



LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical member subjected to LOCALised Fire Dissemination

Grant Agreement n° 754072

4. Metodo analitico e validazione

4. Metodo analitico e validazione

4.1. Concetto di Fiamma Virtuale Solida

Modellazione della fiamma

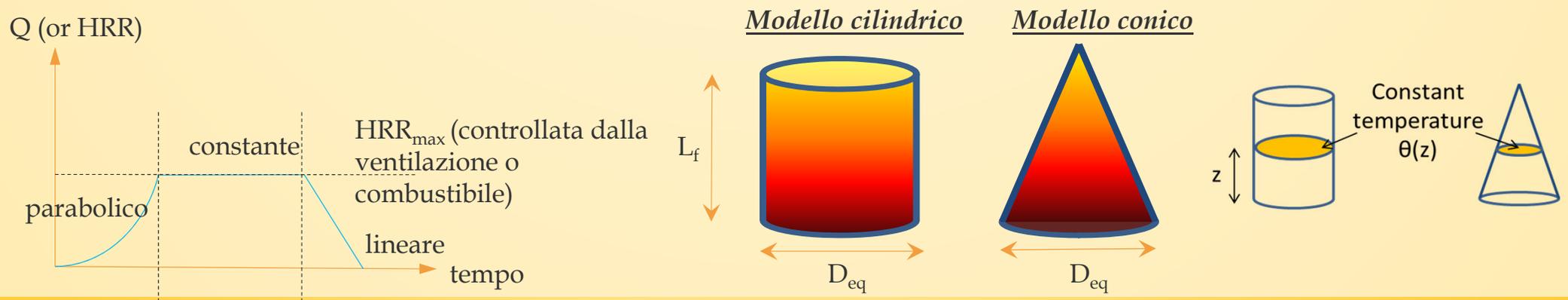
Step 1: L'area di incendio si trasforma in un cerchio equivalente

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

Step 2: L'evoluzione della RHR si calcola secondo l'Appendice E dell'EN 1991-1-2 Annex E e Appendice Nazionale

Step 3: La lunghezza della fiamma L_f si calcola secondo l'Appendice C dell'EN 1991-1-2 $L_f(t) = -1.02 D_{fire} + 0.0148 Q(t)^{0.4}$

Step 4: L'azione termica dell'incendio è rappresentata da una Fiamma Virtuale Solida, conica o cilindrica, definita da D_{eq} e L_f

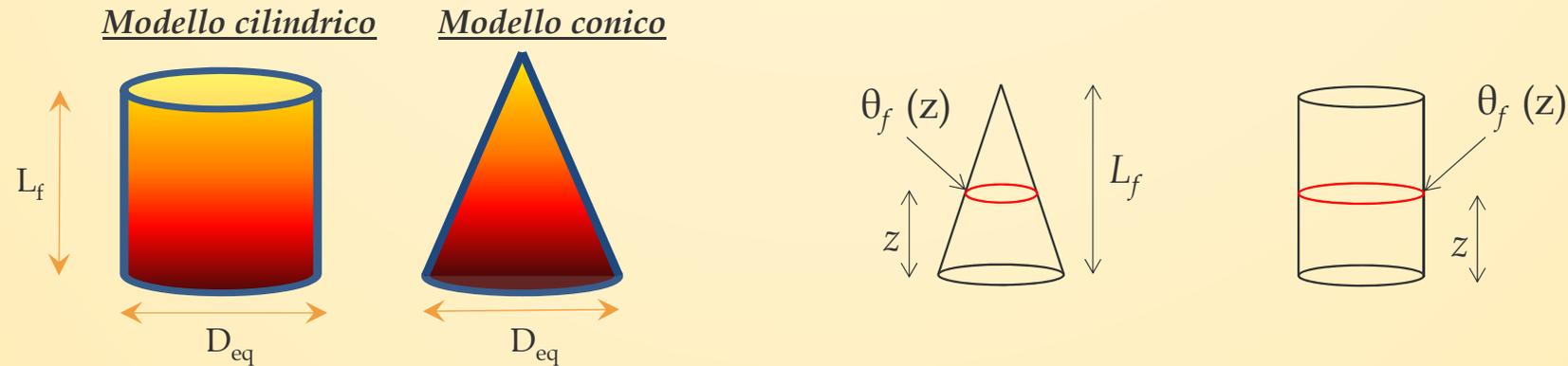


4. Metodo analitico e validazione

4.1. Concetto di Fiamma Virtuale Solida

Modellazione della fiamma

Se la fiamma non impatta il soffitto ($L_f < H_{ceiling}$ o nessun soffitto)



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

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

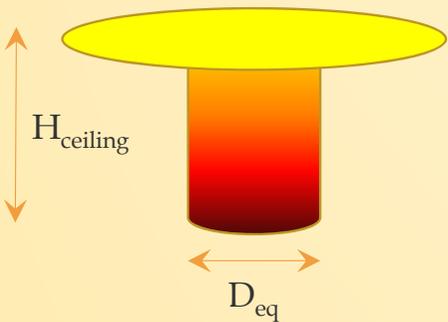
4. Metodo analitico e validazione

4.1. Concetto di Fiamma Virtuale Solida

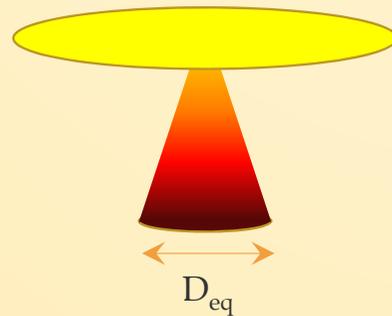
Modellazione della fiamma

Se la fiamma impatta il soffitto ($L_f > H_{ceiling}$)

Modello cilindrico

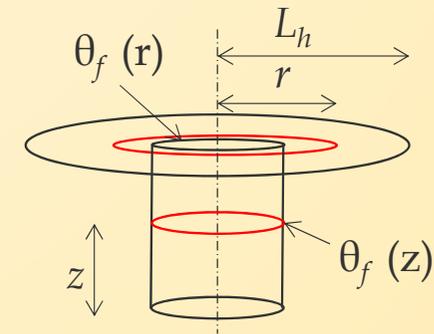
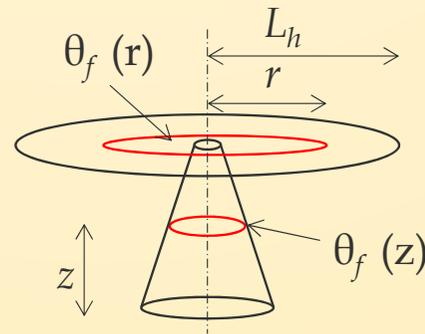


Modello conico



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

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



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

$\dot{h}(r)$ calcolata con Hasemi

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

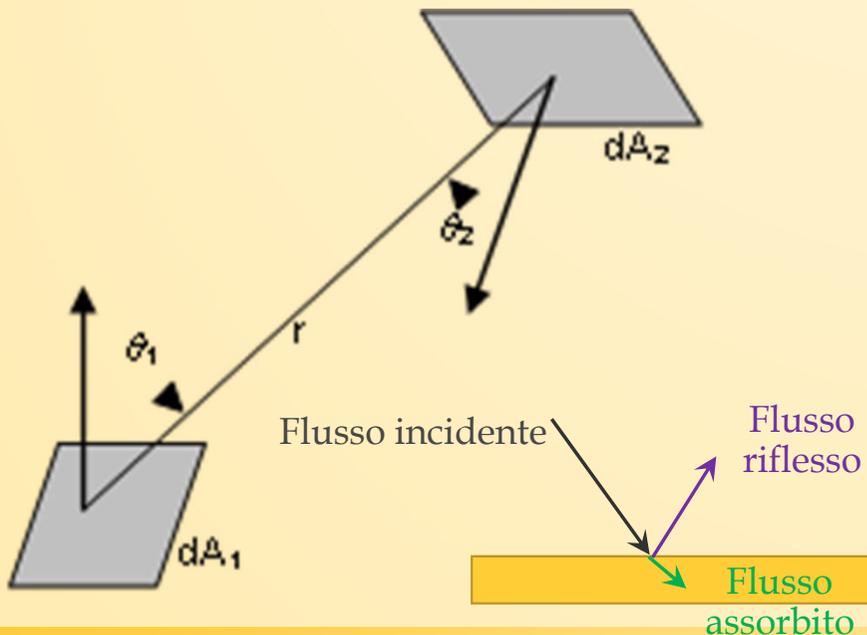
Nota: il contributo dell'anello è piccolo, eccetto quando l'elemento è situato nell'anello → considerato solo per elementi a livello del soffitto

4. Metodo analitico e validazione

4.2. Metodo basato sulla geometria

Calcolo del flusso termico di irraggiamento

Il flusso termico di irraggiamento emesso da una superficie dA_1 e ricevuto da una superficie dA_2 è :



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

- L'emissività ε_1 (della superficie che emette) è considerata per le fiamme uguale a 1
- L'assorbimento α_2 dipende dalle proprietà della superficie ricevente
- Kirchhoff Law : assorbimento (α) = emissività (ε)
- Per l'acciaio, $\varepsilon = \alpha = 0.7$

4. Metodo analitico e validazione

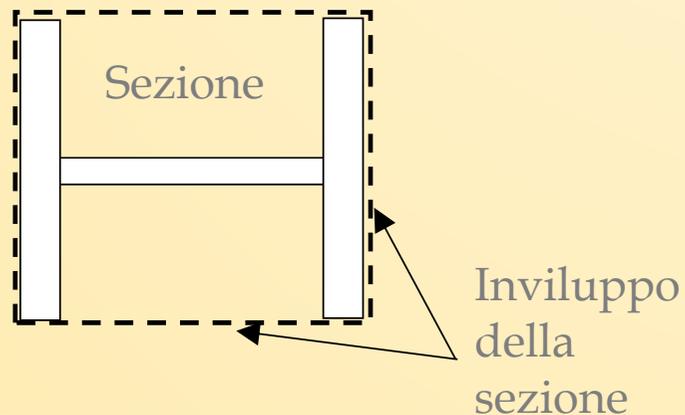
4.2. Metodo basato sulla geometria

Modellazione della membratura verticale

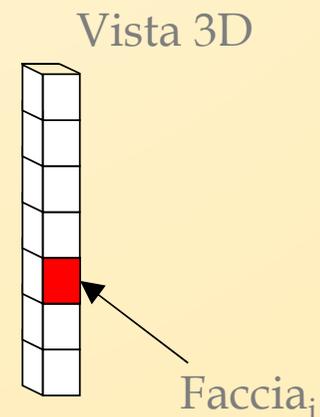
Sezioni concave comportano **effetti ombra** → Come semplificazione, i flussi termici sono calcolati su un perimetro convesso

Per sezioni a I o H, l'elemento strutturale è trasformato in una sezione tubolare rettangolare in linea con l'Appendice G EN 1991-1-2

L'elemento è poi suddiviso in più parti



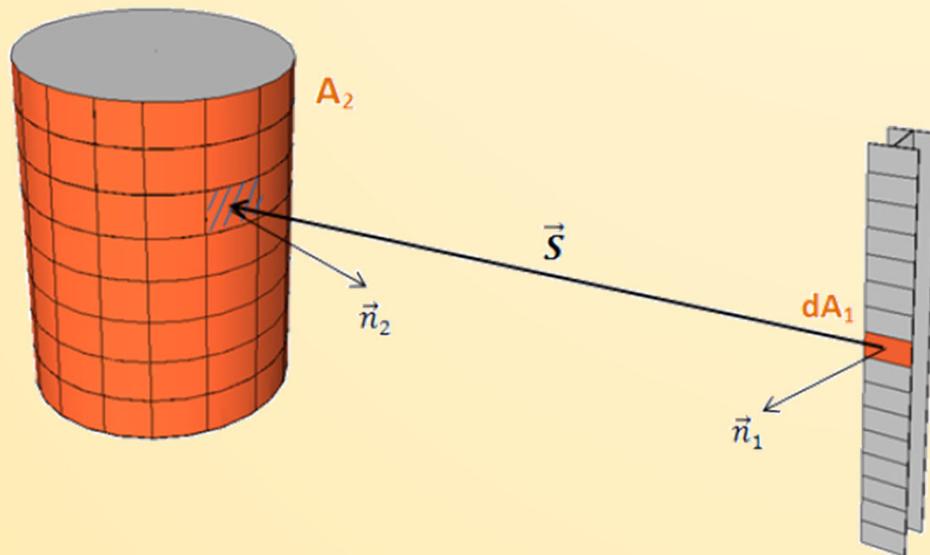
Discretizzazione di un elemento verticale



4. Metodo analitico e validazione

4.2. Metodo basato sulla geometria

Integrazione numerica



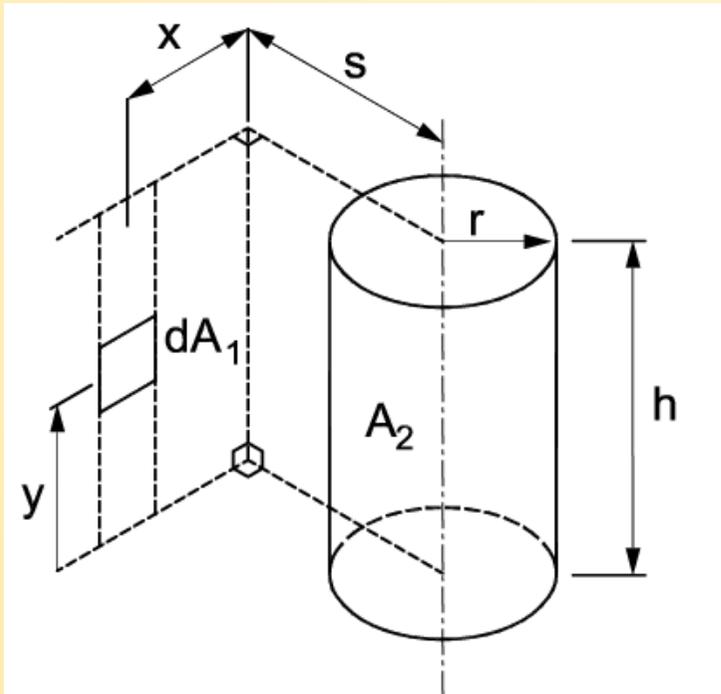
$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S} \cdot \vec{n}_1)(\vec{S} \cdot \vec{n}_2)}{S^4} \Delta A_i$$

- Ogni scambio di irraggiamento "individuale" tra le superfici in cui è diviso il modello è calcolato a ogni time step.
- Richiede un programma di calcolo.
- Permette di tenere in considerazione condizioni non uniformi di irraggiamento lungo il perimetro della sezione.

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Fattore di vista tra una superficie infinitesima e un cilindro



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

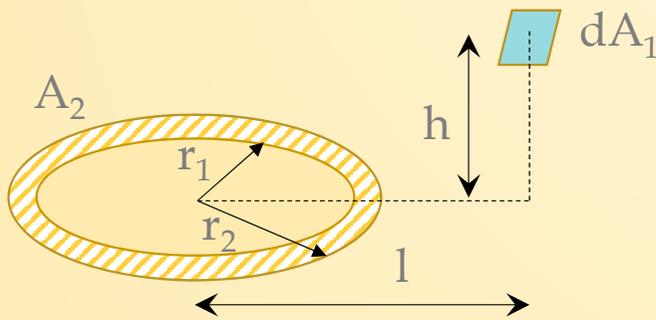
$$\begin{aligned} S &= s/r \\ X &= x/r \\ H &= h/r \\ A &= X^2 + Y^2 + S^2 \\ B &= S^2 + X^2 \\ C &= (H - Y)^2 \end{aligned}$$

Valido solo se il piano che contiene dA_1 non interseca il cilindro !

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Fattore di vista tra una superficie infinitesima e una corona circolare



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

$$H = h/l$$

$$R = r/l$$

Valido solo se $l > r_2$!

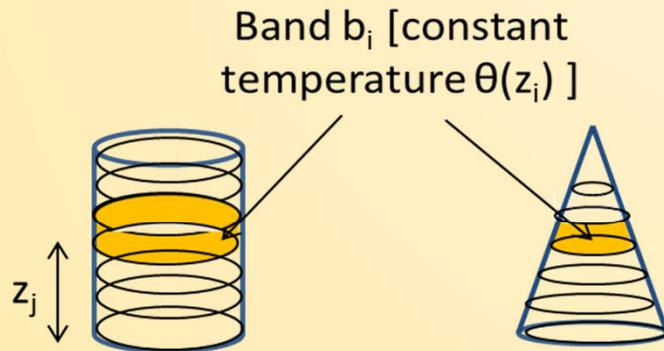
4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Divisione della fiamma in cilindri e corone circolari

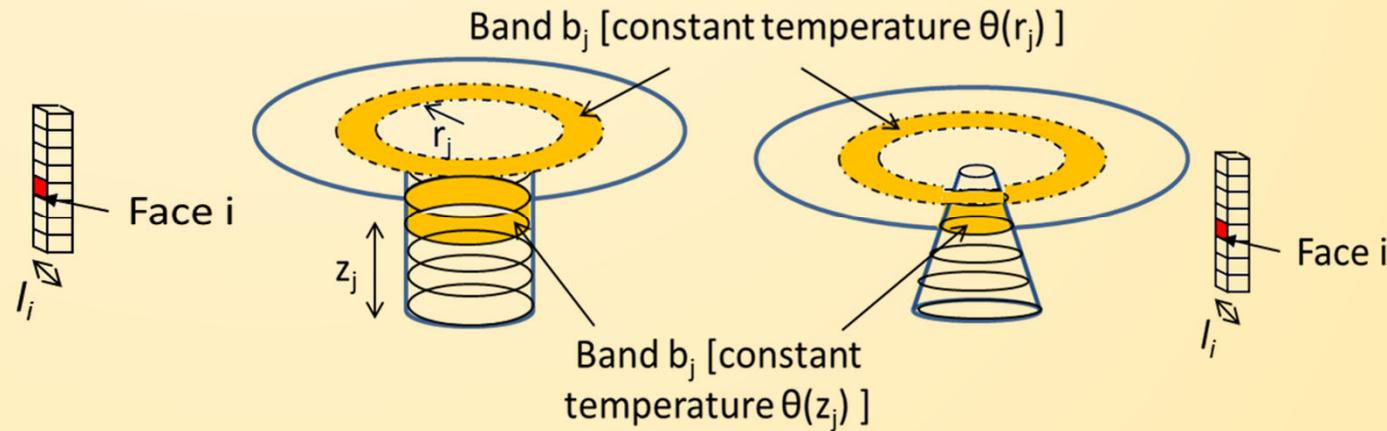
Se la fiamma non impatta il soffitto

($L_f < H_{ceiling}$ o assenza il soffitto)



Se la fiamma impatta il soffitto

($L_f > H_{ceiling}$)

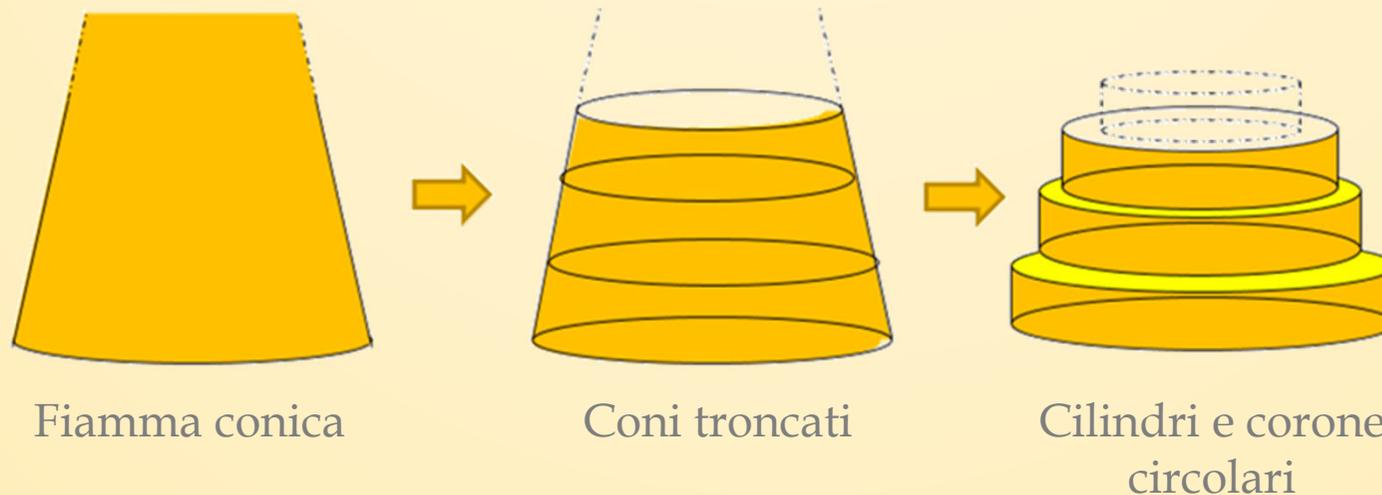


Nota : il contributo dell'anello è piccolo, eccetto quando l'elemento è situato nell'anello → considerato solo per elementi a livello del soffitto

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Divisione della fiamma in cilindri e corone circolari

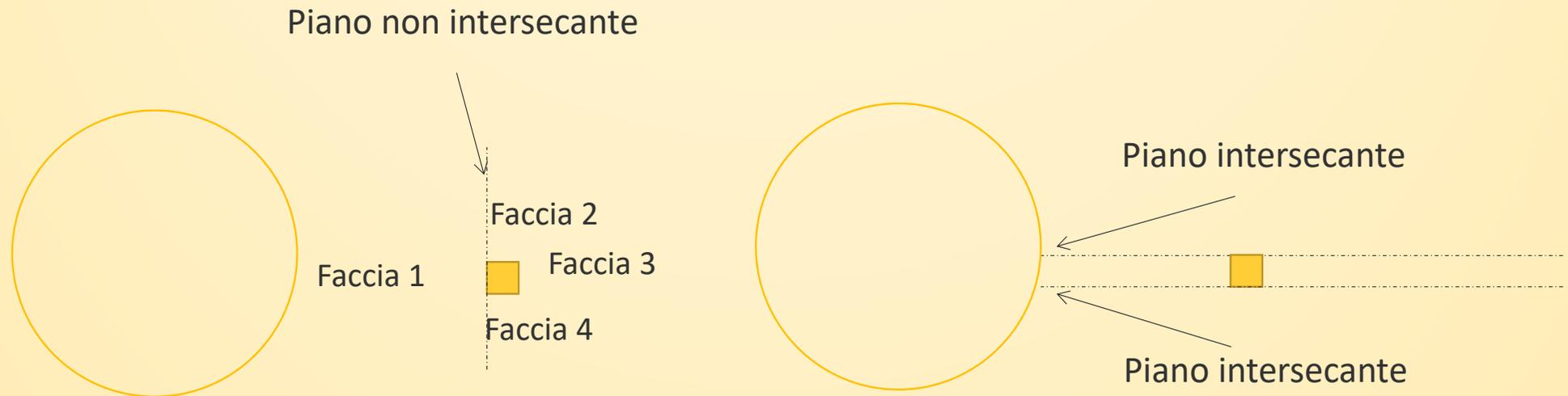


! Trascurando il contributo delle corone circolari, si sottostima il flusso incidente che può essere pure uguale a zero sopra la fiamma !

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Divisione della fiamma in cilindri e corone circolari

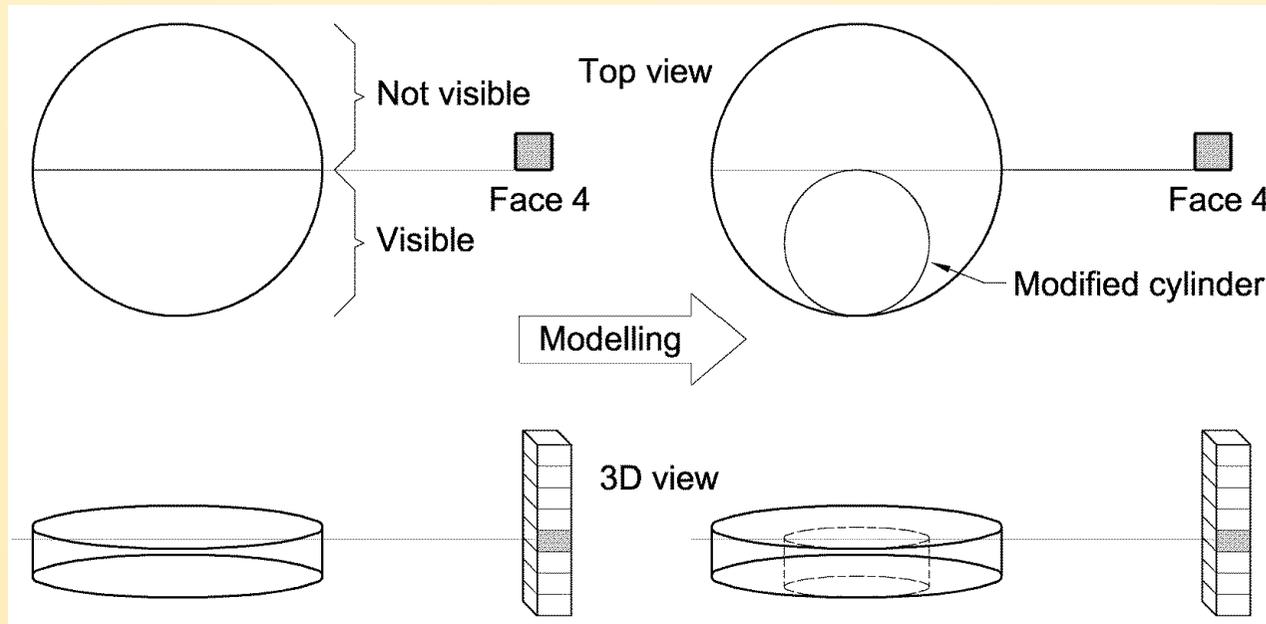


! La formula per i cilindri non è valida se il piano che contiene la superficie ricevente lo interseca !

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Divisione della fiamma in cilindri e corone circolari

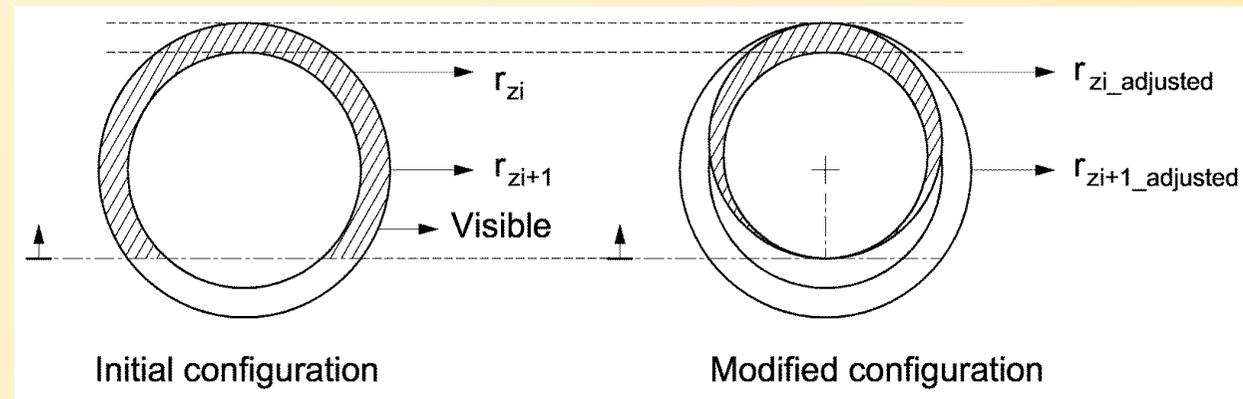
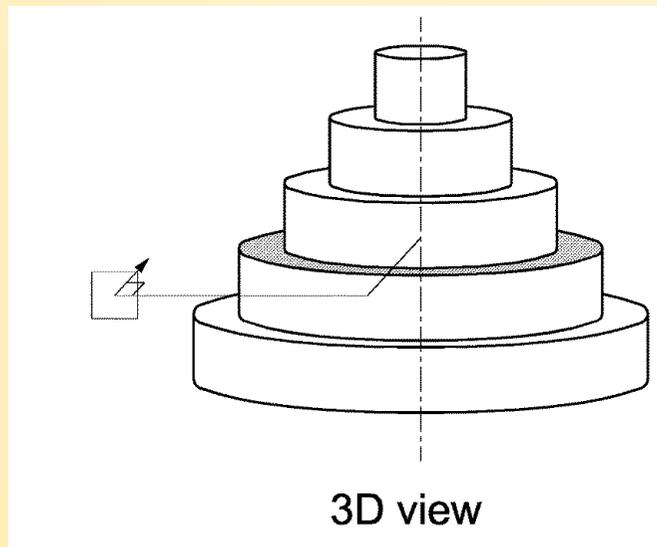


In questo caso, il cilindro iniziale è trasformato in uno modificato nella zona visibile

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Divisione della fiamma in cilindri e corone circolari



Una porzione della corona circolare è « nascosta » dal cilindro situato sopra → Un zona ridotta dovrebbe essere considerata (conservativo ignorare questa riduzione...)

4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Commenti aggiuntivi

- Lo spessore di un singolo cilindro limitata a 50 cm
- Per elementi situati in corrispondenza del soffitto, la convezione va considerata → Hasemi
- Per incendi multipli, i flussi di ogni incendio devono essere considerati. Il flusso totale incidente è limitato a 100 kW/m² $\dot{h}_{tot} = \min(\dot{h}_{rad_section} + \dot{h}_{conv}; 100000)$ [W.m⁻²]
- La temperatura della sezione in acciaio può essere calcolata imponendo il bilancio termico

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

ρ_a , c_a , and A_m/V sono la densità [kg.m⁻³], calore specifico [J.kg⁻¹.K⁻¹] e massività [m⁻¹] della sezione in acciaio

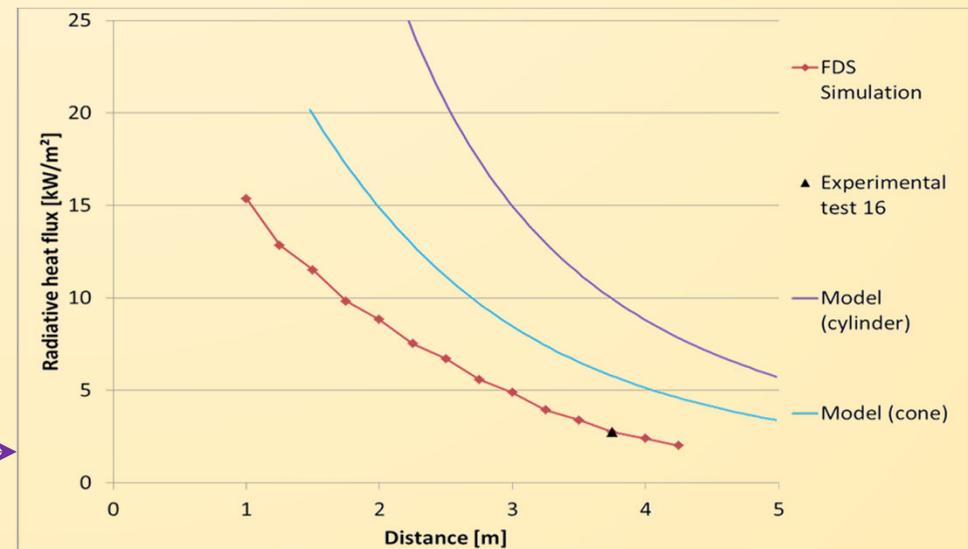
4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Validazione del modello sulla base dei test a ULG (e modellazione FDS)

- Sensore di misura del flusso termico situato a 3.75 m dalla fonte di calore (altezza : 1.86 m)
- Orientazione del sensore: perpendicolare all'asse incendio- sensore

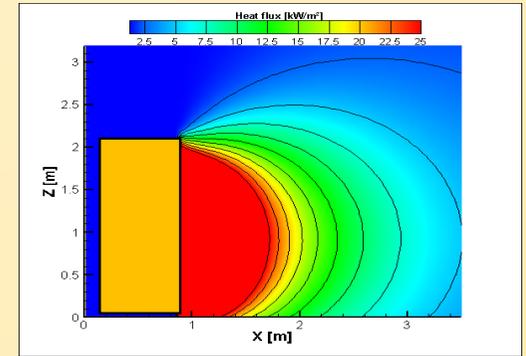
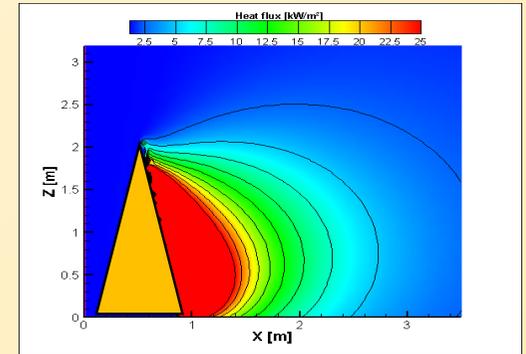
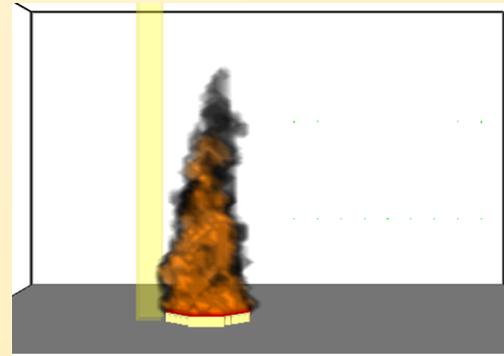
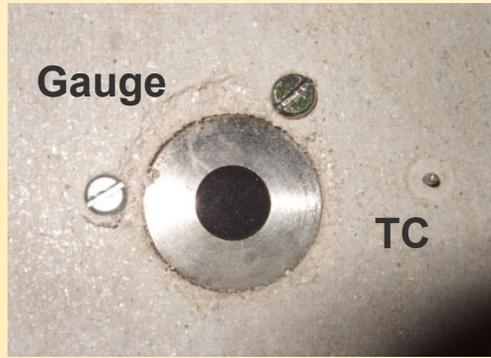
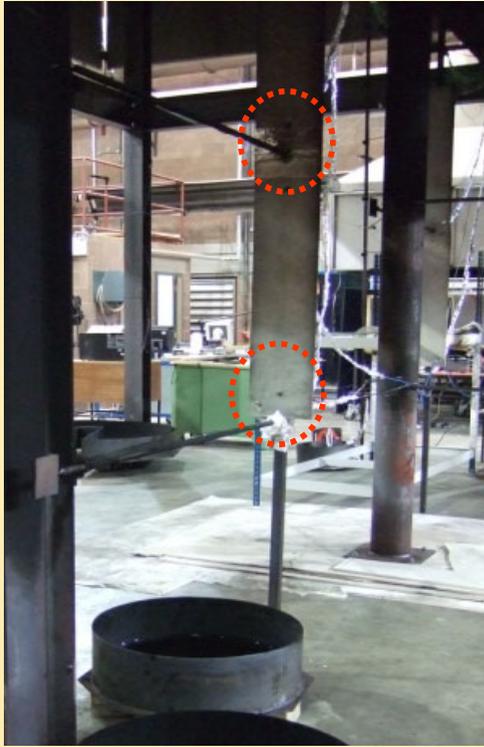
Diam.	Valore sperimentale medio	Test n°	Fiamma cilindrica	Fiamma conica
[m]	[kW/m ²]	[-]	[kW/m ²]	[kW/m ²]
0.60	0.31	1 to 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 to 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 to 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 to 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 to 22	14.55	8.30



4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

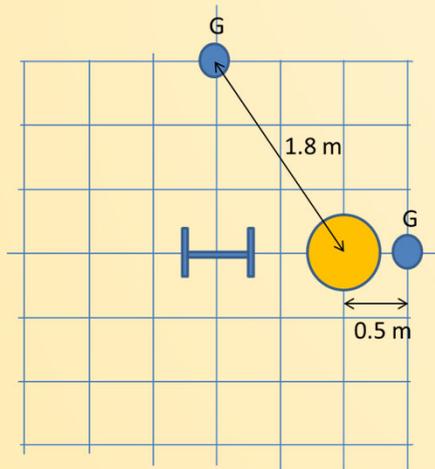
Validazione del modello sulla base dei test a ULSTER (e modellazione FDS)



4. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Validazione del modello sulla base dei test a ULSTER (e modellazione FDS)

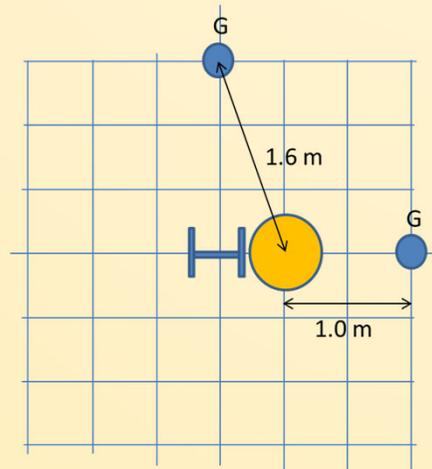


Caso 1a

1 incendio

$D = 0.7 \text{ m}$

Sensori a 0.5/1.8 m



Caso 1b

1 incendio

$D = 0.7 \text{ m}$

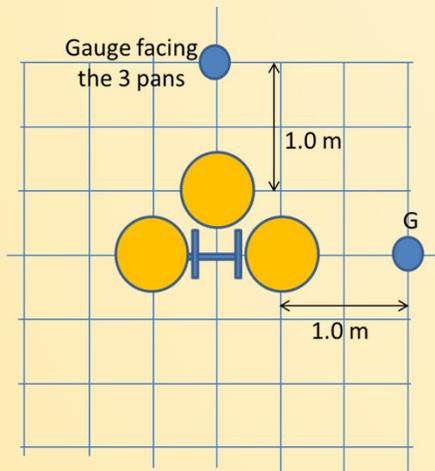
Sensori a 1.0/1.6 m

Posizione sensore		Valore medio sperimentale	Simulazione FDS	Fiamma cilindrica	Fiamma conica
Altezza	Distanza				
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. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

Validazione del modello sulla base dei test a ULSTER (e modellazione FDS)

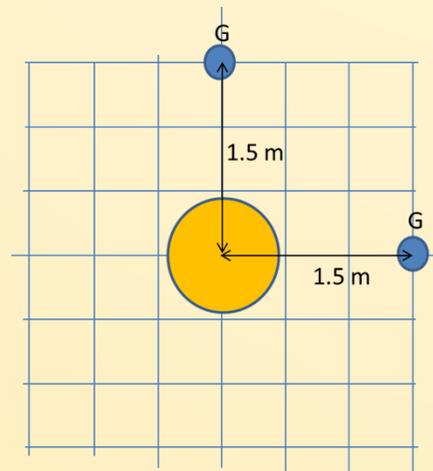


Caso 3

3 incendi

$D = 0.7 \text{ m}$

Sensori a 1.0 m



Caso 5

1 incendio

$D = 1.6 \text{ m}$

Sensori a 1.5 m

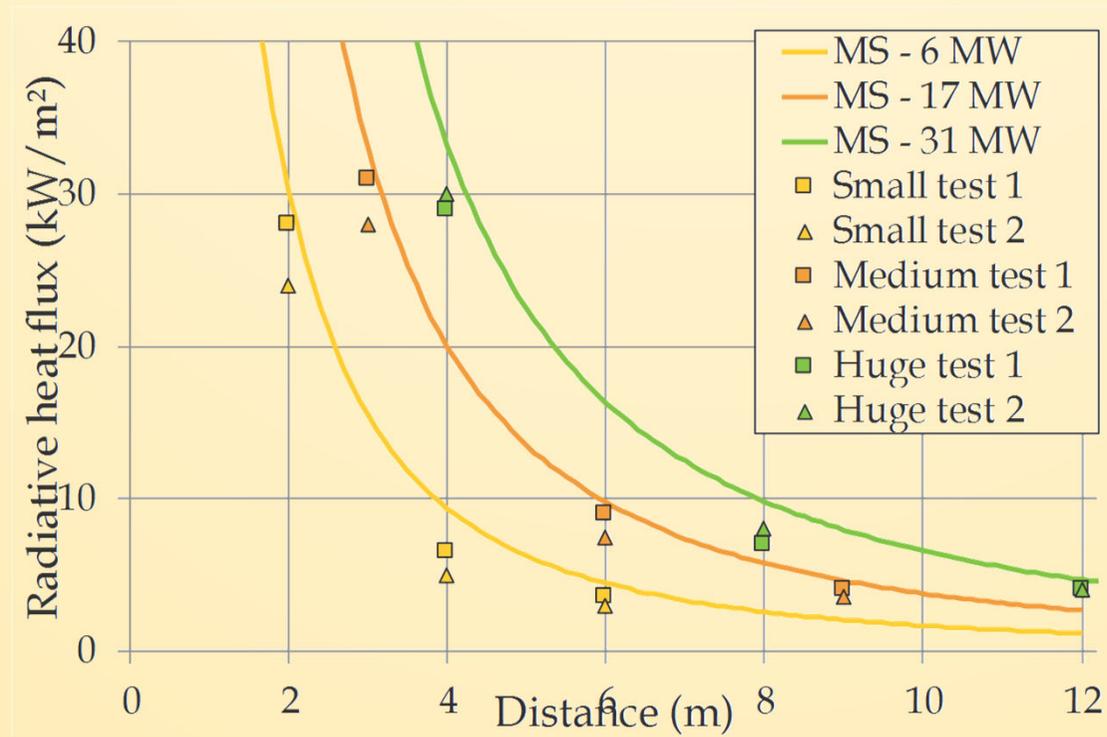
Posizione dei sensori		Valore sperimentale medio	Simulazione FDS	Fiamma cilindrica	Fiamma conica
Altezza	Distanza				
m	m	kW/m^2	kW/m^2	kW/m^2	kW/m^2
1.0	<u>1.0</u>	31.0	26.6	66.3	37.4
1.0	<u>1.0</u>	24.3	21.6	62.0	34.6
2.0	<u>1.0</u>	15.0	17.7	40.9	16.2
2.0	<u>1.0</u>	13.0	13.6	38.5	15.9

Posizione dei sensori		Valore sperimentale medio	Simulazione FDS	Fiamma cilindrica	Fiamma conica
Altezza	Distanza				
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. Metodo analitico e validazione

4.3. Modello semplificato

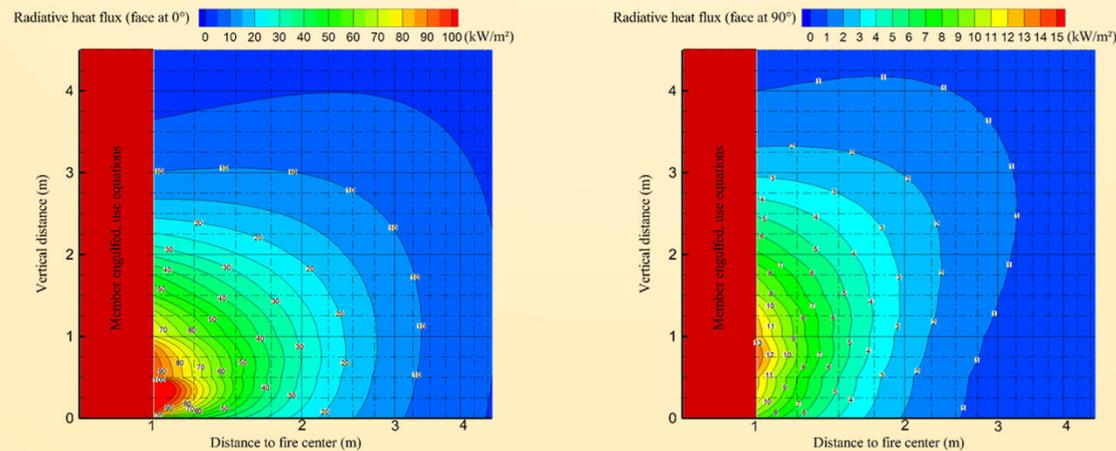
Validazione del modello con incendi di larghe dimensioni (LCPP test)



4. Metodo analitico e validazione

4.4. Metodo grafico - Nomogrammi

- Fornisce un nuovo set di risultati per la validazione dell'implementazione di SAFIR e OZone
- Fornisce risultati rapidamente per un ampio range di configurazioni (predimensionamento) e un metodo interpolante da applicare a un ampio range di configurazioni
- Fornisce un set di risultati di riferimento per la validazione dell'implementazione di metodi analitici fatti dai professionisti (fogli di calcolo o software)



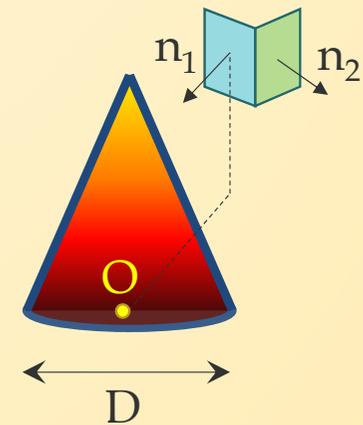
$D = 2 \text{ m}$, $RHR = 500 \text{ kW/m}^2$, $\theta = 0^\circ$ (sinistra) or $\theta = 90^\circ$ (destra)

4. Metodo analitico e validazione

4.4. Metodo grafico - Nomogrammi

- Ogni nomogramma è caratterizzato da :
 - Il diametro dell'incendio (m)
 - La RHR (kW/m^2)
 - L'orientazione della superficie ricevente ($^\circ$)
- Nomogrammi considerano solo l'irraggiamento. Da non usare :
 - All'interno dell'incendio → HESKESTAD
 - A livello del soffitto → HASEMI
- Si considera che la fiamma abbia un'emissività uguale a 1.0
- Fornisce il flusso incidente e non quello assorbito. Quindi il flusso termico deve essere moltiplicato per l'emissività del materiale !

Superficie finita 1 : $\theta = 0^\circ$
Superficie finita 2 : $\theta = 90^\circ$



4. Metodo analitico e validazione

4.4. Metodo grafico - Nomogrammi

Grafico	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
RHR (kW/m ²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500
Potenza (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

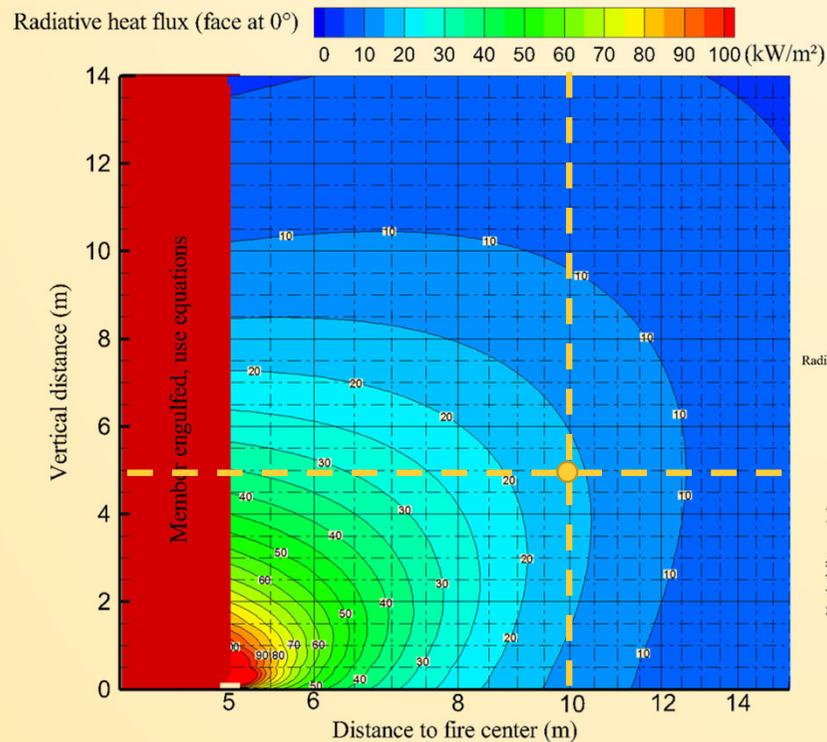
Grafico	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D (m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
RHR (kW/m ²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Potenza (MW)	7.1	14.1	28.3	42.4	12.6	25.1	50.3	47.7	15.9	31.8	19.6	39.3

Applicazione del metodo coerente con l'Appendice C dell'EN 1991-1-2 : $D \leq 10$ m ; $Q \leq 50$ MW

→ Le configurazioni scelte coprono il campo di applicazione del metodo analitico

4. Metodo analitico e validazione

4.4. Metodo grafico - Nomogrammi



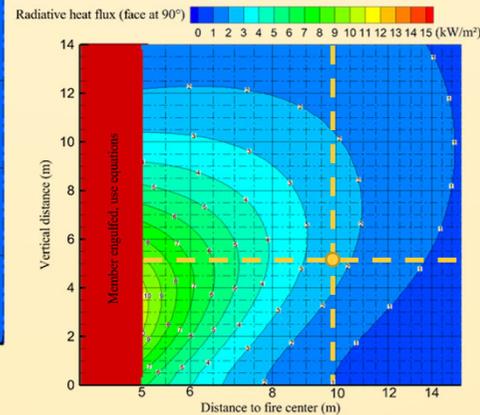
➤ Caratteristiche dell'incendio localizzato:

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

➤ Posizione target

- $Z = 5$ m
- $X = 10$ m
- Orientazione : 0°

Flusso incidente = 16 kW/m^2



➤ Posizione del target

- $Z = 5$ m
- $X = 10$ m
- Orientazione : 90°

Flusso incidente = 2.4 kW/m^2

4. Metodo analitico e validazione

4.5. Conclusioni

- LOCAFI introduce il nuovo concetto di Fiamma Virtuale Solida.
- La distribuzione di temperatura sul perimetro della Fiamma Virtuale Solida si basa su equazioni esistenti dell'Appendice C dell'EN1991-1-2 (Heskestad, Hasemi).
- Lo scambio di flusso radiante si basa sul calcolo del fattore di vista dell'Appendice G dell'EN 1991-1-2.
- Il modello semplificato si basa su equazioni matematiche che forniscono il flusso termico incidente per irraggiamento su una superficie infinitesima emesso da cilindri e corone circolari che formano la fiamma.
- I flussi convettivi devono essere considerati e sono significativi per configurazioni già coperte da metodi forniti dall'Appendice C dell'EN 1991-1-2 (elementi avvolti dalla fiamma o posizionati all'altezza del soffitto).