LOCAFI+

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

4. Método analítico y validación

4. Método analítico y validación

4.1. Concepto de llama sólida virtual

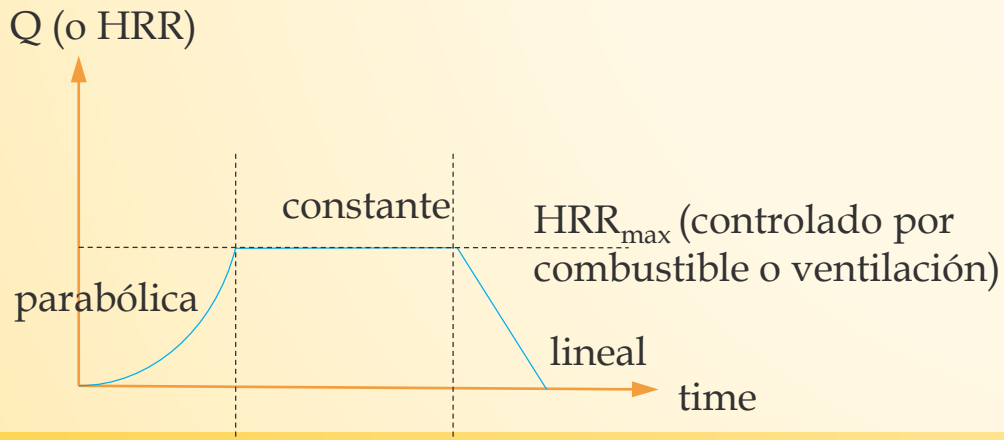
Modelado de la llama

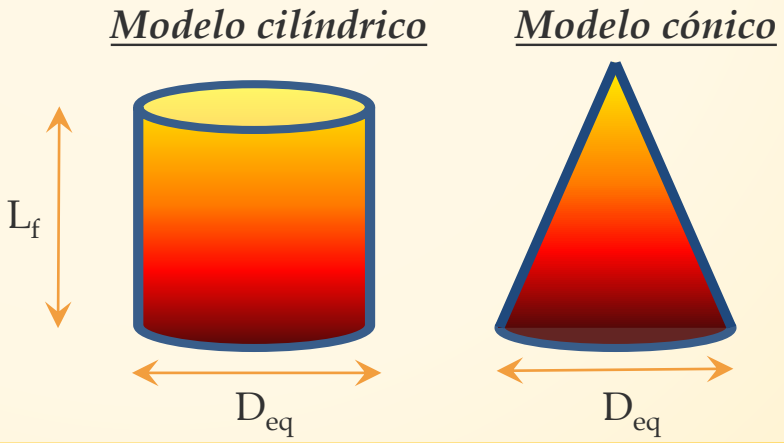
Paso 1: La superficie del fuego se transforma en un disco equivalente $D_{fire} = \sqrt{\frac{4.S}{\pi}}$

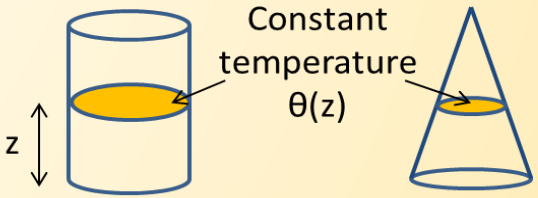
Paso 2: La evolución del HRR se calcula de acuerdo al Anexo E del EN 1991-1-2 (fase creciente, meseta, fase decreciente)

Paso 3: La longitud de la llama L_f se calcula por aplicación del Anexo C del EN 1991-1-2 $L_f(t) = -1.02\, D_{fire} + 0.0148\, Q(t)^{0.4}$

Paso 4: La acción del fuego se representa mediante una llama sólida virtual, cónica o cilíndrica, definida por D_{eq} y L_f





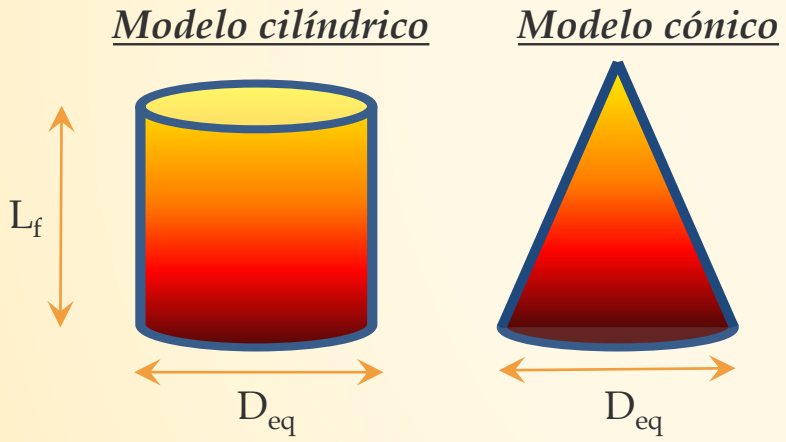


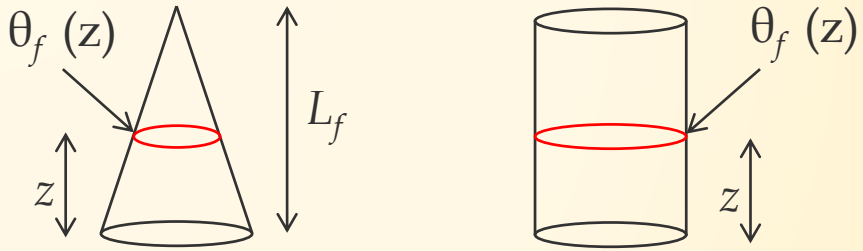
4. Método analítico y validación

4.1. Concepto de llama sólida virtual

Modelado de la llama

Si la llama no impacta contra el techo ($L_f < H_{ceiling}$ o no existe techo)





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

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

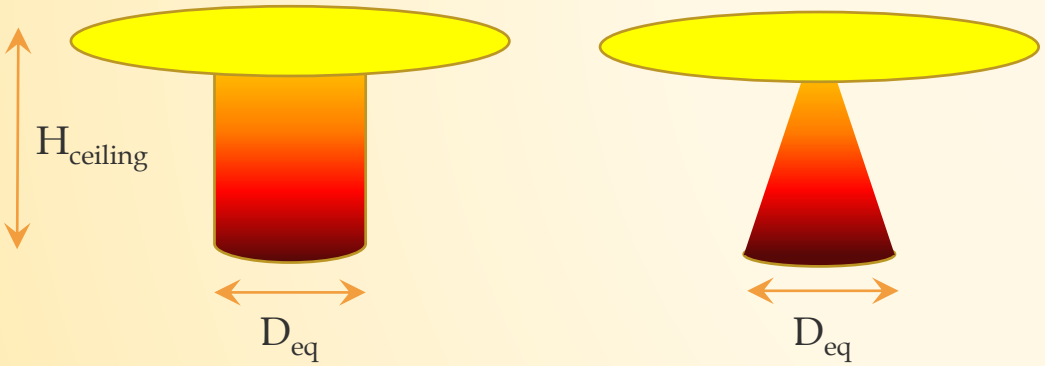
4. Método analítico y validación

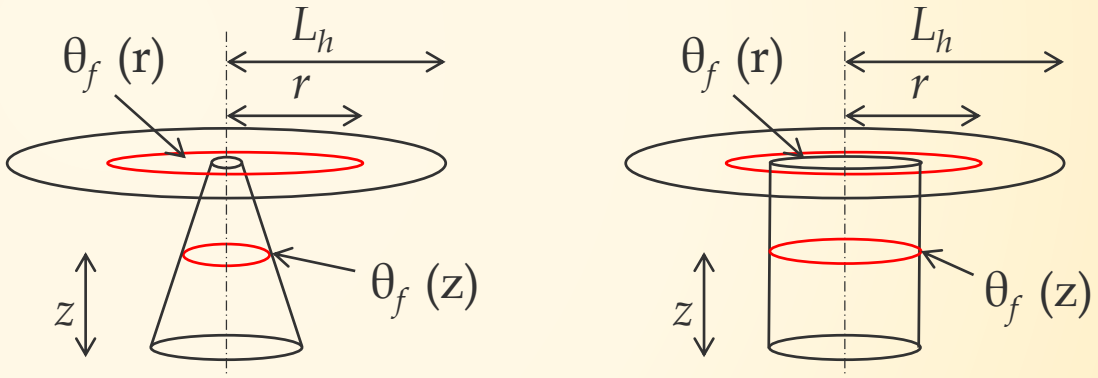
4.1. Concept of Virtual Solid Flame

Modelado de la llama

Si la llama impacta contra el techo ($L_f > H_{ceiling}$)

Modelo cilíndrico ***Modelo cónico***





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

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

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

$\dot{h}(r)$ *calculado mediante Hasemi*

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

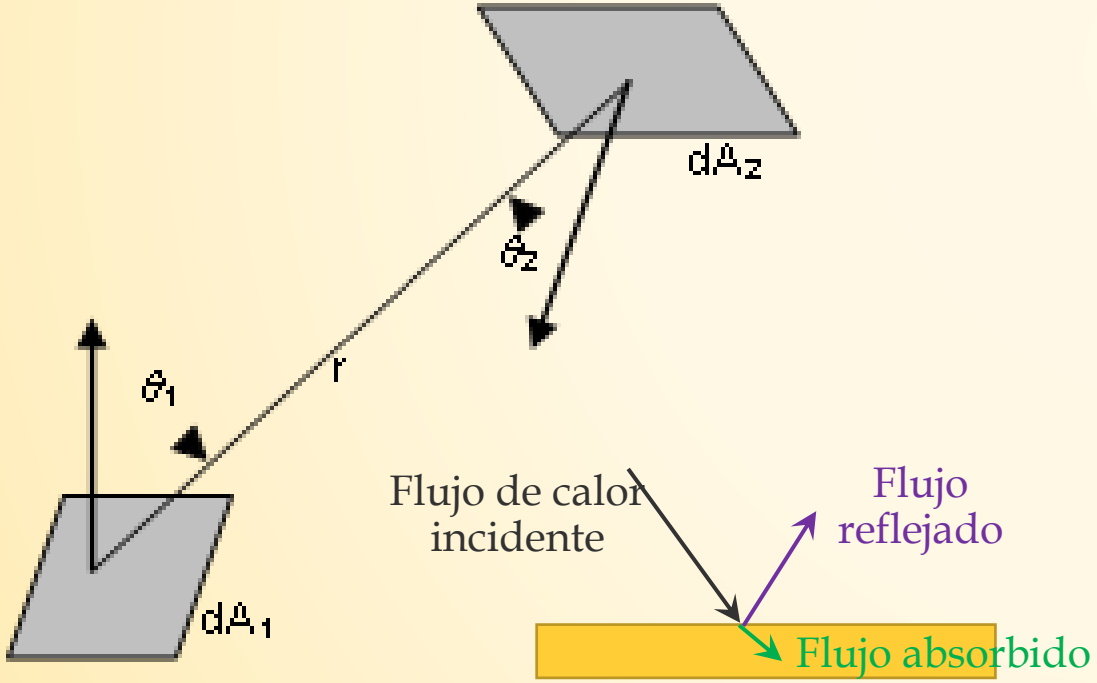
Nota : la contribución del anillo es baja, salvo si el elemento se sitúa dentro del mismo→ considerado solo para elementos a nivel del techo

4. Método analítico y validación

4.2. Geometrical method for exchanged heat fluxes

Evaluación del flujos de calor radiativos

El flujo de calor por radiación desde una superficie radiante dA_1 hasta una superficie receptora dA_2 es:



$$\emptyset_{dA_1 \to dA_2} = \alpha_2 \varepsilon_1 \sigma . T^4 \frac{cos(\theta_1) cos(\theta_2) dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

- La emisividad ε_1 (de la superficie emisora) sesupone igual a 1 para las llamas
- La absortividad α_2 depende de las propiedades de la superficie receptora
- Ley de Kirchoff: absortividad (α) = emisividad (ε)
- Para el acero, $\varepsilon = \alpha = 0.7$

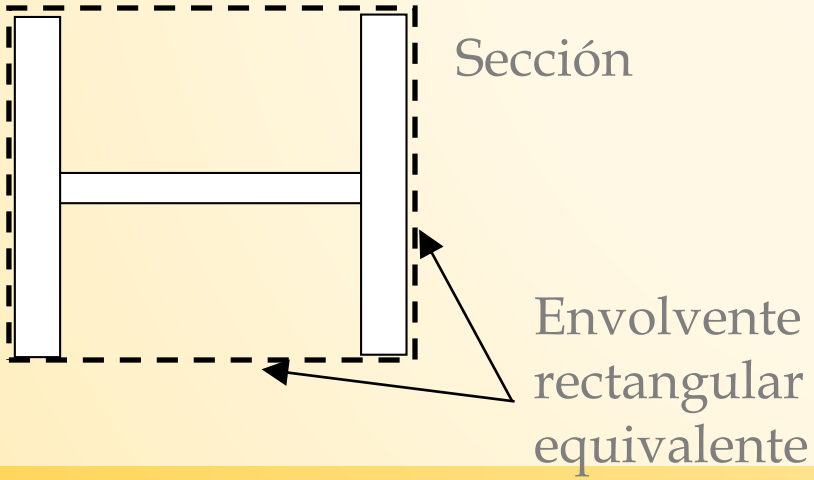
4.2. Método geométrico para flujos de calor intercambiados

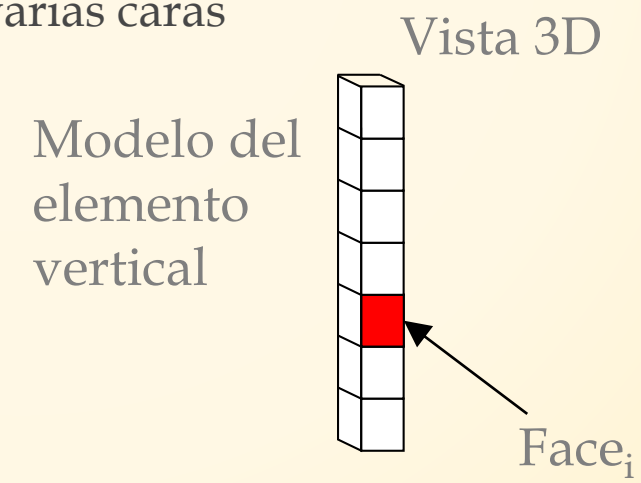
Modelado del elemento vertical

Las secciones cóncavas implican el **'efecto sombra'** → Como simplificación, los flujos de calor se calculan en un perímetro convexo

Para secciones en I o H, el element structural se transforma en una sección tubular de geometría rectangular (en línea con el Anexo G del EN 1991-1-2)

Entonces, la superficie perimetral se subdivide en varias caras

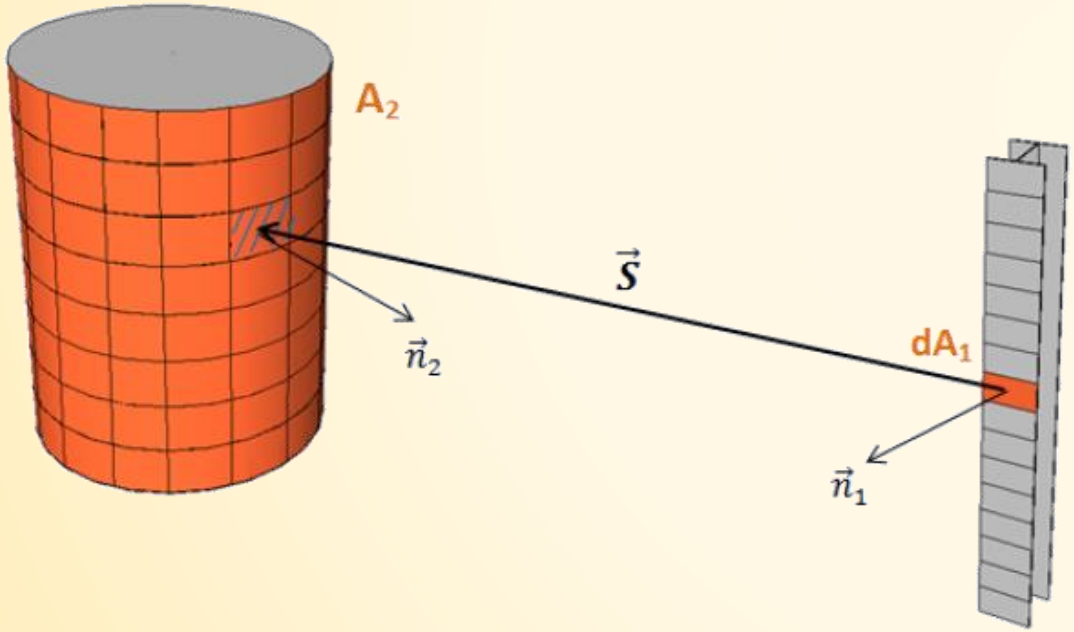




4. Método analítico y validación

4.2. Método geométrico para flujos de calor intercambiados

Integración numérica

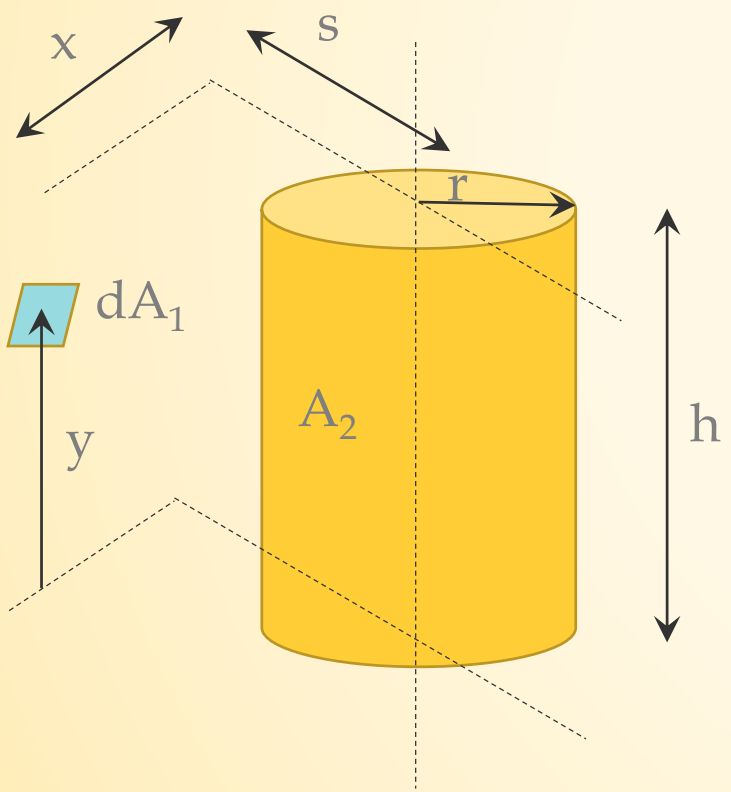


$$F_{d1-2} \simeq \frac{-1}{\pi} \sum_i \frac{(\vec{S}.\vec{n_1})(\vec{S}.\vec{n_2})}{S^4} \Delta A_i$$

- Se calcula cada intercambio de calor por radiación "individual" (en cada paso de tiempo).
- Requiere un programa para aplicaciones reales.
- Permite aplicar condiciones no uniformes (flujos por radiación) en el perímetro de la sección.

4.3. Modelo simplificado

Factor de forma entre una superficie infinitesimal y un cilindro



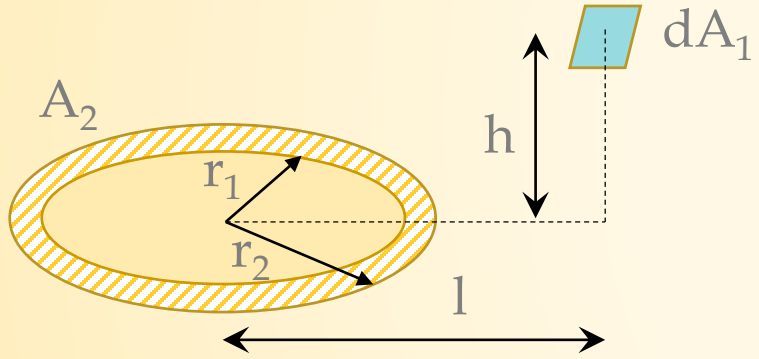
$$F_{dA_1 \to A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi}\left\{\begin{array}{l} cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1}\right) + cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1}\right) \\ -Y\left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A-1)^2 + 4Y^2}} cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)}\right)\right] \\ -\sqrt{C}\frac{C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

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

Válido sólo si el plano definido por dA_1 no intersecta el cilindro!

4.3. Modelo simplificado

Factor de forma entre una superficie infinitesimal y un cilindro



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

$$H = h/l$$
$$R = r/l$$

Valid only if $l > r_2$!

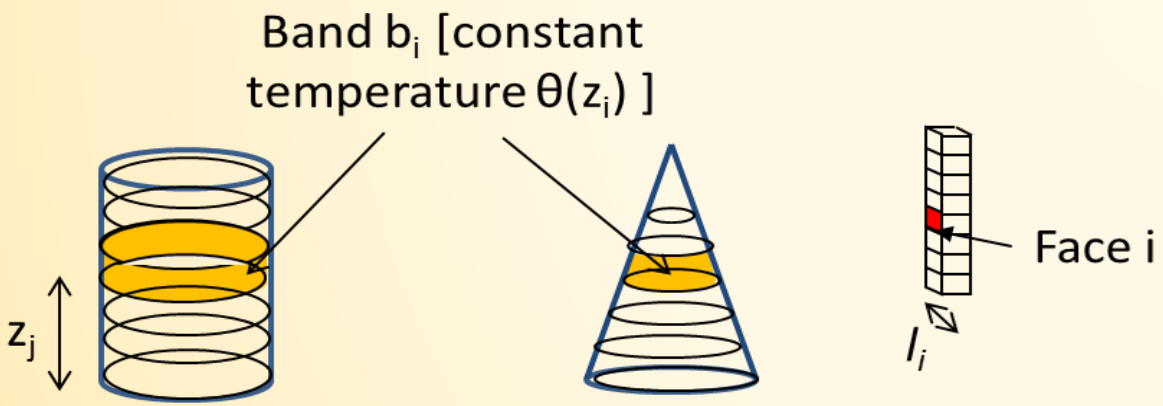
4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

Subdivisión de la llama en cilindros y anillos

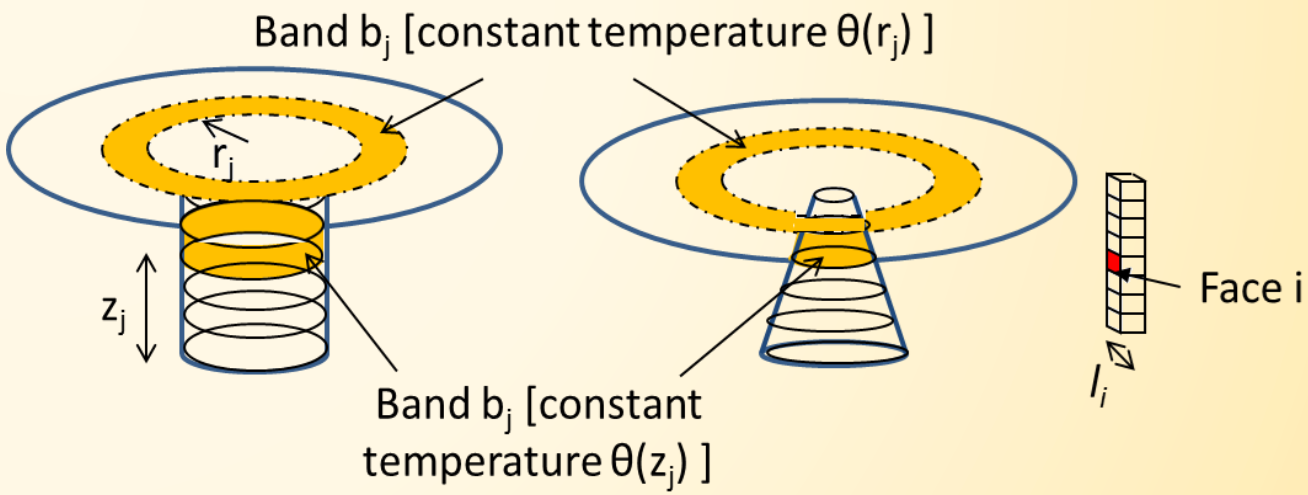
Si la llama no impacta contra el techo

($L_f < H_{ceiling}$ o no existe techo)



Si la llama impacta contra el techo

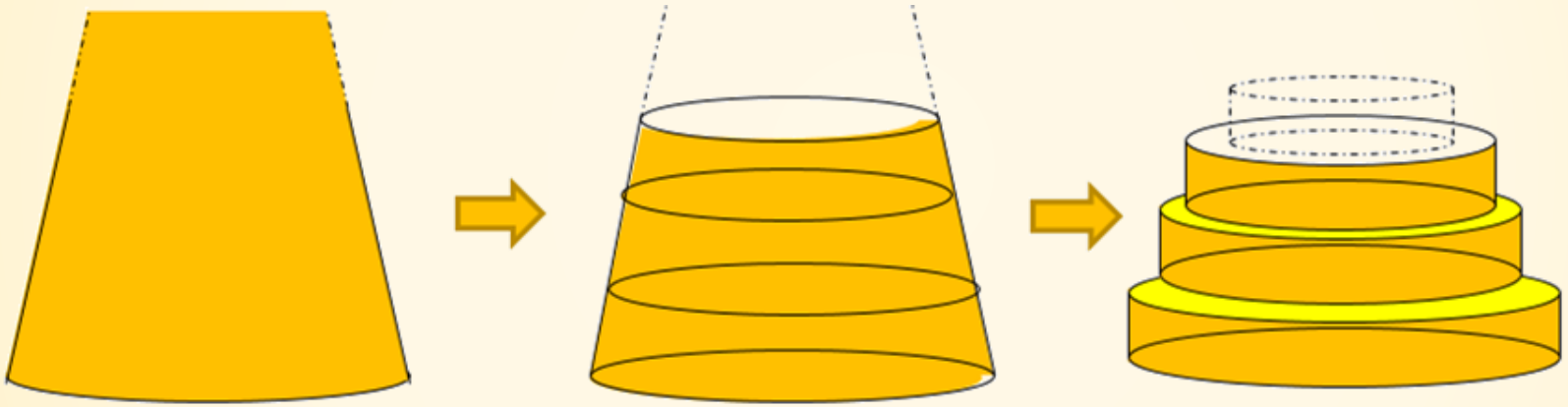
($L_f > H_{ceiling}$)



<u>Nota</u> : la contribución del anillo es baja, salvo si el elemento se sitúa dentro del mismo→ considerado solo para elementos a nivel del techo

4.3. Modelo simplificado

Subdivisión de la llama en cilindros y anillos (Adaptación 1)



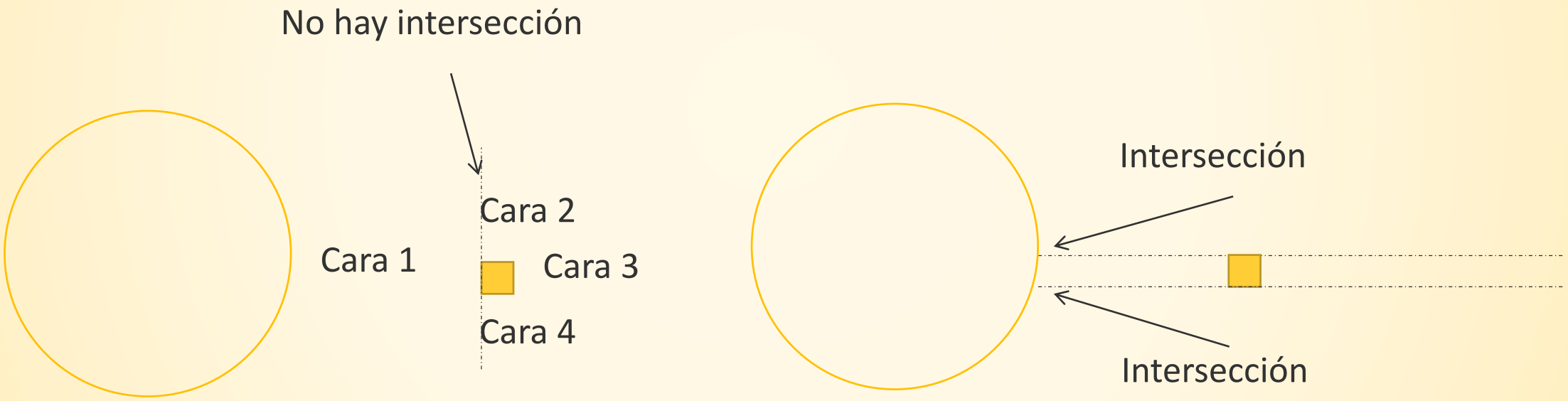
Llama sólida cónica | Conos truncados | Cilindros y anillos

¡ Si se desprecia la contribución de los anillos, se subestima el flujo incidente, pudiendo incluso obtenerse un flujo incidente igual a 0 por encima del fuego !

4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

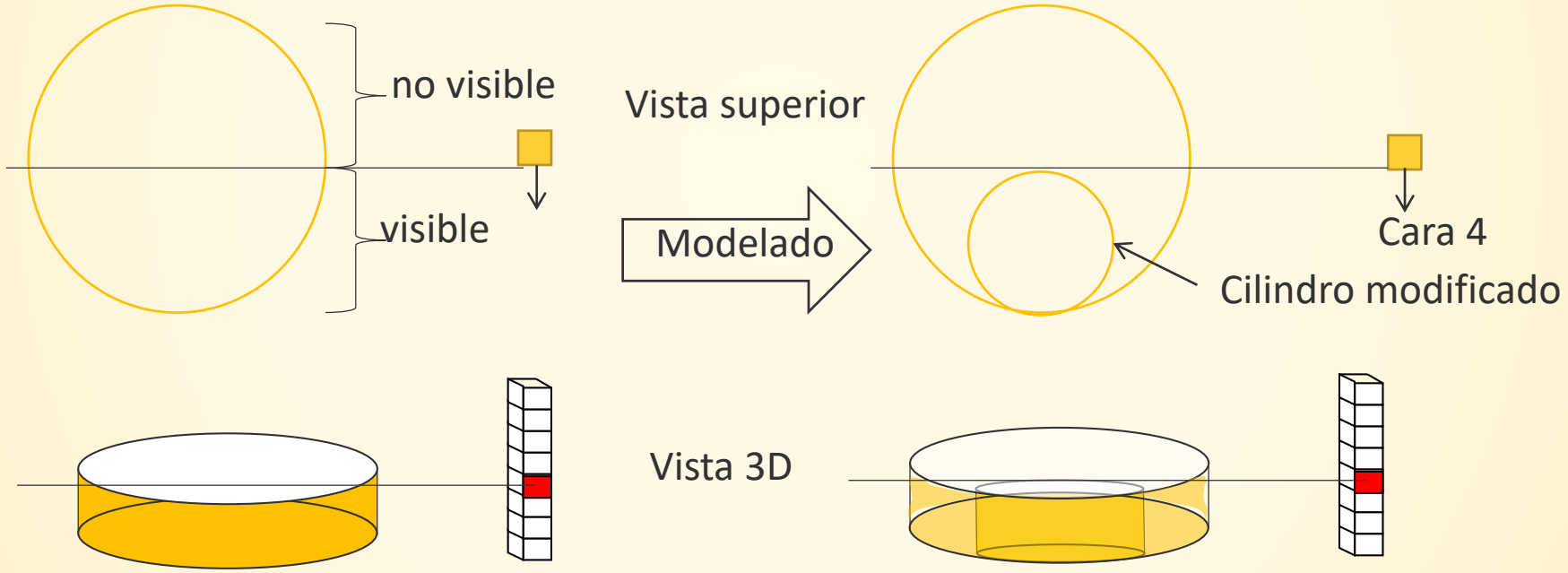
Subdivisión de la llama en cilindros y anillos (Adaptación 2)



¡ La fórmula para el cilindro no es válida si la superficie receptora lo intersecta !

4.3. Modelo simplificado

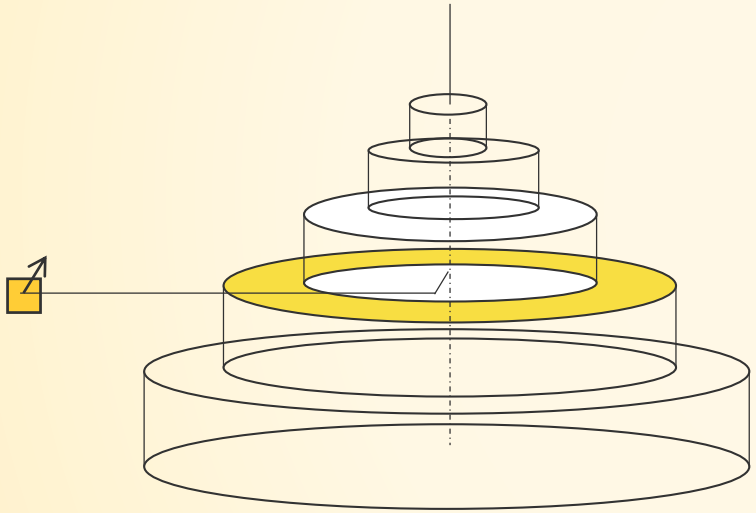
Subdivisión de la llama en cilindros y anillos (Adaptación 2)



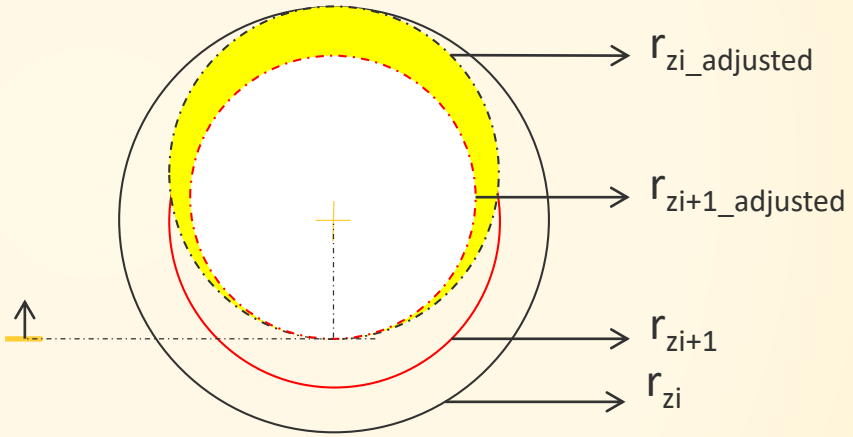
En este caso, el cilindro inicial se transforma en un cilindro modificado en la zona visible

4.3. Modelo simplificado

Subdivisión de la llama en cilindros y anillos (Adaptación 3)



Vista 3D



Vista superior

Existe una porción de anillo « oculta » por el cilindro situado encima de éste → Se debe considerar una zona reducida
(ignorar esta reducción es conservador…)

4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

Comentarios adicionales

- La altura de cilindro recomendada es de 50 cm
- Para elementos situados por debajo del techo, se debe añadir la convección → Hasemi
- Si existen distintos focos, los flujos recividos desde cada foco se deben adicionar. El flujo total incidente se limita a 100 kW/m^2 $\dot{h}_{tot} = min\left(\dot{h}_{rad_section} + \dot{h}_{conv}; 100000\right)$ [W.m^{-2}]
- La temperature del elemento se calcula estableciendo el equilibrio térmico del mismo

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

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

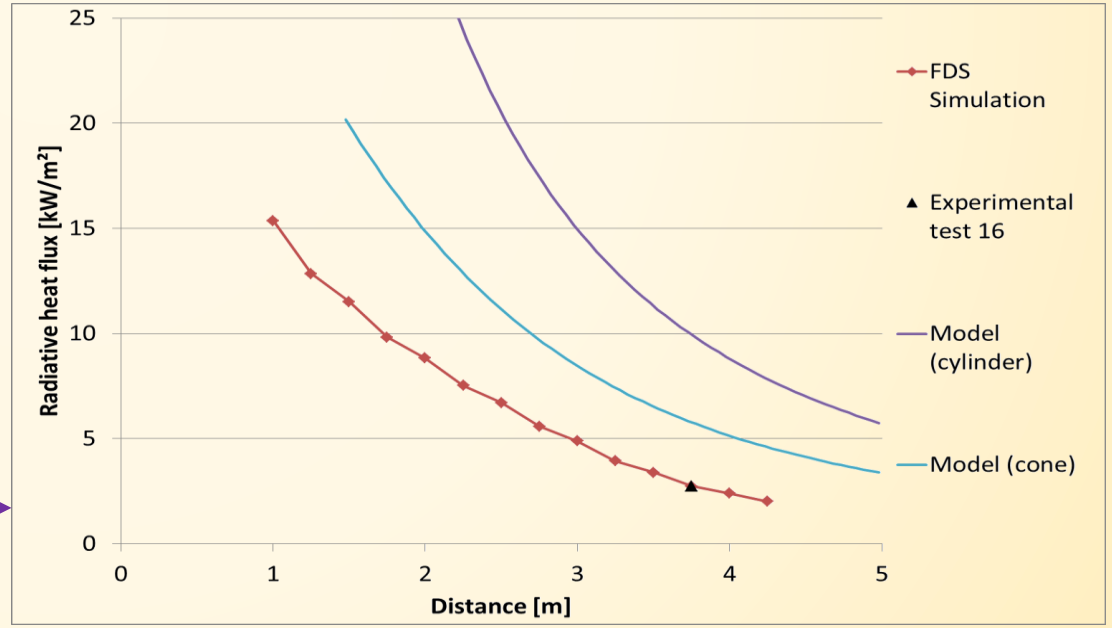
4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

Validación del modelo basada en los ensayos de Liège (y modelado FDS)

- Galga situada a 3.75 m del foco del fuego (altura: 1.75 m)
- Orientación de la galga: perpendicular al eje fuego-galga

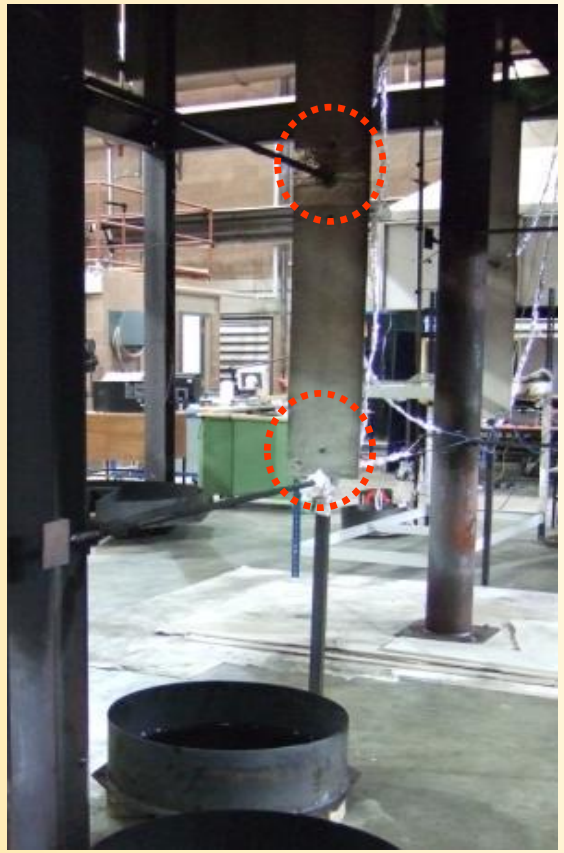
Diam.	Valor medio experimental	Ensayo nº	Llama cilíndrica	Llama cónica
[m]	[kW/m²]	[-]	[kW/m²]	[kW/m²]
0.60	0.31	1 to 4	1.20	0.74
1.00	0.73	5 to 8	3.23	1.95
1.40	1.36	9 to 14	6.19	3.67
1.80	2.12	15 to 18	9.95	5.78
2.20	3.39	19 to 22	14.55	8.30

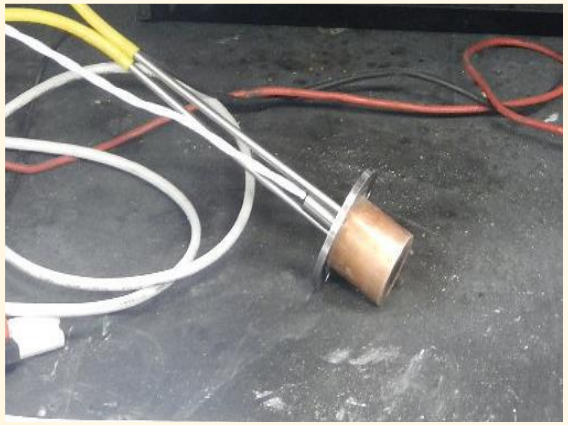


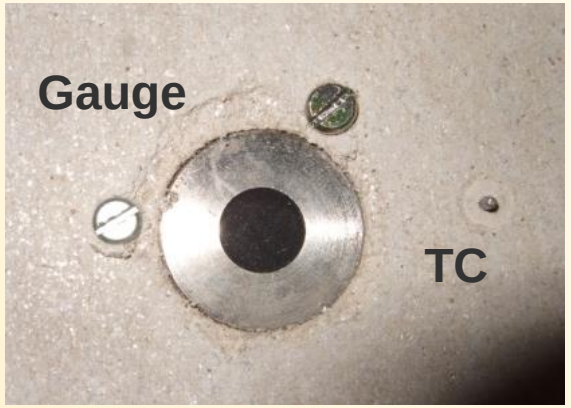
4. Método analítico y validación

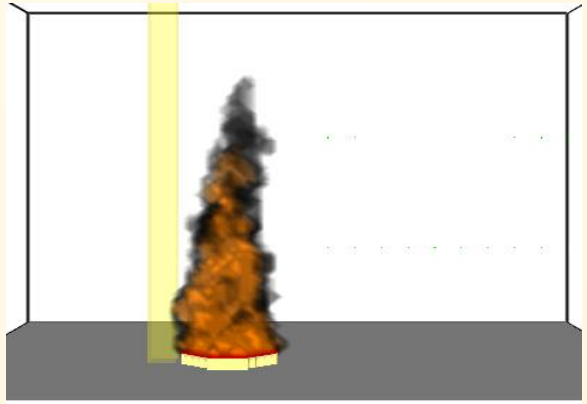
4.3. Modelo simplificado

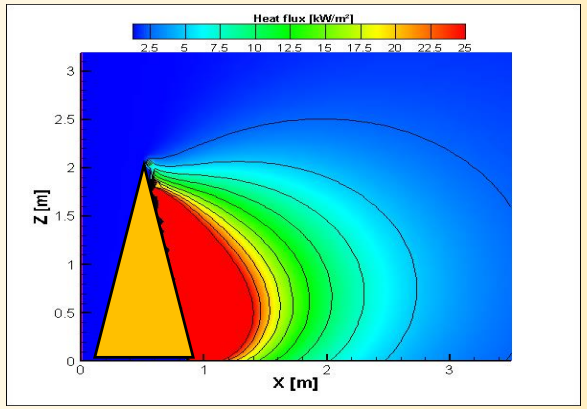
Validación del modelo basada en los ensayos de Ulster (y modelado FDS)

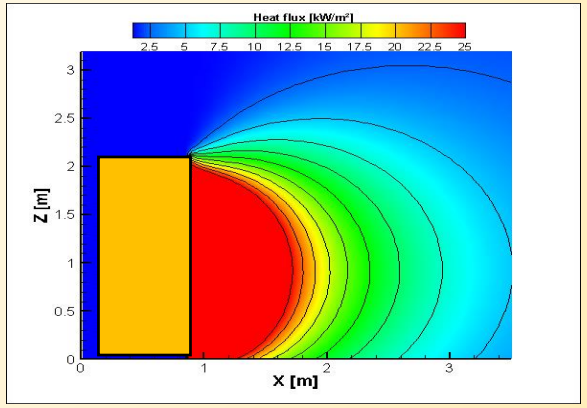








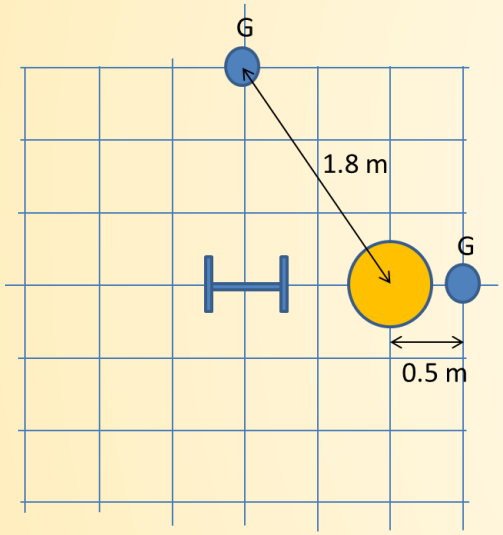


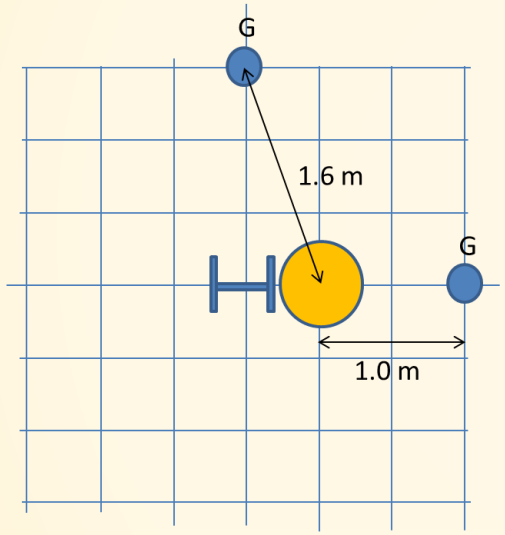


4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

Validación del modelo basada en los ensayos de Ulster (y modelado FDS)





Caso 1a
1 cubeta
D = 0.7 m
Galgas a 0.5/1.8 m

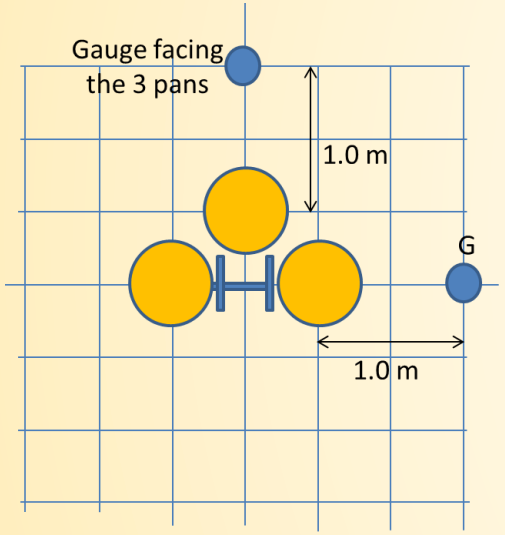
Caso 1b
1 cubeta
D = 0.7 m
Galgas a 1.0/1.6 m

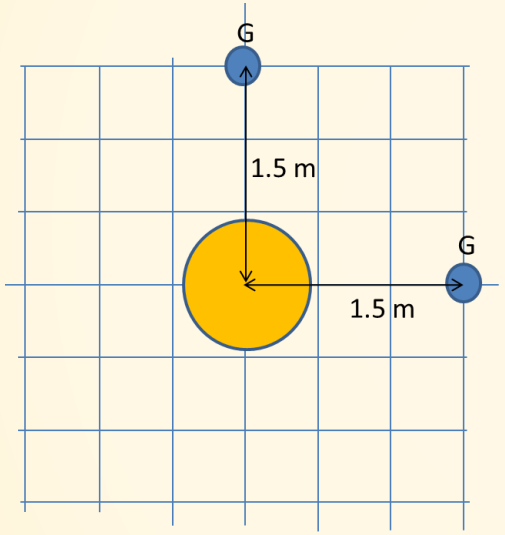
Posición galgas		Media experimental	Simulación FDS	Llama cilíndrica	Llama cónica
Altura	Distancia				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1.0	0.5	30.6	28.5	74.0	39.0
1.0	1.0	13.8	12.9	33.2	17.9
1.0	1.6	5.9	5.5	15.5	8.5
1.0	1.8	4.2	3.8	10.8	6.0
2.0	0.5	6.2	11.2	22.0	5.9
2.0	1.0	4.5	5.9	14.1	5.5
2.0	1.6	3.0	3.7	8.8	4.1
2.0	1.8	2.3	2.6	6.7	3.3

4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

Validación del modelo basada en los ensayos de Ulster (y modelado FDS)





Caso 3
3 cubetas
D = 0.7 m
Galgas a 1.0 m

Caso 5
1 cubeta
D = 1.6 m
Galgas a 1.5 m

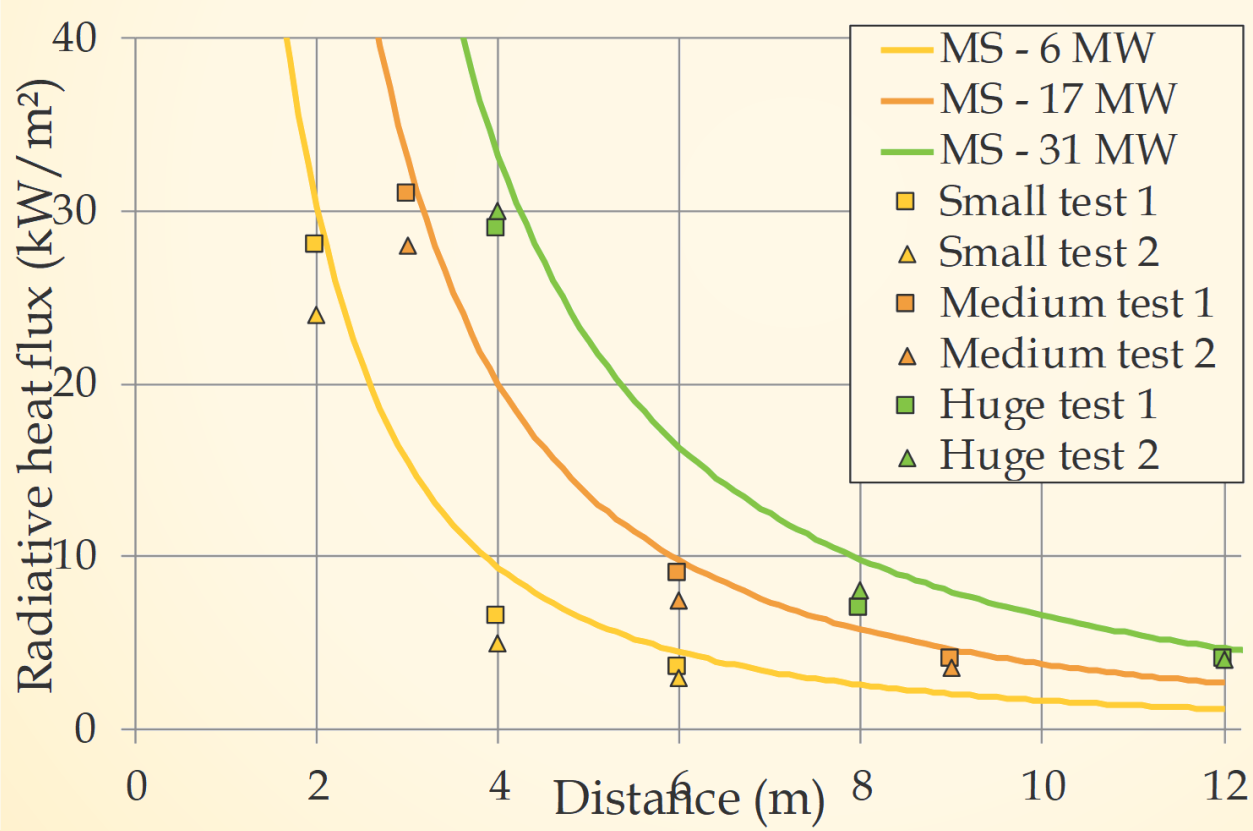
Posición galgas		Media experimental	Simulación FDS	Llama cilíndrica	Llama cónica
Altura	Distancia				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1.0	1.0	31.0	26.6	66.3	37.4
1.0	1.0	24.3	21.6	62.0	34.6
2.0	1.0	15.0	17.7	40.9	16.2
2.0	1.0	13.0	13.6	38.5	15.9

Posición galgas		Media experimental	Simulación FDS	Llama cilíndrica	Llama cónica
Altura	Distancia				
m	m	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
1.0	1.5	37.6	33.6	53.9	38.9
2.0	1.5	26.5	24.5	55.2	29.7

4. Método analítico y validación

4.3. Modelo simplificado

Validación del modelo para grandes diámetros (Ensayos LCPP)

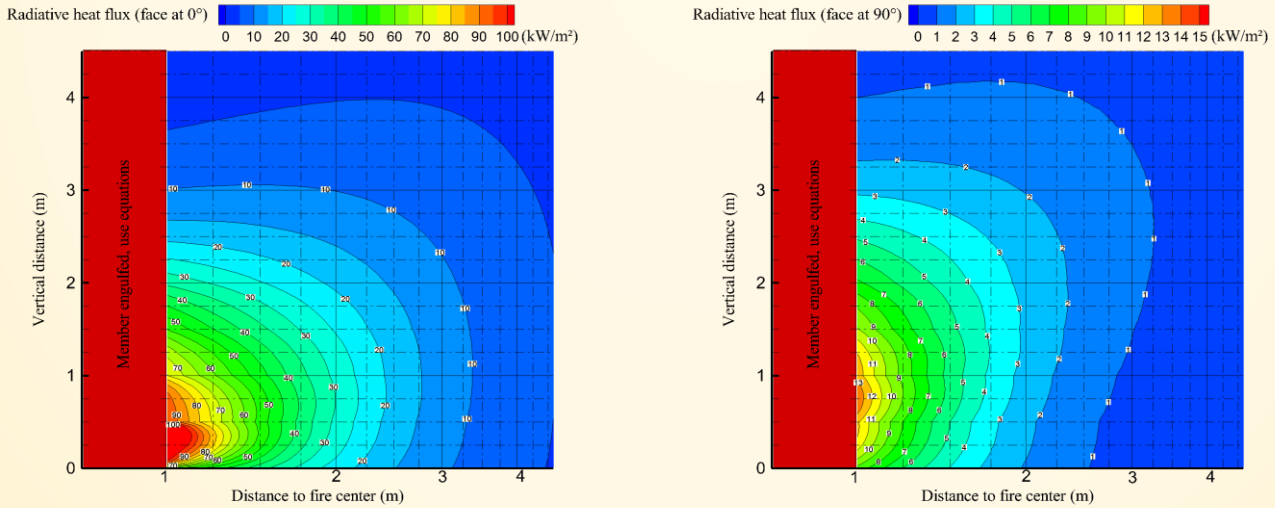


20

4. Método analítico y validación

4.4. Mapas de contorno

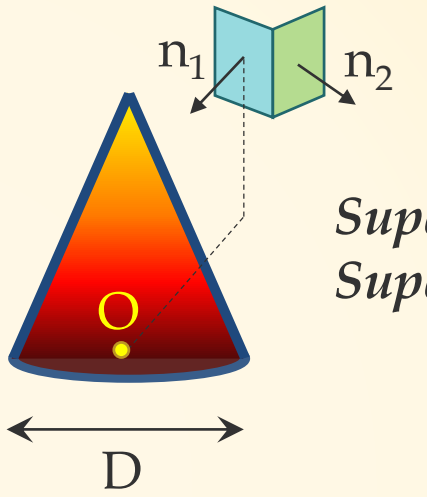
- Proporcionan un nuevo conjunto de resultados para su implementación en SAFIR y OZone
- Proporcionan resultados rápidos y conservadores para un amplio rango de configuraciones (prediseño) y un método de interpolación para aplicar a un rango aún mayor
- Proporcionan un conjunto de resultados para la validación de la implementación de métodos analíticos por los calcultistas (hojas de cálculo o software)



D = 2m, RHR = 500 kW/m^2, θ = 0° (izquierda) o θ = 90° (derecha)

4. Método analítico y validación

4.4. Mapas de contorno



Superficie finita 1 : $\theta = 0°$
Superficie finita 2 : $\theta = 90°$

- Cada nomograma viene caracterizado por:
  - El diámetro del fuego (m)
  - El RHR (kW/m^2)
  - La orientación de la superficie receptora (°)
- Los nomogramas sólo tienen en cuenta la radiación. No emplear:
  - Dentro del fuego → HESKESTAD
  - A nivel del techo → HASEMI
- Considera que la emisividad de la llama es 1.0
- Proporciona el flujo incidente, no el absorbido (se debe multiplicar por la emisividad !)

4. Método analítico y validación

4.4. Mapas de contorno

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/m²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500	250	500	1000	1500
Potencia (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

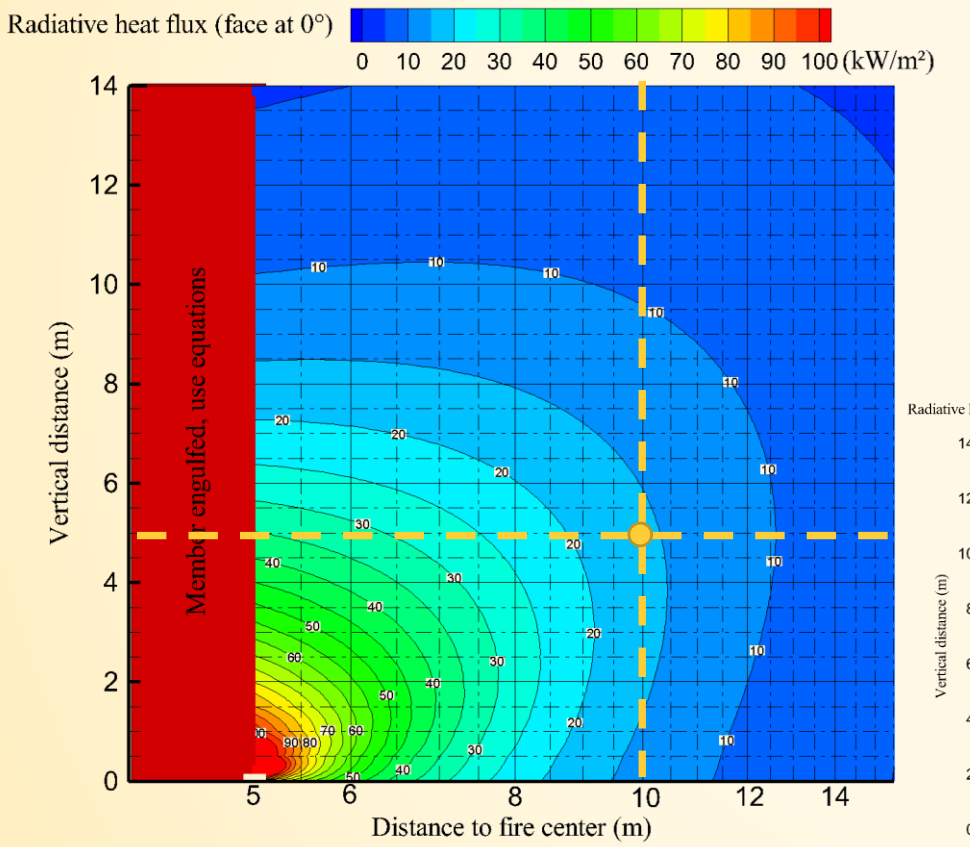
Caso	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D (m)	6	6	6	6	8	8	8	9	9	9	10	10
HRR (kW/m²)	250	500	1000	1500	250	500	1000	250	500	750	250	500
Potencia (MW)	7.1	14.1	28.3	42.4	12.6	25.1	50.3	47.7	15.9	31.8	19.6	39.3

Alcance de aplicación del método (idem Anexo C del EN 1991-1-2) : D $\leq$ 10 m ; Q $\leq$ 50 MW

→ Las configuraciones escogidas cubren del campo de aplicación del método de cálculo

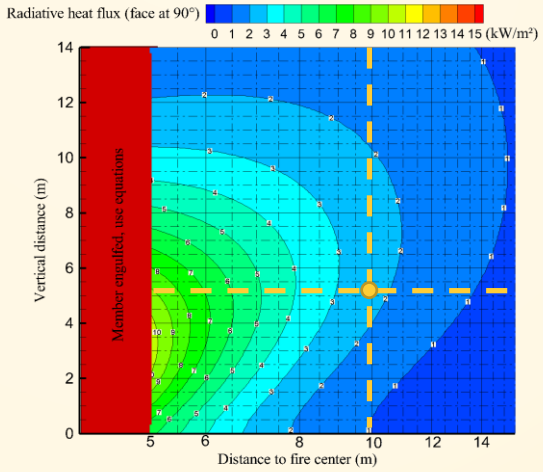
4. Método analítico y validación

4.4. Mapas de contorno



- Características del fuego localizado:
  - D = 10 m
  - RHR : 500 kW/m²
- Posición objetivo
  - Z = 5m
  - X = 10 m
  - Orientación : 0°

Flujo incidente = 16 kW/m²



- Posición objetivo
  - Z = 5m
  - X = 10 m
  - Orientación : 90°

Flujo incidente = 2.4 kW/m²

4.5. Conclusiones

- El proyecto LOCAFI introduce el nuevo concepto de llama sólida virtual.
- La distribución de temperatura en el perímetro de la llama sólida virtual se basa en las ecuaciones existentes en el Anexo C del EN 1991-1-2 (Heskestad, Hasemi).
- El intercambio de flujos de calor por radiación se basa en el factor de forma del Anexo G del EN 1991-1-2.
- El modelo simplificado se basa en las ecuaciones matemáticas que proporcionan el flujo de calor por radiación recibido por una superficie infinitesimal desde los cilindros y anillos.
- Los flujos de calor por convección se deben calcular por separado. Sin embargo, los flujos convectivos tiene sólo un efecto significativo en las configuraciones ya cubiertas por el Anexo C del EN 1991-1-2 (elementos envueltos por las llamas o situados a nivel del techo).