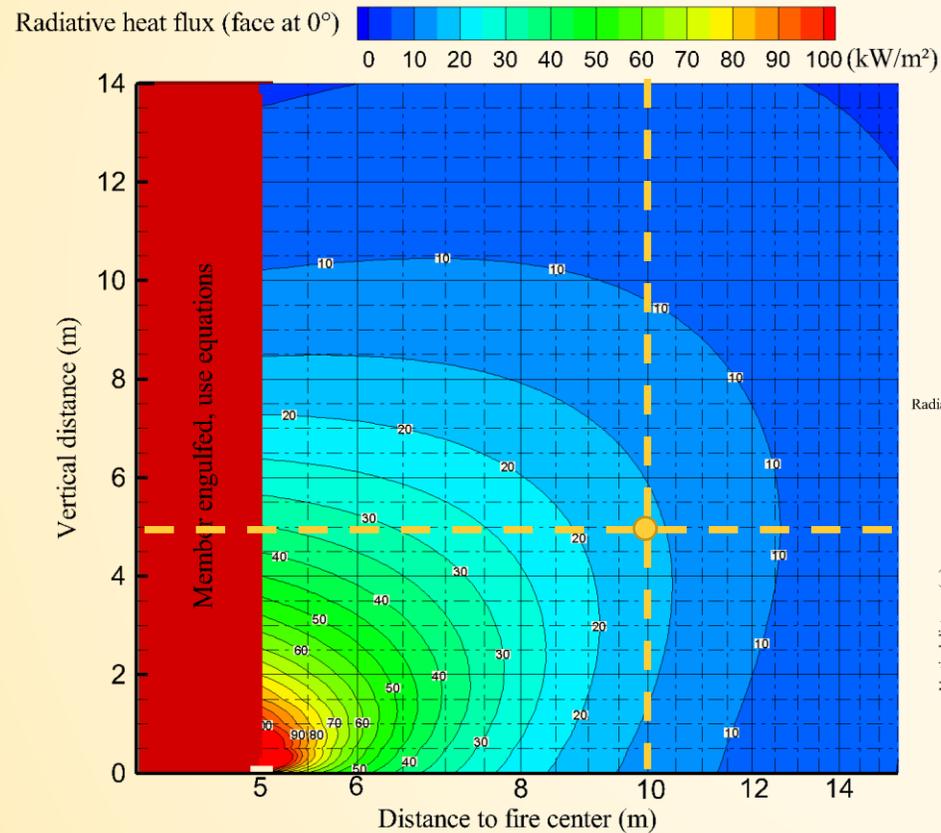
Caso	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D (m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
HRR (kW/m ²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Potência (MW)	7.1	14.1	28.3	42.4	12.6	25.1	50.3	47.7	15.9	31.8	19.6	39.3

Âmbito de aplicação do método (idem do Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010): $D \leq 10 \text{ m}$; $Q \leq 50 \text{ MW}$

→ As configurações escolhidas abrangem o campo de aplicação do método de cálculo

4. Método analítico e validação

4.4. Nomogramas



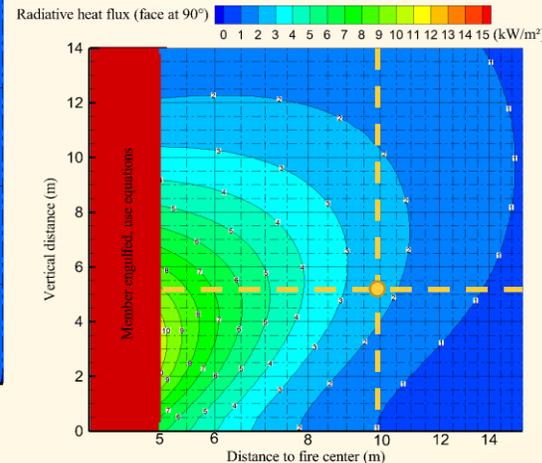
➤ Características do incêndio localizado:

- $D = 10 \text{ m}$
- $RHR: 500 \text{ kW/m}^2$

➤ Posição do alvo

- $Z = 5 \text{ m}$
- $X = 10 \text{ m}$
- Orientação: 0°

Fluxo incidente
= 16 kW/m^2



➤ Posição do alvo

- $Z = 5 \text{ m}$
- $X = 10 \text{ m}$
- Orientação : 90°

Fluxo incidente
= 2.4 kW/m^2

4. Método analítico e validação

4.5. Conclusões

- O projeto LOCAFI introduz o novo conceito de Chama Sólida Virtual.
- A distribuição de temperatura no perímetro da Chama Sólida Virtual é baseada em equações existentes do Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010 (Heskestad, Hasemi).
- A troca de fluxos de radiação é baseada no fator de vista do Anexo G da NP EN 1991-1-2:2010.
- O modelo simplificado é baseado em equações matemáticas que fornecem o fluxo por radiação recebido por uma superfície infinitesimal proveniente de cilindros e anéis.
- Os fluxos convectivos devem ser calculados separadamente. Contudo, os fluxos de calor convectivos apenas tem um efeito significativo em configurações já abrangidas pelo Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010 (elementos totalmente envolvidos pelas chamas ou situados ao nível do teto).



LOCAFI+

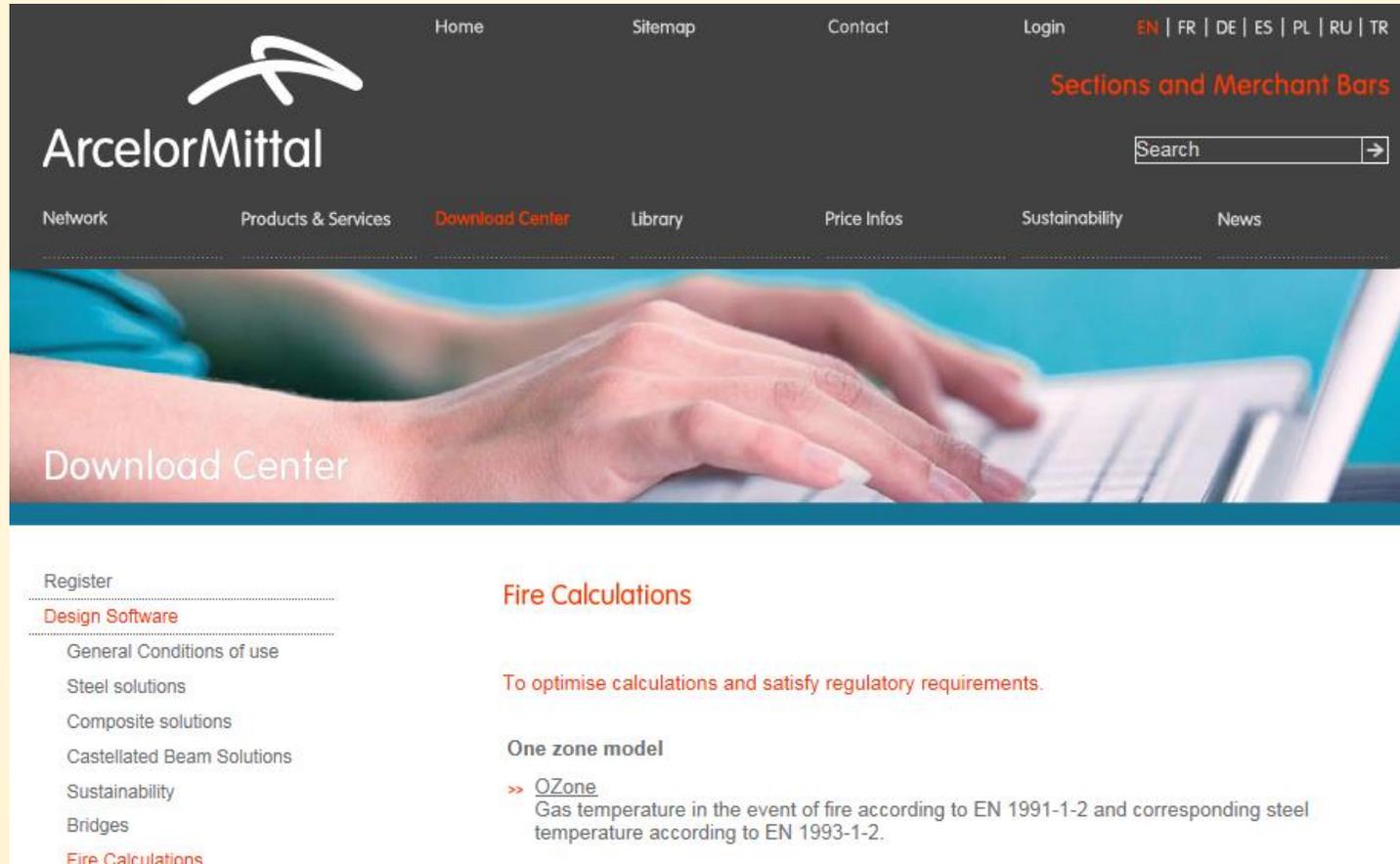
Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAlied Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

5. Programa de cálculo automático

5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento

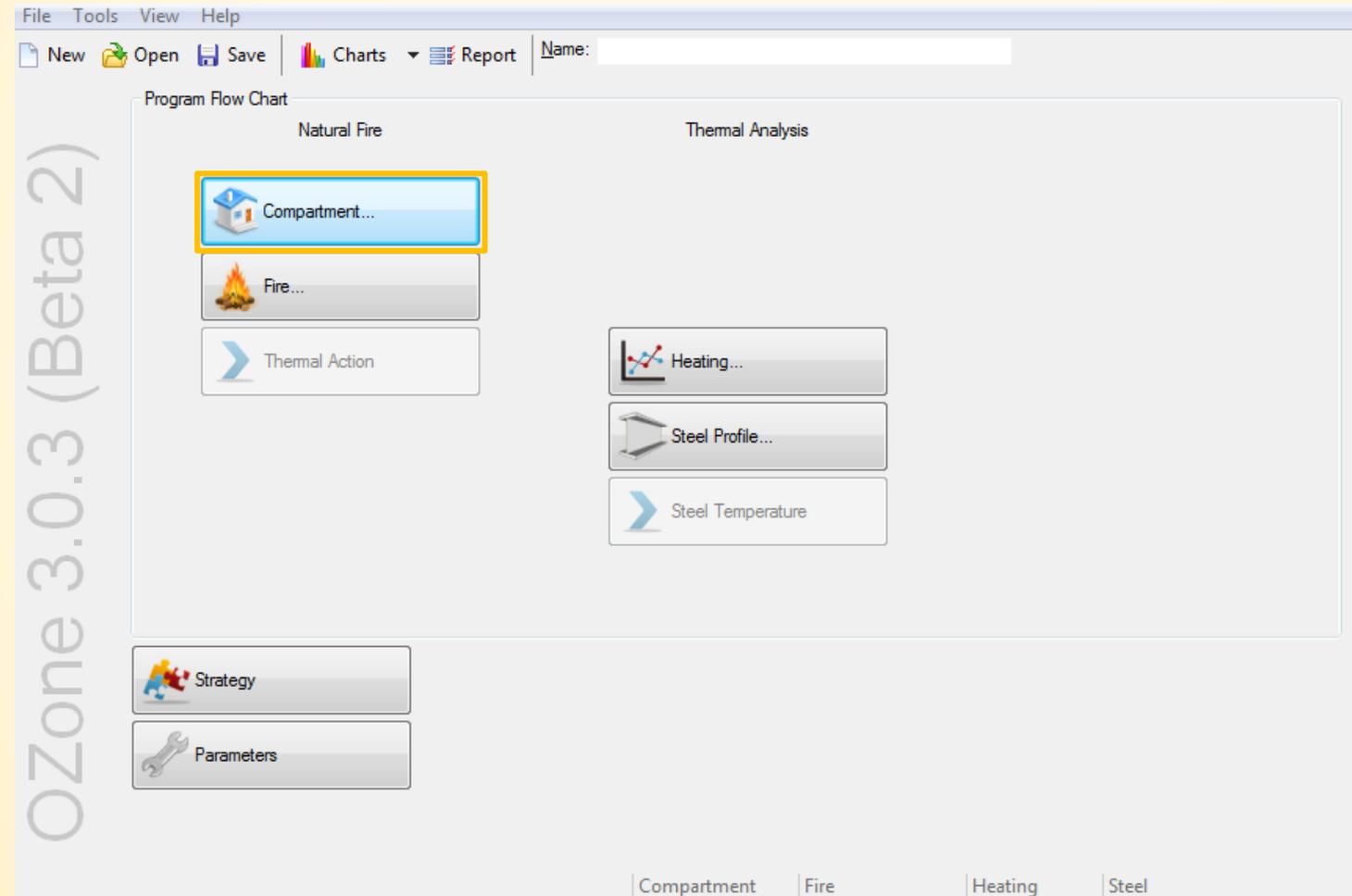


The screenshot shows the ArcelorMittal website's Download Center page. The header includes the ArcelorMittal logo, navigation links (Home, Sitemap, Contact, Login), and language options (EN, FR, DE, ES, PL, RU, TR). A search bar is also present. The main navigation menu includes Network, Products & Services, Download Center (highlighted), Library, Price Infos, Sustainability, and News. The main content area features a banner for the Download Center with an image of hands typing on a laptop. Below the banner, there is a sidebar with a list of categories: Register, Design Software (highlighted), General Conditions of use, Steel solutions, Composite solutions, Castellated Beam Solutions, Sustainability, Bridges, and Fire Calculations (highlighted). The main content area is titled "Fire Calculations" and includes the text "To optimise calculations and satisfy regulatory requirements." and "One zone model" with a link to "OZone" (highlighted) and a description: "Gas temperature in the event of fire according to EN 1991-1-2 and corresponding steel temperature according to EN 1993-1-2."

<http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html>

5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



File Tools View Help

Form of Compartment

Rectangular Floor
 Flat Roof
 Single Pitch Roof
 Double Pitch Roof
 Any Compartment

Height: m
Depth: m
Length: m

Define Layers and Openings

Select Wall: Define

Select Walls to Copy to:
Ceiling
Wall 1
Wall 2
Wall 3
Wall 4

Copy Copy Openings

Defined Walls:

Wall	Type	Openings	Length
Floor			
Ceiling			
Wall 1			
Wall 2			
Wall 3			
Wall 4			

Forced Ventilation

Smoke Extractors:

	Height	Diameter	Volume	In/Out
	m	m	m ³ /sec	
Extractor 1				
Extractor 2				
Extractor 3				

OK Cancel

Geometria do compartimento

Propriedades do pavimento, paredes e teto

Ventilação forçada (se existir)

5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento

File Tools View Help

Wall Length: 13 m

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		cm	kg/m ³	W/mK	J/kgK	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Steel [EN1994-1-2]	0.1	7850	45	600	0.8	0.8
Layer 2	Glass wool_Rock wool	6	60	0.037	1030	0.8	0.8
Layer 3	Steel [EN1994-1-2]	0.1	7850	45	600	0.8	0.8
Layer 4							

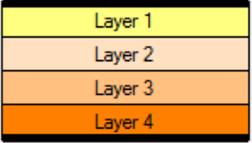
Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

	Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
	m	m	m		
Opening 1	0	4	4.2	Stepwise	no
Opening 2	0	2	1	Stepwise	no
Opening 3					

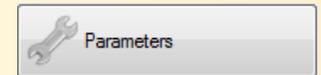
Inside



Outside

OK Cancel

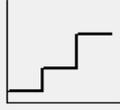
Propriedades das camadas para cada parede



Temperature Dependent Openings

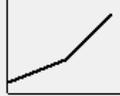
Temperature Dependent: 400 °C

Stepwise Variation



Temperature °C	% of Total Openings
20	10
400	50
500	100

Linear Variation



Temperature °C	% of Total Openings
20	10
400	50
500	100

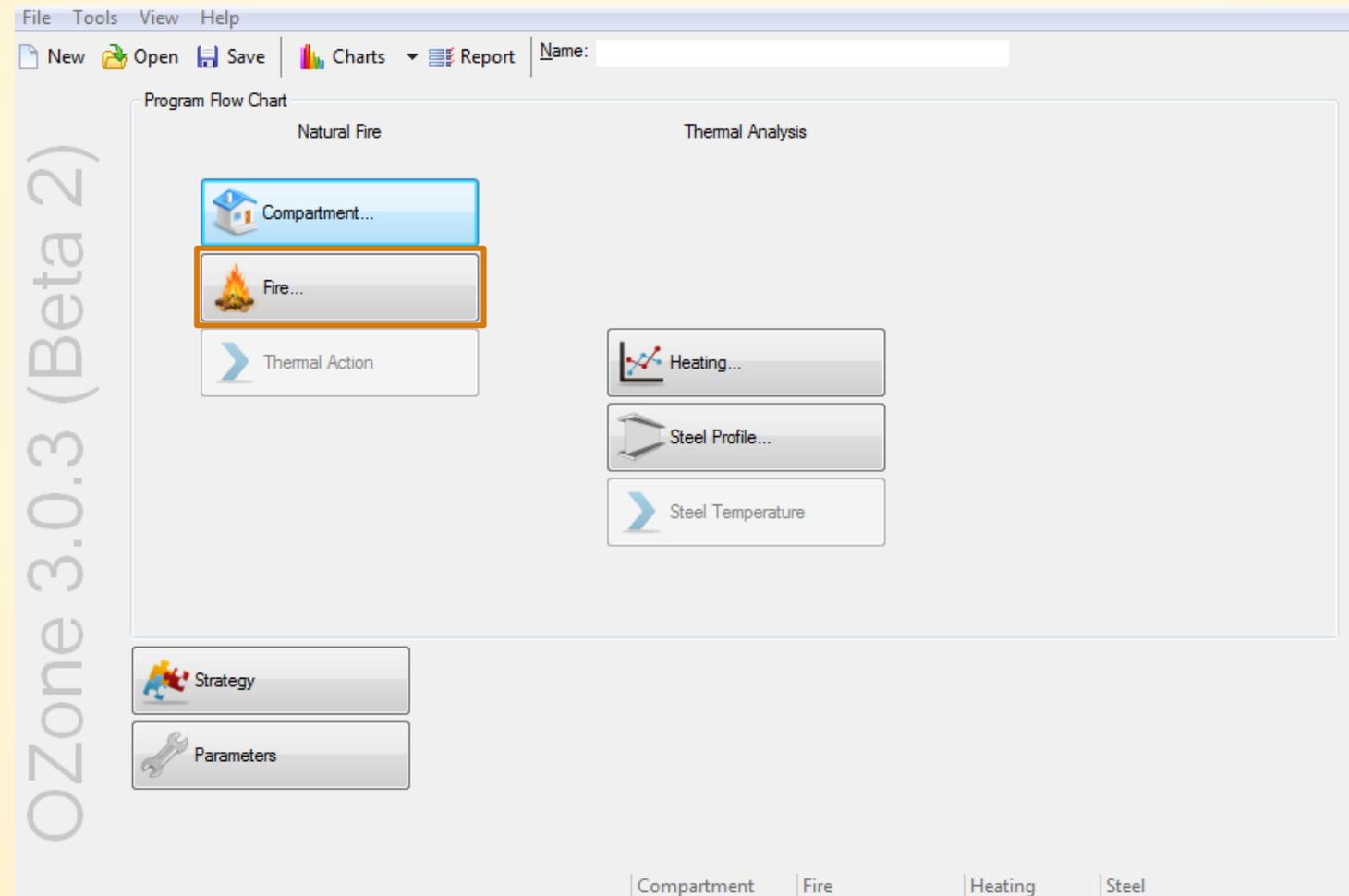
Time Dependent Openings

Time sec	% of Total Openings
0	5
1200	100

Aberturas

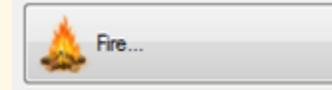
5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



Fire

File Tools View Help

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2) User Defined Fire

Localised Fire: Localised Fire

National Annex:

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kW/m²]	Fire Load q _{f,k} 80% Fractile MJ/m²	Danger of Fire Activation
School	Medium	250	347	1

Active Fire Fighting Measures

- Automatic Water Extinguishing System $\delta_{n,1}=1$
- Independent Water Supplies 1 2 $\delta_{n,2}=1$
- Automatic Fire Detection by Heat $\delta_{n,3}=1$
- Automatic Fire Detection by Smoke $\delta_{n,5}=1$
- Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade $\delta_{n,6}=1$
- Work Fire Brigade $\delta_{n,8}=1$
- Off Site Fire Brigade $\delta_{n,9}=1$
- Safe Access Routes $\delta_{n,10}=1$
- Staircases Under Overpressure in Fire Alarm $\delta_{n,9}=1$
- Fire Fighting Devices $\delta_{n,9}=1$
- Smoke Exhaust System $\delta_{n,10}=1$

Fire Info

Max Fire Area: m²

Fire Elevation: m

Fuel Height: m

Design Fire Load

Fire Risk Area: m² $\delta_{q,1}=1$

Danger of Fire Activation: $\delta_{q,2}=1$

Active Measures: $\prod \delta_{n,i}=1$

$q_{f,d} = \delta_{q,1} \delta_{q,2} \prod \delta_{n,i} m q_{f,k} = 277.6 \text{ MJ/m}^2$

Combustion

Combustion Efficiency Factor:

Combustion Model:

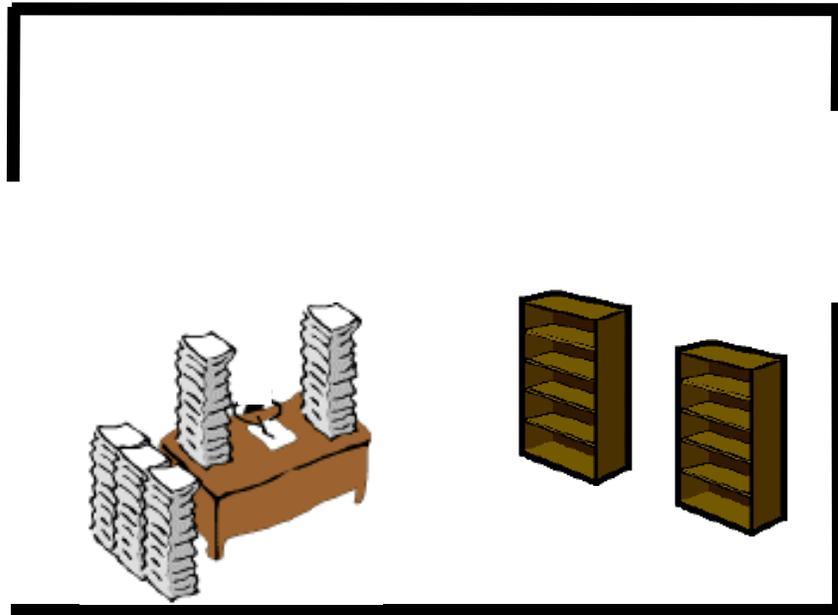
Stoichiometric Coefficient:

OK Cancel

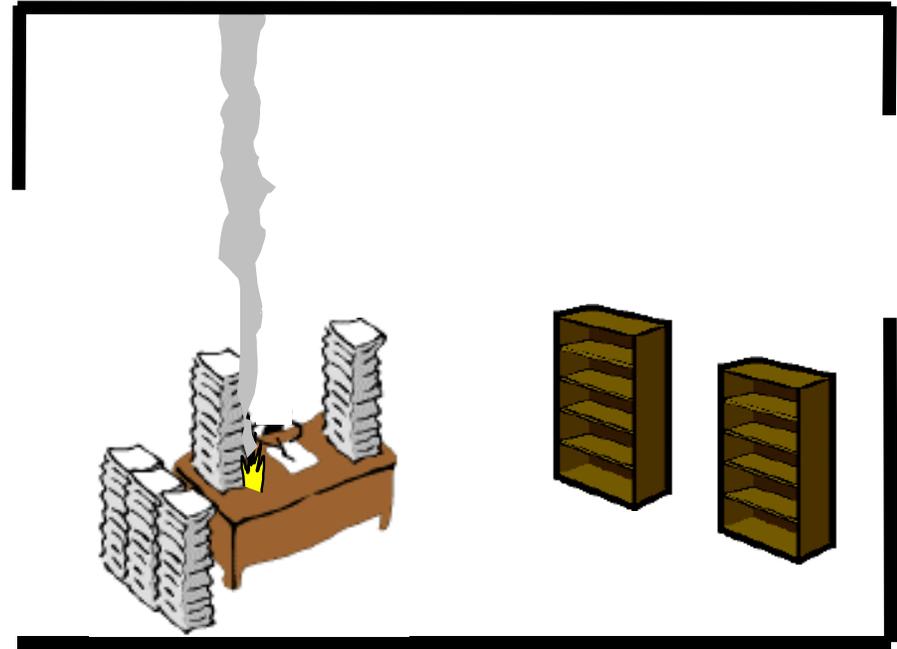
5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento

Antes do incêndio



Ignição

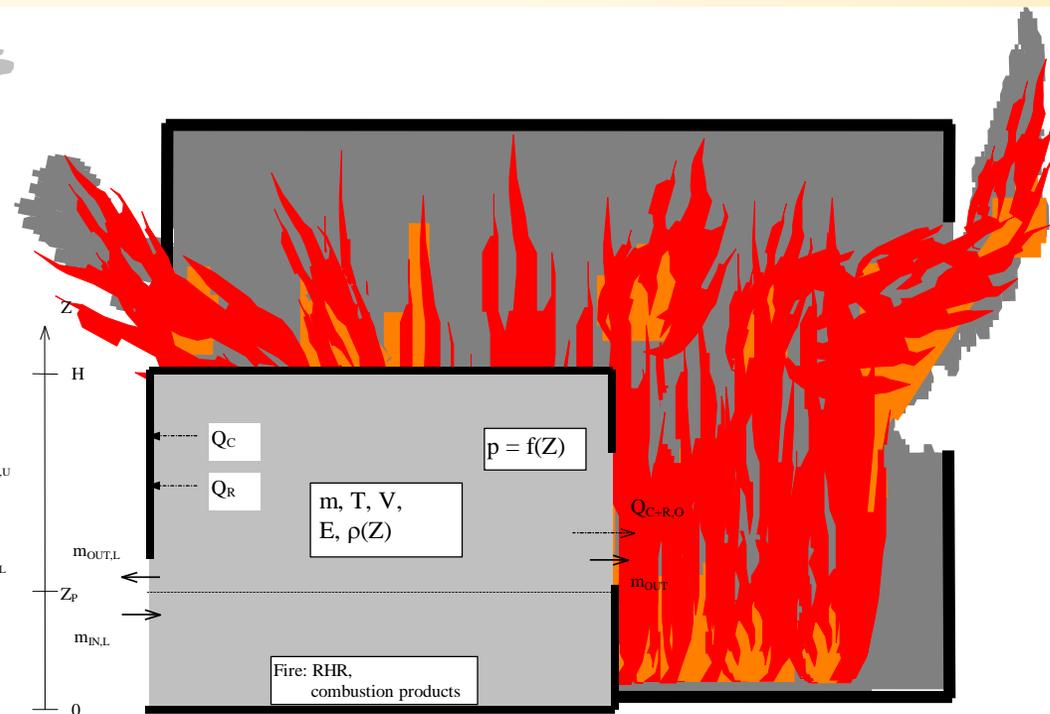
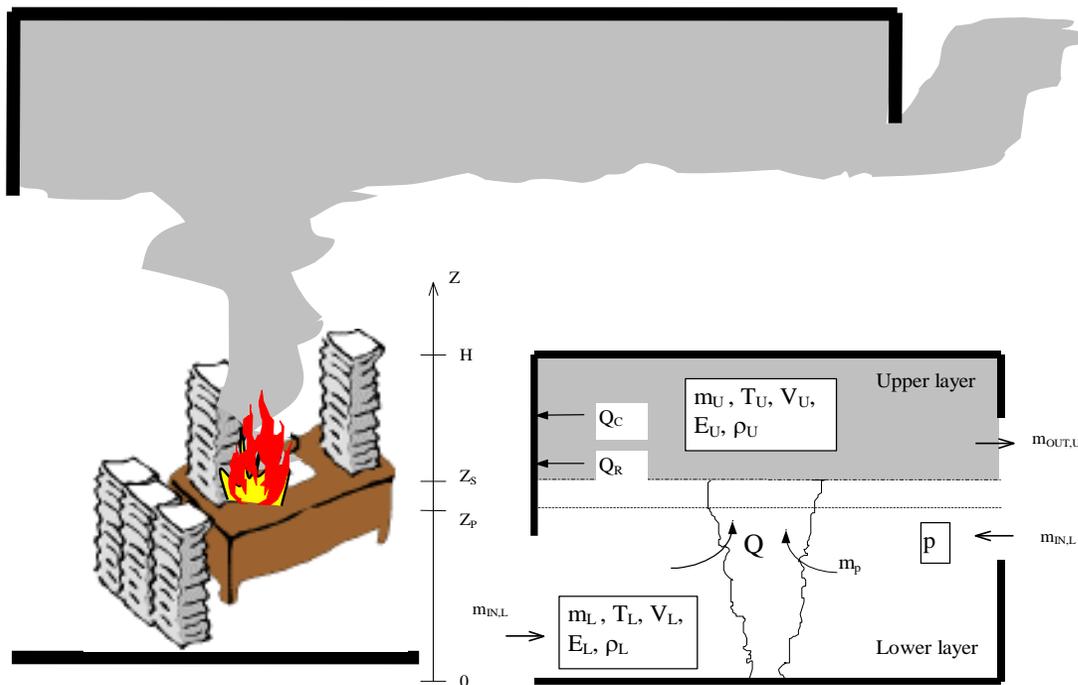


5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento

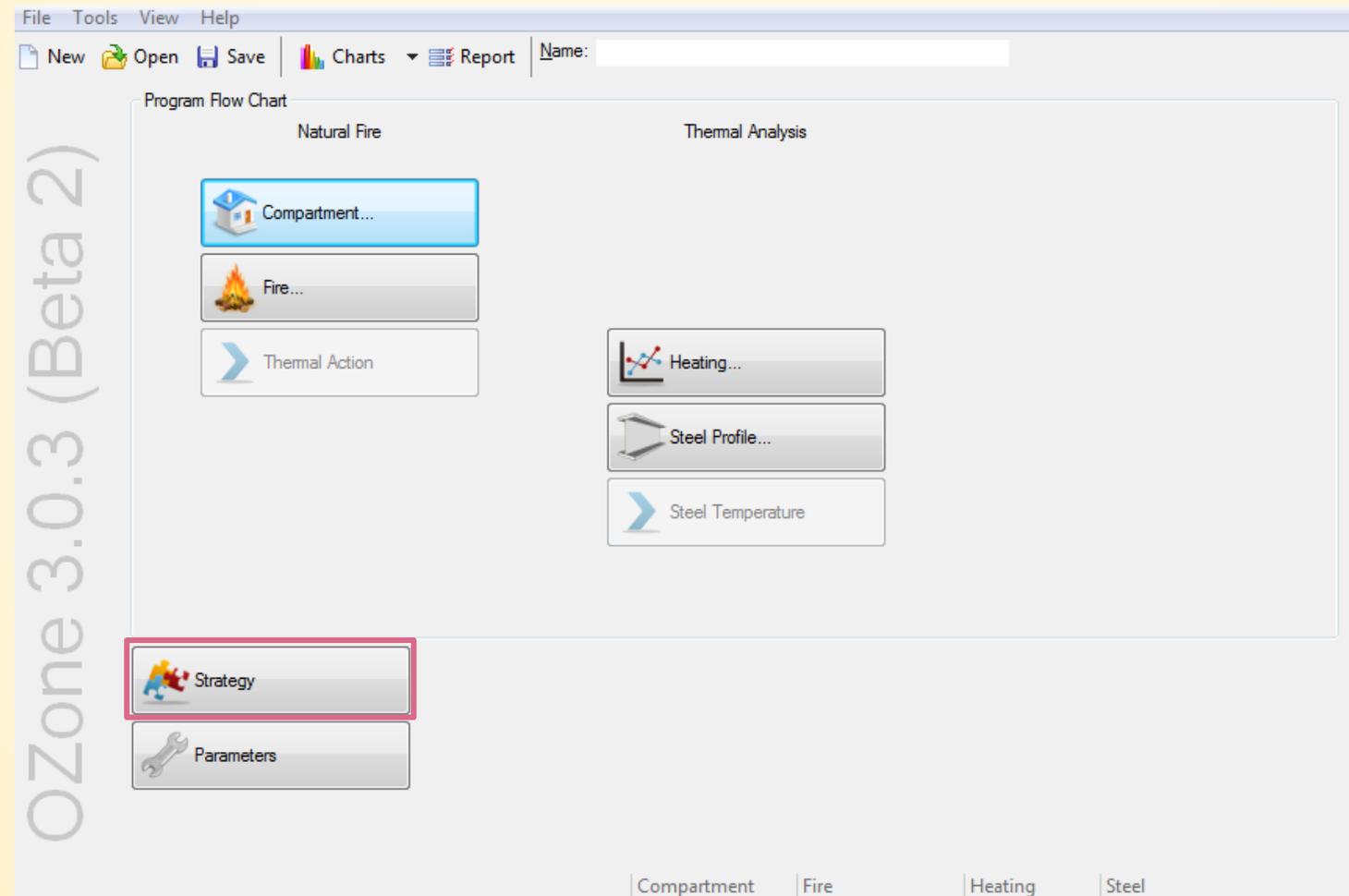
Incêndio localizado

Incêndio totalmente desenvolvido



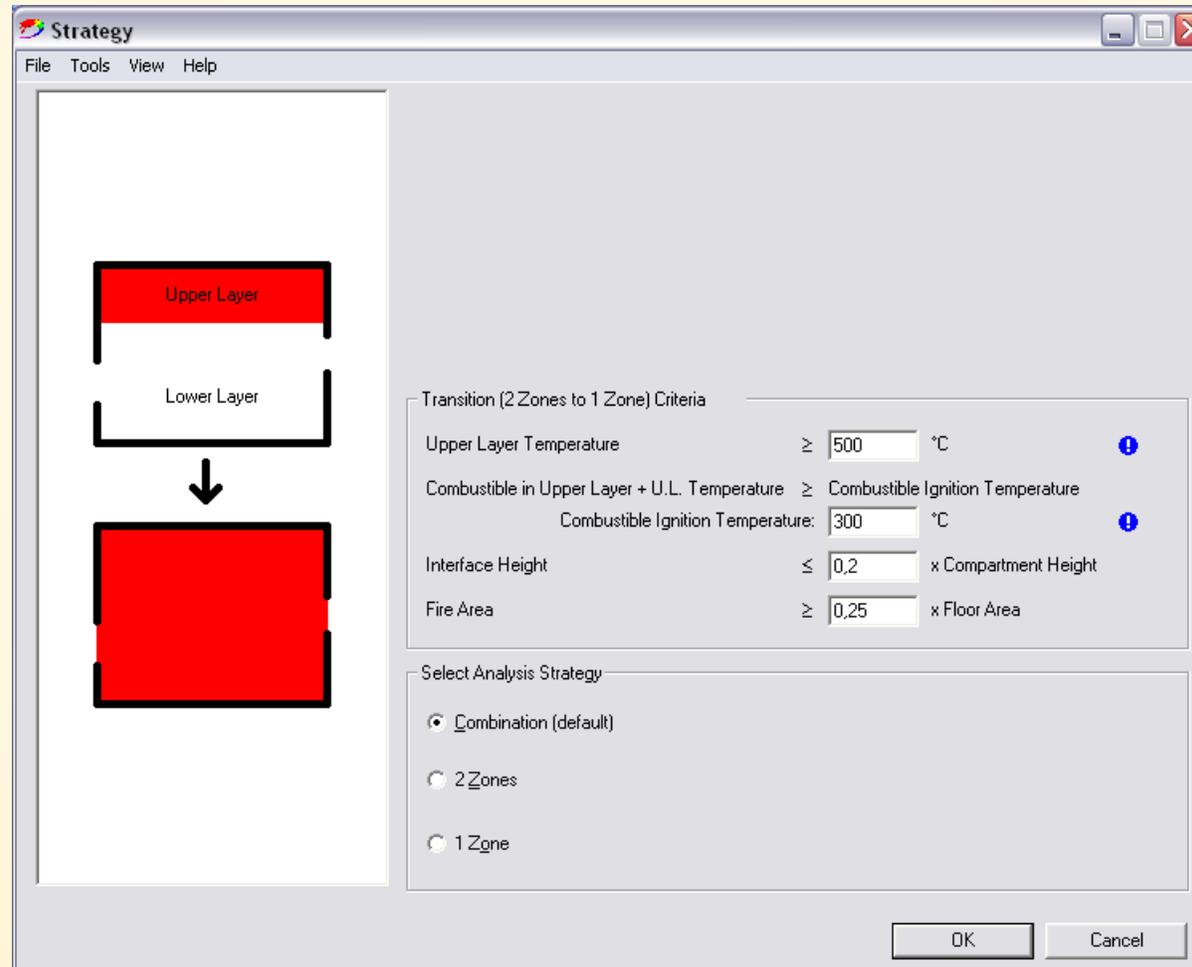
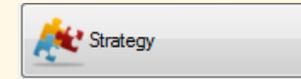
5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



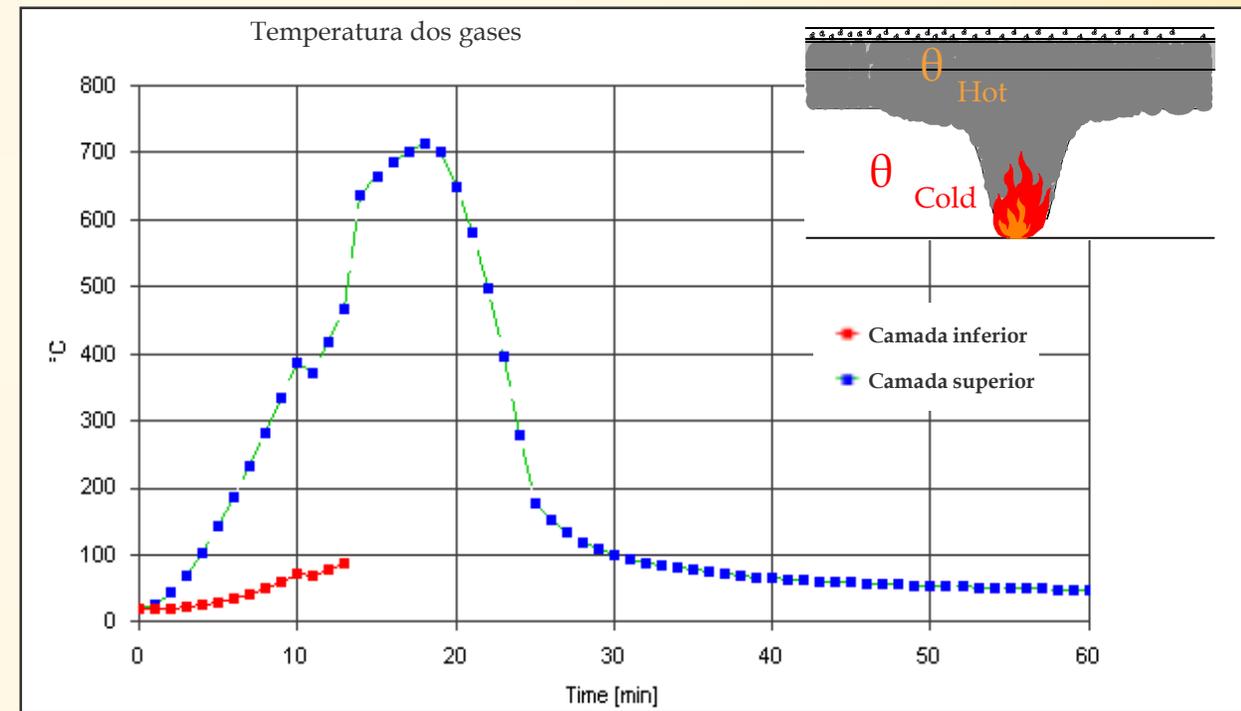
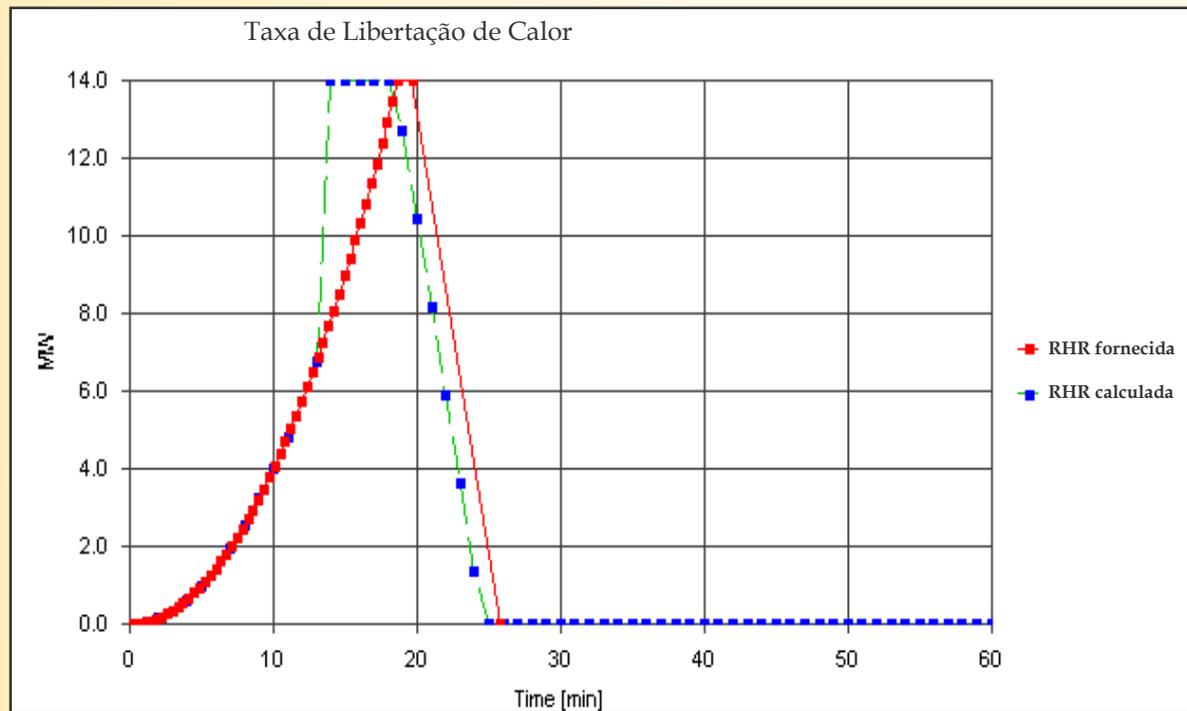
5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento



Após 13 minutos, a temperatura da camada superior atinge os 500°C → Passando de 2 zonas para 1 zona

5. Programa de cálculo automático

5.1. OZone Compartimento

The screenshot shows the 'Fire' software interface. The window title is 'Fire'. The menu bar includes 'File', 'Tools', 'View', and 'Help'. The main area is divided into several sections:

- Compartment Fire:** Radio buttons for 'Annex E (EN 1991-1-2)' and 'User Defined Fire'. The 'User Defined Fire' option is selected and highlighted with an orange box.
- Localised Fire:** Radio button for 'Localised Fire'.
- Table:** A table with 5 columns: 'Point', 'Time', 'RHR', 'mf', and 'Fire Area'. The units are 'sec', 'MW', 'kg/s', and 'm²' respectively. The table has 23 rows, numbered 1 to 23.
- Data Points:** Buttons for 'Save...' and 'Load...'.
- Fire Info:** Input fields for 'Max Fire Area' (m²), 'Fire Elevation' (m), and 'Fuel Height' (m). All are currently set to 0.
- User Defined Fire Columns:** Radio buttons for 'Only RHR' (selected), 'Only mf', and 'RHR and mf'. A checkbox for 'Fire Area' is also present.
- Combustion:** Input fields for 'Combustion Efficiency Factor' (0.8), 'Combustion Model' (No combustion mode), and 'Stoichiometric Coefficient' (1.27).

At the bottom right, there are 'OK' and 'Cancel' buttons. A note at the top right states: 'To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.'

5. Programa de cálculo automático

5.2. OZone Incêndio Localizado

File Tools View Help

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2) User Defined Fire

Localised Fire: Localised Fire

Number of fires: Select fire:

Fire	Diametre [m]	Pos X [m]	Pos Y [m]
Fire 1	3	2.5	1.25
Fire 2			
Fire 3			
Fire 4			
Fire 5			

Diâmetro e posição do incêndio(s) localizado

Geometrical Data

Ceiling Height: m

Distance on Axis (x): m

Height on Axis (z): m

O alvo (coluna,...) é sempre no eixo y = 0. É recomendável localizá-lo em x = 0

	Time [min]	RHR [MW]
Point 1	0	0
Point 2	5	1
Point 3	10	2
Point 4	15	2.5
Point 5	20	1.5
Point 6	25	0
Point 7		
Point 8		
Point 9		
Point 10		
Point 11		
Point 12		
Point 13		
Point 14		
Point 15		
Point 16		
Point 17		
Point 18		
Point 19		
Point 20		

OK Cancel

Evolução da RHR

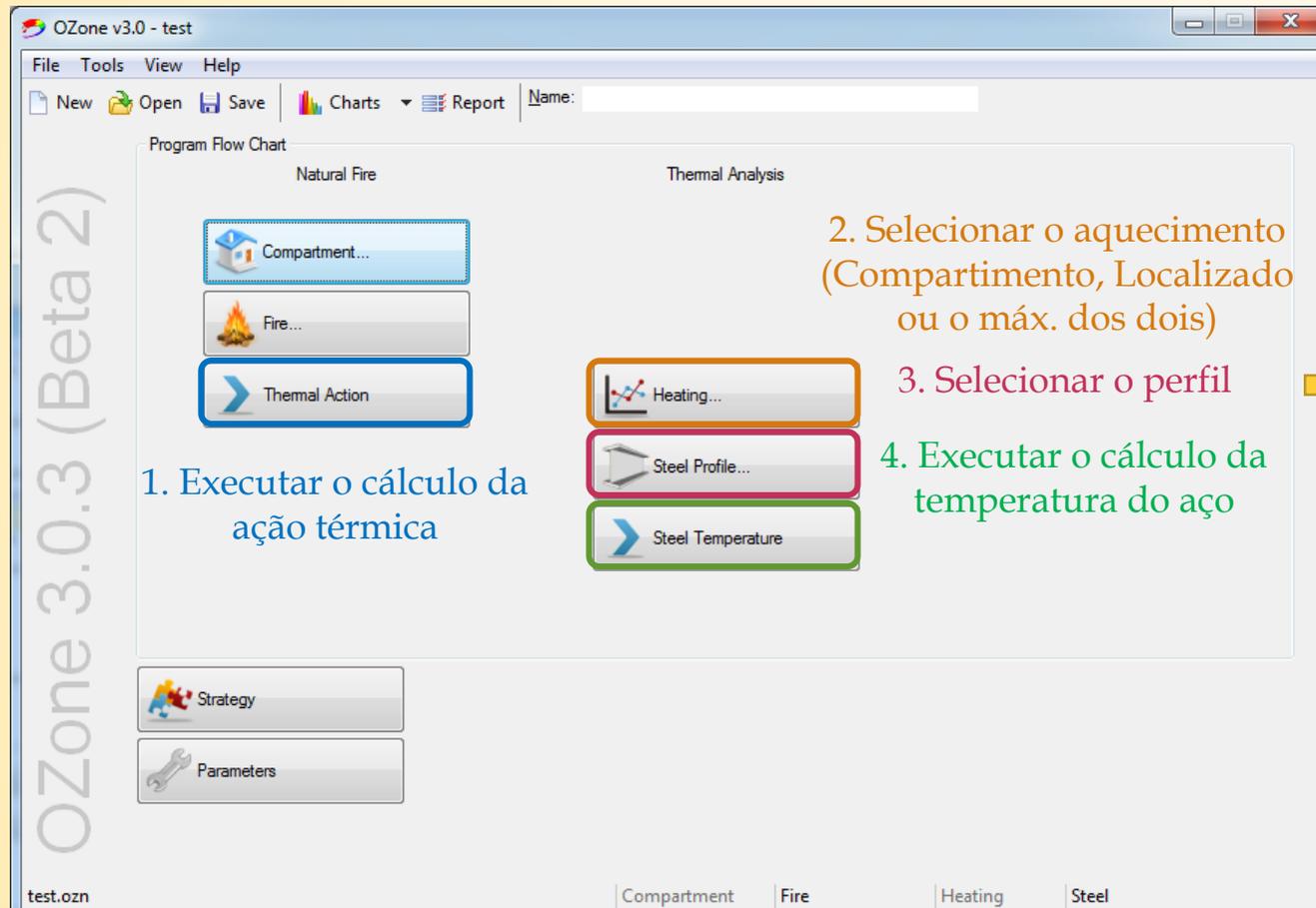
5. Programa de cálculo automático

5.2. OZone Incêndio Localizado

NP EN 1991-1-2:2010 § 3.3.2 (4)

Para calcular mais corretamente a distribuição de temperatura ao longo de um elemento, no caso de um incêndio localizado, deve ser considerada uma abordagem que combine os resultados obtidos com um modelo de duas zonas e um incêndio localizado.

NOTA: O campo de temperatura no elemento pode ser obtido considerando o máximo efeito em cada localização dada pelos dois modelos de incêndio.

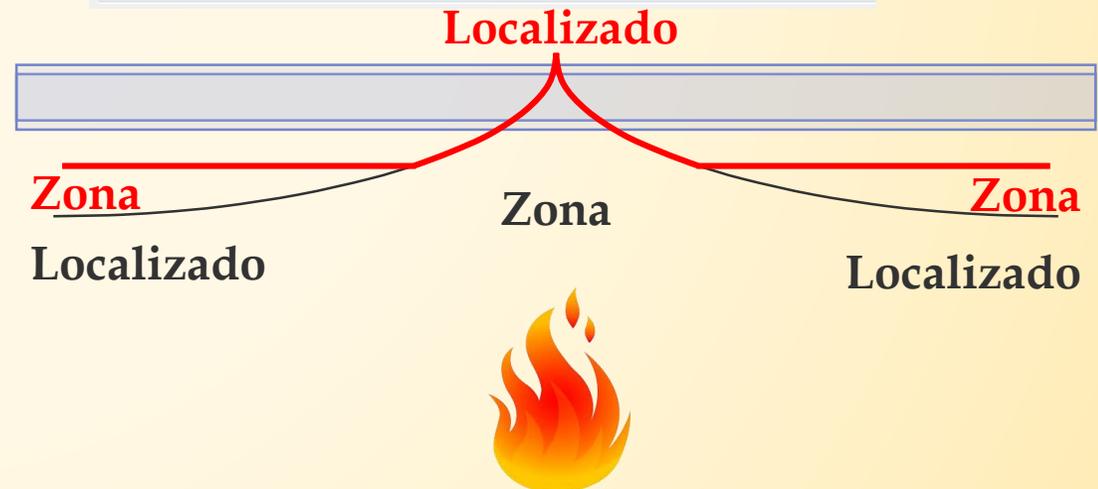
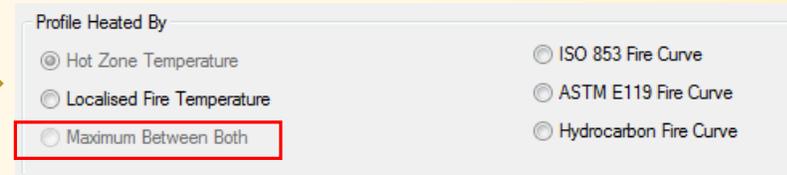


1. Executar o cálculo da ação térmica

2. Selecionar o aquecimento (Compartmento, Localizado ou o máx. dos dois)

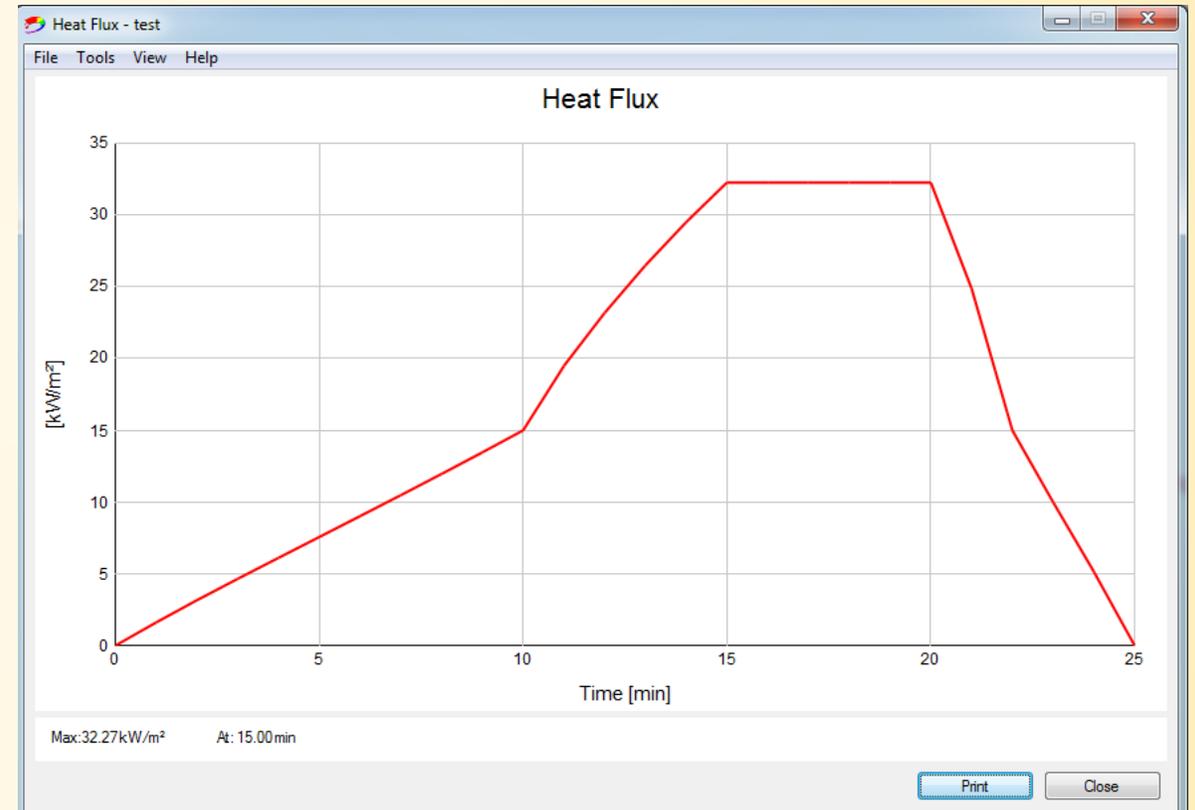
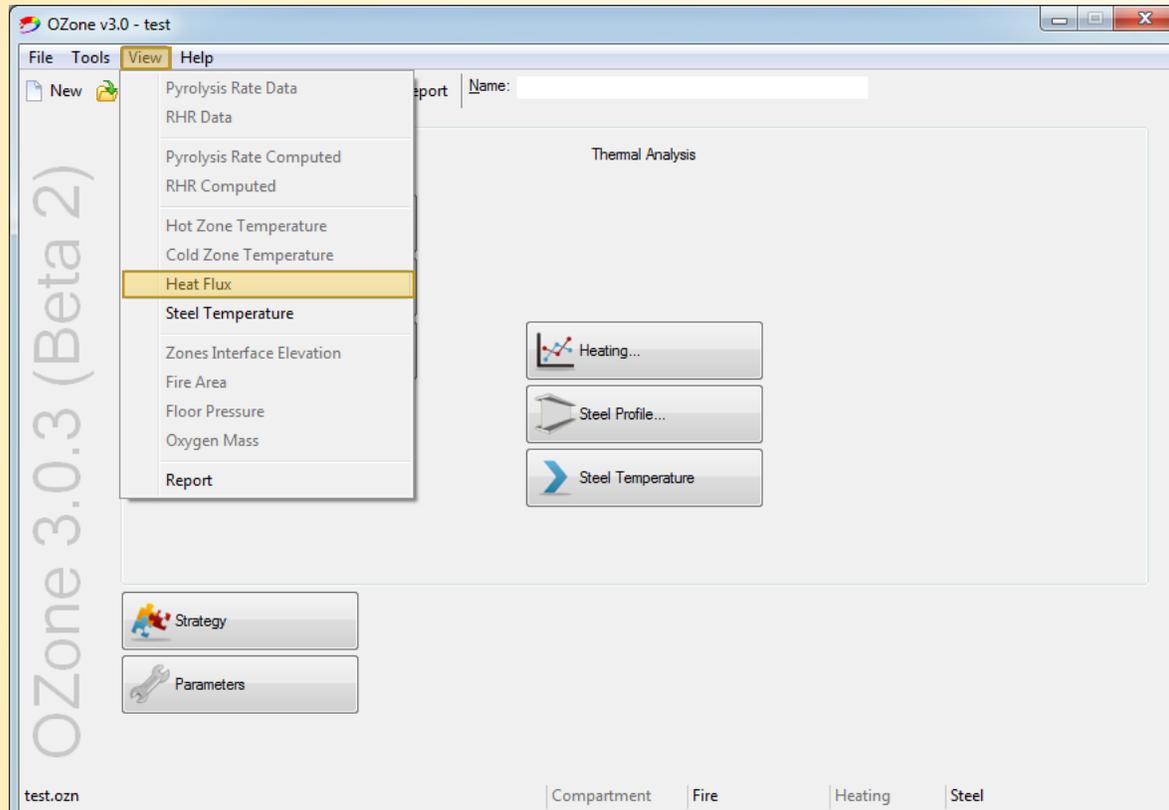
3. Selecionar o perfil

4. Executar o cálculo da temperatura do aço



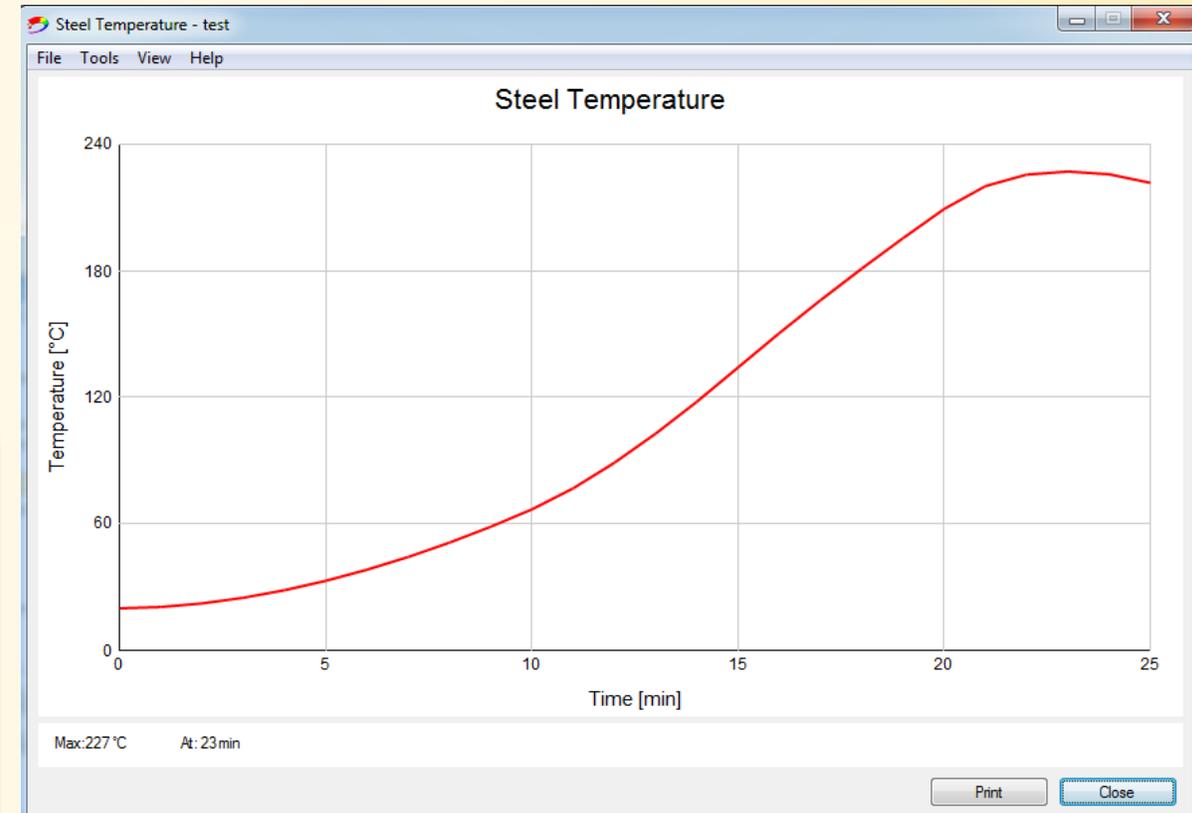
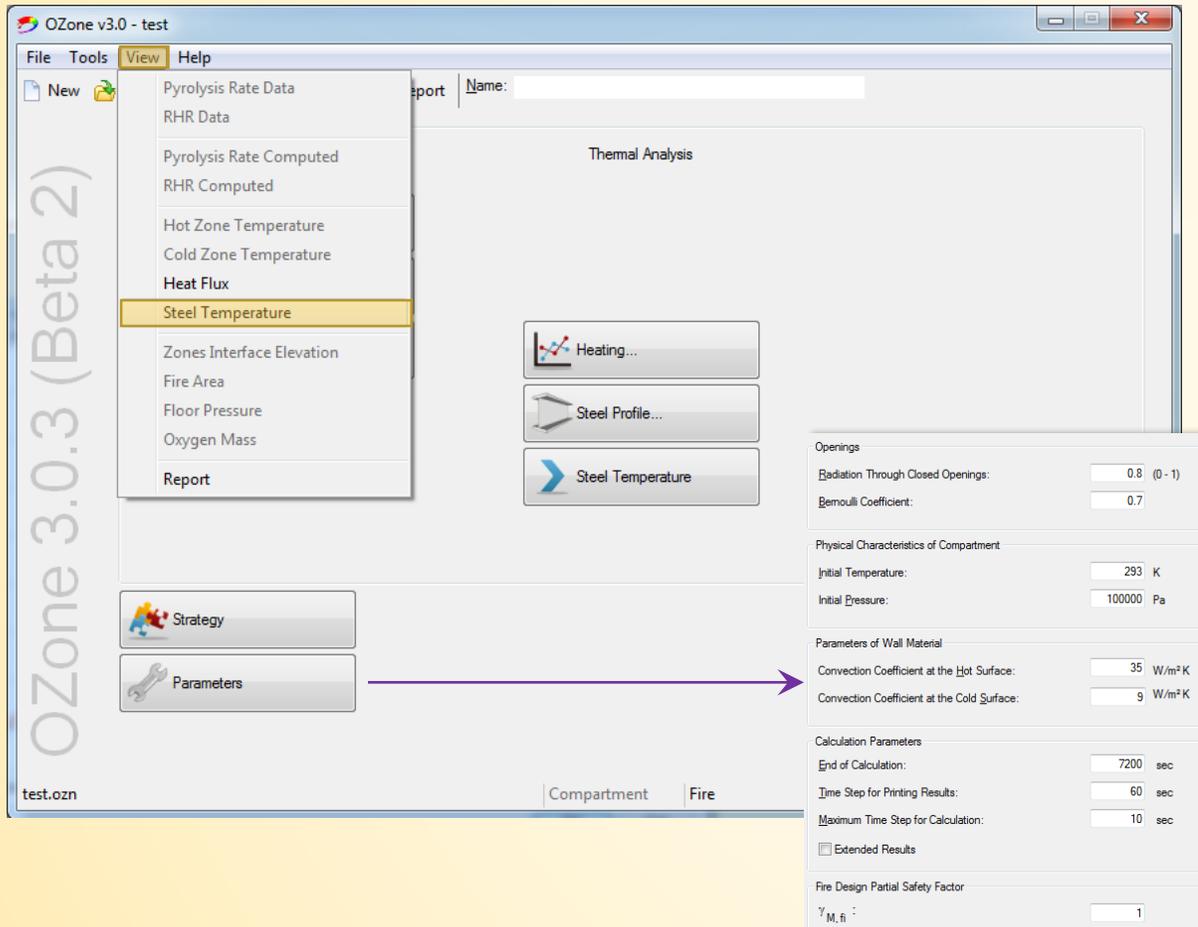
5. Programa de cálculo automático

5.2. OZone Incêndio Localizado



5. Programa de cálculo automático

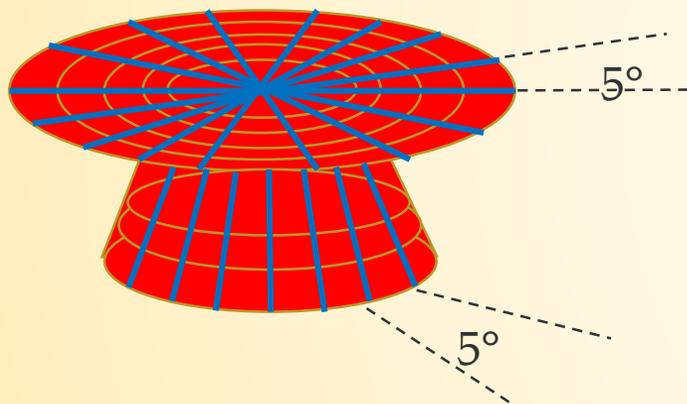
5.2. OZone Incêndio Localizado



5. Programa de cálculo automático

5.3. SAFIR Incêndio Localizado

Chama cilíndrica
(tocando o teto)



- O método geométrico foi implementado no SAFIR (troca direta de calor entre superfícies finitas).
- Isto gera uma **distribuição não uniforme de temperatura** nas secções analisadas.
- Cada incêndio é descrito pela posição (x, y, z) , forma (cilíndrica ou cônica), posição vertical do teto, evolução do diâmetro no tempo, evolução da RHR no tempo.
- No caso de vários incêndios, os efeitos são somados e limitados a 100 kW/m^2 .

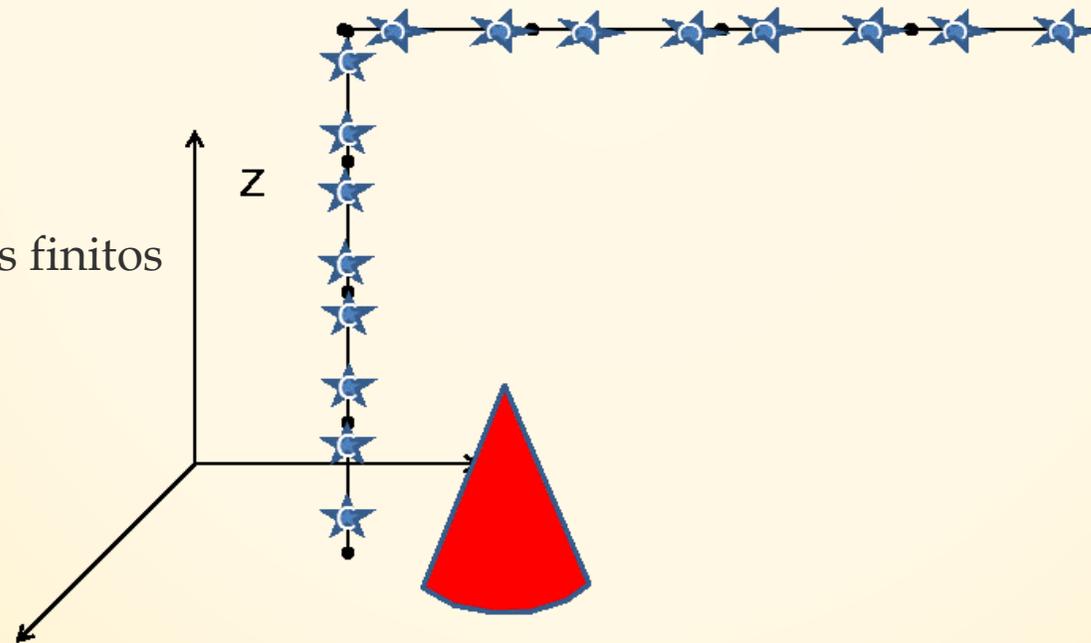
5. Programa de cálculo automático

5.3. SAFIR Incêndio Localizado

- Uma análise térmica 2D é realizada em cada ponto de Gauss de cada elemento finito de barra (ou casca).

Esta coluna tem 4 elementos finitos => 8 pontos de Gauss

Esta coluna tem 4 elementos finitos
=> 8 pontos de Gauss



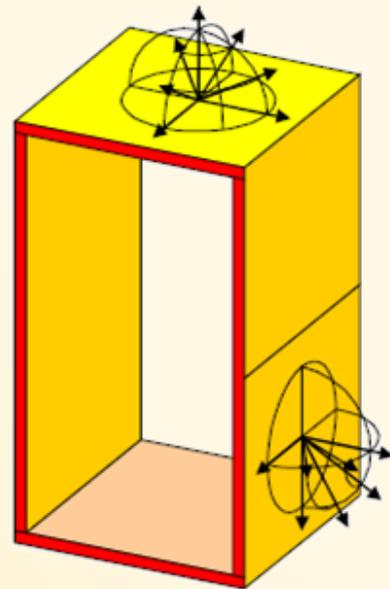
Esta coluna não é aquecida

5. Programa de cálculo automático

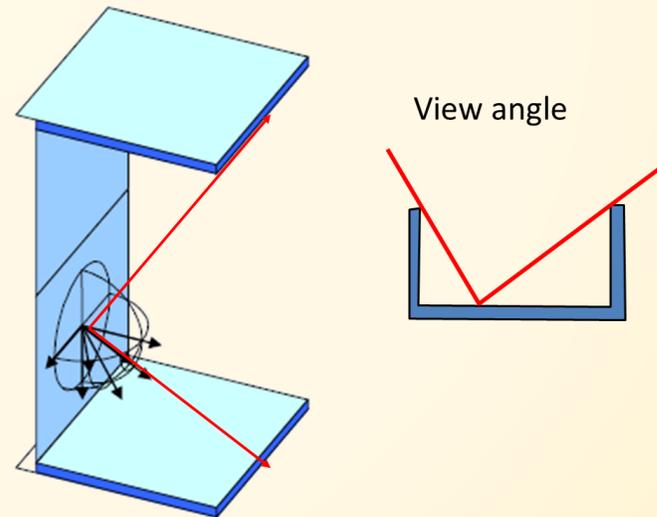
5.3. SAFIR Incêndio Localizado

- Numa secção côncava, o efeito de sombra é automaticamente considerado se a secção estiver fora do incêndio.

Forma convexa



Forma côncava





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)

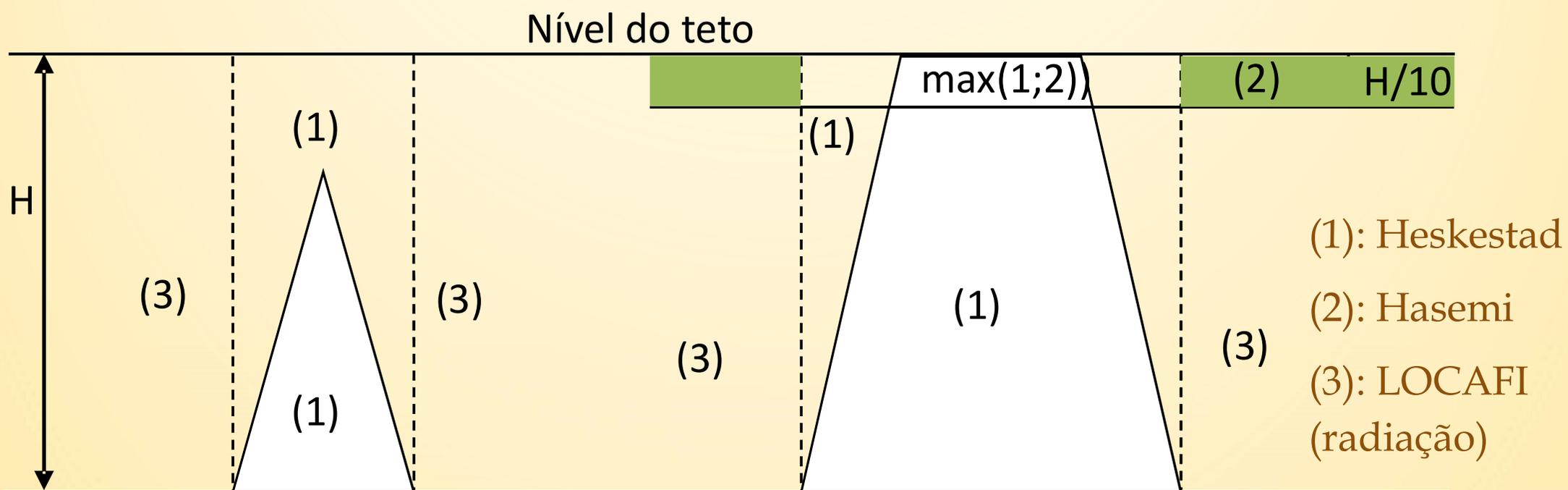
6.2.2. Incêndios localizados

- 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)

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

Fluxo convectivo
emitido

Fluxo de
radiação emitido

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

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

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

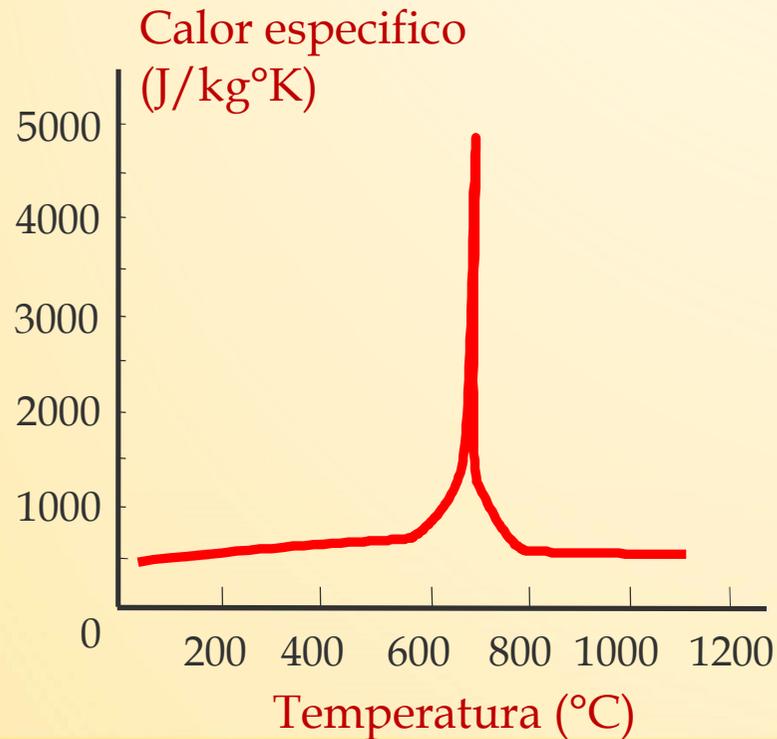
No caso de incêndios em compartimentos, o fluxo por radiação incidente médio $\dot{h}_{m,r}$ deve ser substituído por \dot{h}_{tot} , incluindo os fluxos convectivos e por radiação.

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

6. Síntese da resistência ao fogo

6.3. Análise térmica

6.3.2. Procedimento incremental (temperatura uniforme)



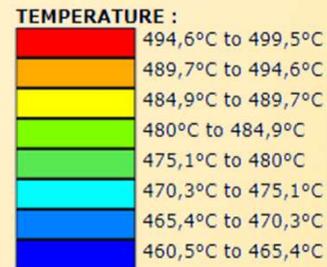
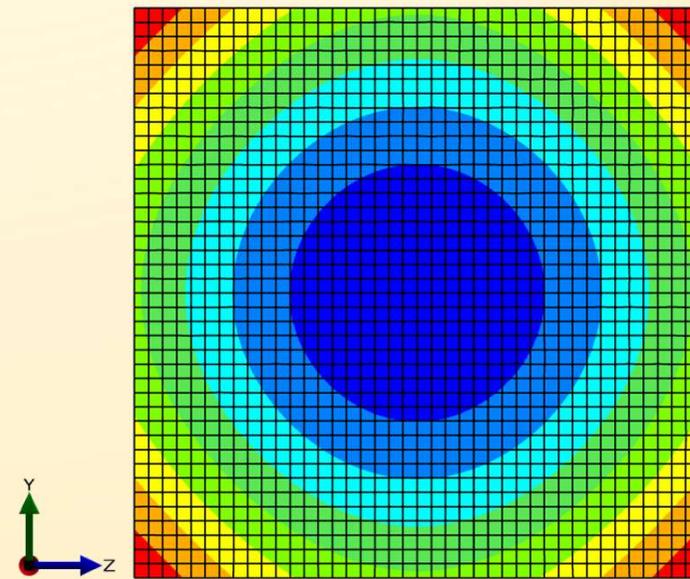
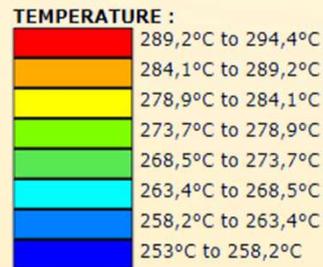
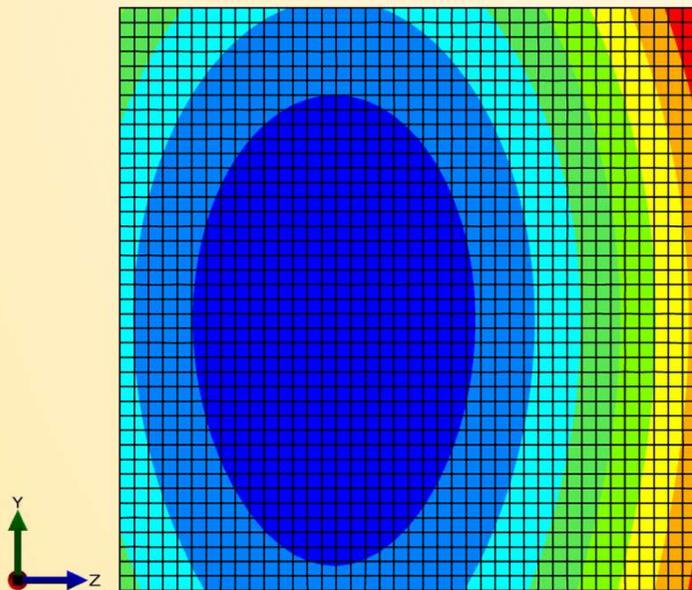
Massa volúmica do aço: 7850 kg/m³

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

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

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

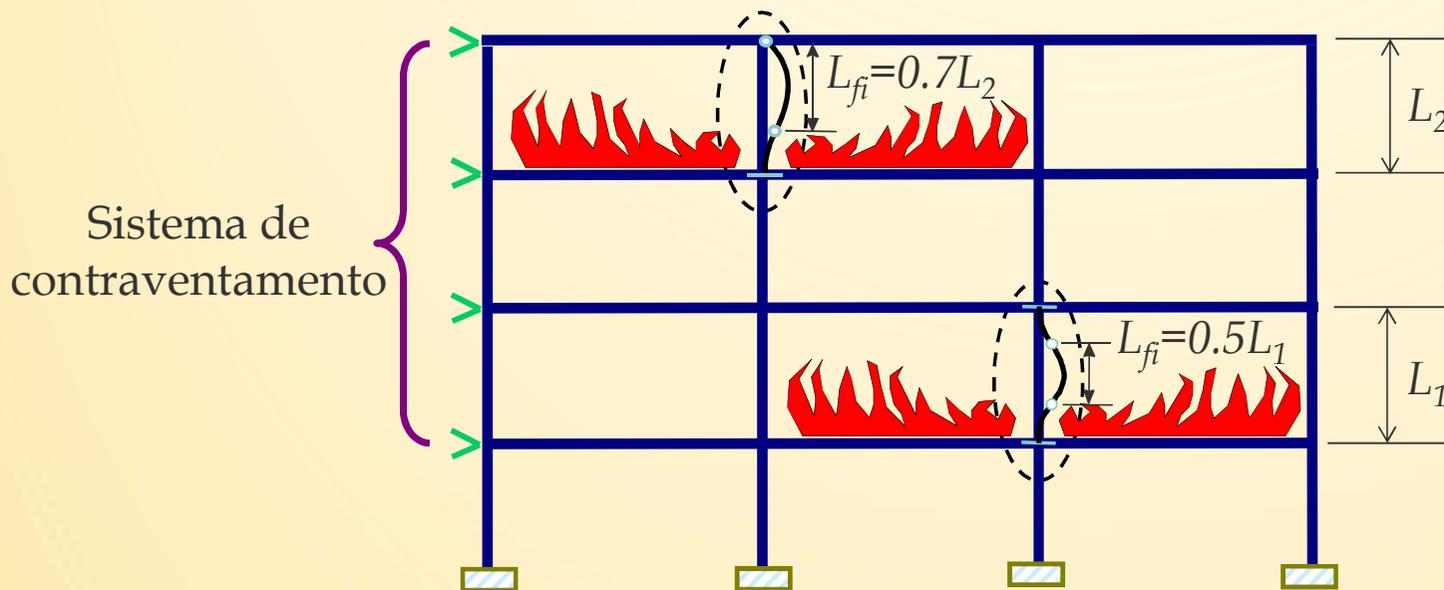
Fatores parciais do aço a elevadas temperaturas

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)

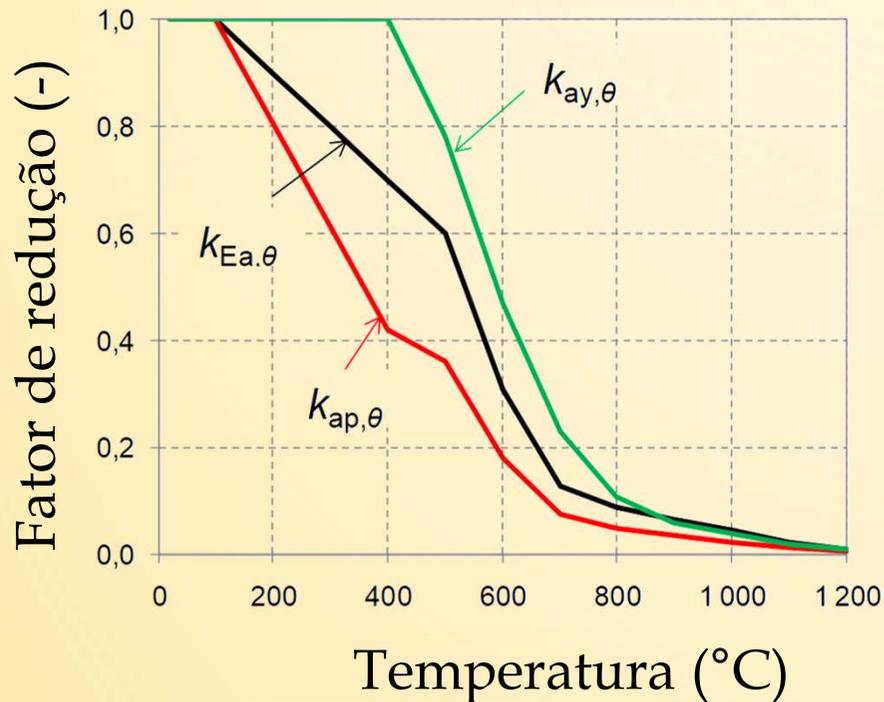
Tempo: $t_{fi,d} \geq t_{fi,required}$

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				
...				

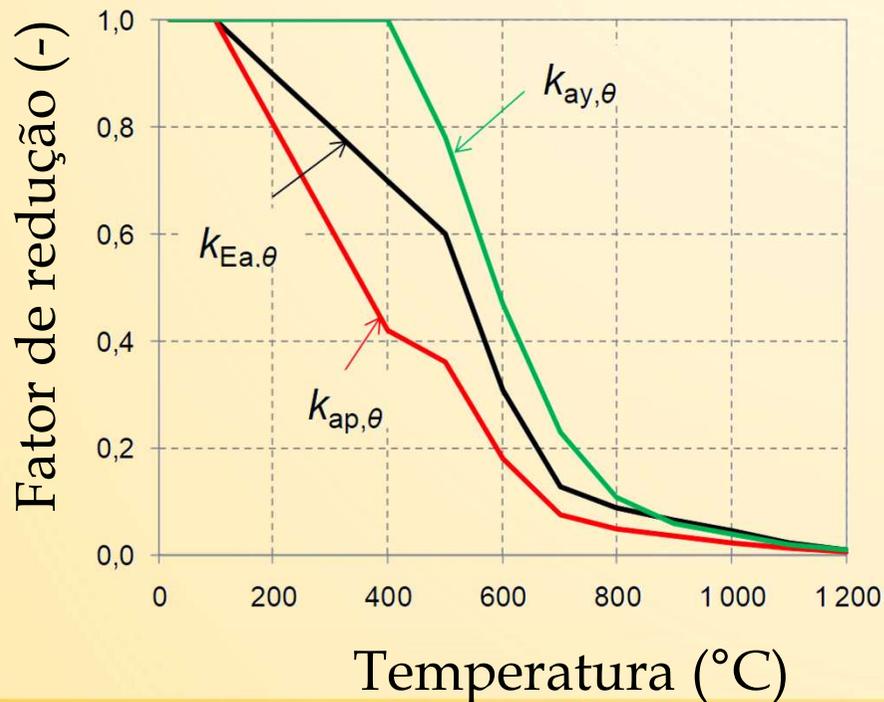
A temperatura crítica de elementos de aço sujeitos a instabilidade utilizando dados tabelados específicos baseia-se em:

- 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

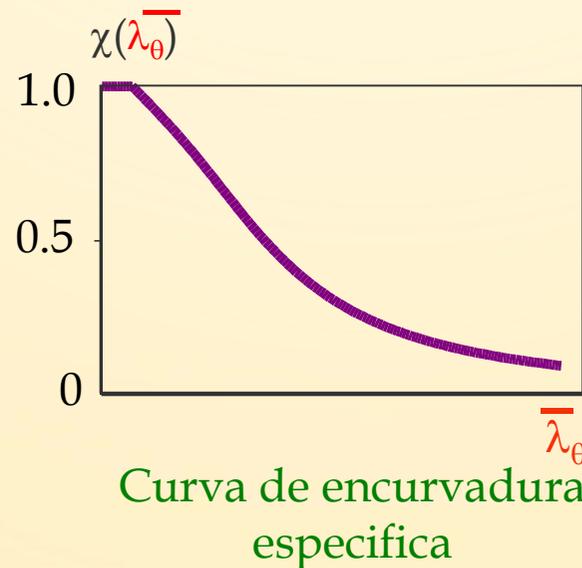
A atual versão da NP EN 1993-1-2:2010 aplica-se às classes de aço S235 a S460

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

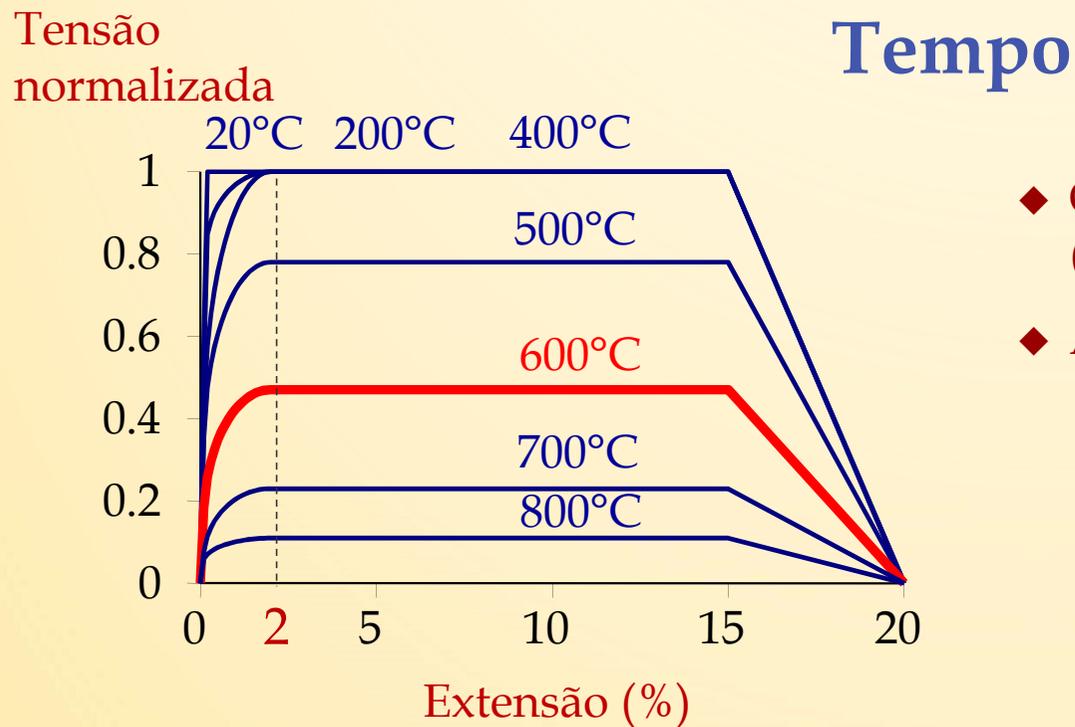
$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

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

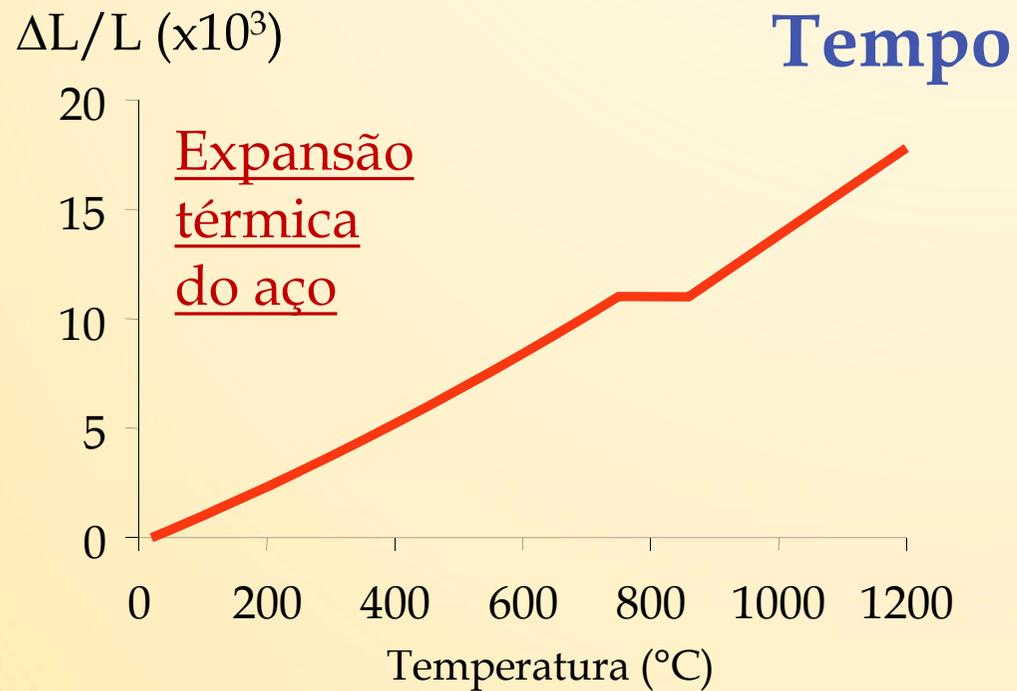


- ◆ O gráfico tensão-extensão do aço não é linear (elástico, parabólico, constante, ramo descendente)
- ◆ A tensão de cedência a 600°C reduz cerca de 50%

6. Síntese da resistência ao fogo

6.4. Análise mecânica

6.4.3. Análise de elementos finitos



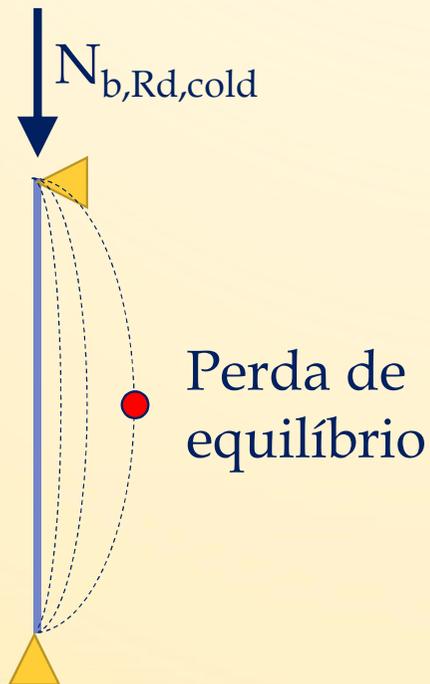
6. Síntese da resistência ao fogo

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

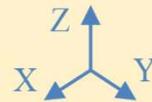
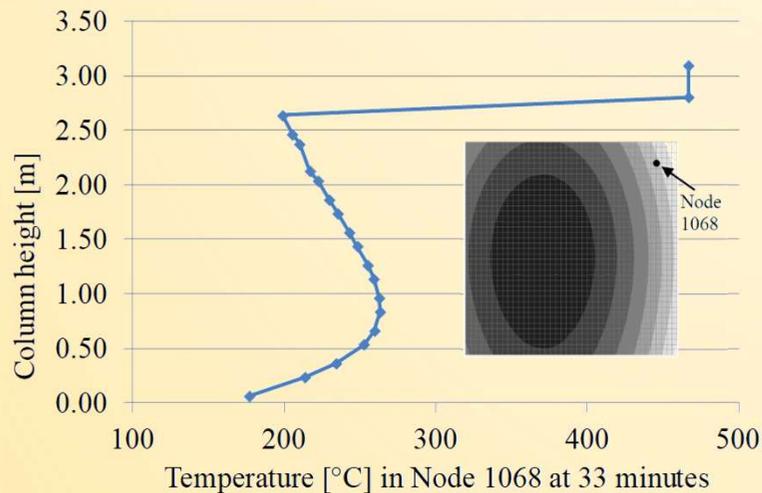


6. Síntese da resistência ao fogo

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



LOCAFI+

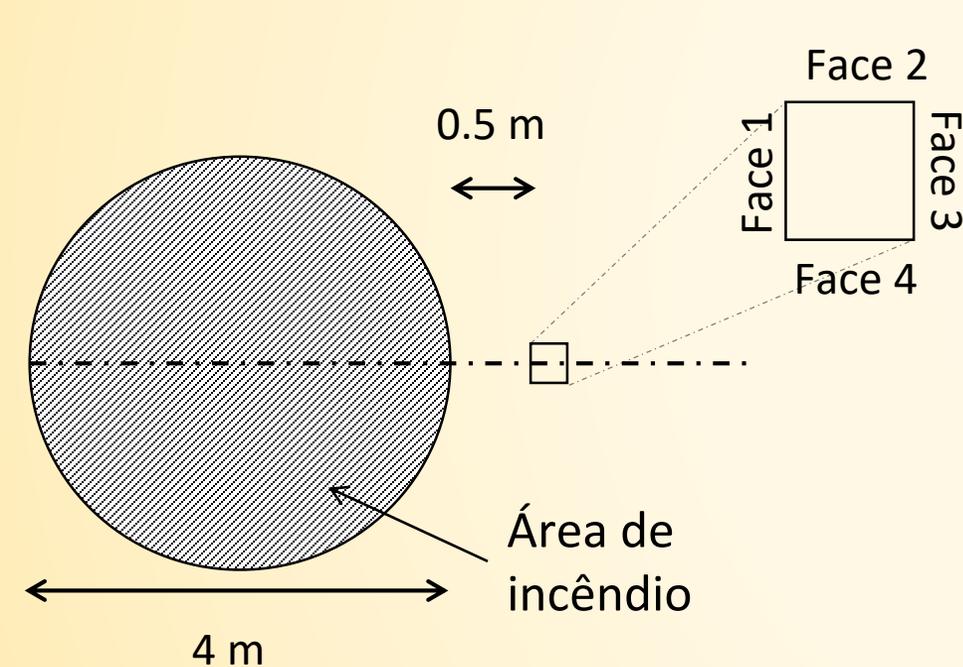
Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAIised Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

7. Exemplos de aplicação

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



Secção da coluna: HEB 300

Diâmetro da fonte de incêndio: 4m

Distância entre o fogo e a coluna: 0.5m

Taxa de libertação de calor: 1000 kW.m⁻²

Chama cônica

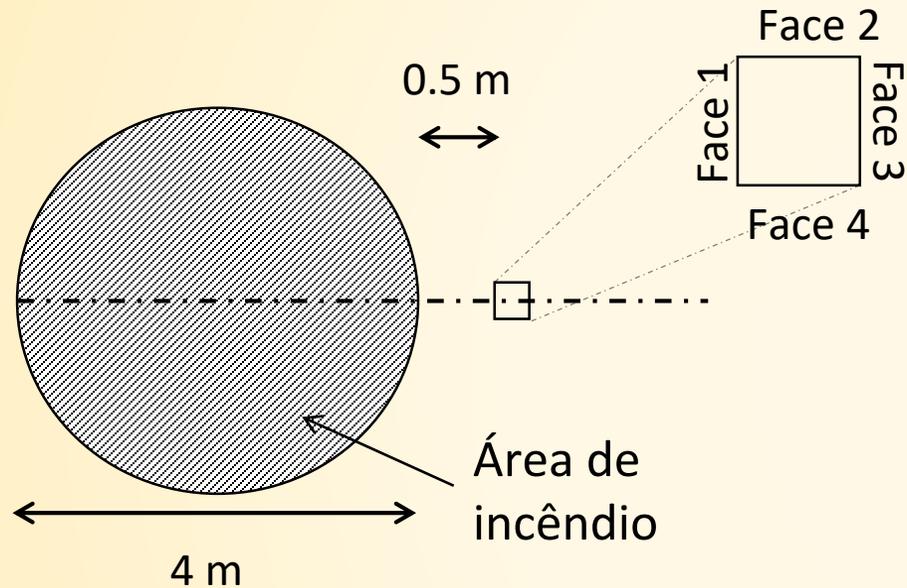
Coluna localizada no exterior do fogo e da camada de fumo

Sem teto

Cálculo realizado para $z = 1.0m$

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



$$D = 4 \text{ m}$$

$$Q = RHR * \frac{\pi}{4} * D^2 = 12566371 \text{ W}$$

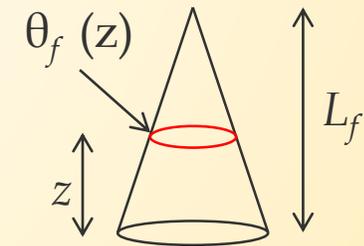
$$L_f = -1.02 D + 0.0148 Q^{0.4} = 6.15 \text{ m}$$

$$z_0 = -1.02 D + 0.00524 Q^{0.4} = -0.48 \text{ m}$$

Temperatura da chama

$$\theta_f(z) = \min\left(900; 20 + 0.25(0.8Q(t))^{2/3}(z - z_0)^{-5/3}\right)$$

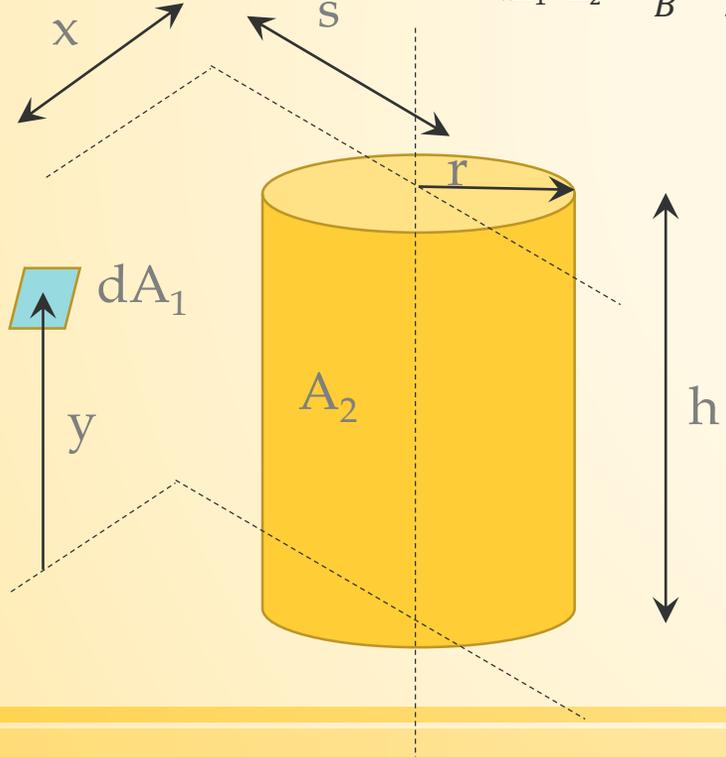
z (m)	T (°C)
0	900
0.5	900
1	900
1.5	900
2	900
2.5	900
3	900
3.5	900
4	900
4.5	827.9
5	708.4
5.5	614.8
6	540.0
6.5	479.3
7	429.1
7.5	387.2

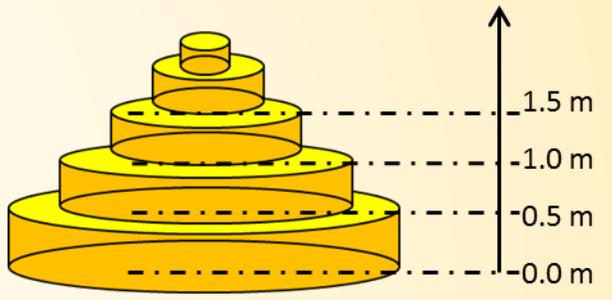


7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

Face 1



$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \begin{aligned} &\cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) \\ &- Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) \right] \\ &- \sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right) \\ &+ H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B}} \right) \end{aligned} \right\}$$


$S = s/r$
 $X = x/r$
 $H = h/r$
 $A = X^2 + Y^2 + S^2$
 $B = S^2 + X^2$
 $C = (H - Y)^2$

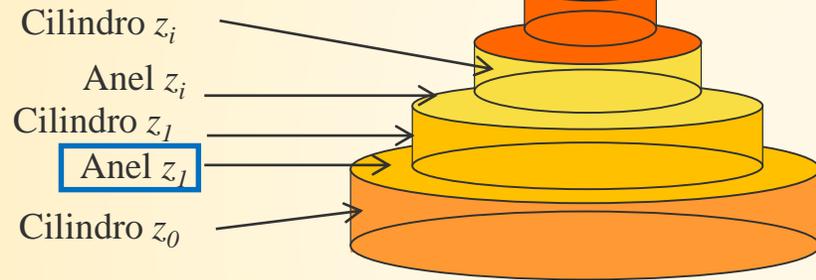
$F_i = F_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_i - z_f|)$
 $F_{i+1} = F_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_{i+1} - z_f|)$

se $z_i \geq z_f$ então $F = F_{i+1} - F_i$
 Se não $F = F_i - F_{i+1}$

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

Face 1



$$z_f = 1.0m$$

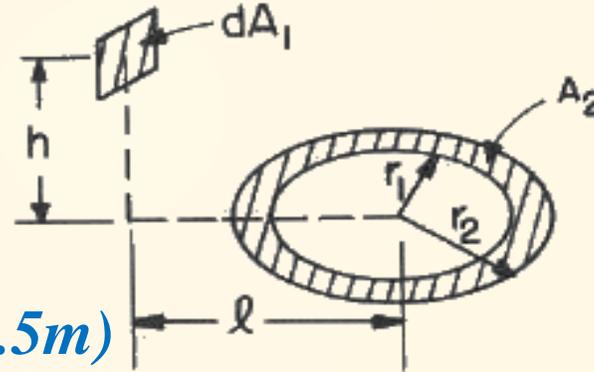
→ Apenas um anel a considerar ($z_i = 0.5m$)

$$\text{Raio externo } r_2 = 2.0m$$

$$\text{Raio interno } r_1 = (6.15 - 0.5) / 6.15 * 2.0m = 1.84m$$

$$\text{Simplificação: } l = 2.5m$$

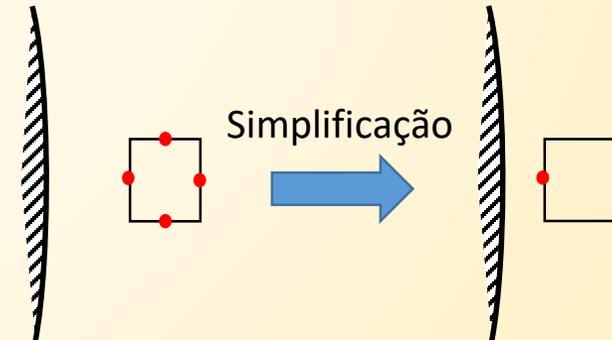
$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{H}{2} \left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right)$$



$$H = h/l = (1 - 0.5) / 2.5 = 0.2$$

$$R_2 = r_2/l = 2 / 2.5 = 0.8$$

$$R_1 = r_1/l = 1.84 / 2.5 = 0.73$$



7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

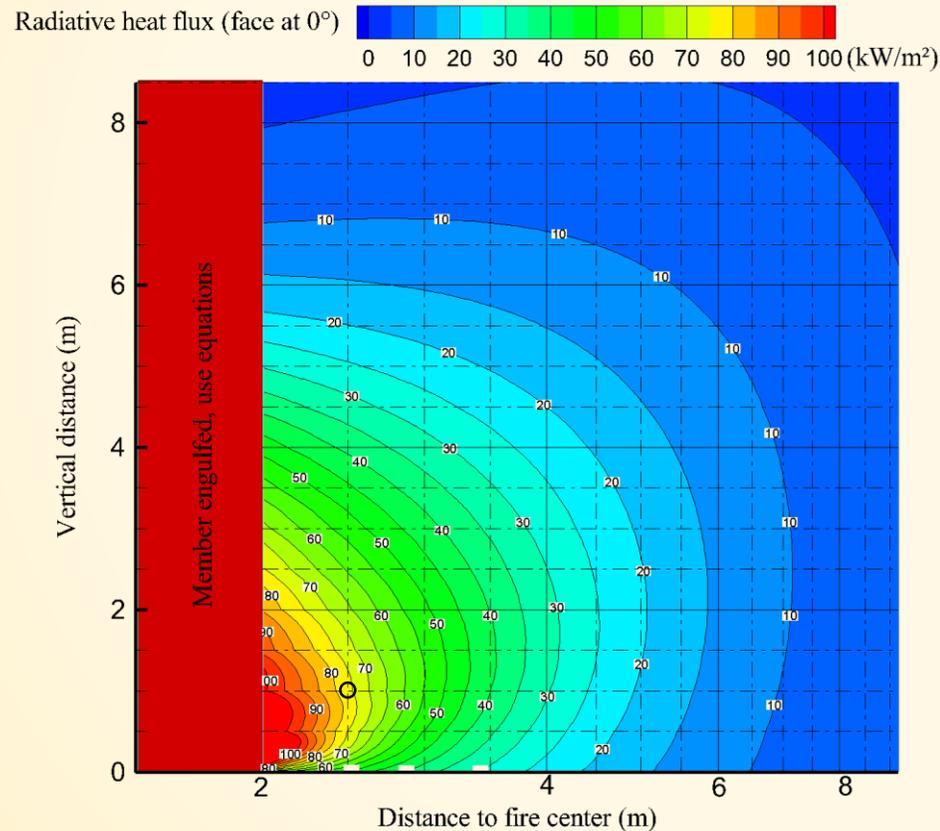
Face 1

Input data					Constant		Section coordinate			Intermediate variables							
HRR	D _{fire}	Q	Q	hf	σ	Tab _s	sf	xf	zf	z _{virt}	l						
kW/m ²	m	W	MW	m			m	m	m								
1000	4	12566370.6	12.57	6.15	5.67E-08	273.15	2.5	0	1	-0.46	2.5						
Cylinder														Ring			
z _i	T _f	r _i	F _{Cylinder_zi}	F _{ring_zi}	Flux _{face1}	F _i	F _{i+1}	S	X	A	H _i	H _{i+1}	z _i -z _f	z _{i+1} -z _f	H	R _i	R _{i+1}
m	°C	m	-	-	kW/m ²	-	-	-	-	-	-	-	m	m	-	-	-
0	900	2.00	0.0726	0	7.79	0.3705	0.2979	1.25	0	1.56	0.50	0.25	1.00	0.50	0	0.00	0.00
0.5	900	1.84	0.2374	0.0555	31.45	0.2374	0.0000	1.36	0	1.85	0.27	0.00	0.50	0.00	0.20	0.80	0.73
1	900	1.67	0.1893	0	20.33	0.0000	0.1893	1.49	0	2.23	0.00	0.30	0.00	0.50	0	0.73	0.67
1.5	900	1.51	0.0823	0	8.84	0.1514	0.2337	1.65	0	2.73	0.33	0.66	0.50	1.00	0	0.67	0.60
2	900	1.35	0.0361	0	3.88	0.1953	0.2315	1.85	0	3.43	0.74	1.11	1.00	1.50	0	0.60	0.54
2.5	900	1.19	0.0177	0	1.91	0.1958	0.2136	2.11	0	4.43	1.26	1.68	1.50	2.00	0	0.54	0.47
3	900	1.02	0.0095	0	1.02	0.1797	0.1893	2.44	0	5.95	1.95	2.44	2.00	2.50	0	0.47	0.41
3.5	900	0.86	0.0054	0	0.58	0.1564	0.1618	2.90	0	8.41	2.90	3.48	2.50	3.00	0	0.41	0.34
4	900	0.70	0.0031	0	0.34	0.1296	0.1328	3.57	0	12.77	4.29	5.00	3.00	3.50	0	0.34	0.28
4.5	828	0.54	0.0018	0	0.15	0.1009	0.1027	4.66	0	21.68	6.52	7.45	3.50	4.00	0	0.28	0.21
5	708	0.37	0.0010	0	0.05	0.0711	0.0720	6.68	0	44.58	10.68	12.02	4.00	4.50	0	0.21	0.15
5.5	615	0.21	0.0004	0	0.02	0.0405	0.0409	11.80	0	139.24	21.24	23.60	4.50	5.00	0	0.15	0.08
6	540	0.05	0.0001	0	0.00	0.0095	0.0096	50.71	0	2571.11	101.41	111.55	5.00	5.50	0	0.08	0.02
6.5	479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.50	6.00	0	0.02	0
7	429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	6.50	0	0	0
7.5	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.50	1.00	0	0	0
Incident heat flux on face 1					76.36	kW/m ²											
Absorbed heat flux on face 1					53.45	kW/m ²											

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

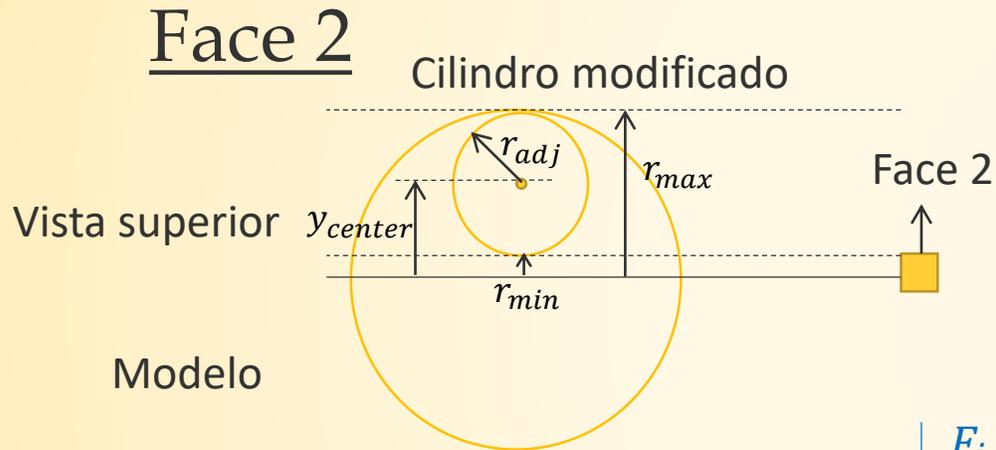
Face 1



$$\begin{aligned}\text{Fluxo absorvido} &= \varepsilon * \varphi_{tot} \\ &= 0.7 * 77 \text{ kW/m}^2 \\ &= 53.9 \text{ kW/m}^2\end{aligned}$$

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



$$\underline{z = 0}$$

$$r_{min} = \max(-r_i, x_f) = 0$$

$$r_{max} = r_i = 2.0 \text{ m}$$

$$y_{center} = \frac{r_{min} + r_{max}}{2} = 1.0 \text{ m}$$

$$r_{adjusted} = \frac{r_{max} - r_{min}}{2} = 1.0 \text{ m}$$

$$F_i = F_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = y_{center} - x_f, x = s_f, r = r_{adjusted}, h = |z_i - z_f|)$$

$$F_{i+1} = F_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = y_{center} - x_f, x = s_f, r = r_{adjusted}, h = |z_{i+1} - z_f|)$$

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

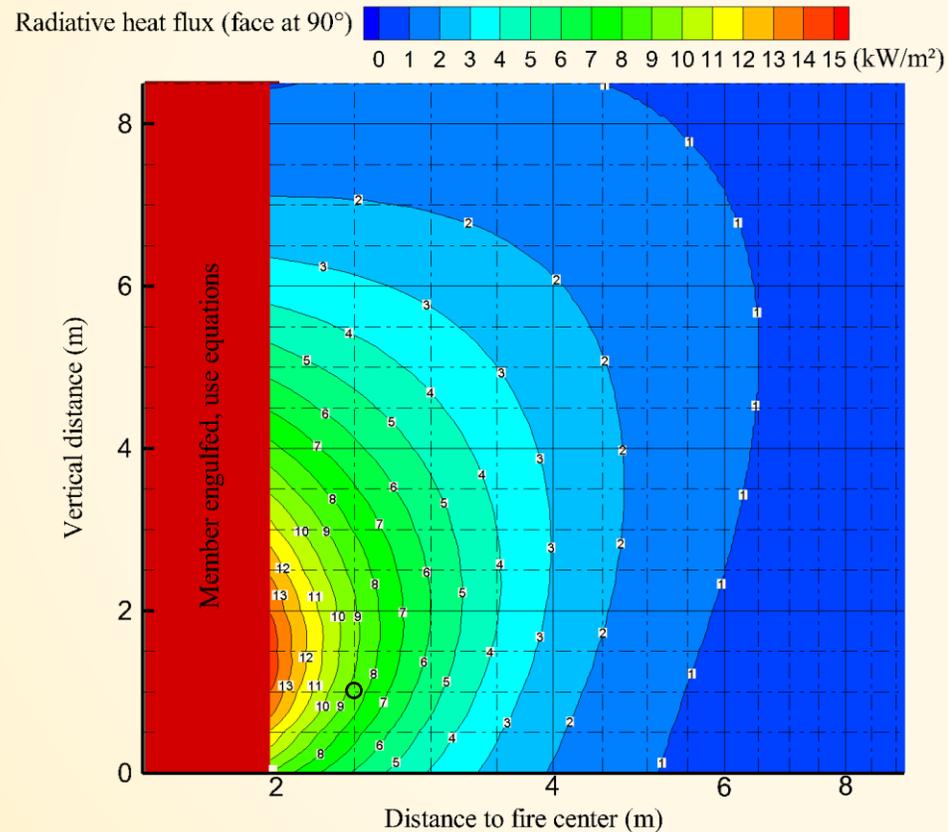
Face 2

zi	Tf	ri	F _{cylinder_zi}	F _{ring_zi}	Flux _{face2}	Ring			Input data				
m	°C	m	-	-	kW/m ²	H	Ri	Ri+1	HRR	Dfire	Q	Q	hf
									kW/m ²	m	W	MW	m
0	900	2.00	0.0175	0	1.88	0	0.00	0.00	1000	4	12566370.6	12.57	6.15
0.5	900	1.84	0.0193	0.0060	2.71	0.20	0.40	0.37					
1	900	1.67	0.0160	0	1.72	0	0.37	0.33					
1.5	900	1.51	0.0103	0	1.10	0	0.33	0.30					
2	900	1.35	0.0056	0	0.60	0	0.30	0.27					
2.5	900	1.19	0.0028	0	0.30	0	0.27	0.24					
3	900	1.02	0.0014	0	0.15	0	0.24	0.20					
3.5	900	0.86	0.0006	0	0.07	0	0.20	0.17					
4	900	0.70	0.0003	0	0.03	0	0.17	0.14					
4.5	828	0.54	0.0001	0	0.01	0	0.14	0.11					
5	708	0.37	0.0000	0	0.00	0	0.11	0.07					
5.5	615	0.21	0.0000	0	0.00	0	0.07	0.04					
6	540	0.05	0.0000	0	0.00	0	0.04	0.01					
6.5	479	0	0	0	0	0	0.01	0.00					
7	429	0	0	0	0	0	0	0					
7.5	387	0	0	0	0	0	0	0					
					Incident heat flux on face 2	8.57	kW/m ²						
					Absorbed heat flux by face 2	6.00	kW/m ²						
Modified cylinder / ring				Cylinder									
rmin	rmax	ri_adjusted	Ycenter	Fi	Fi+1	s	S	X	A	Hi	Hi+1	z _i -z _i	z _{i+1} -z _i
m	m	m	m	-	-	-	-	-	-	-	-	m	m
0	2.00	1.00	1.00	0.0403	0.0229	1.00	1.00	2.50	7.25	1.00	0.50	1.00	0.50
0	1.84	0.92	0.92	0.0193	0.0000	0.92	1.00	2.72	8.40	0.54	0.00	0.50	0.00
0	1.67	0.84	0.84	0.0000	0.0160	0.84	1.00	2.99	9.91	0.00	0.60	0.00	0.50
0	1.51	0.76	0.76	0.0130	0.0233	0.76	1.00	3.31	11.93	0.66	1.32	0.50	1.00
0	1.35	0.67	0.67	0.0185	0.0241	0.67	1.00	3.70	14.72	1.48	2.22	1.00	1.50
0	1.19	0.59	0.59	0.0187	0.0215	0.59	1.00	4.21	18.74	2.53	3.37	1.50	2.00
0	1.02	0.51	0.51	0.0161	0.0174	0.51	1.00	4.88	24.81	3.90	4.88	2.00	2.50
0	0.86	0.43	0.43	0.0124	0.0130	0.43	1.00	5.80	34.64	5.80	6.96	2.50	3.00
0	0.70	0.35	0.35	0.0086	0.0089	0.35	1.00	7.15	52.09	8.58	10.01	3.00	3.50
0	0.54	0.27	0.27	0.0053	0.0054	0.27	1.00	9.31	87.70	13.04	14.90	3.50	4.00
0	0.37	0.19	0.19	0.0026	0.0027	0.19	1.00	13.35	179.33	21.37	24.04	4.00	4.50
0	0.21	0.11	0.11	0.0009	0.0009	0.11	1.00	23.60	557.97	42.48	47.20	4.50	5.00
0	0.05	0.02	0.02	0.0000	0.0000	0.02	1.00	101.41	10285.43	202.82	223.11	5.00	5.50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.50	6.00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	6.50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.50	1.00

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

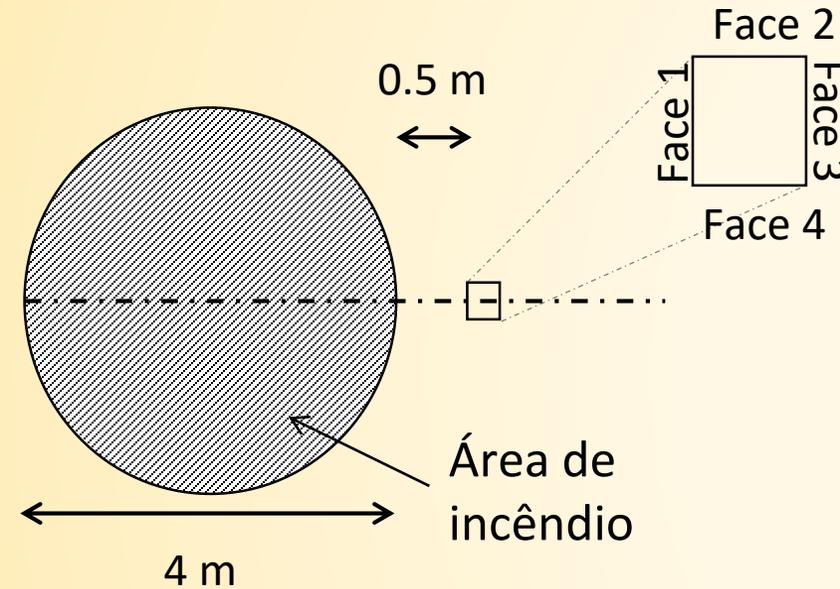
Face 2



$$\begin{aligned}\text{Fluxo absorvido} &= \varepsilon * \varphi_{tot} \\ &= 0.7 * 8.7 \text{ kW/m}^2 \\ &= 6.1 \text{ kW/m}^2\end{aligned}$$

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



Fluxo de calor absorvido por cada face (assumindo $\varepsilon = 0.7$)

Face 1 : 53.45 kW/m²

Face 2 : 6.00 kW/m²

Face 3 : 0.00 kW/m²

Face 4 : 6.00 kW/m²

→ Fluxo de calor médio = 16.36 kW/m²

$$0 = \underbrace{h(T - 20)}_{\text{Fluxo convectivo emitido}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(T + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Fluxo por radiação emitido}} - \underbrace{\varepsilon * \varphi_{tot}}_{\text{Fluxo absorvido}}$$

Fluxo convectivo emitido

Fluxo por radiação emitido

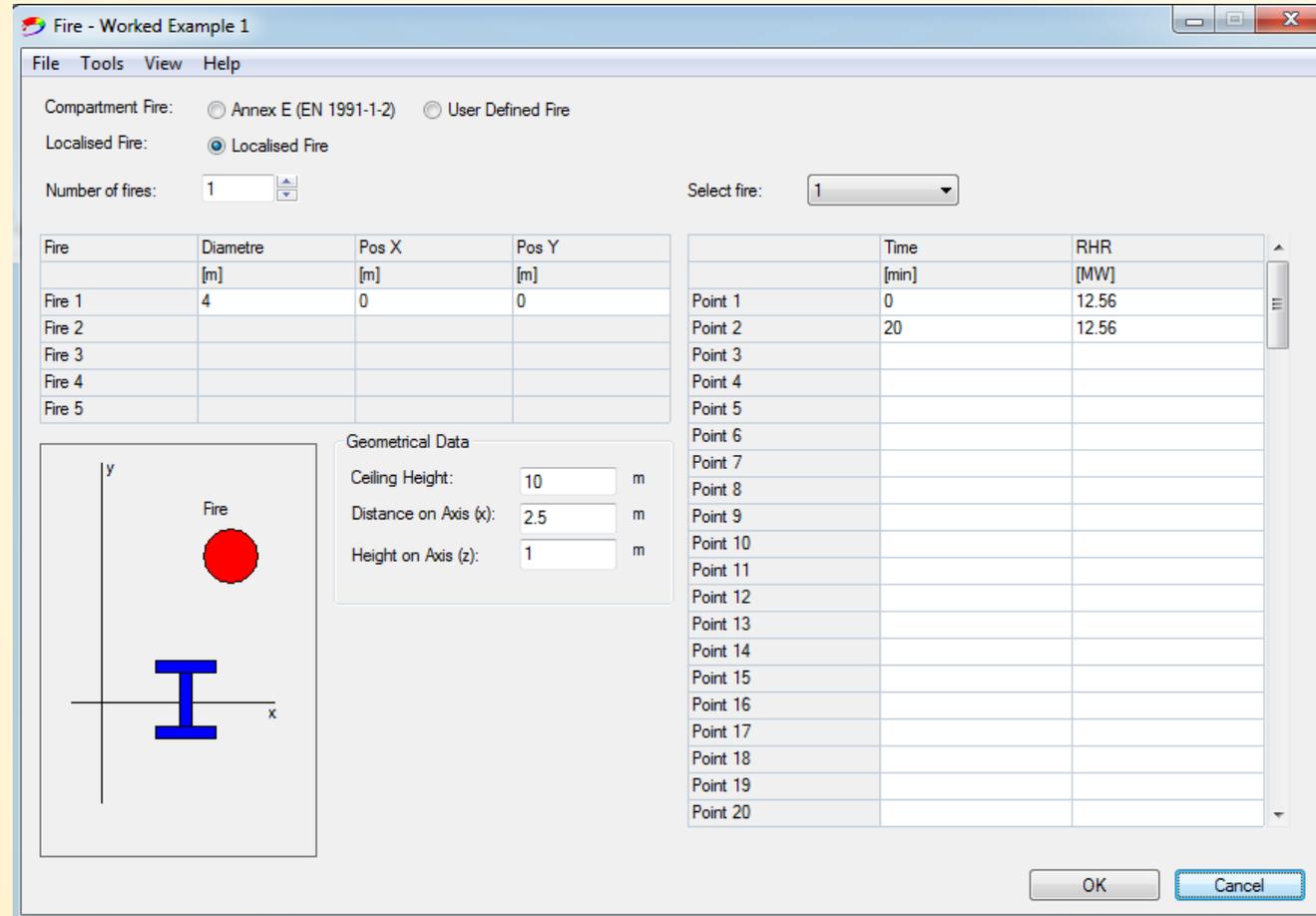
Fluxo absorvido

$$h = 35 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}; \sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

θ (°C)	Fluxo emitido W/m ²
20	0
30	392.03
40	788.42
50	1189.49
...	...
280	12519.26
290	13145.11
300	13786.06
310	14442.65
320	15115.43
330	15804.96
340	16511.80
350	17236.55
360	17979.78

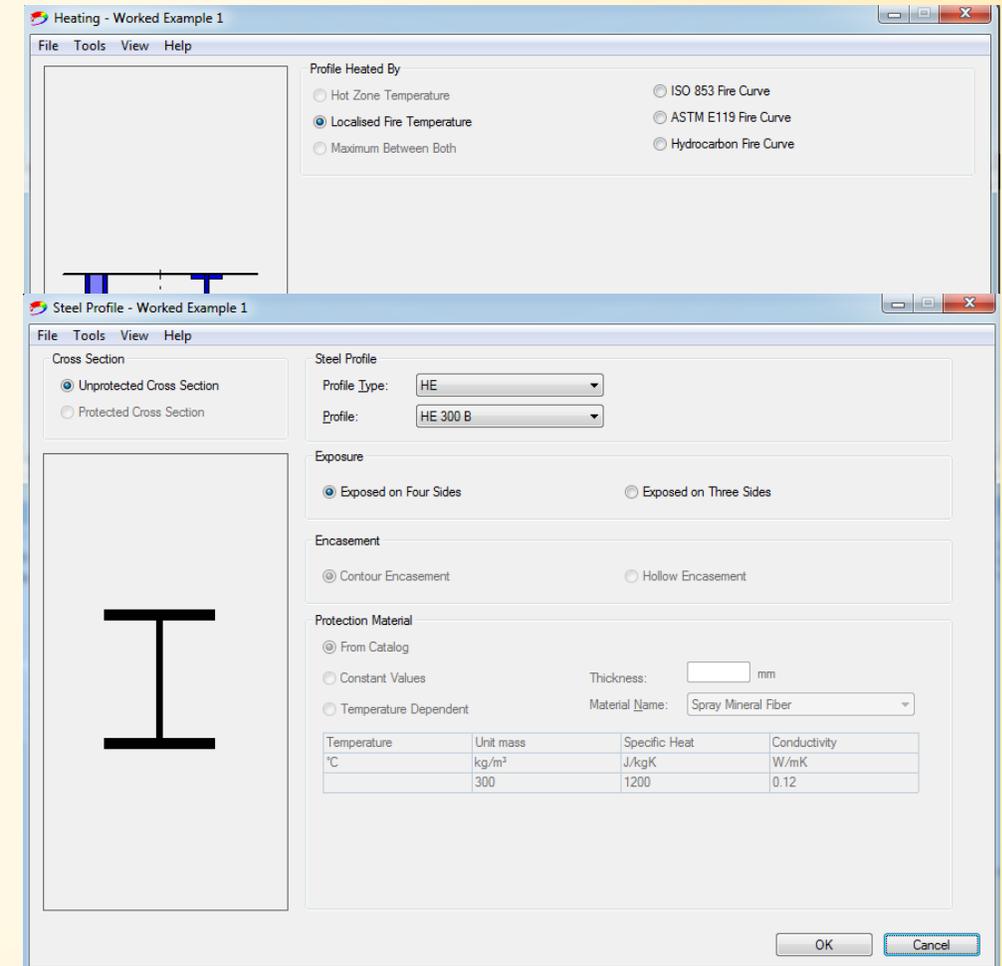
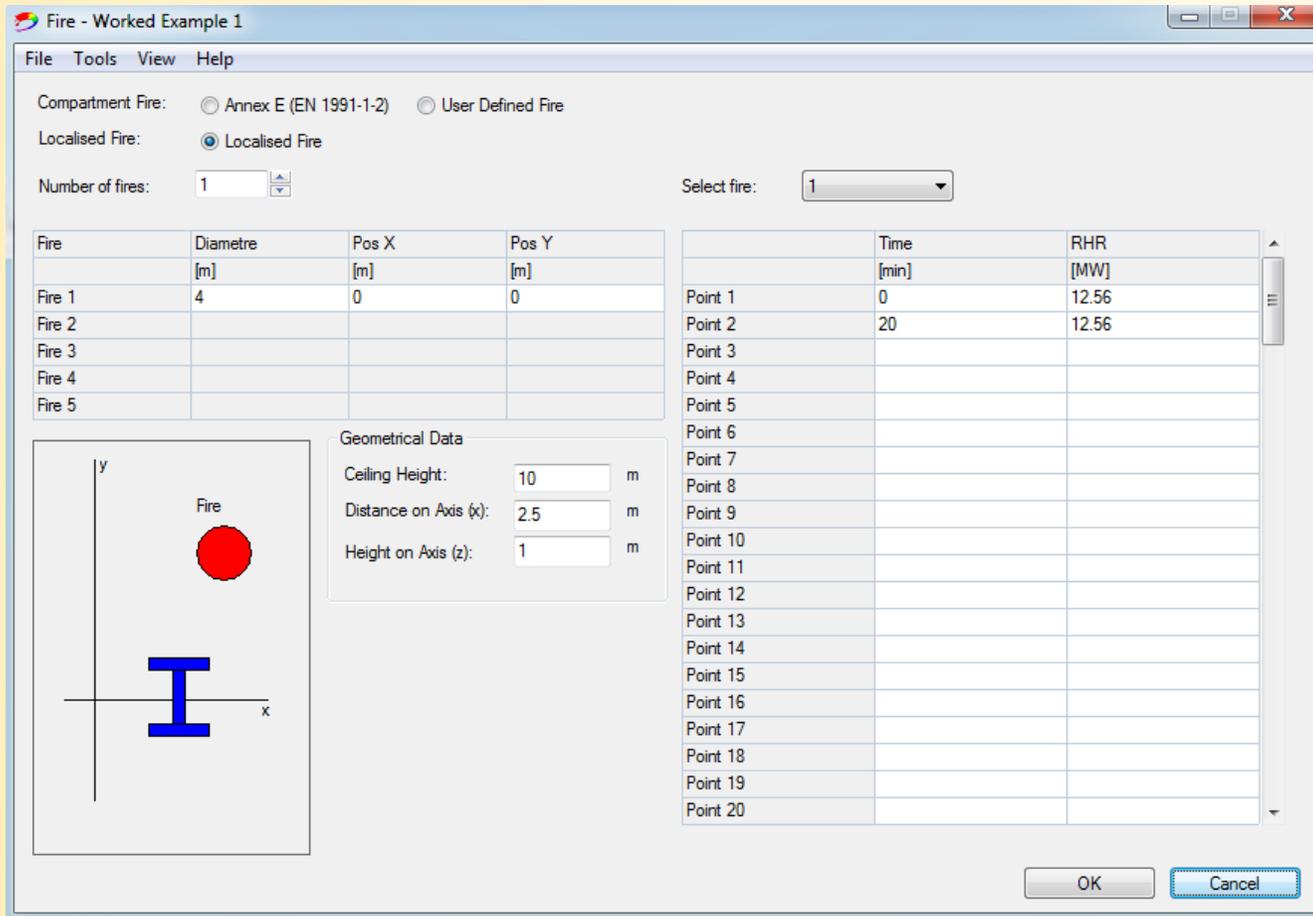
7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



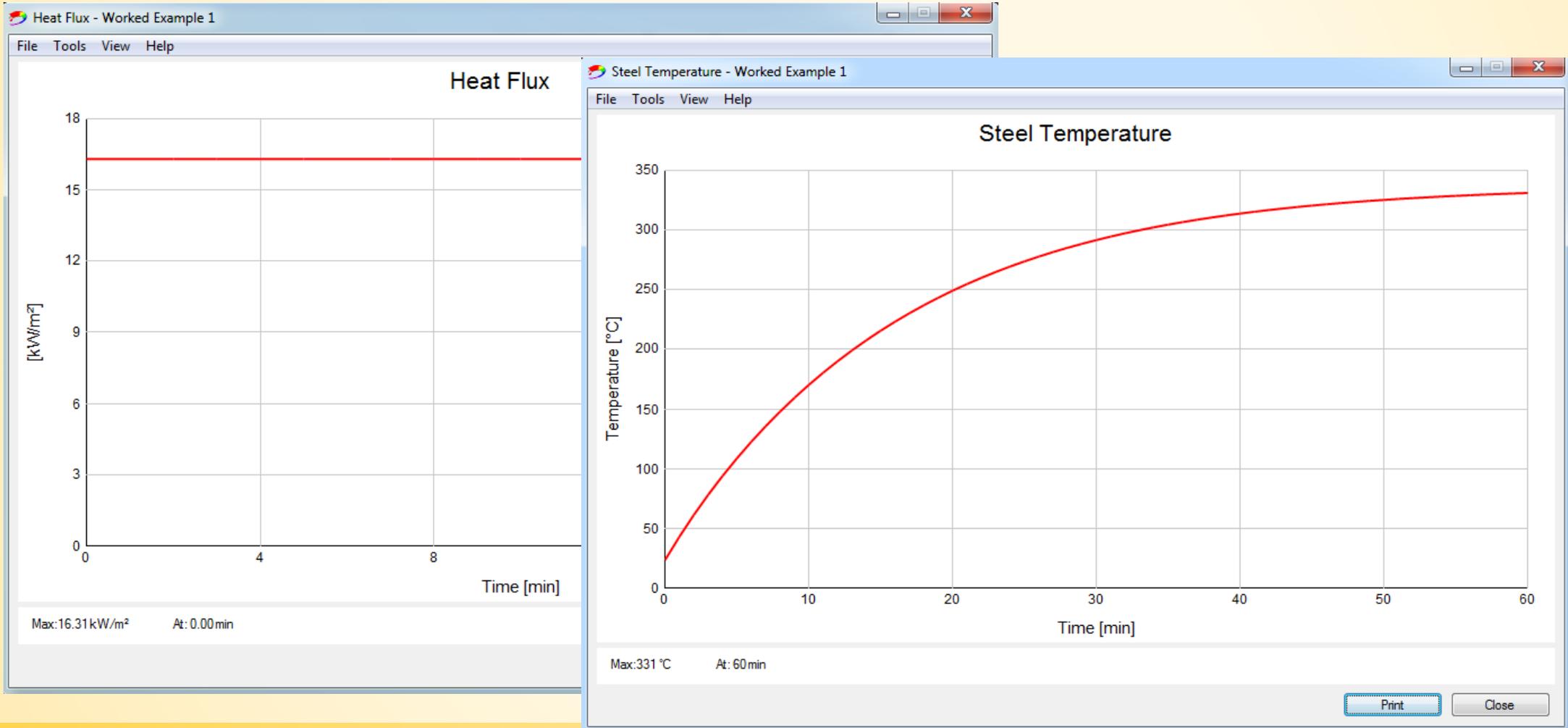
7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

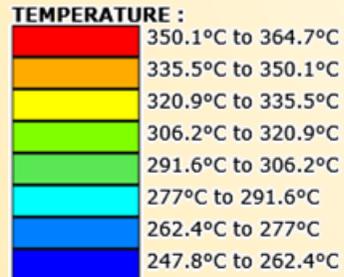
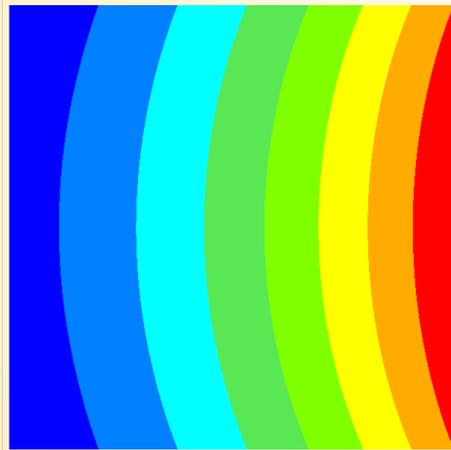


7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

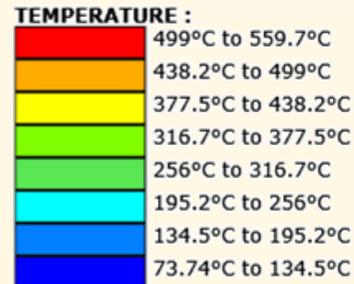
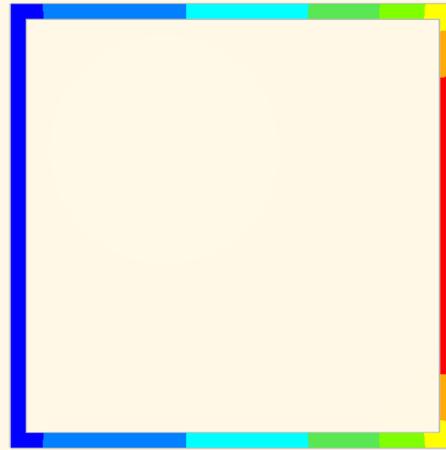
Distribuição de temperatura em equilíbrio (LOCAFI)

Quadrado 300x300



$$(T_{\max} + T_{\min})/2 = 306^{\circ}\text{C}$$

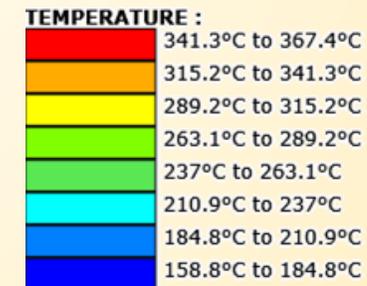
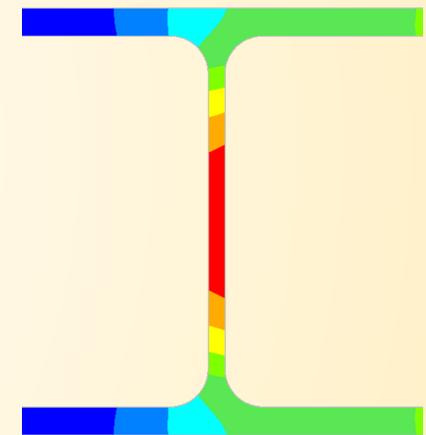
Tubular 300x300x10



$$(T_{\max} + T_{\min})/2 = 317^{\circ}\text{C}$$

Grande variação em toda a secção

HEB 300

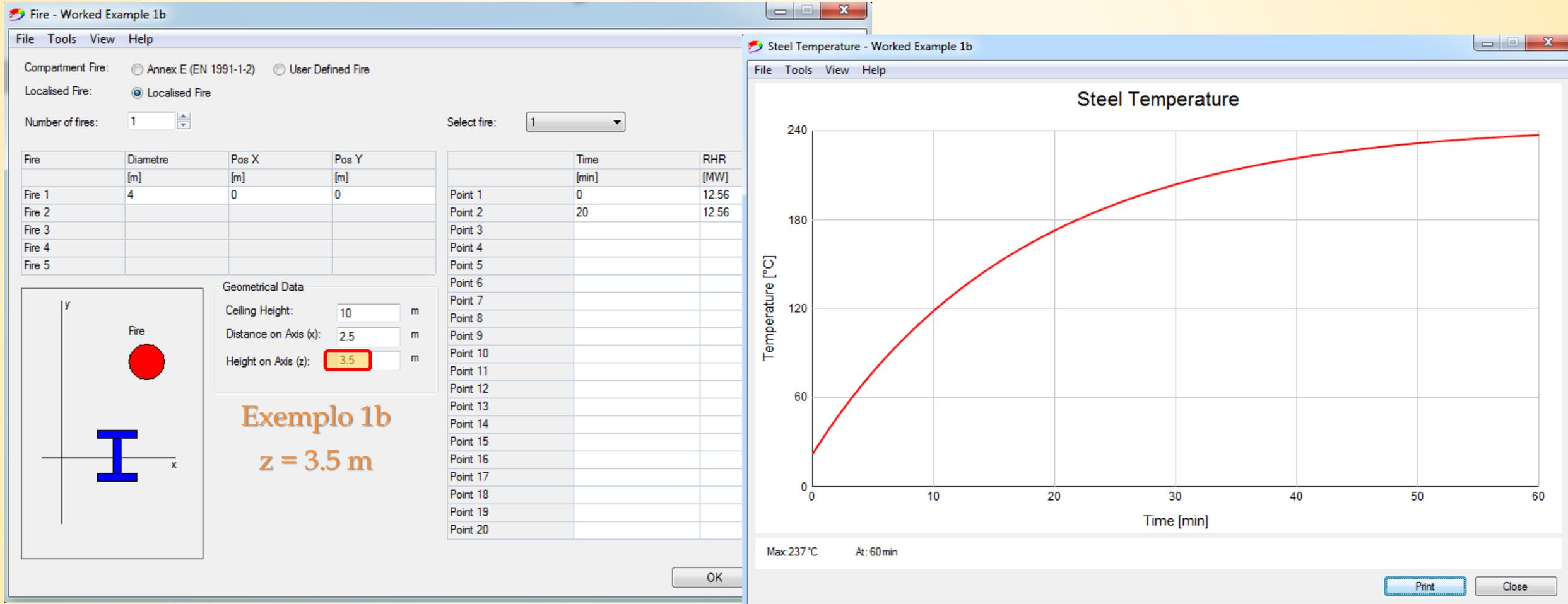


$$(T_{\max} + T_{\min})/2 = 262^{\circ}\text{C}$$

O modelo tem em consideração o efeito de sombra

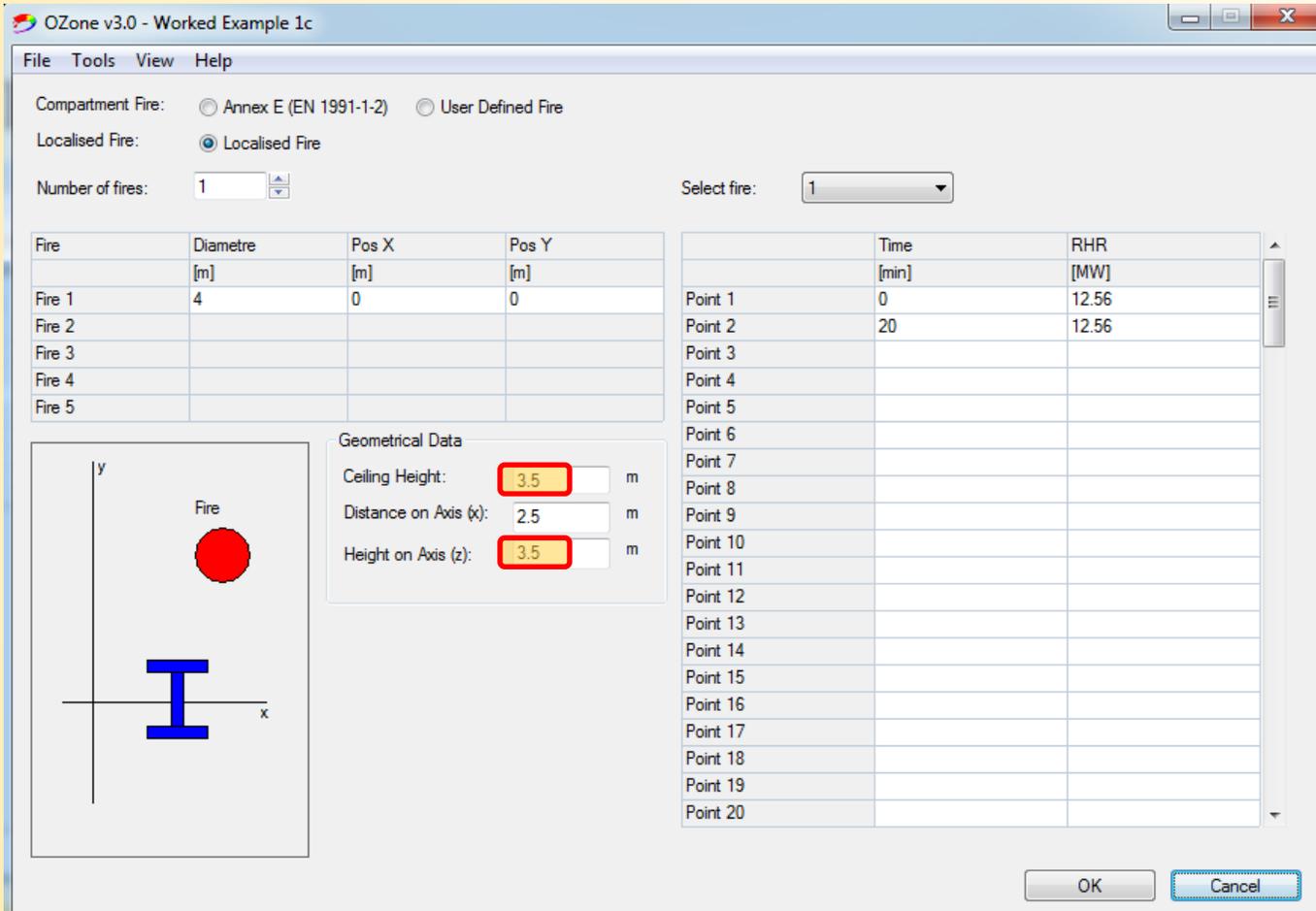
7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



7. Exemplos

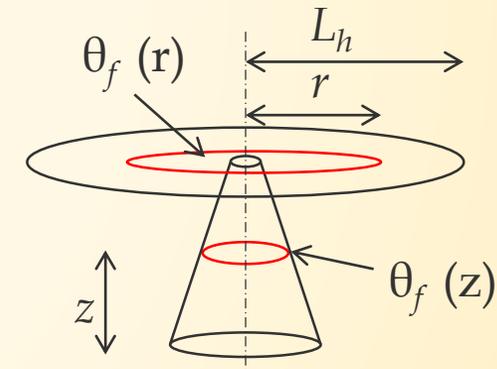
7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado



Exemplo 1c

$z = 3.5 \text{ m}$

$z_{\text{ceiling}} = 3.5 \text{ m}$



$$L_h = H(2.9Q_H^{0.33} - 1) = 4.54 \text{ m}$$

7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

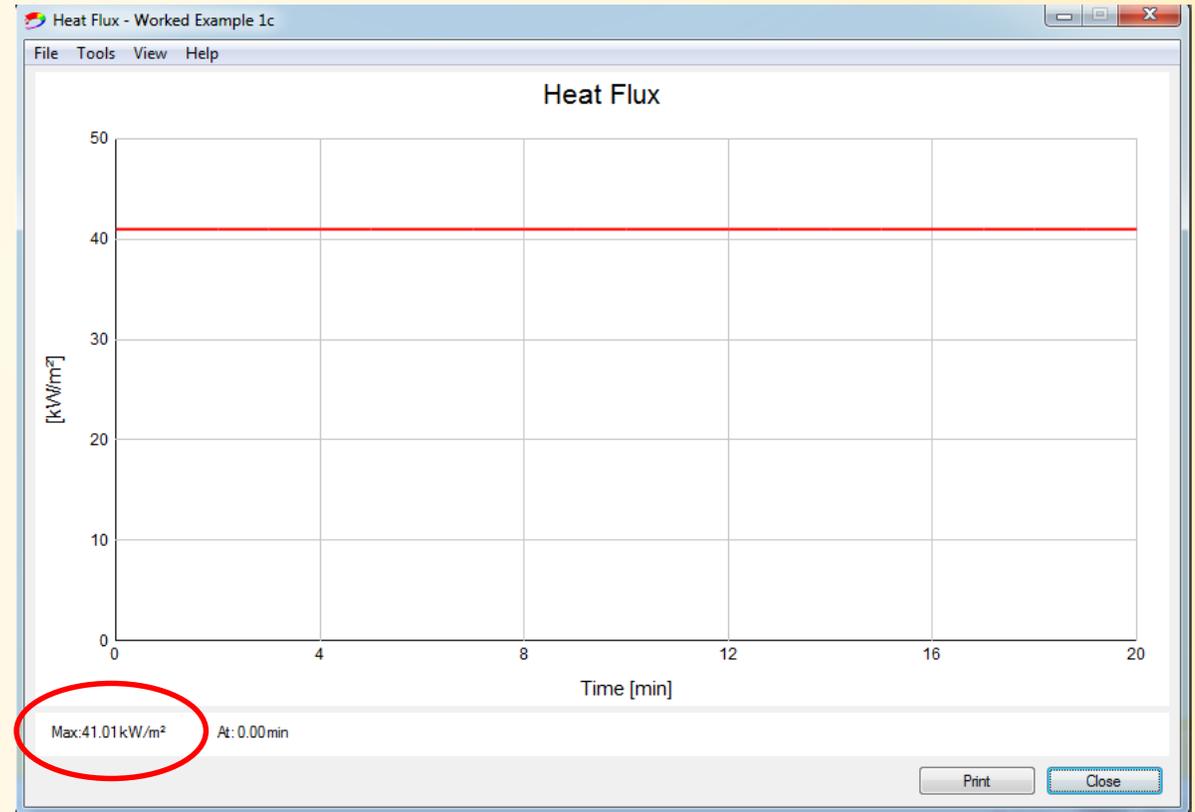
HASEMI (EN 1991-1-2 - Anexo C)

$$Q_D^* = \frac{Q}{1.11 \cdot 10^6 \cdot D^{2.5}} = 0.3536$$

$$z' = 2.4 \cdot D \cdot (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) = 1.535$$

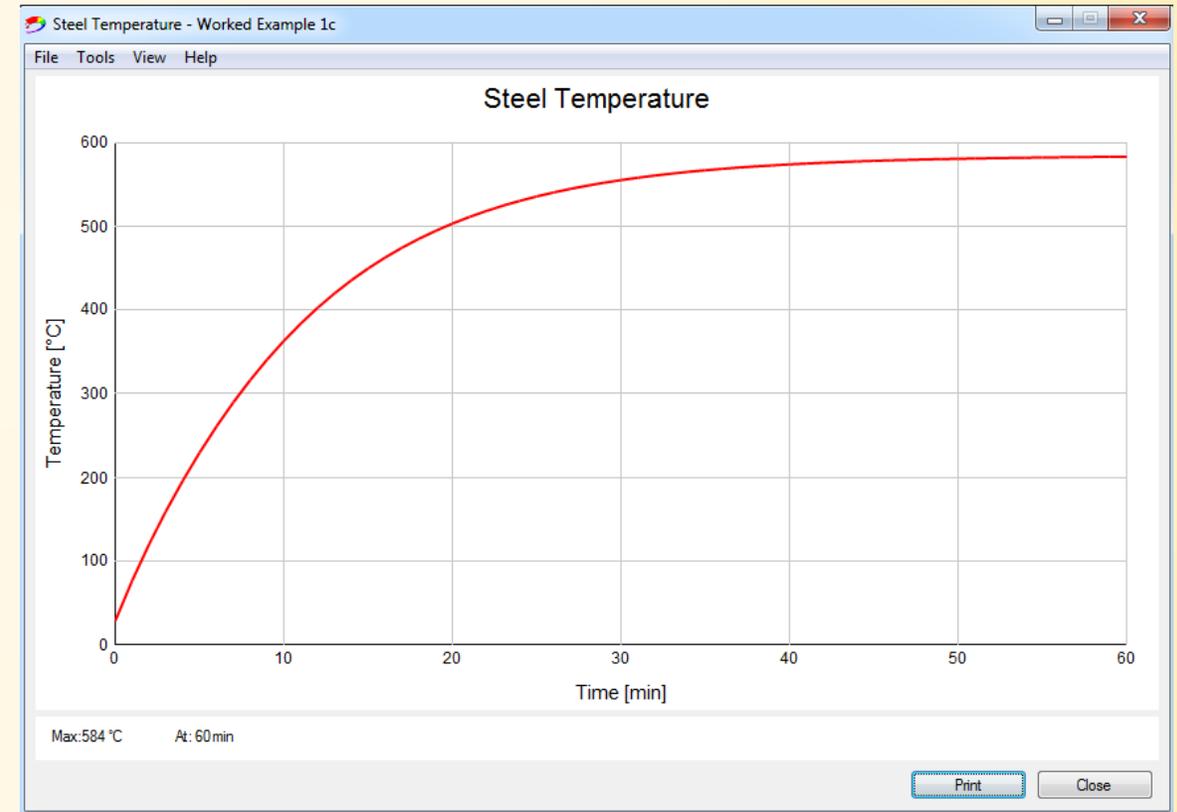
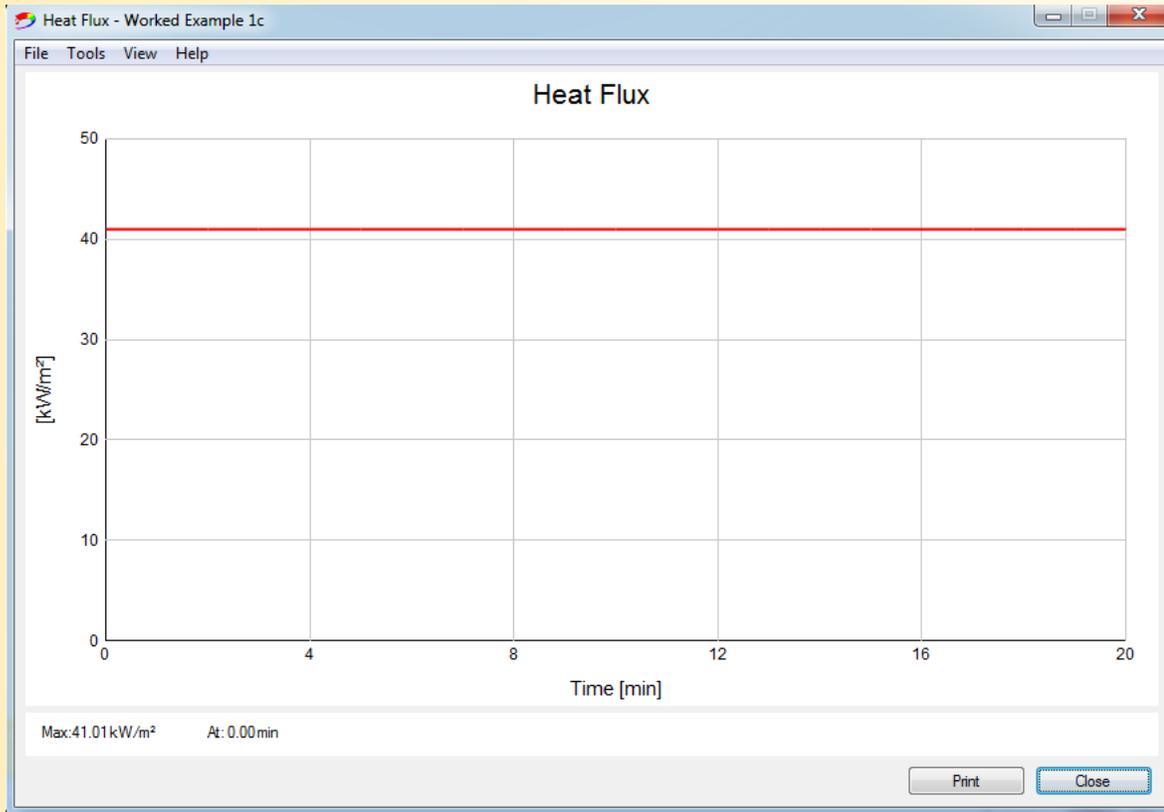
$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} = 0.787$$

$$0.3 < y < 1 \rightarrow \dot{h} = 136300 - 121000 y$$
$$\rightarrow \dot{h} = 41073 \text{ W/m}^2$$



7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

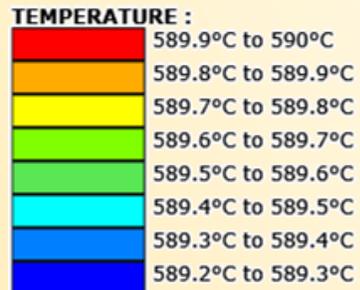
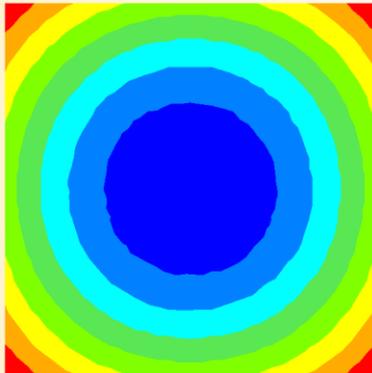


7. Exemplos

7.1. Exemplo 1: Fluxos de radiação sob incêndio localizado

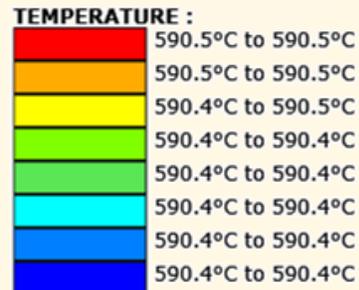
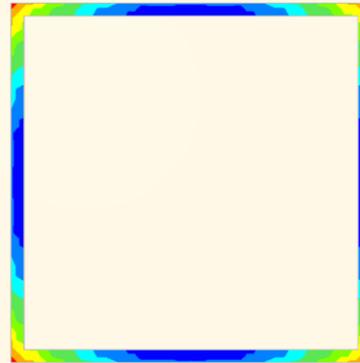
Distribuição de temperatura em equilíbrio (HASEMI)

Quadrado 300x300



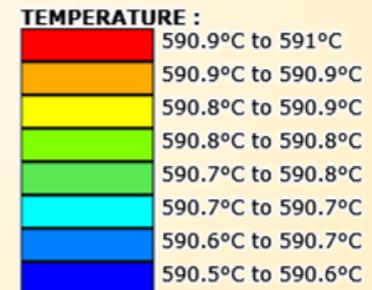
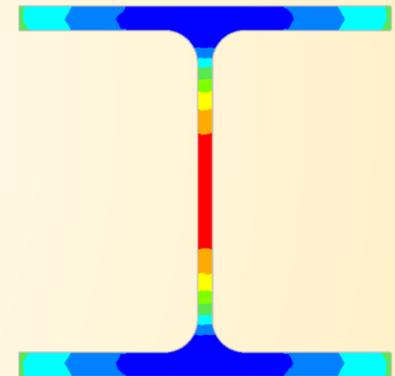
$T_{\text{média}} = 589^{\circ}\text{C}$

Tubular 300x300x10



$T_{\text{média}} = 590^{\circ}\text{C}$

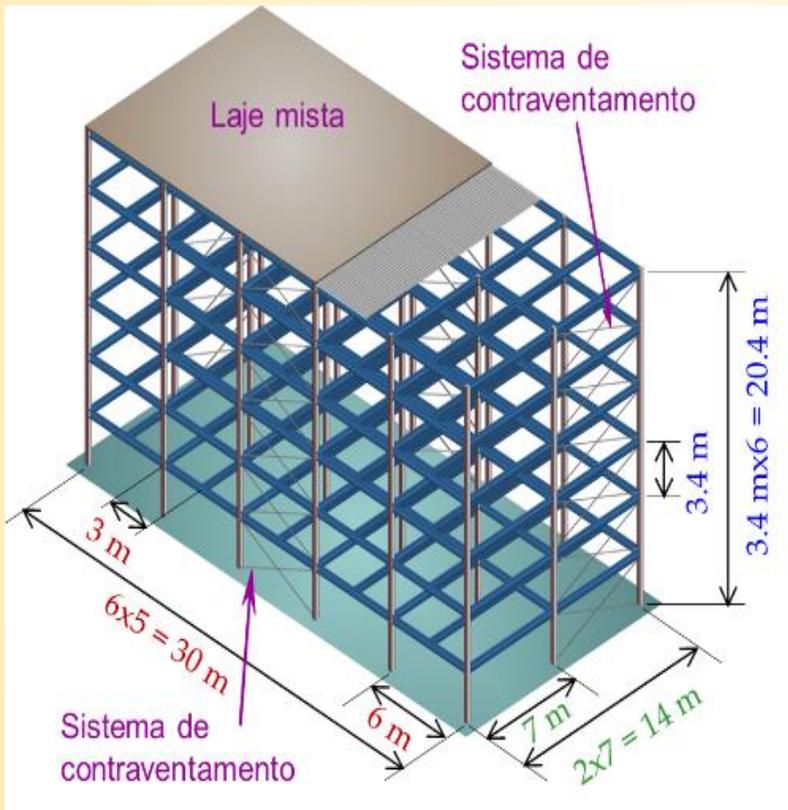
HEB 300



$T_{\text{média}} = 591^{\circ}\text{C}$

7. Exemplos

7.2. Exemplo 2: Coluna de um edifício de escritórios

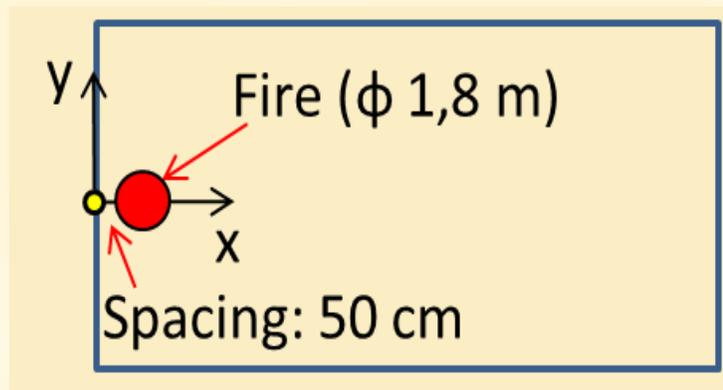


Origem do incêndio localizada a 0.5 m da coluna

Nível do teto: 3.5 m

Fonte de incêndio: 500 kg de papel (17.5 MJ/kg) numa área de 2.5m²

$RHR_{max} = 1000 \text{ kW/m}^2$

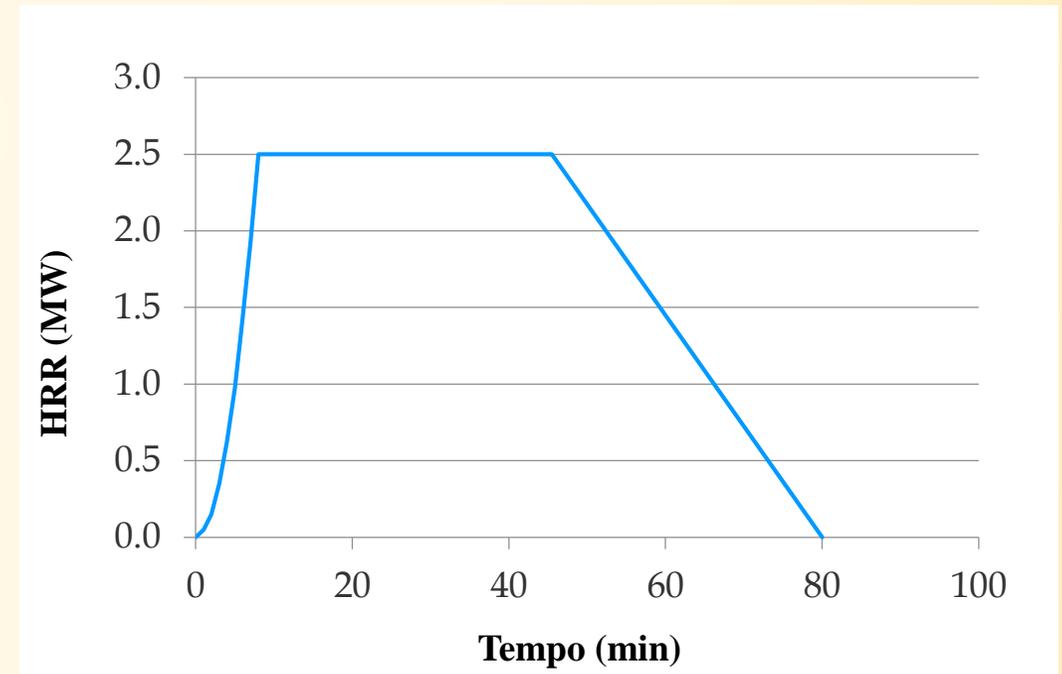


7. Exemplos

7.2. Exemplo 2: Coluna de um edifício de escritórios

Desenvolvimento do incêndio de acordo com o Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010

- Fase de crescimento: $Q(t) = 10^6 * (t/t_\alpha)^2$
- Velocidade de desenvolvimento: Média
- RHR = 1 MW após $t_\alpha = 300 \text{ sec}$
- $RHR_{max} = 2.5 \text{ m}^2 * 1000 \text{ kW/m}^2 = 2.5 \text{ MW}$
- A fase de arrefecimento começa após 70% do combustível ter ardido



7. Exemplos

7.2. Exemplo 2: Coluna de um edifício de escritórios

File Tools View Help

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2) User Defined Fire

Localised Fire: Localised Fire

Number of fires: 1 Select fire: 1

Fire	Diametre [m]	Pos X [m]	Pos Y [m]
Fire 1	1.8	1.4	0
Fire 2			
Fire 3			
Fire 4			
Fire 5			

Geometrical Data

Compartment Height: 3.5 m

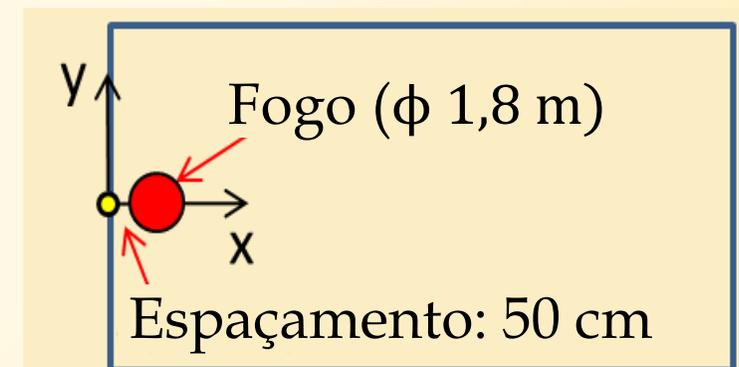
Distance on Axis (x): 0 m

Height on Axis (z): 2.5 m

Point	Time [min]	RHR [MW]
Point 1	0	0
Point 2	1	0.05
Point 3	2	0.15
Point 4	3	0.35
Point 5	4	0.625
Point 6	5	0.975
Point 7	6	1.425
Point 8	7	1.925
Point 9	8	2.5
Point 10	45	2.5
Point 11	45.5	2.5
Point 12	80	0
Point 13		
Point 14		
Point 15		
Point 16		
Point 17		
Point 18		
Point 19		
Point 20		

OK Cancel

$$\text{Pos } x : 0.5\text{m} + 1.8\text{m}/2 = 1.4\text{m}$$



7. Exemplos

7.2. Exemplo 2: Coluna de um edifício de escritórios

File Tools View Help

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2) User Defined Fire

Localised Fire: Localised Fire

Number of fires: 1

Select fire: 1

Fire	Diametre [m]	Pos X [m]	Pos Y [m]
Fire 1	1.8	1.4	0
Fire 2			
Fire 3			
Fire 4			
Fire 5			

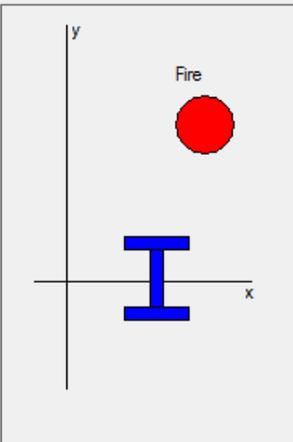
Geometrical Data

Compartment Height: 3.5 m

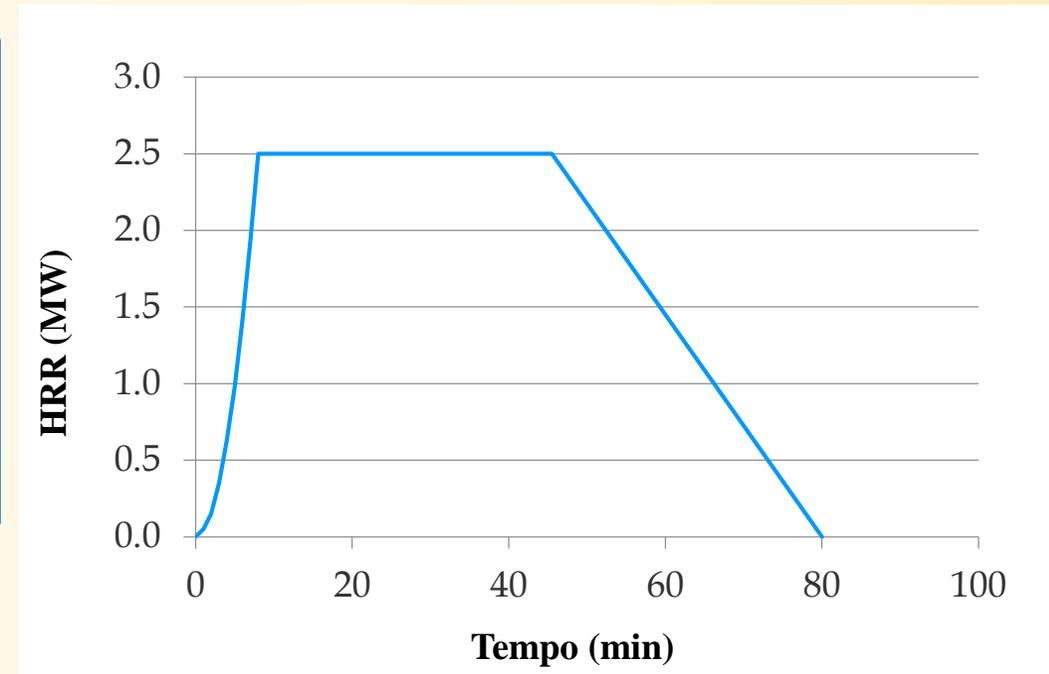
Distance on Axis (x): 0 m

Height on Axis (z): 2.5 m

	Time [min]	RHR [MW]
Point 1	0	0
Point 2	1	0.05
Point 3	2	0.15
Point 4	3	0.35
Point 5	4	0.625
Point 6	5	0.975
Point 7	6	1.425
Point 8	7	1.925
Point 9	8	2.5
Point 10	45	2.5
Point 11	45.5	2.5
Point 12	80	0
Point 13		
Point 14		
Point 15		
Point 16		
Point 17		
Point 18		
Point 19		
Point 20		



OK Cancel



7. Exemplos

7.2. Exemplo 2: Coluna de um edifício de escritórios

File Tools View Help

Cross Section

Unprotected Cross Section
 Protected Cross Section



Steel Profile

Profile Type: HE - HL
Profile: HE 260 A

Exposure

Exposed on Four Sides
 Exposed on Three Sides

Encasement

Contour Encasement
 Hollow Encasement

Protection Material

From Catalog
 Constant Values
 Temperature Dependent

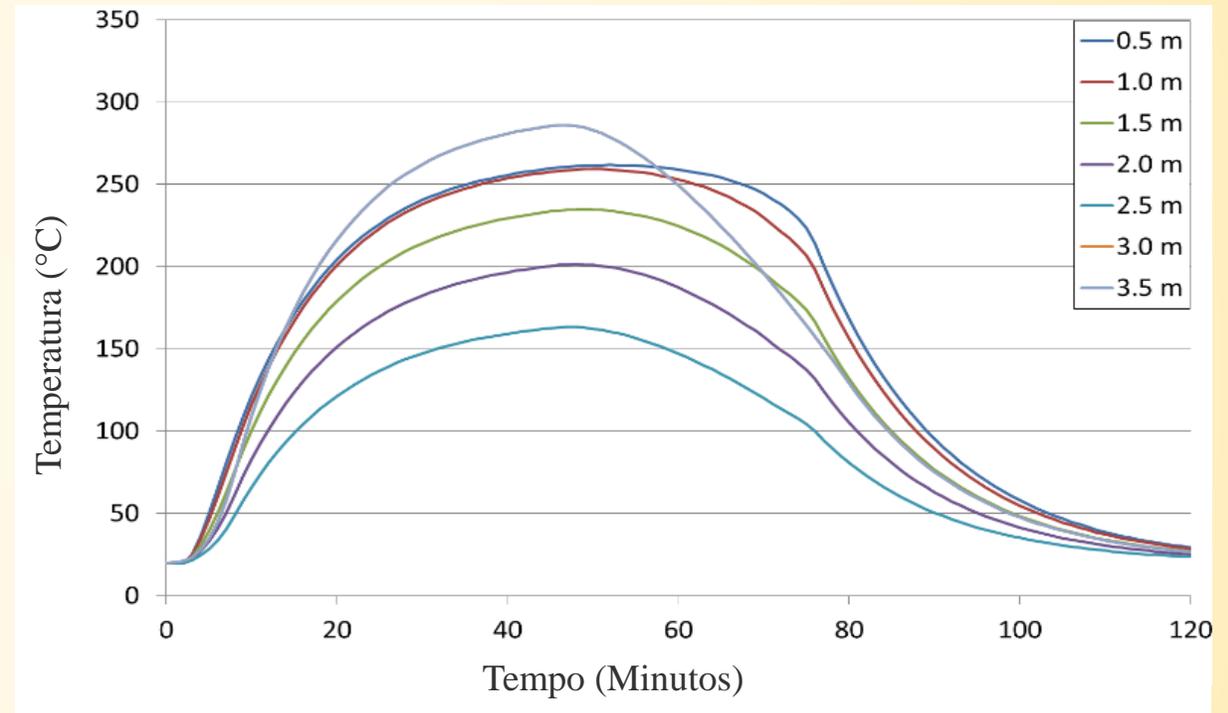
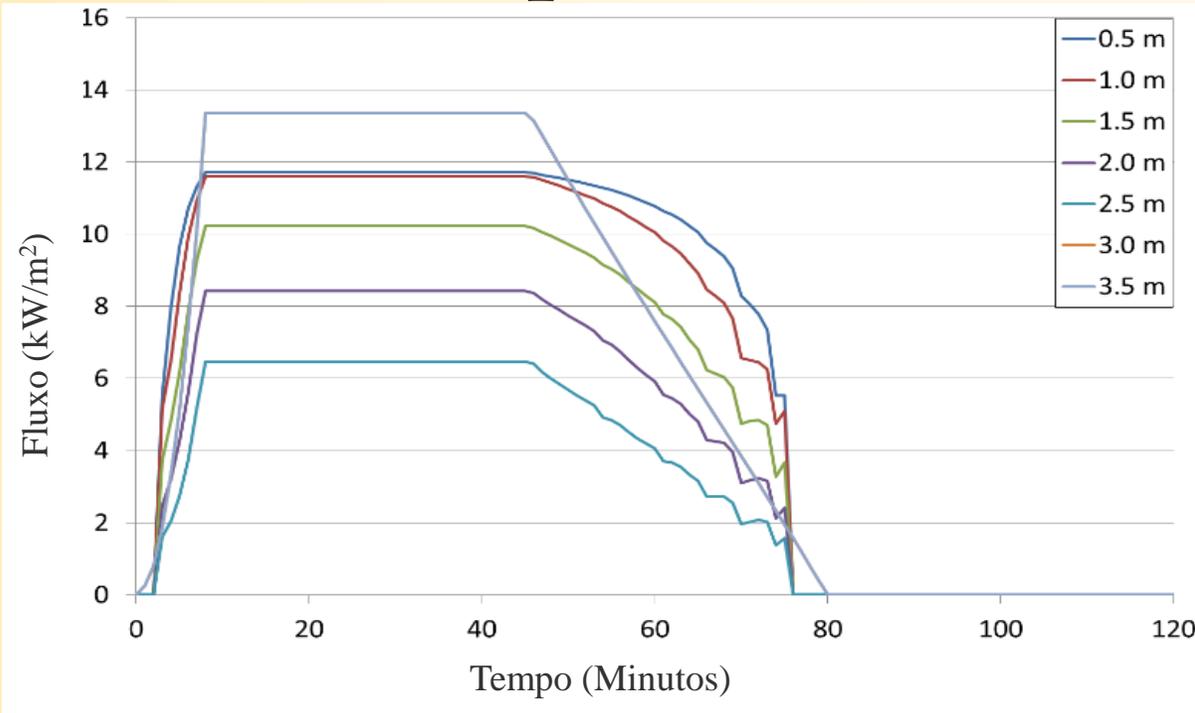
Thickness: 0 mm
Material Name: Spray Mineral Fiber

Temperature	Unit mass	Specific Heat	Conductivity
°C	kg/m ³	J/kgK	W/mK
	300	1200	0.12

OK Cancel

7. Exemplos

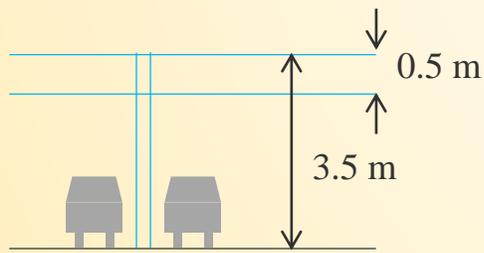
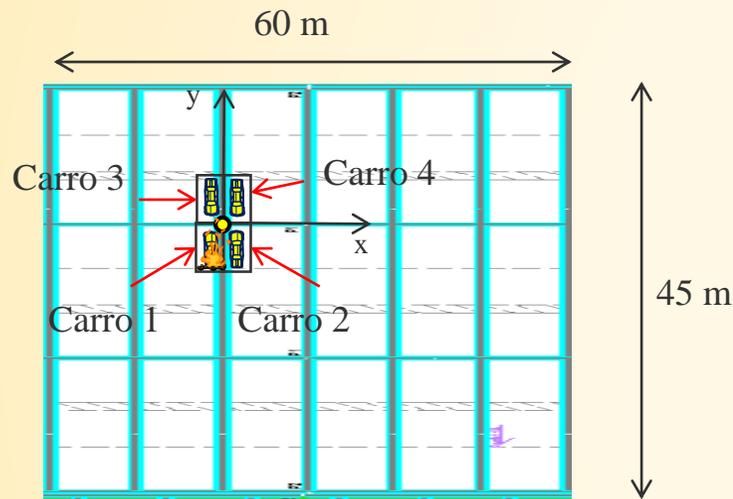
7.2. Exemplo 2: Coluna de um edifício de escritórios



- Fluxo de calor por radiação máximo absorvido na camada de fumo
- Camada de fumo ($z = 3.5\text{m}$): a temperatura atinge 290°C
- No exterior da camada de fumo ($z = 0.5\text{m}$ and $z = 1\text{m}$): $\sim 250^{\circ}\text{C}$

7. Exemplos

7.3. Exemplo 3: Coluna de um parque de estacionamento



Coluna HEA 300

Nível do teto: 3.5 m

*Dimensões do lugar de estacionamento: 2.5m*5m*

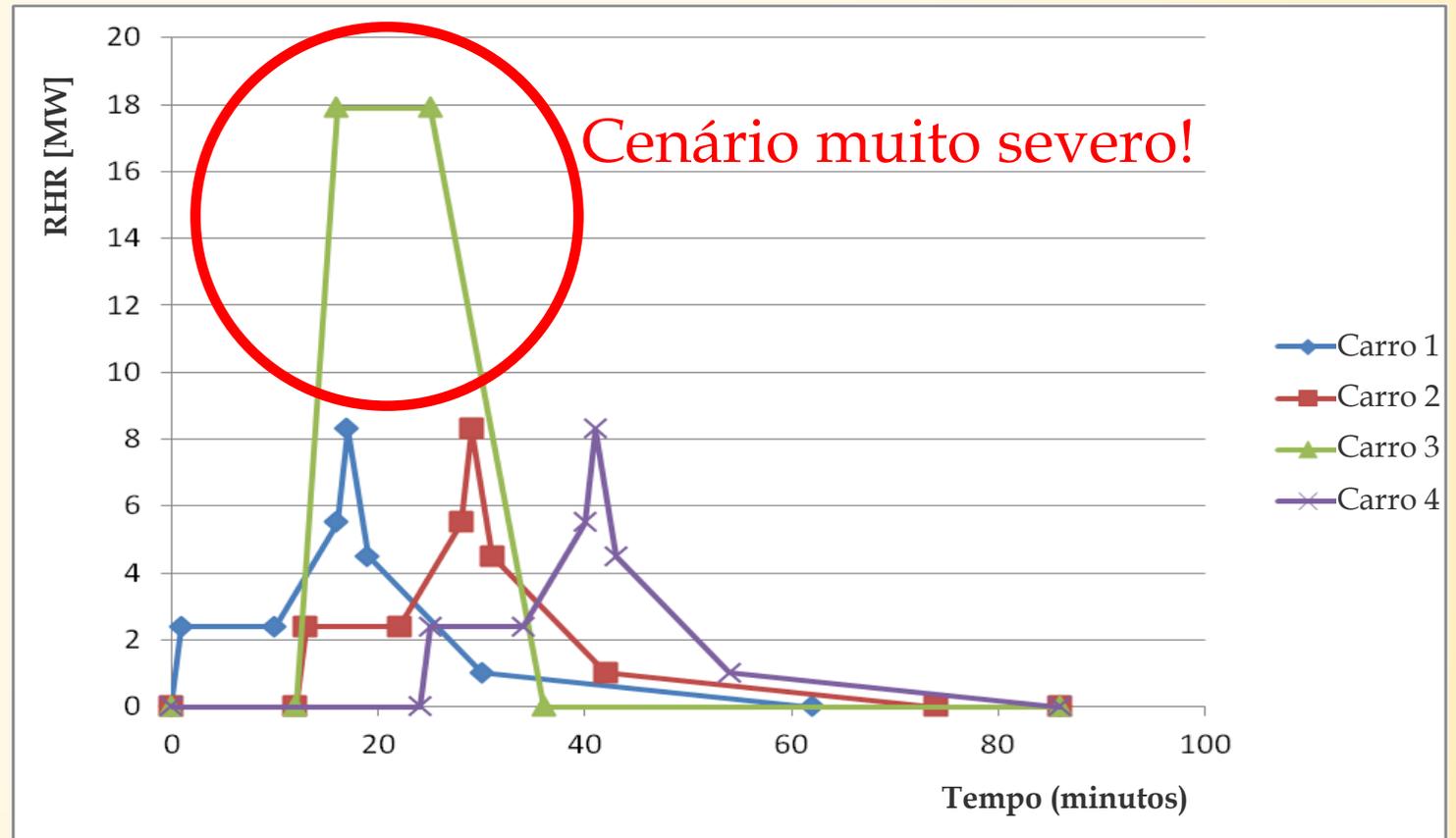
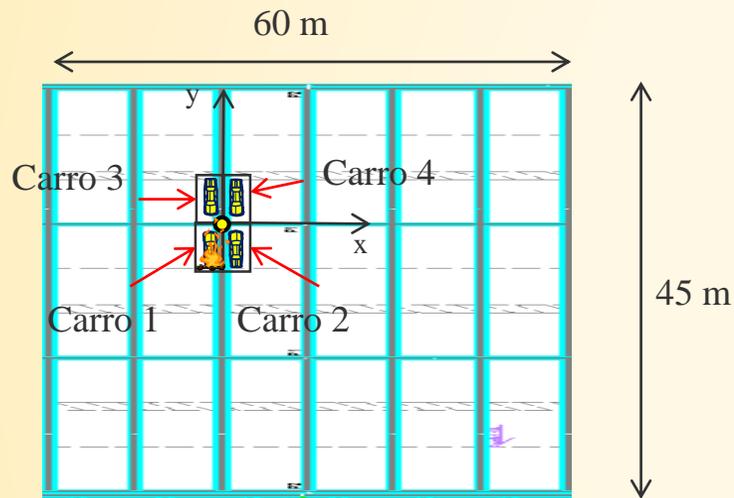
→ Diâmetro equivalente do incêndio: 4 m

Cenário de incêndio: 3 carros + 1 carrinha (análise de risco – pressuposto altamente severo)

Tempo de ignição entre dois carros consecutivos: 12 minutos

7. Exemplos

7.3. Exemplo 3: Coluna de um parque de estacionamento



7. Exemplos

7.3. Exemplo 3: Coluna de um parque de estacionamento

File Tools View Help

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2) User Defined Fire

Localised Fire: Localised Fire

Number of fires:

Select fire:

Fire	Diametre [m]	Pos X [m]	Pos Y [m]
Fire 1	4	-1.25	-2.5
Fire 2	4	1.25	-2.5
Fire 3	4	-1.25	2.5
Fire 4	4	1.25	2.5
Fire 5			

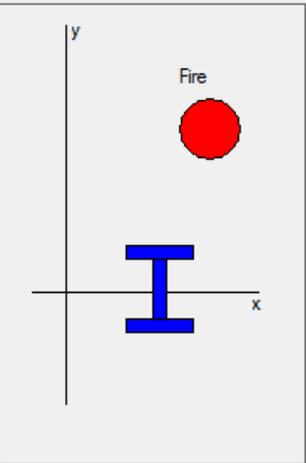
	Time [min]	RHR [MW]
Point 1	0	0
Point 2	1	2.4
Point 3	10	2.4
Point 4	16	5.5
Point 5	17	8.3
Point 6	19	4.5
Point 7	30	1
Point 8	62	0
Point 9	86	0
Point 10		
Point 11		
Point 12		
Point 13		
Point 14		
Point 15		
Point 16		
Point 17		
Point 18		
Point 19		
Point 20		

Geometrical Data

Compartment Height: m

Distance on Axis (x): m

Height on Axis (z): m



OK Cancel

File Tools View Help

Cross Section

Unprotected Cross Section

Protected Cross Section

Steel Profile

Profile Type:

Profile:

Exposure

Exposed on Four Sides Exposed on Three Sides

Encasement

Contour Encasement Hollow Encasement

Protection Material

From Catalog

Constant Values

Thickness: mm

Temperature Dependent

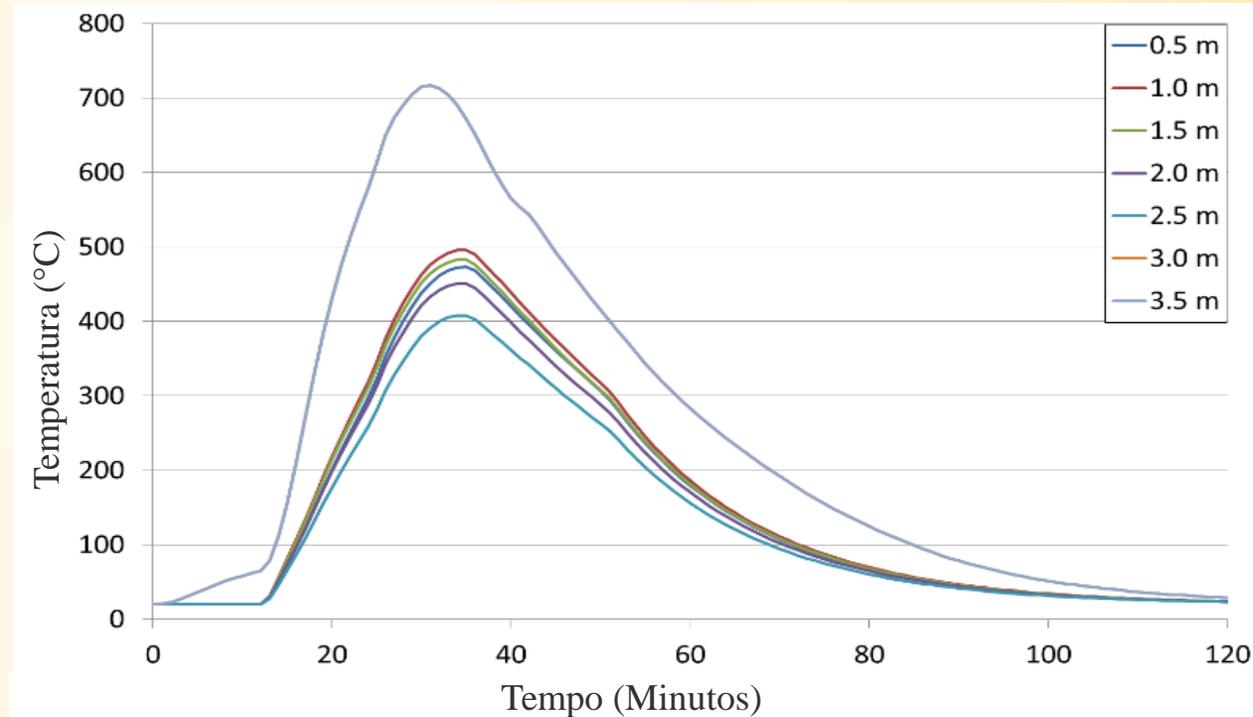
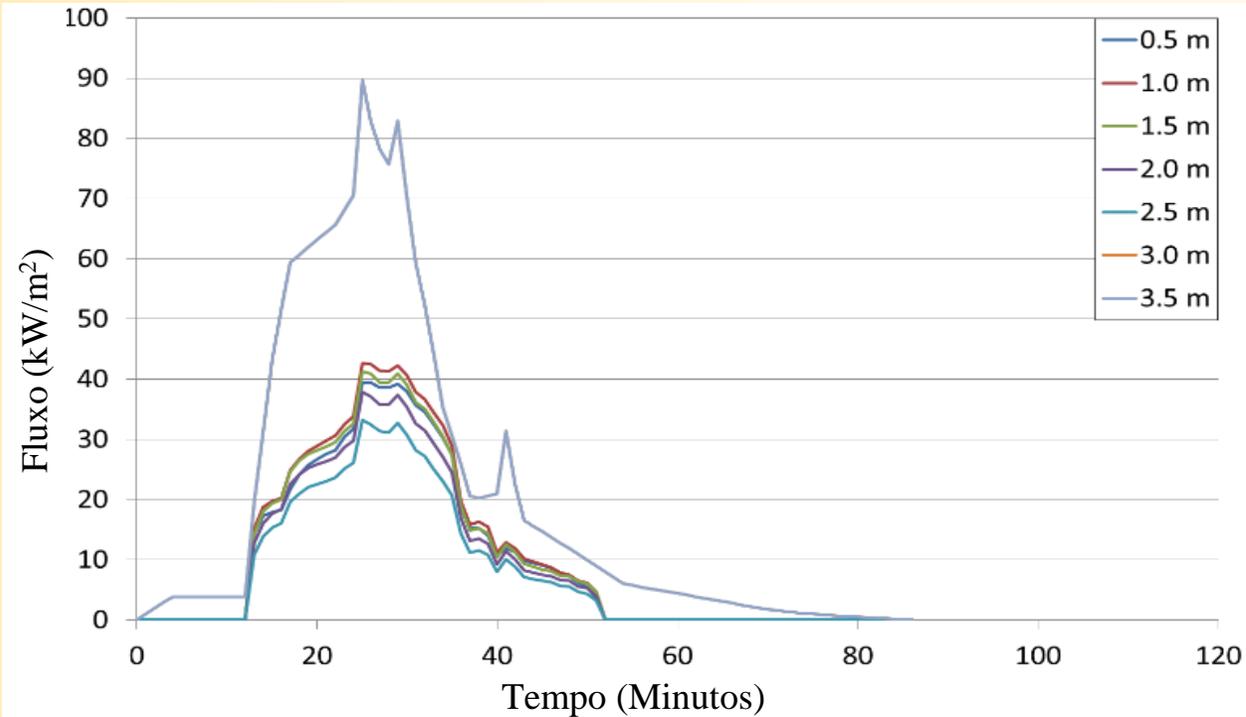
Material Name:

Temperature °C	Unit mass kg/m ³	Specific Heat J/kgK	Conductivity W/mK
	300	1200	0.12

OK Cancel

7. Exemplos

7.3. Exemplo 3: Coluna de um parque de estacionamento



- Fora da camada de fumo ($z = 1 \text{ m}$): $t_{\max} = 500^\circ\text{C}$

- Na camada de fumo ($z = 3.5 \text{ m}$): $t_{\max} = 718^\circ\text{C}$

7. Exemplos

7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial

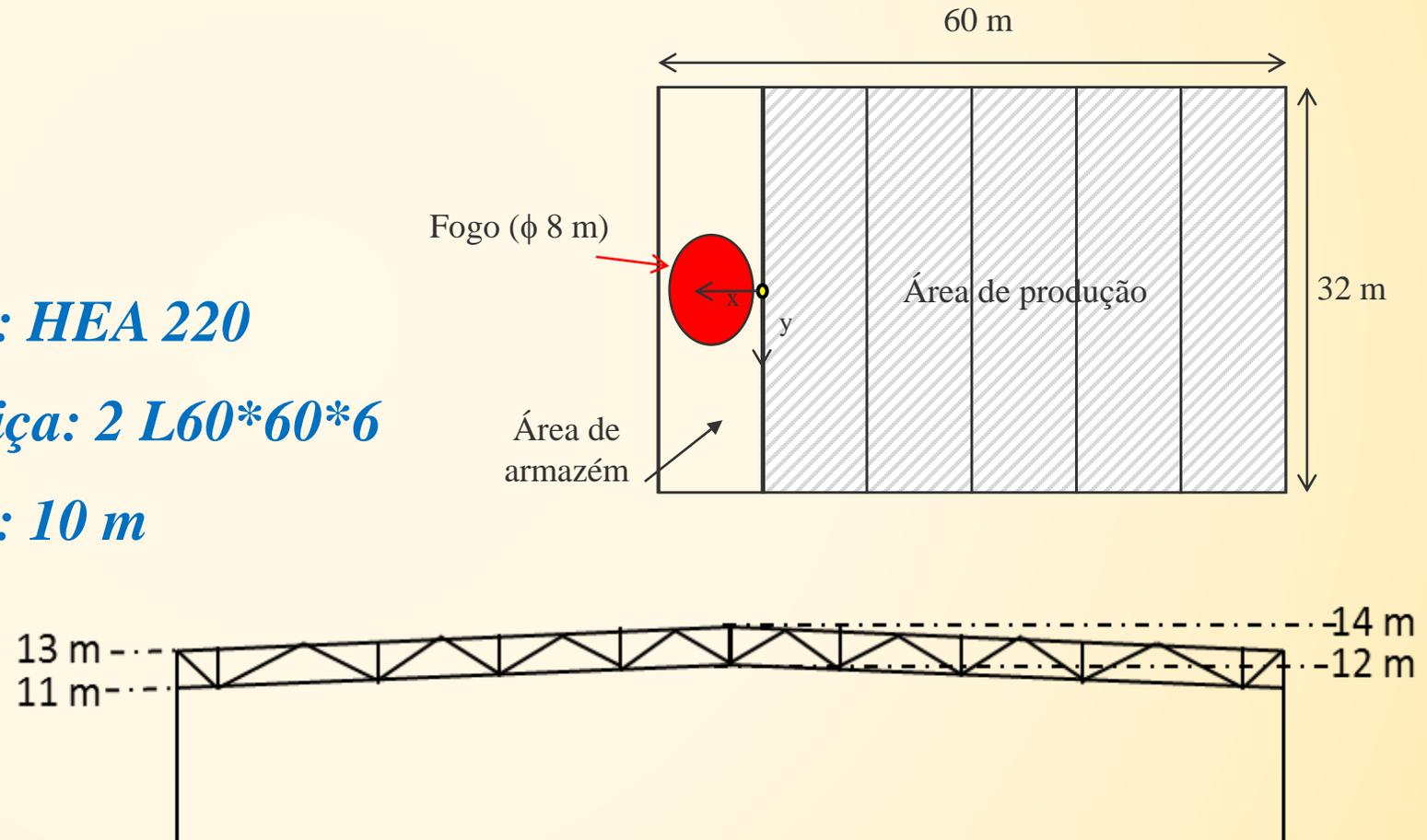
Descrição da estrutura:

Secção dos banzos da treliça: HEA 220

*Secção das diagonais da treliça: 2 L60*60*6*

Distância entre dois pórticos: 10 m

Altura do cume: 14 m



7. Exemplos

7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial

Cenário de incêndio:

Área de incêndio: 50 m^2 (centro da área de armazenamento)

→ Diâmetro equivalente: 8 m

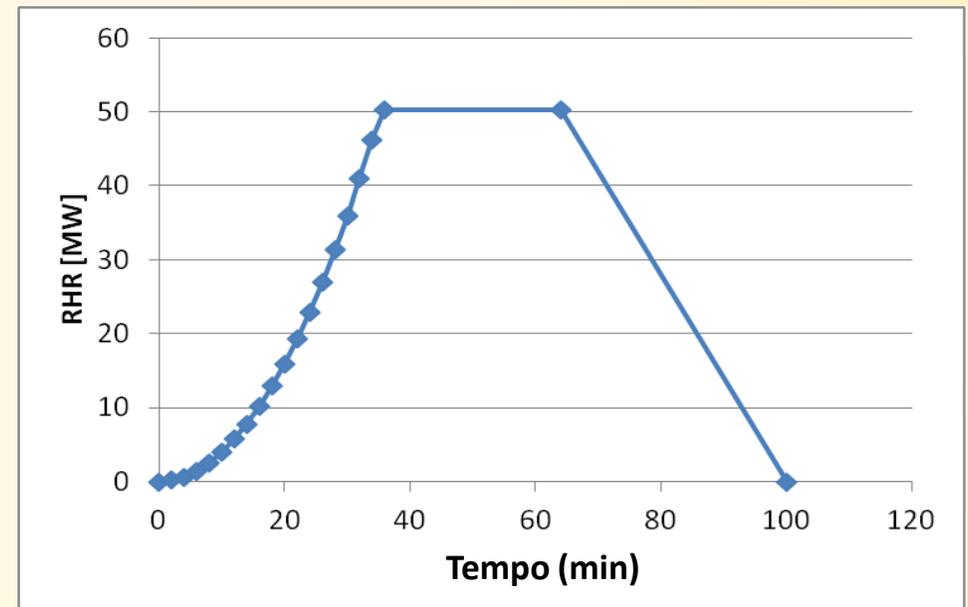
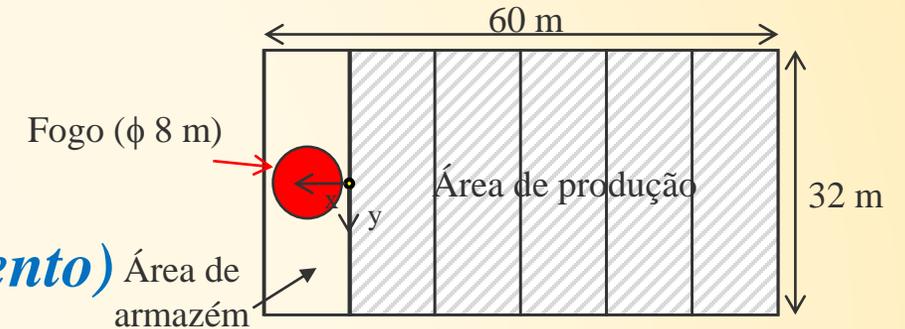
Velocidade de desenvolvimento: Média

→ $RHR = 1 \text{ MW}$ após $t_{\alpha} = 300 \text{ sec}$

$RHR_{max} = 1000 \text{ kW/m}^2 * 50 \text{ m}^2 = 50 \text{ MW}$

Carga de incêndio: 10 To (celulosa)

→ $Q = 17.5 \text{ MJ/kg} * 10000 \text{ kg} = 175000 \text{ MJ}$



7. Exemplos

7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial

File Tools View Help

Compartment Fire: Annex E (EN 1991-1-2) User Defined Fire

Localised Fire: Localised Fire

Number of fires: Select fire:

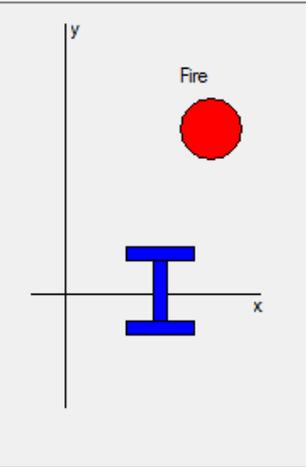
Fire	Diametre [m]	Pos X [m]	Pos Y [m]
Fire 1	8	0	0
Fire 2			
Fire 3			
Fire 4			
Fire 5			

Geometrical Data

Compartment Height: m

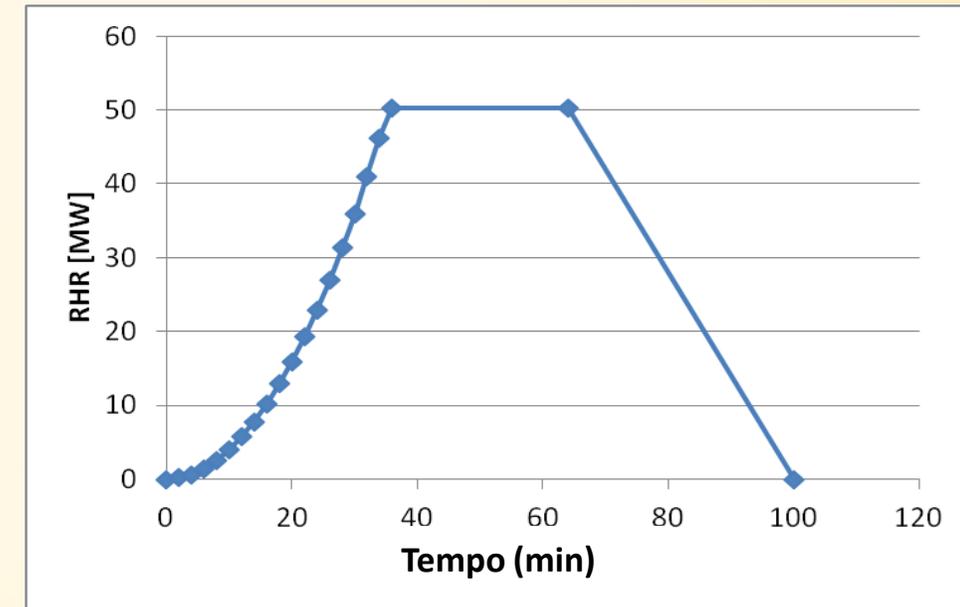
Distance on Axis (x): m

Height on Axis (z): m



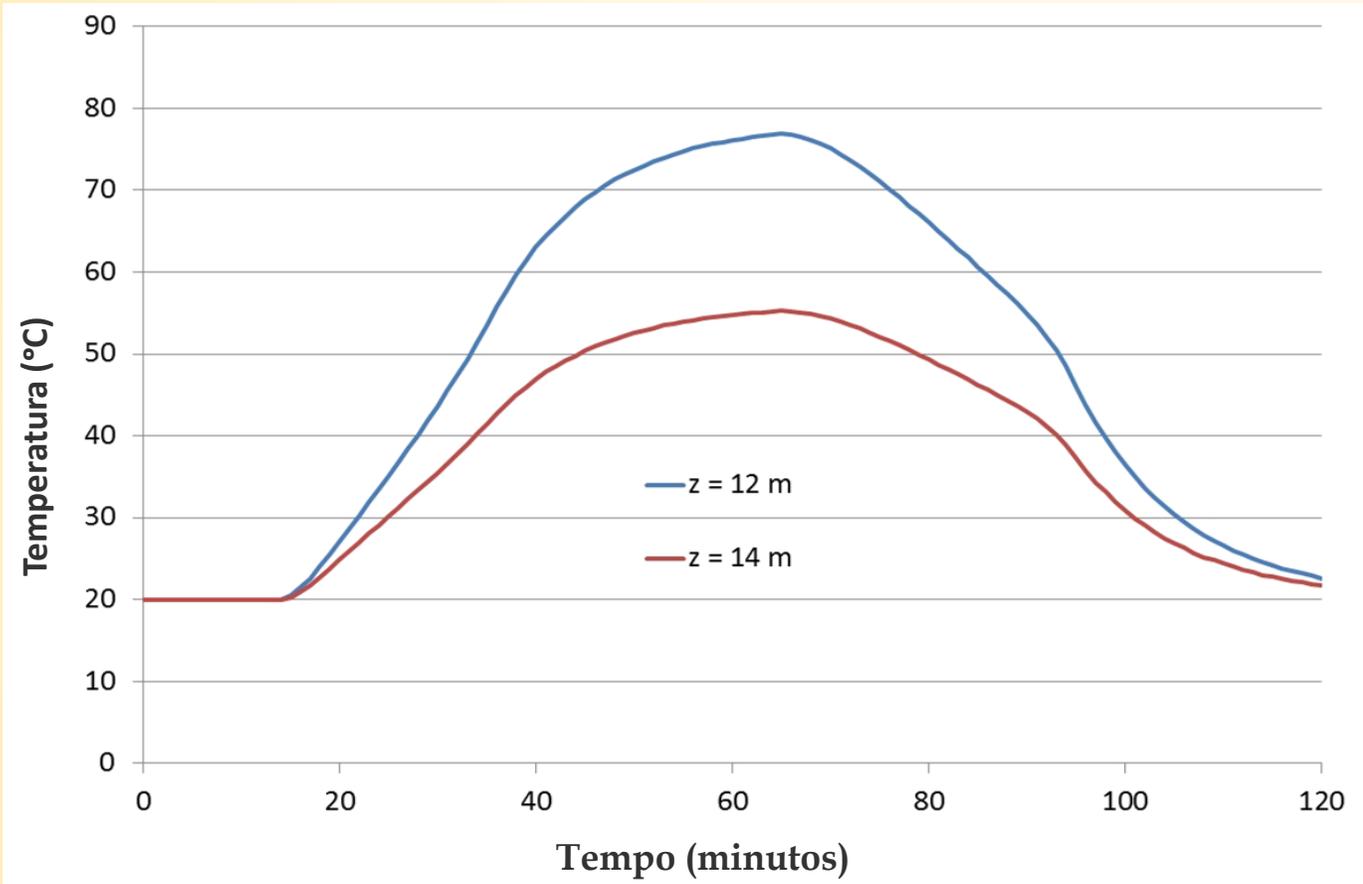
	Time [min]	RHR [MW]
Point 1	0	0
Point 2	2	0.15
Point 3	4	0.65
Point 4	6	1.45
Point 5	8	2.55
Point 6	10	4
Point 7	12	5.75
Point 8	14	7.8
Point 9	16	10.2
Point 10	18	12.9
Point 11	20	15.9
Point 12	22	19.25
Point 13	24	22.9
Point 14	26	26.9
Point 15	28	31.2
Point 16	30	35.8
Point 17	32	40.75
Point 18	34	46
Point 19	36	50
Point 20	64	50

OK Cancel



7. Exemplos

7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial



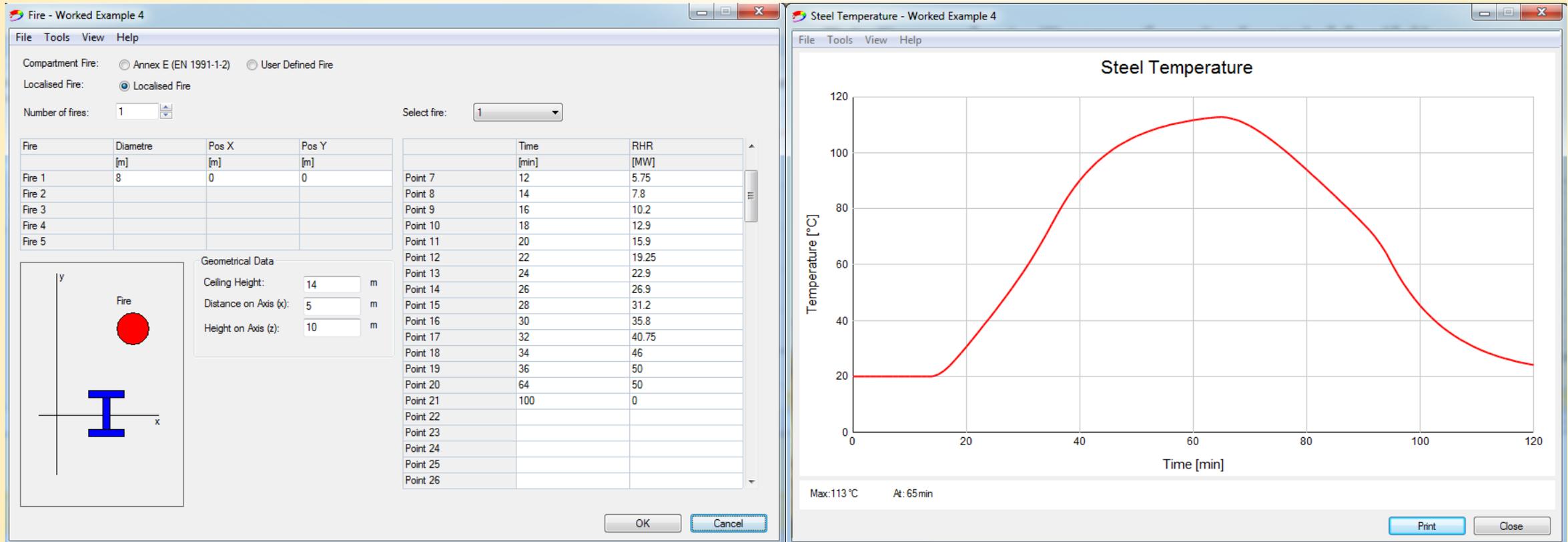
Altura da chama = 9.7m

→ Os elementos da treliça estão localizados acima da chama sólida

Temperatura máxima das treliças = 210°C

7. Exemplos

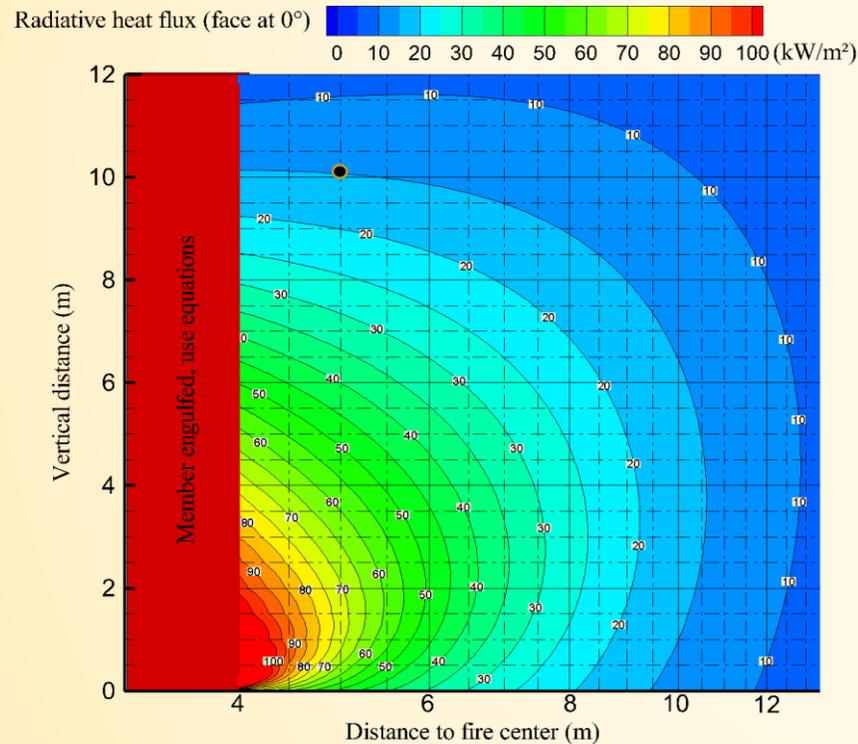
7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial



7. Exemplos

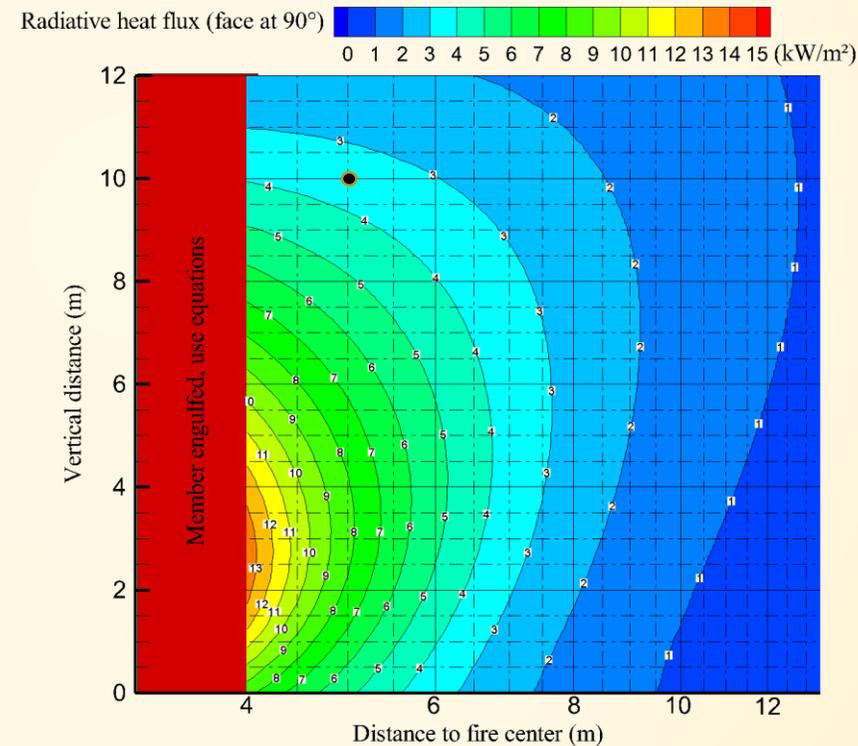
7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial

Face 1



$$\varepsilon * \varphi_{tot} = 0.7 * 15 \text{ kW/m}^2 = 10.5 \text{ kW/m}^2$$

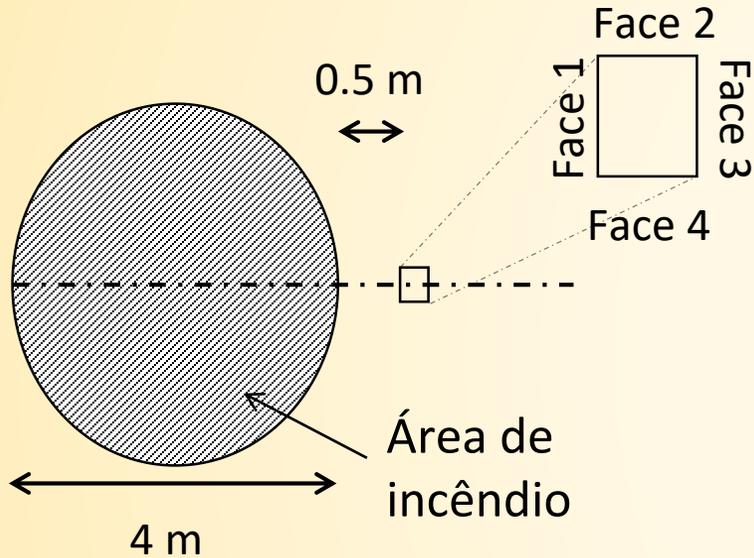
Face 2



$$\varepsilon * \varphi_{tot} = 0.7 * 3.5 \text{ kW/m}^2 = 2.45 \text{ kW/m}^2$$

7. Exemplos

7.4. Exemplo 4: Treliça de um edifício industrial



Fluxo de calor recebido por cada face (assumindo $\varepsilon = 0.7$)

Face 1 : 10.5 kW/m²

Face 2 : 2.45 kW/m²

Face 3 : 0.00 kW/m²

Face 4 : 2.45 kW/m²

→ Fluxo de calor médio = 3.85 kW/m²

$$0 = \underbrace{h(\theta - 20)}_{\text{Fluxo convectivo emitido}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Fluxo de radiação emitida}} - \underbrace{\varepsilon * \varphi_{tot}}_{\text{Fluxo absorvido}}$$

Fluxo convectivo emitido

Fluxo de radiação emitida

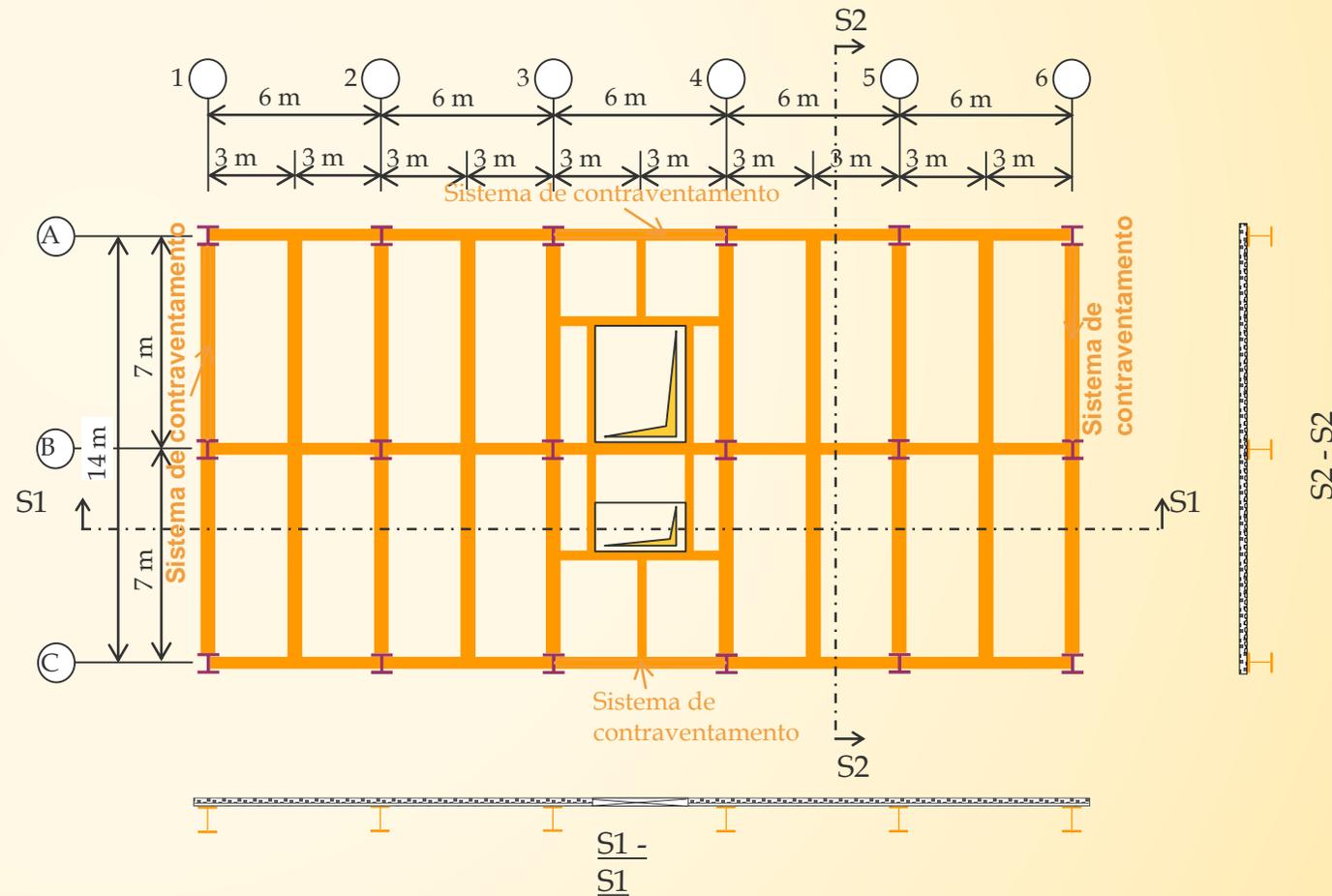
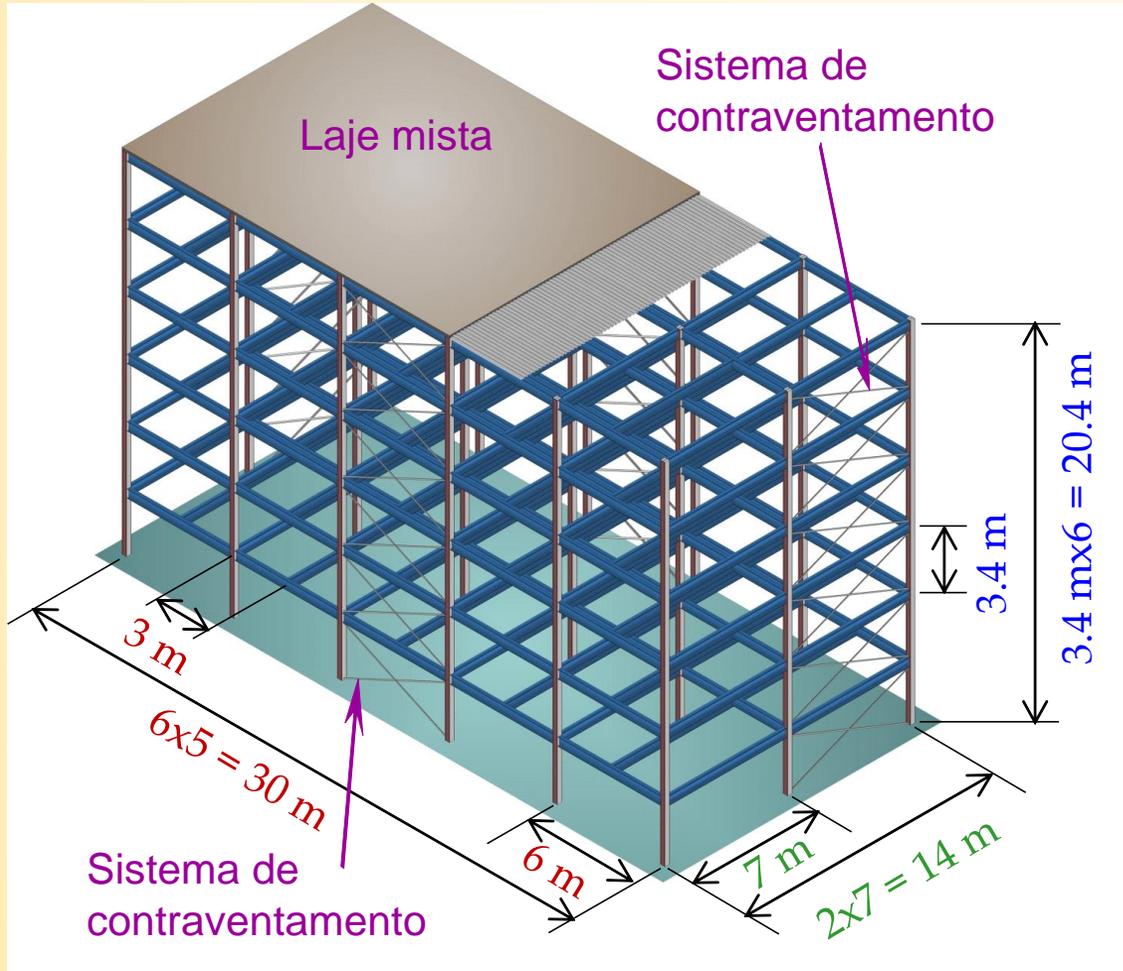
Fluxo absorvido

$$h = 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}; \sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

T (°C)	Fluxo emitido (W/m ²)
20	0
30	392.03
40	788.42
50	1189.49
60	1595.53
70	2006.84
80	2423.77
90	2846.62
100	3275.76
110	3711.52
120	4154.27
130	4604.37
140	5062.21
150	5528.18

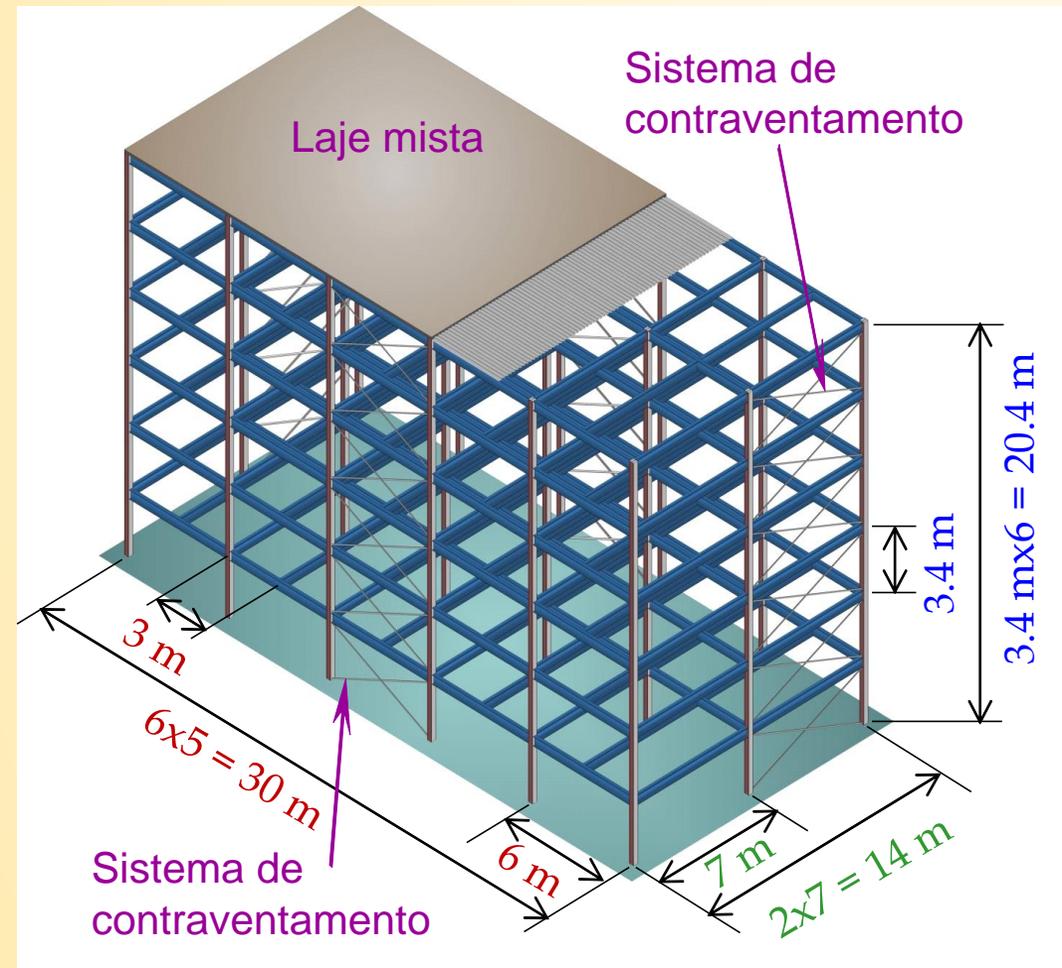
7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna



7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna



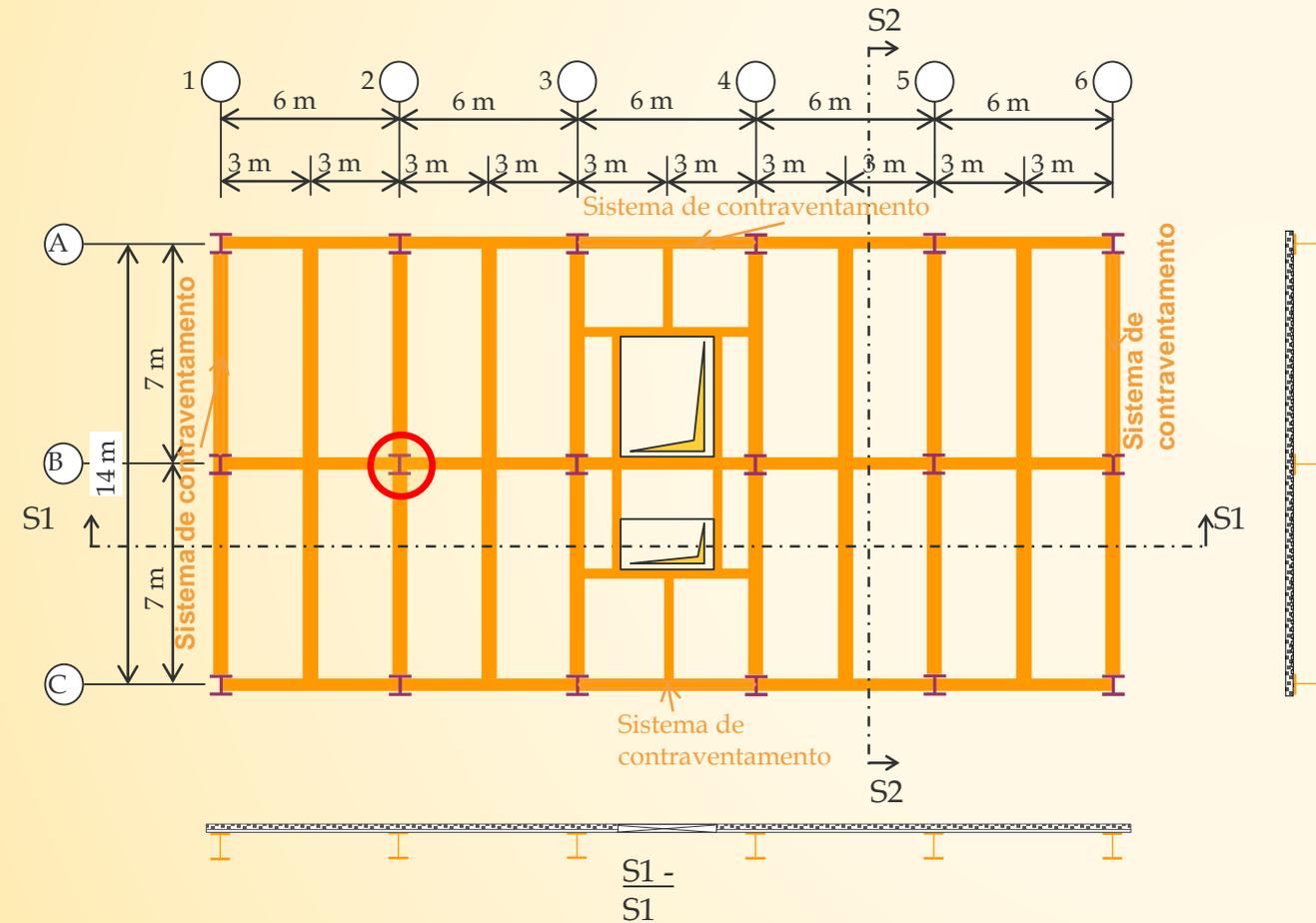
Ações (para todos os pisos)

- Peso próprio G1:
 - ✓ Peso unitário da laje mista: 2.12 kN/m^2
 - ✓ Elementos estruturais em aço: de acordo com as suas dimensões
- Carga permanente G2:
 - ✓ acabamentos, instalações, divisórias: 1.50 kN/m^2
- Carga permanente G3:
 - ✓ Carga de revestimento das fachadas: 2.00 kN/m
- Valores característicos das cargas variáveis e fatores ψ

Tipo	Q_k	ψ_1	ψ_2
Carga variável nos pisos	4.0 kN/m^2	0.7	0.6
Neve na cobertura	1.7 kN/m^2	0.2	0.0

7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna



Elementos estruturais

- Laje mista:
 - ✓ Espessura total: 12 cm
 - ✓ Chapa de aço perfilada: COFRAPLUS60
 - ✓ Espessura chapa de aço perfilada: 0.75 mm
 - ✓ Laje continua sobre 2 vãos
- Vigas secundárias comuns:
 - ✓ IPE360 - S275
- Vigas internas principais:
 - ✓ HEA360 - S275
- Colunas para o nível do solo:
 - ✓ Colunas de bordo (nível do solo): HEA300 - S275
 - ✓ **Colunas centrais (nível do solo): HEB300 - S275**

7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna

Passo 1: Cálculo da ação mecânica em incêndio

- Carga de cálculo em situação de incêndio

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

- Peso próprio da coluna

$$q_{fi,d,t} = 1.15 \text{ kN/m}$$

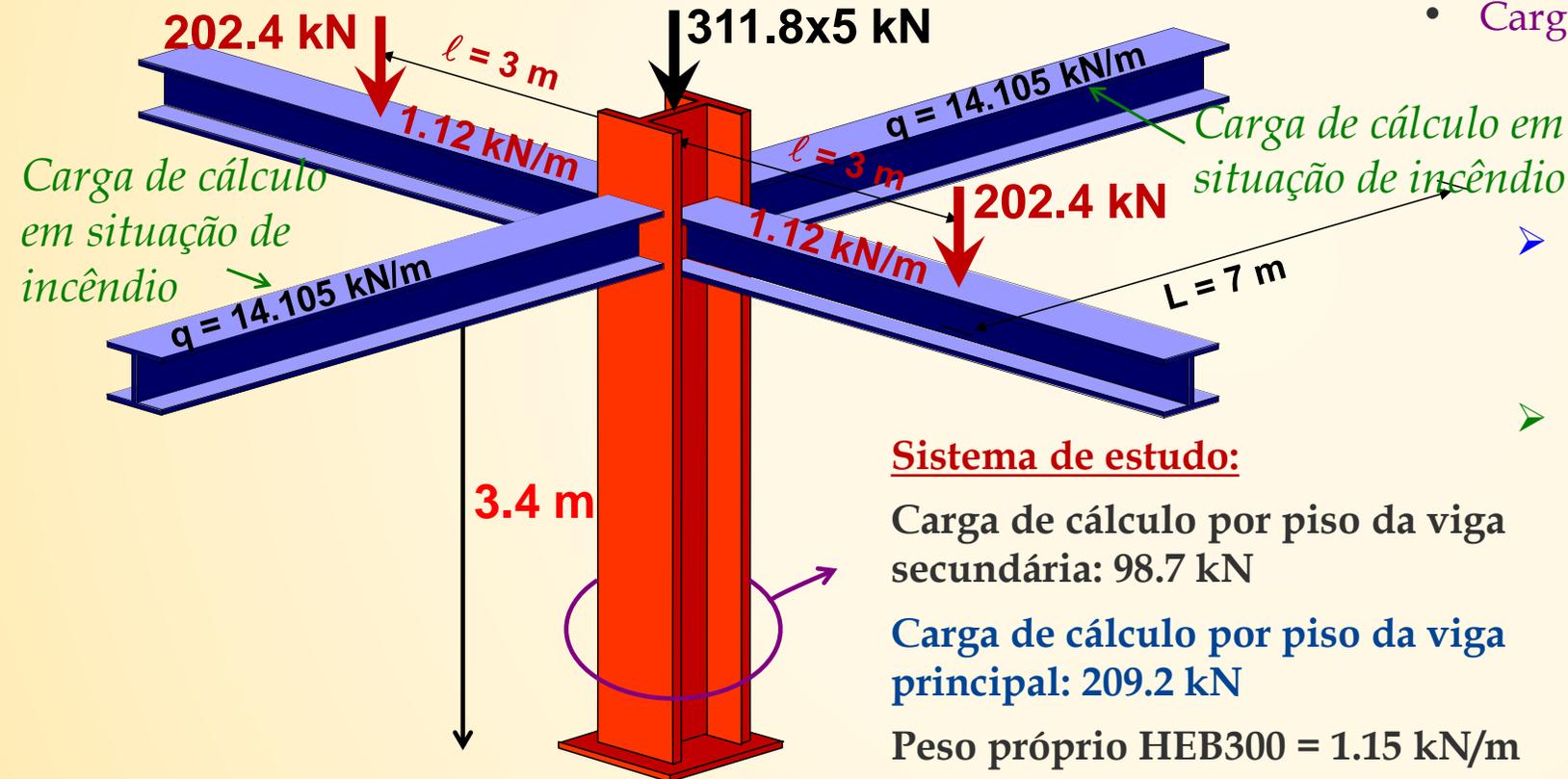
- Carga axial concentrada total proveniente das vigas de aço

$$P_{fi,d,t} = \sum (G_{k,1} + \psi_{2,1} Q_{k,1})$$

$$= 14.105 \times 7 + 202.4 + 1.12 \times 6$$

$$\approx 307.9 \text{ kN}$$

Viga secundária
Viga principal



Nota: dependendo do país deve adotar-se $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$.

7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna

Passo 1: Design mechanical action in fire

- Condições de carga de cálculo total em situação de incêndio

$$N_{fi,d,t} = (307.9 + 3.9) \times 6 = 1870.8 \text{ kN}$$

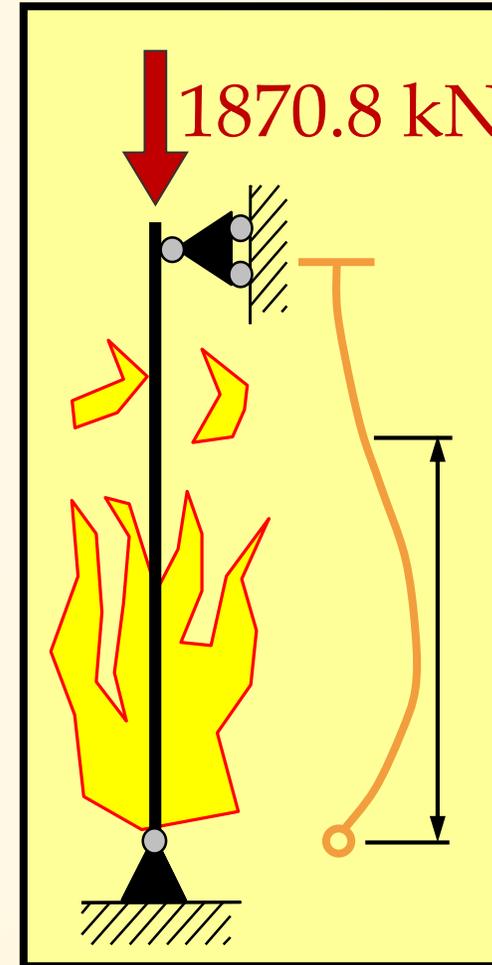
- Comprimento de encurvadura em situação de incêndio

- base da coluna fixa

$$L_{fi} = 0.7L = 0.7 \times 3.4 = 2.38 \text{ m}$$

- Carga crítica de Euler

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{3.14^2 \times 210000 \times 8.563 \times 10^7}{2380^2} = 31332213 \text{ N}$$



7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna

Passo 2: Classificar o elemento

- Elemento comprimido

Relação 4.2 do Eurocódigo 3 parte 1-2

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{235/f_y} = 0.786$$

\searrow S275

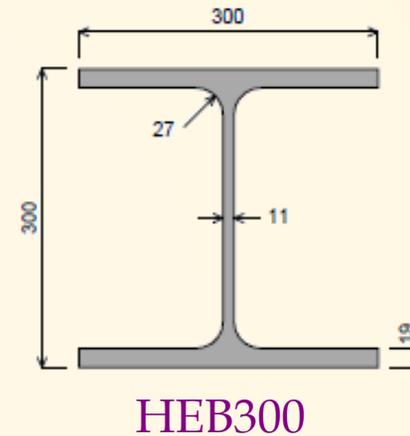
Tabela 5.2 do Eurocódigo 3 parte 1-1

$$c/t_w \leq 33\varepsilon \rightarrow \text{Classe da alma 1}$$

$$\begin{aligned} &\searrow = 18.9 \quad \swarrow = 25.9 \end{aligned}$$

$$c/t_f \leq 9\varepsilon \rightarrow \text{Classe do banzo 1}$$

$$\begin{aligned} &\searrow = 6.2 \quad \swarrow = 7.07 \end{aligned}$$



Secção de classe 1

7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna

Passo 3: Resistência de cálculo no instante 0 (temperatura ambiente)

Resistência de cálculo no instante 0 (temperatura ambiente) de acordo com o Eurocódigo 3 parte 1-2

- Esbelteza normalizada à temperatura normal

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{14910 \times 275}{31332213}} = 0.362$$

- Esbelteza a elevada temperatura

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.361 \sqrt{\frac{1.0}{0.825}} = 0.399$$

- Coeficiente de redução

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0.699 + \sqrt{0.699^2 - 0.398^2}} = 0.786$$

- Resistência axial plástica

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.786 \times \frac{14910}{1000} \times 1.0 \times \frac{275}{1.0} = 3223 \text{ kN}$$

HEB300	
A (cm ²)	149.08
I _z (mm ⁴)	8.56

7. Exemplos

7.5. Exemplo 5: Resistência à encurvadura de uma coluna

Passo 4: Grau de utilização para dados tabelados

$$\mu_0 = \frac{N_{fi,d,t}}{N_{pl,fi,0}} = 0.452$$

Passo 5: Temperatura crítica

Interpolação linear de dados tabelados $\bar{\lambda}_{fi,0} = 0.362$

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
μ_0											
...
0.40	629	603	578	544	499						
0.42	621	595	569	535	477						
0.44	613	588	561	525	455						
0.46	604	581	553	516	433						
0.48	597	573	545	506	411						
0.50	590	566	536	494	367						
0.52	584	559	528	477							

$\theta_{cr} \approx 560 \text{ } ^\circ\text{C}$