



# LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCAIised 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

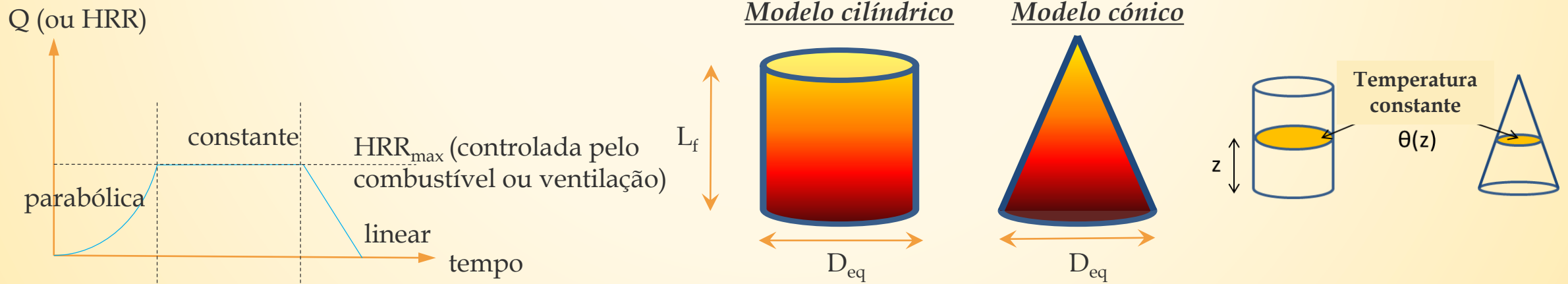
$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

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  $L_f$

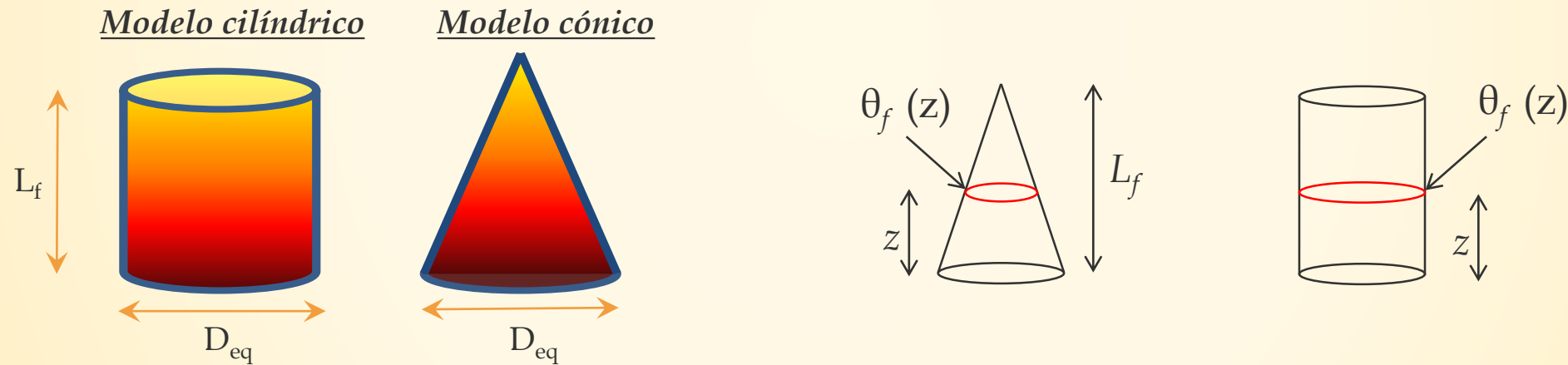


## 4. Método analítico e validação

### 4.1. Conceito de Chama Sólida Virtual

#### Modelação da chama

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



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

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

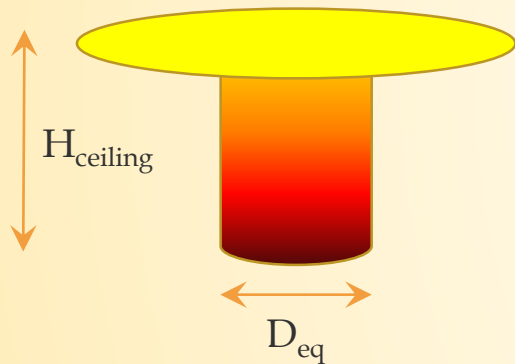
# 4. Método analítico e validação

## 4.1. Conceito de Chama Sólida Virtual

### Modelação da chama

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

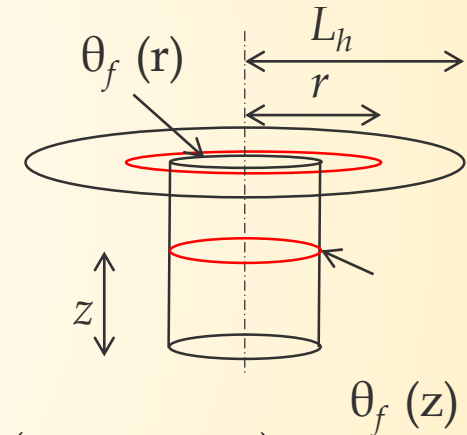
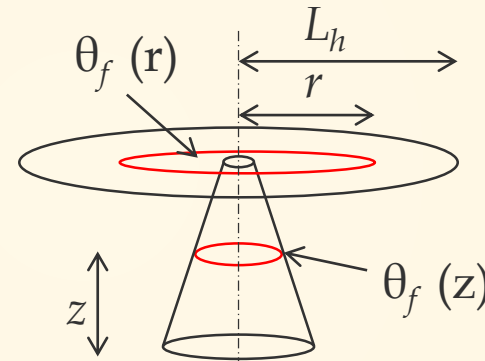
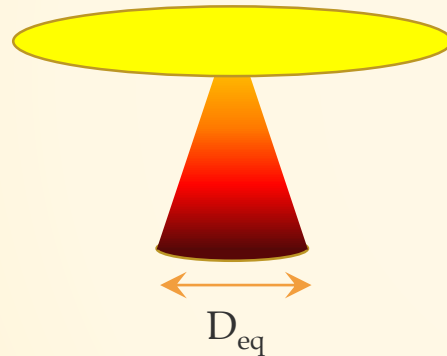
Modelo cilíndrico



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

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

Modelo cónico



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

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

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

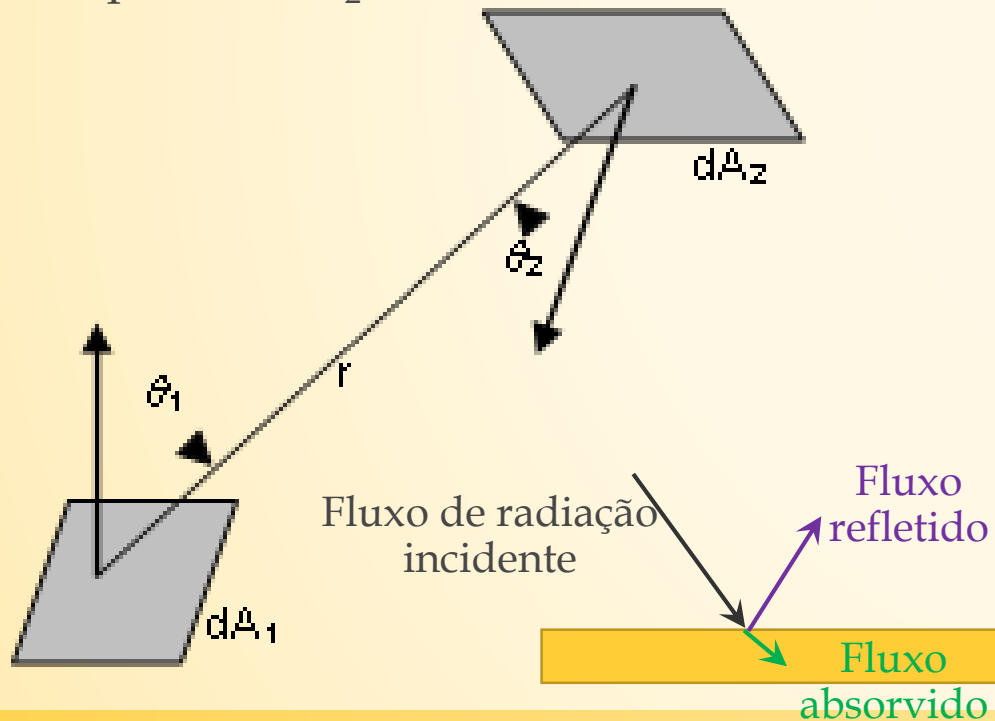
Nota: a contribuição dos anéis é bastante baixa, exceto se o elemento estiver situado no anel → considerado apenas para elementos ao nível do teto

## 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  $\varepsilon_1$  (da superfície emissora) é assumida igual a 1 para chamas
- a absorção  $\alpha_2$  depende das propriedades da superfície recetora
- Lei de Kirchoff: absorção ( $\alpha$ ) = emissividade ( $\varepsilon$ )
- para o aço,  $\varepsilon = \alpha = 0.7$

## 4. Método analítico e validação

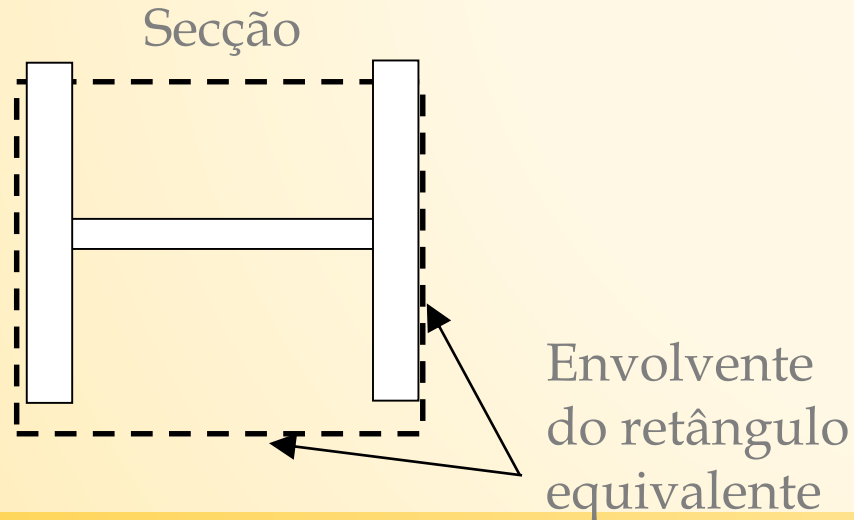
### 4.2. Geometrical method for exchanged heat fluxes

#### Modelação do elemento vertical

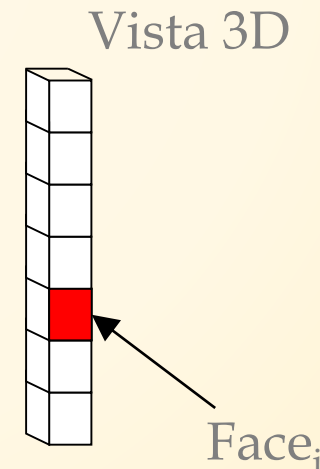
As secções côncavas implicam **efeito sombra** → Como simplificação, os fluxos de calor são calculados num perímetro convexo.

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



Modelo do  
elemento  
vertical



Vista 3D

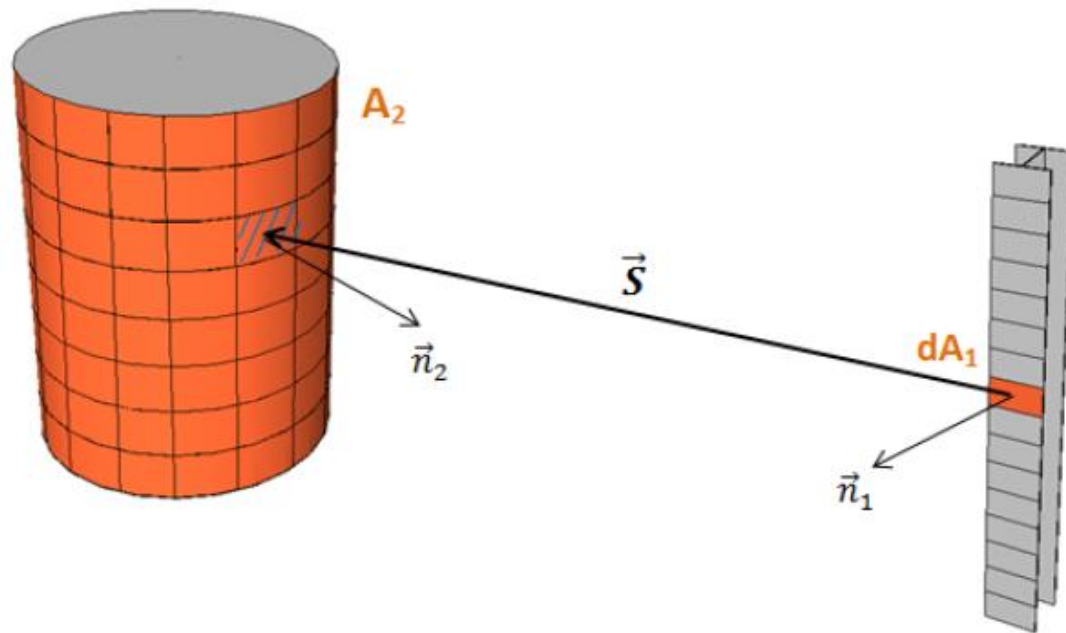
Face<sub>i</sub>



## 4. Método analítico e validação

### 4.2. Geometrical method for exchanged heat fluxes

#### Integração numérica



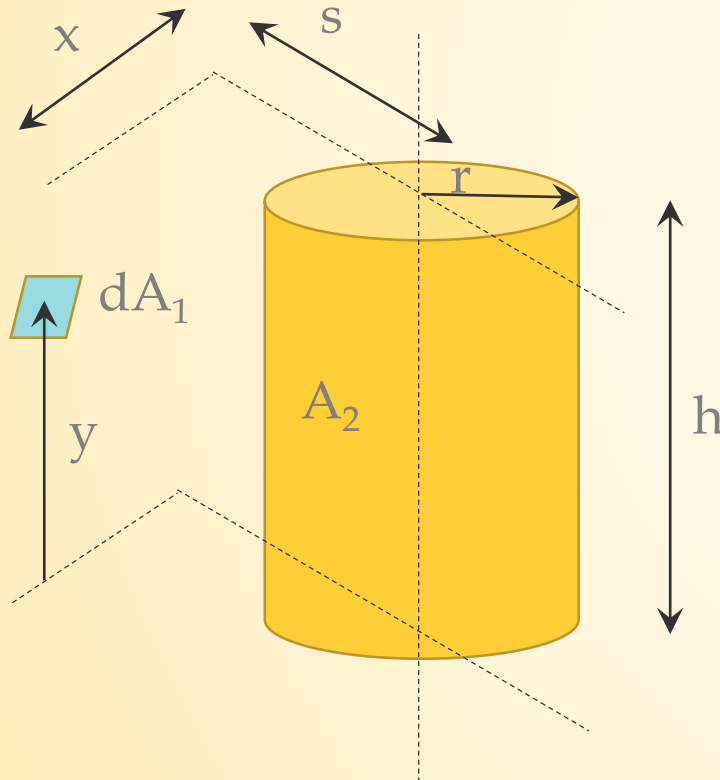
$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S} \cdot \vec{n}_1)(\vec{S} \cdot \vec{n}_2)}{S^4} \Delta A_i$$

- 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



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

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

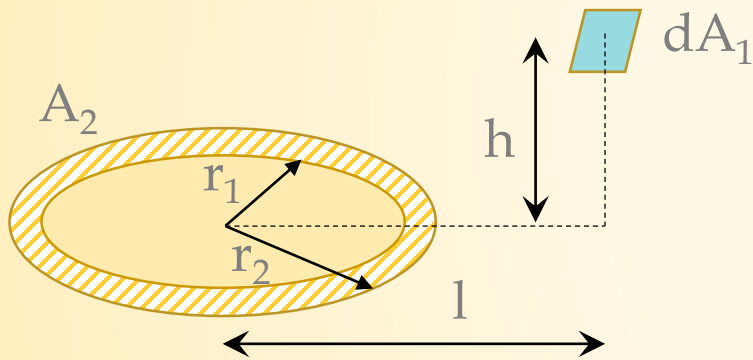
Válido apenas se o plano definido por  $dA_1$  não intersecta o cilindro!



## 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  $l > r_2$  !

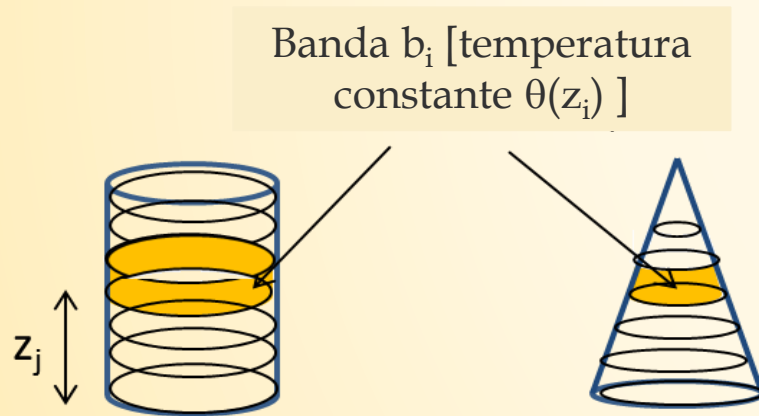
## 4. Método analítico e validação

### 4.3. Modelo simplificado

#### Subdivisão da chama em cilindros e anéis

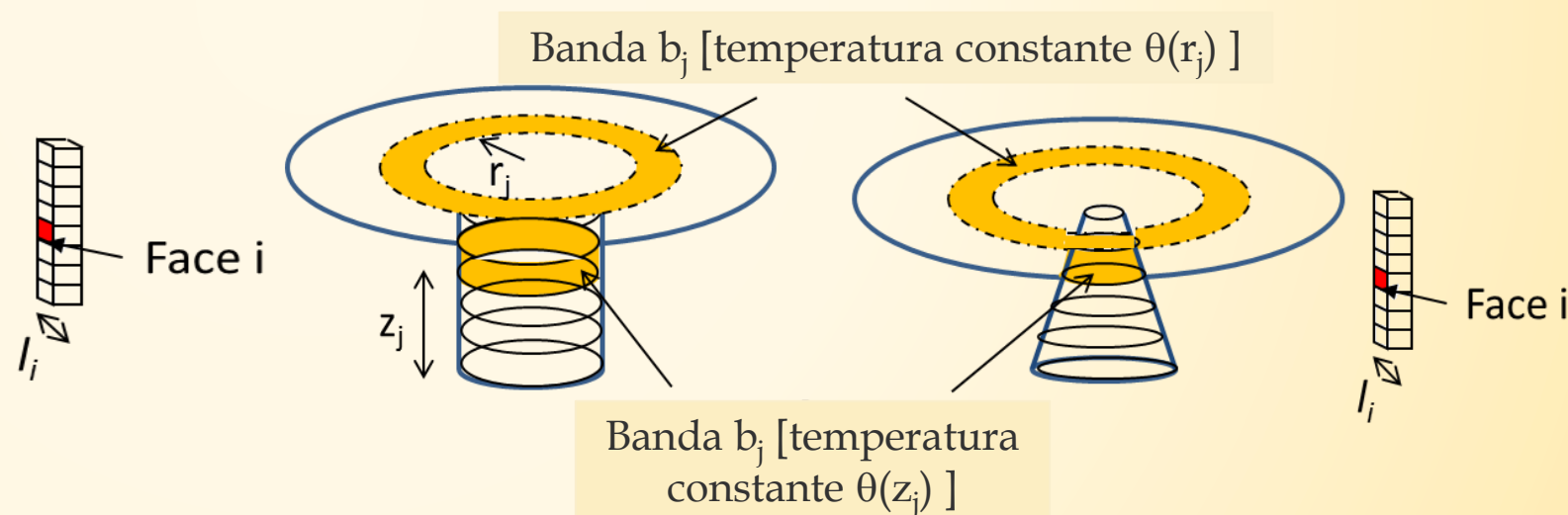
*Se a chama não atinge o teto*

$(L_f < H_{ceiling}$  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)

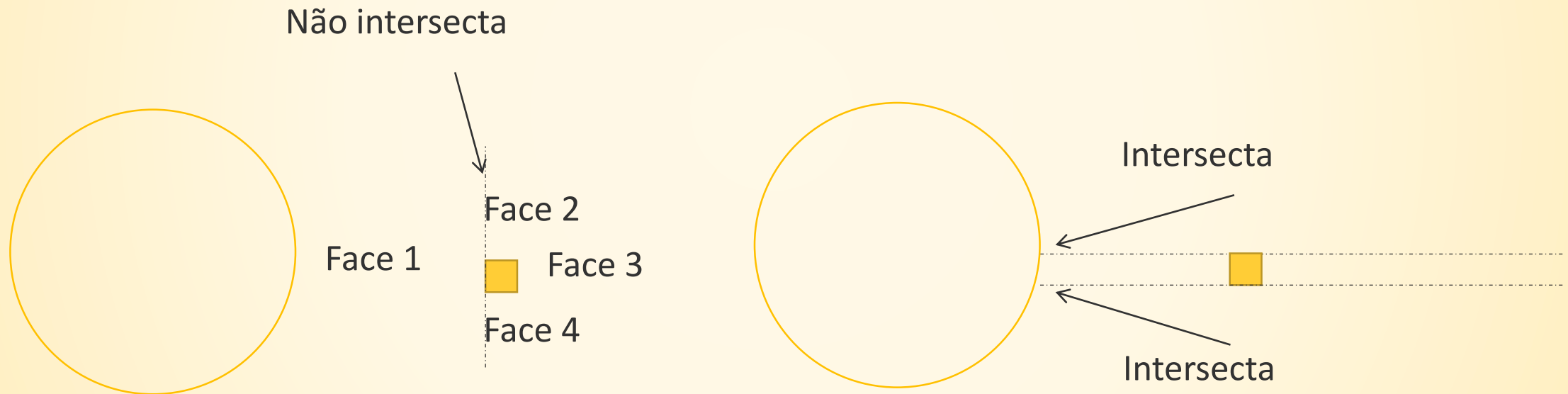


Ignorando a contribuição dos anéis, subestimamos o fluxo recebido e podemos obter um fluxo incidente igual a 0 acima do incêndio!

## 4. Método analítico e validação

### 4.3. Modelo simplificado

#### Subdivisão da chama em cilindros e anéis (Adaptação 2)

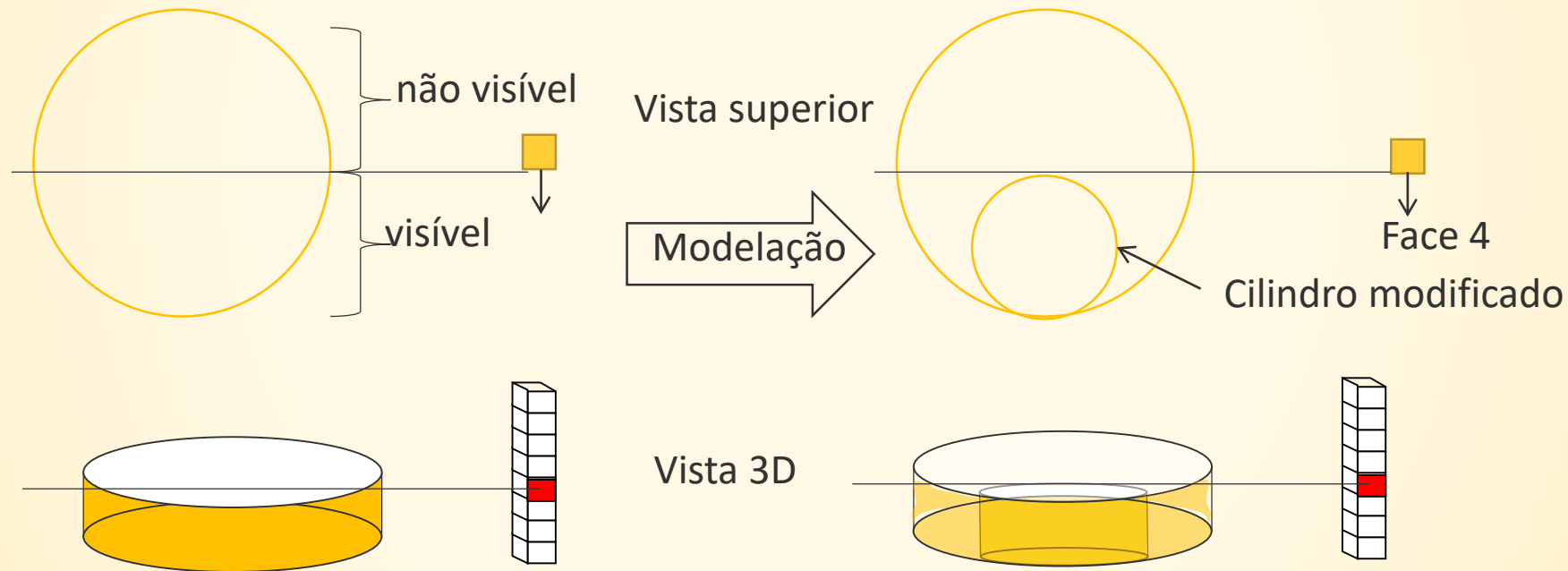


A fórmula para cilindro não é válida se a superfície recetora intersecta o cilindro!

## 4. Método analítico e validação

### 4.3. Modelo simplificado

#### Subdivisão da chama em cilindros e anéis (Adaptação 2)

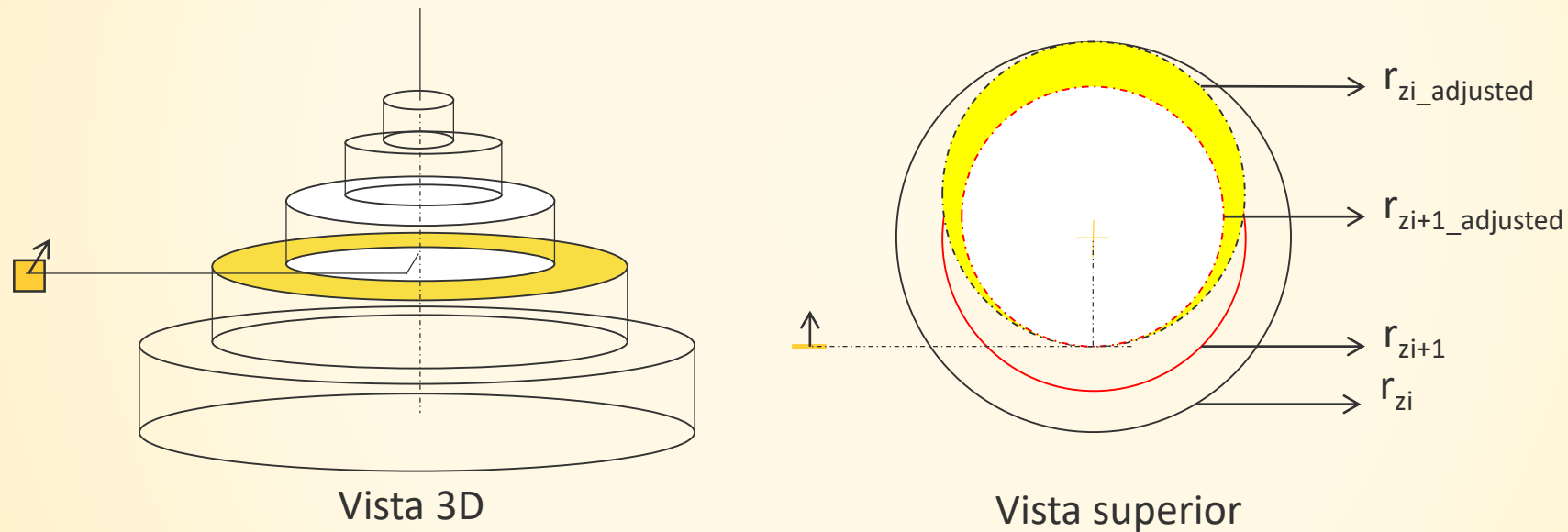


Neste caso, o cilindro inicial é transformado num cilindro modificado na zona visível

## 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/m<sup>2</sup>

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

- 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<sup>-3</sup>], calor específico [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] e massividade [m<sup>-1</sup>] do elemento

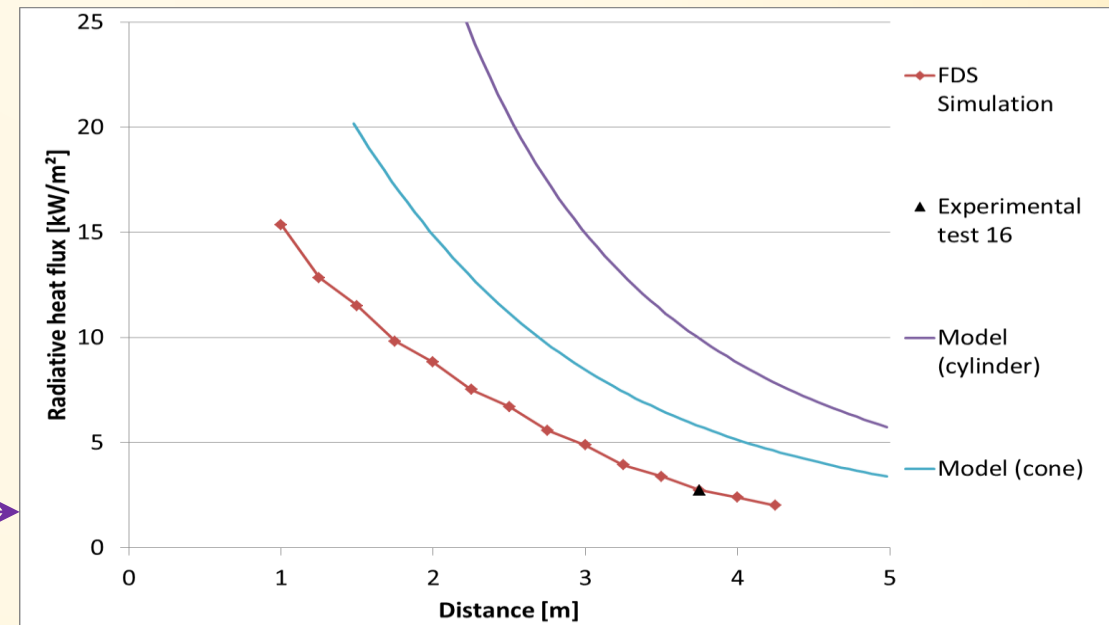
## 4. Método analítico e validação

### 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

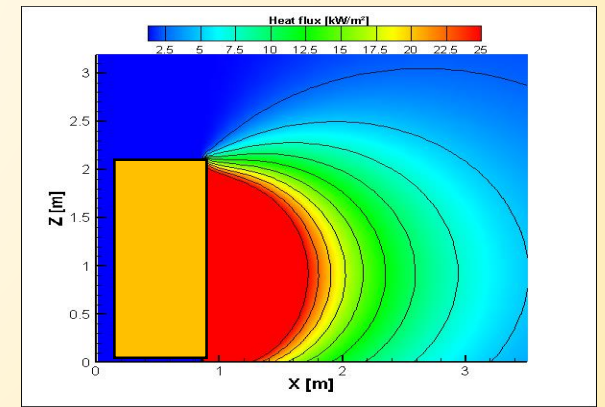
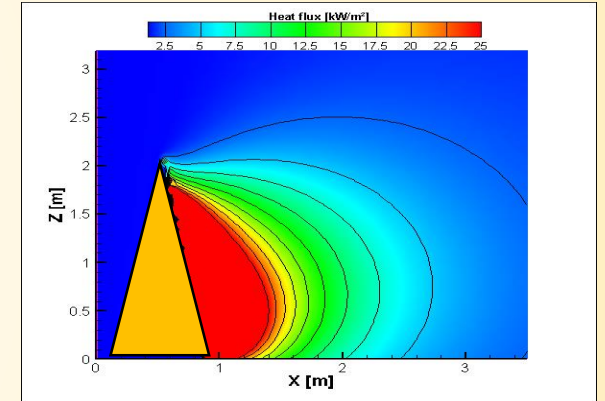
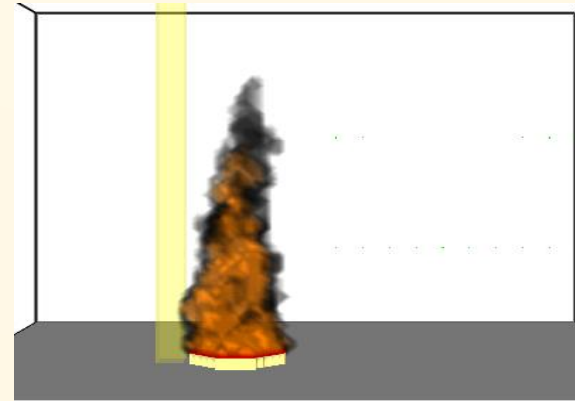
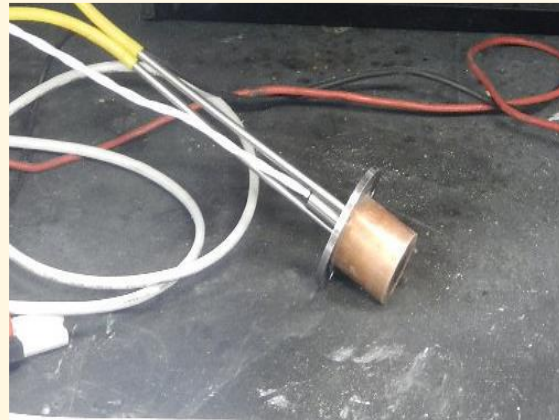
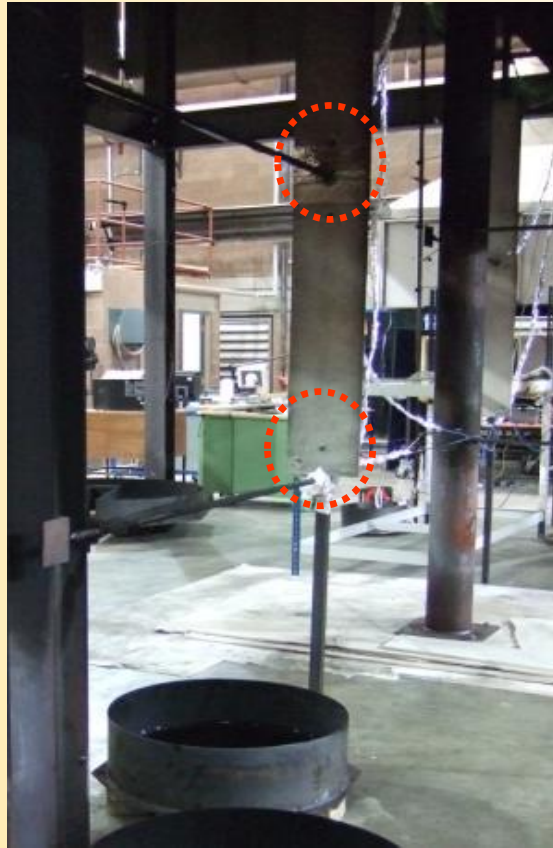
Diâm.	Valor médio experimental	Ensaio n°	Chama cilíndrica	Chama cónica
[m]	[kW/m²]	[-]	[kW/m²]	[kW/m²]
0.60	0.31	1 a 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 a 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 a 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 a 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 a 22	14.55	8.30



## 4. Método analítico e validação

### 4.3. Modelo simplificado

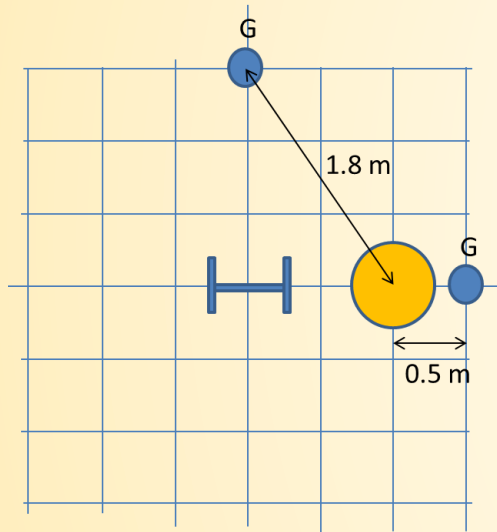
Validação do modelo baseado nos ensaios de Ulster (e modelação FDS)



## 4. Método analítico e validação

### 4.3. Modelo simplificado

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

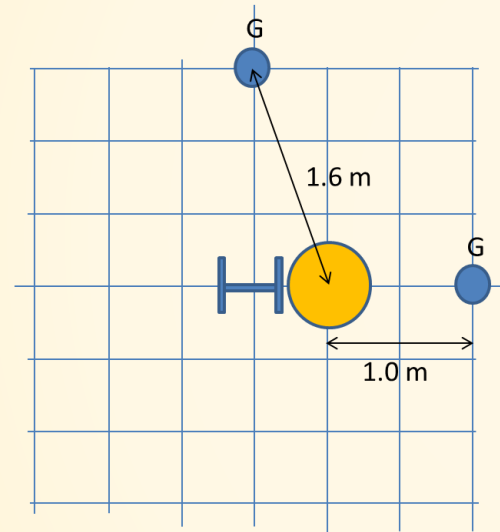


Caso 1a

1 incêndio

$D = 0.7 \text{ m}$

Medidores a 0.5/1.8 m



Caso 1b

1 incêndio

$D = 0.7 \text{ m}$

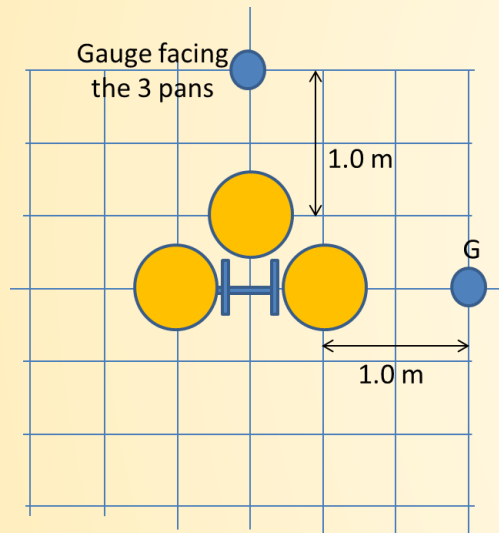
Medidores a 1.0/1.6 m

Localização do medidor		Média experimental	Simulação FDS	Chama cilíndrica	Chama cônica
Altura	Distância				
m	m	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
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

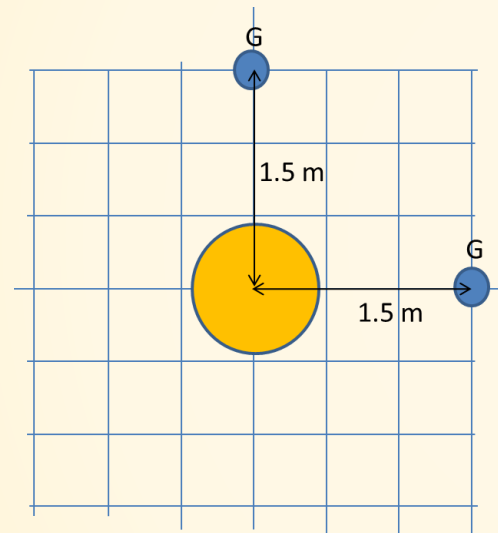
## 4. Método analítico e validação

### 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

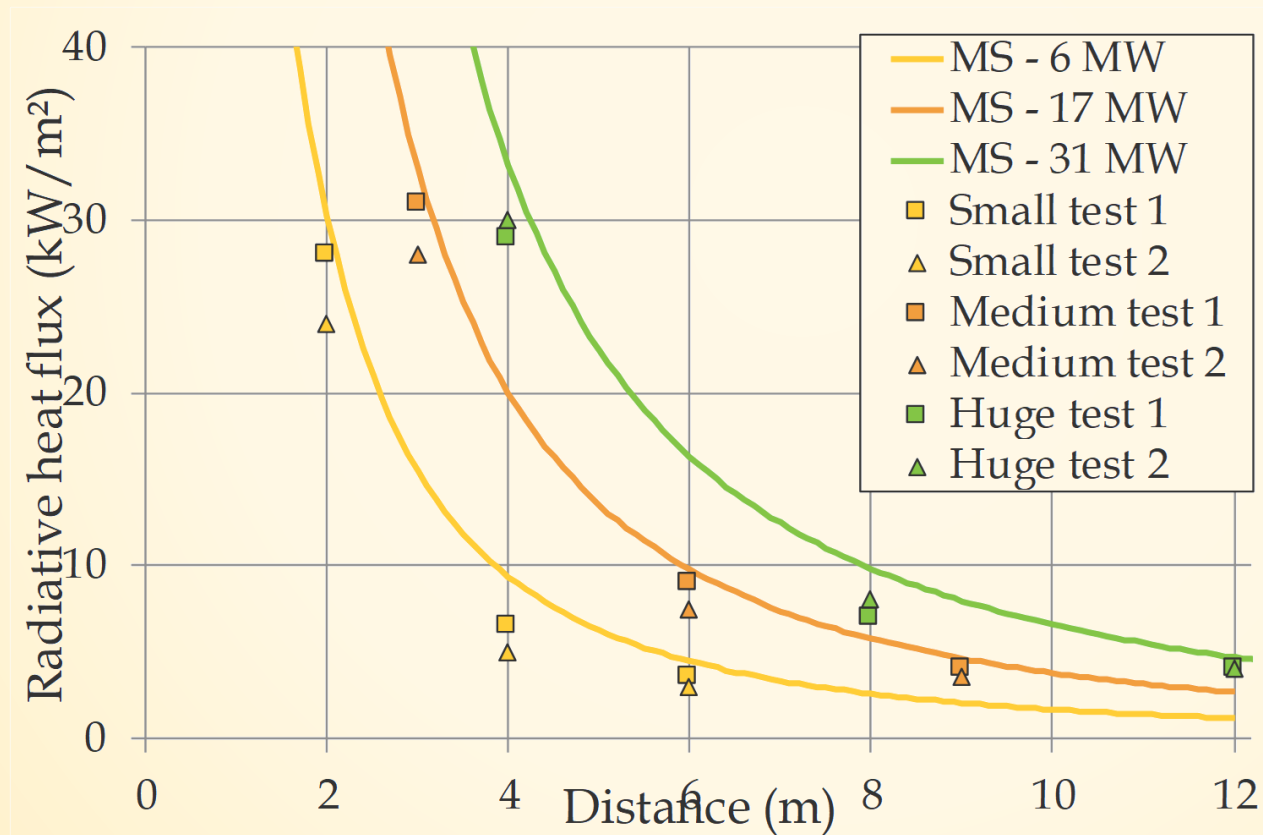
Localização do medidor		Média experimental	Média da simulação	Chama cilíndrica	Chama cónica
Altura	Distância				
m	m	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
1.0	<u>1.0</u>	31.0	26.6	66.3	37.4
1.0	<u>1.0</u>	24.3	21.6	62.0	34.6
2.0	<u>1.0</u>	15.0	17.7	40.9	16.2
2.0	<u>1.0</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 <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>
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)

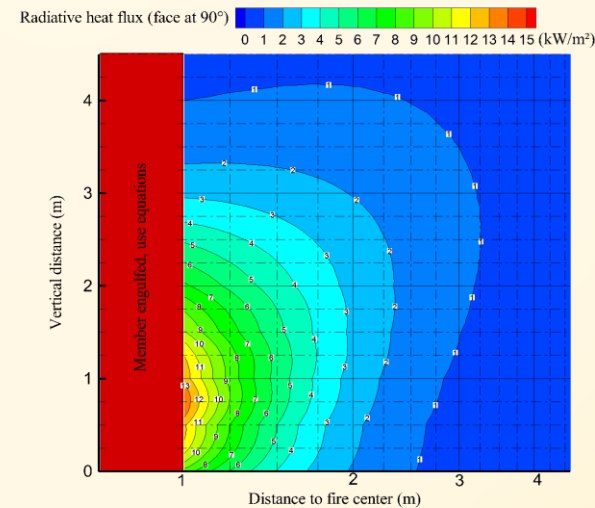
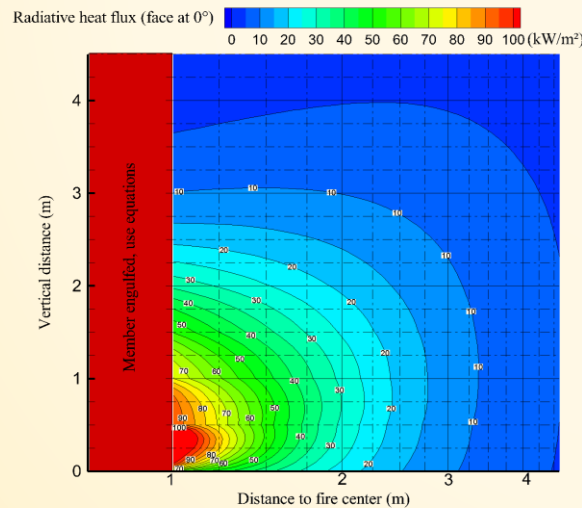




# 4. Método analítico e validação

## 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)

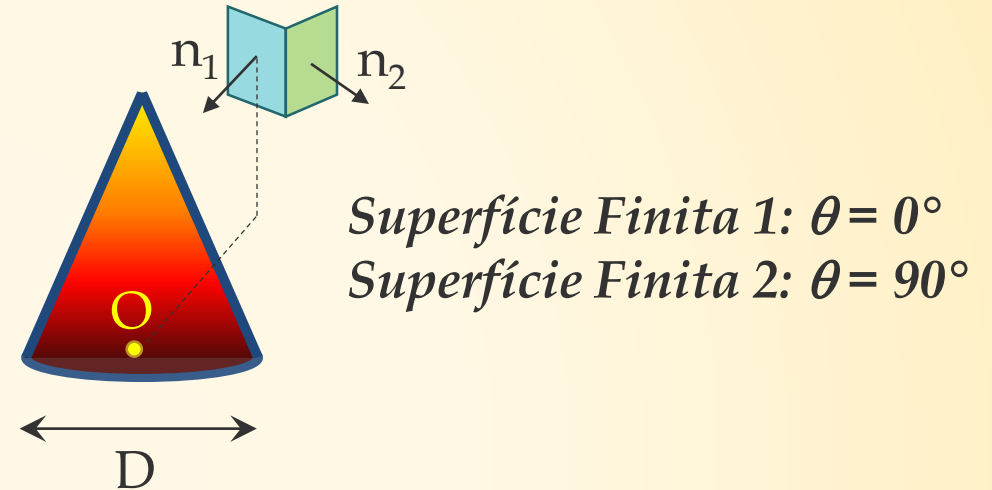


$D = 2\text{m}$ ,  $\text{RHR} = 500 \text{ kW/m}^2$ ,  $\theta = 0^\circ$  (esquerda) ou  $\theta = 90^\circ$  (direita)

# 4. Método analítico e validação

## 4.4. Nomogramas

- Cada nomograma é caracterizado por:
  - o diâmetro do fogo (m)
  - a RHR ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )
  - 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!)



## 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 <sup>2</sup> )	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

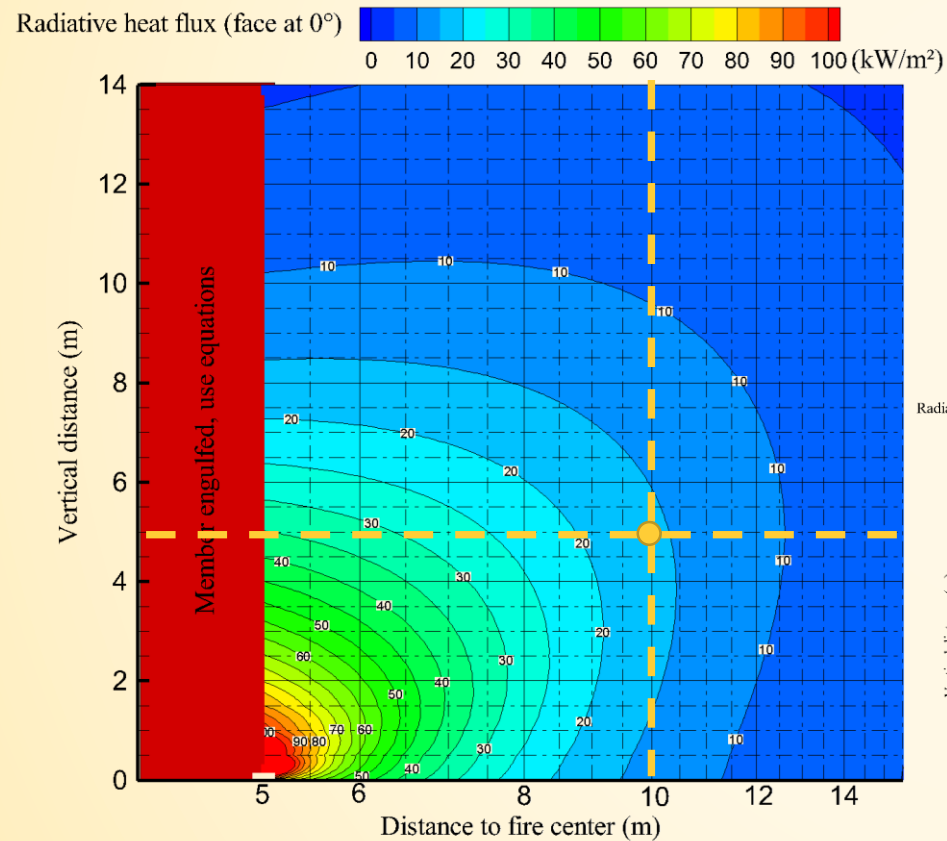
Caso	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D (m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
HRR (kW/m <sup>2</sup> )	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Potência (MW)	7.1	14.1	28.3	42.4	12.6	25.1	50.3	47.7	15.9	31.8	19.6	39.3

*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



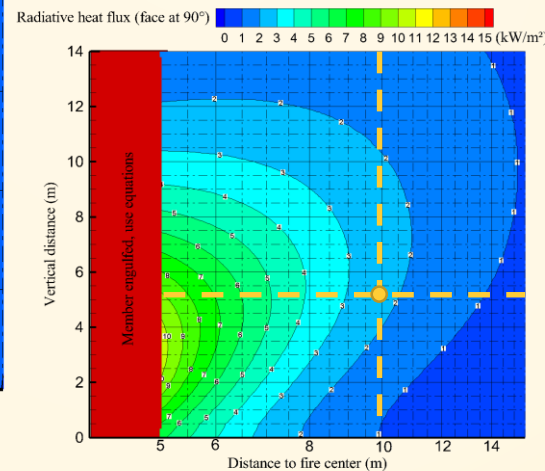
### ➤ Características do incêndio localizado:

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

### ➤ Posição do alvo

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

Fluxo incidente  
=  $16 \text{ kW/m}^2$



### ➤ Posição do alvo

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

Fluxo incidente  
=  $2.4 \text{ kW/m}^2$

## 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).