

AZIONI TERMICHE SU ELEMENTI ESTERNI - METODO DI CALCOLO "SEMPLIFICATO"



A cura di Michele Barberi
Modena, 11 Ottobre 2023

Eurocodice 1

Azioni sulle strutture

Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco

CALCOLO DELLA TEMPERATURA DELLA FIAMMA IN UN'APERTURA ESTERNA AL FINE DELLA VERIFICA DI IRRAGGIAMENTO

- (7) Si raccomanda che la dimensione del compartimento antincendio non sia maggiore di 70 m in lunghezza, 18 m in larghezza e di 5 m in altezza.

Si calcola il Carico d'incendio nel compartimento ai sensi dell'Eurocodice1
 $Q_{fk} = 1146 \text{ MJ/mq}$

Appendice E UNI EN 1991-1-2

prospetto E.1 **Fattori δ_{q1} , δ_{q2}**

| Area in pianta del compartimento A_f [m ²] | Pericolo di attivazione dell'incendio δ_{q1} |
|---|--|
| 25 | 1,10 |
| 250 | 1,50 |
| 2 500 | 1,90 |
| 5 000 | 2,00 |
| 10 000 | 2,13 |

| Pericolo di attivazione dell'incendio δ_{q2} | Esempi di utilizzi |
|--|---|
| 0,78 | Gallerie d'arte, musei, piscine |
| 1,00 | Uffici, residenze, alberghi, industria cartaria |
| 1,22 | Stabilimenti di macchinari e motori |
| 1,44 | Laboratori chimici, officine di verniciatura |
| 1,66 | Stabilimenti di fuochi di artificio o vernici |

| δ_{ni} funzione delle misure di lotta attiva contro l'incendio | | | | | | | | | | | |
|---|--|--------------------------------------|-----|--|-----------------------------------|---|---|--|---|---|---|
| Spegnimento automatico dell'incendio | | Rivelazione automatica dell'incendio | | | Spegnimento manuale dell'incendio | | | | | | |
| Sistemi di estinzione ad acqua automatici δ_{n1} | Adduzione indipendente di acqua δ_{n2} | | | Rivelazione e allarme incendio automatici δ_{n3} δ_{n4} | | Trasmissione automatica di allarme ai Comandi dei Vigili del fuoco δ_{n5} | Squadre di Vigili del fuoco operanti sul posto δ_{n6} | Squadre di Vigili del fuoco operanti dall'esterno δ_{n7} | Percorsi di accesso sicuro δ_{n8} | Dispositivi di lotta contro l'incendio δ_{n9} | Sistemi di evacuazione dei fumi δ_{n10} |
| | 0 | 1 | 2 | Mediante calore | Mediante fumo | | | | | | |
| 0,61 | 1,0 | 0,87 | 0,7 | 0,87 oppure 0,73 | | 0,87 | 0,61 oppure 0,78 | | 0,9 oppure 1 oppure 1,5 | 1,0 oppure 1,5 | 1,0 oppure 1,5 |

Si assume $\delta q_1 = 1,54$; $\delta q_2 = 1$

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} = 0,73 \cdot 0,87 \cdot 0,78 \cdot 0,9 = 0,446$$

$$Q_{fd} = 1146 \cdot 1,54 \cdot 0,446 = 787 \text{ MJ/mq}$$

Il ns. locale ha dimensioni in pianta 13 m x 37 m

Af= Superficie in pianta del compartimento mq. 481

H = 5 m

At=Superfici pavimenti pareti e soffitto

Pavimento = mq 481

Pareti nord e sud = 13 x 5 = 65 mq

Parete est e ovest = 37 x 5 = mq 185

Soffitto = mq 481

At = 1462 m² Area delle superfici delimitanti il compartimento

Facendo riferimento agli Eurocodici UNI-EN 1991-1-2-2004, ponendo qfd pari a 787 Mj/mq .

Per procedere con la verifica occorre calcolare l'altezza equivalente delle finestre del compartimento.

Altezza equivalente (media pesata delle altezze delle finestre delle pareti) heq = $\Sigma (A_{ih}i) / A_v$;

si considera la presenza di tutte le finestre sulle pareti

Aperture lato Ovest

n. 7 da 2.20 x 4.60 m $h_i = 2.3 \text{ m}$ $A_{v2} = 70.84 \text{ m}^2$

verifica $A_{vi}/\text{Sup parete } i = 70,84/185 < 0.5$

Aperture lato sud

n. 2 da 2.60 x 5,00 m $h = 2.50 \text{ m}$ $A_{v1} = 26,00 \text{ m}^2$

verifica $A_{vi}/\text{Sup parete } i = 26/65 < 0.5$

$A_v = \sum A_i = 96,84 \text{ m}^2$ area totale aperture

$$h_{eq} = \left(h_{eq} = \left(\sum_i (A_{v,i} h_i) \right) / A_v \right) = 2.35 \text{ m}$$

Quando sono presenti finestre solo nella parete 1, il rapporto D / W è dato da:

$$D / W = \frac{W_2}{W_1} \quad (\text{B.1})$$

Quando sono presenti finestre su più di una parete, il rapporto D / W è calcolato come segue:


$$D / W = \frac{W_2 A_{v1}}{W_1 A_v} \quad (\text{B.2})$$

dove:

W_1 è la larghezza della parete 1, che per ipotesi contiene l'apertura più grande;

A_{v1} è la somma delle aree delle finestre nella parete 1;

W_2 è la lunghezza della parete perpendicolare alla parete 1 nel compartimento antincendio.

$$W_1 = 13 \text{ m}$$

$$W_2 = 37 \text{ m}$$

$$A_{v1} = 26 \text{ m}^2$$

$$A_v = 96,84 \text{ m}^2$$

Si ricava

$$D/W = 0.764$$

Modo di ventilazione

- (1)P Se sono presenti finestre su facce opposte del compartimento antincendio o se aria addizionale è in grado di alimentare il fuoco da un'altra sorgente (diversa dalle finestre), il calcolo deve essere effettuato in condizione di ventilazione forzata. Altrimenti, il calcolo è eseguito prescindendo dalla ventilazione forzata.

Nel ns. caso si considera la condizione di ventilazione naturale.

Q = velocità di rilascio del calore del fuoco [MW]

Condizioni di ventilazione naturale

- (1) La velocità di combustione o di rilascio di calore è fornita dall'espressione:

$$Q = \min \left((A_f \cdot q_{f,d}) / \tau_F ; 3,15(1 - e^{-0,036/O}) A_V \left(\frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{1/2} \right) \quad [\text{MW}] \quad (\text{B.4})$$

O = fattore di apertura = $A_v \cdot h_{eq}^{1/2} / A_t = 0,101$

con i limiti $0,02 \leq O \leq 0,20$

si assume quindi $O = 0,101 \text{ m}^{1/2}$

τ_F tempo durante il quale il fuoco brucia liberamente (assunto pari a 1 200 [s])

| | |
|-------------------------|----------|
| Af(m ²) | 481 |
| Qfd(MJ/m ²) | 787 |
| Tauf(sec) | 1200 |
| O(m ^{1/2}) | 0,1016 |
| Av(m ²) | 96,84 |
| Heq(m) | 2,354 |
| D/W | 0,764147 |

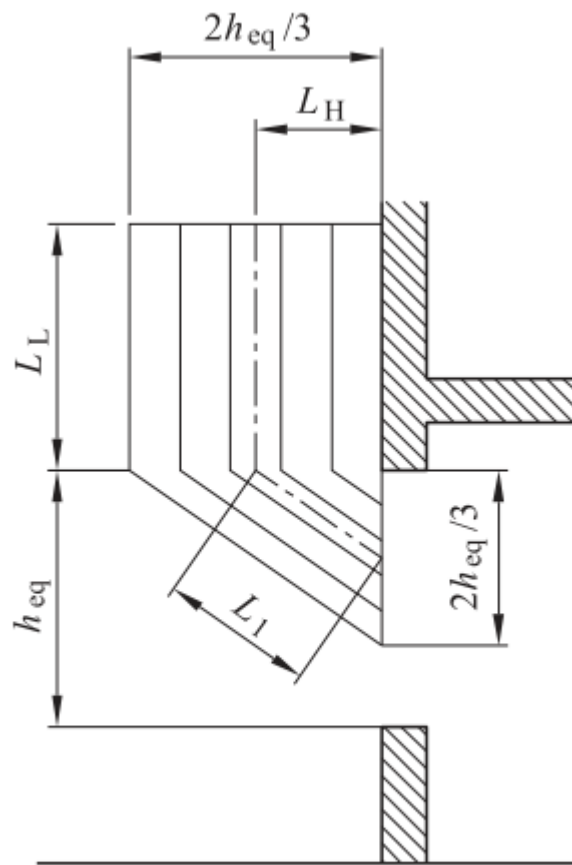
Sviluppando i calcoli si ha:

$$(A_f \cdot q_{f,d}) / \tau_F = 315 \text{ MW}$$

$$3,15(1 - e^{-0,036/O}) A_v \left(\frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{1/2} = 159,7 \text{ MW}$$

Il secondo valore prescinde dal carico d'incendio, ma unicamente dalla geometria del locale.

Si assume quindi $Q = 159,7 \text{ MW}$



2

(3) L'altezza delle fiamme (vedere figura B.2) è data da:

$$L_L = \max\left(0; h_{eq}\left(2,37\left(\frac{Q}{A_v\rho_g(h_{eq}g)^{1/2}}\right)^{2/3} - 1\right)\right)$$

ρ_g densità interna del gas

Assumendo $\rho_g = 0,45 \text{ kg/m}^3$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, l'equazione si semplifica nella seguente:

$$L_L = 1,9 \left(\frac{Q}{w_t} \right)^{2/3} - h_{eq}$$


w_t somma delle larghezze delle finestre su tutte le pareti ($w_t = \Sigma w_i$); fattore di ventilazione riferito a A_t

$$W_t = 20,6 \text{ m}$$

$$L_L = 1,56 \text{ m}$$

(6) La proiezione orizzontale della fiamma:

- nel caso che sopra la finestra sia presente una parete è data da:

 $L_H = h_{eq} / 3$ se $h_{eq} \leq 1,25 w_t$ (B.8)

$L_H = 0,3 h_{eq} (h_{eq} / w_t)^{0,54}$ se $h_{eq} > 1,25 w_t$ e la distanza da qualsiasi altra finestra è maggiore di $4 w_t$ (B.9)

$L_H = 0,454 h_{eq} (h_{eq} / 2w_t)^{0,54}$ negli altri casi (B.10)

- Nel caso la finestra non sia sovrastata da una parete, è data da:

$L_H = 0,6 h_{eq} (L_L / h_{eq})^{2,1c}$ (B.11)

(7) La lunghezza della fiamma lungo l'asse, è data da:

quando $L_L > 0$,

$L_f = L_L + h_{eq} / 2$ se esiste una parete sopra la finestra e se $h_{eq} \leq 1,25 w_t$ (B.12)

$L_f = (L_L^2 + (L_H - h_{eq} / 3)^2)^{1/2} + h_{eq} / 2$ se non esiste una parete sopra la finestra o se $h_{eq} > 1,25 w_t$ (B.13)

quando $L_L = 0$ allora anche $L_f = 0$.

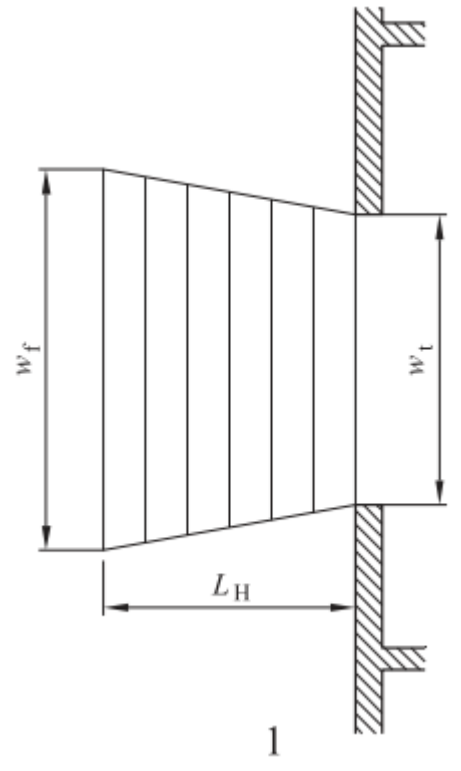
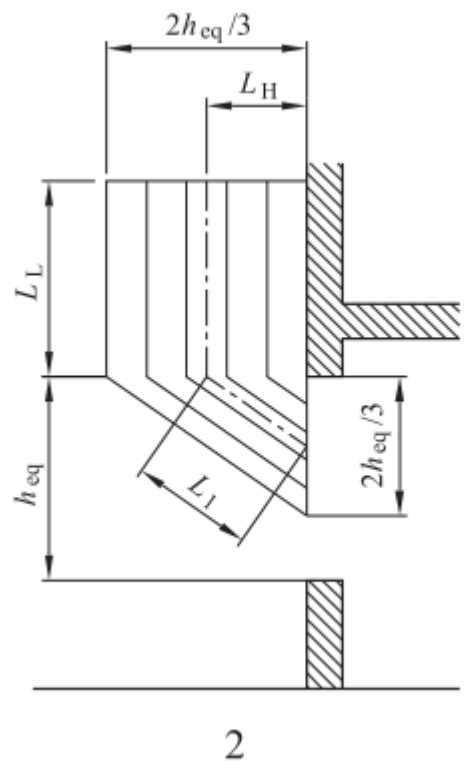
Nel ns. caso $h_{eq} = 2.35 \text{ m}$

$w_t = 29,6 \text{ m}$

$h_{eq} < 1.25 w_t$

per cui

$L_H = 2,35/3 = 0.78 \text{ m}$



(7) La lunghezza della fiamma lungo l'asse, è data da:

quando $L_L > 0$,

$$L_f = L_L + h_{eq} / 2$$

se esiste una parete sopra la finestra e se $h_{eq} \leq 1,25 w_t$ (B.12)

$$L_f = (L_L^2 + (L_H - h_{eq} / 3)^2)^{1/2} + h_{eq} / 2$$

se non esiste una parete sopra la finestra o se $h_{eq} > 1,25 w_t$ (B.13)

quando $L_L = 0$ allora anche $L_f = 0$.

$$L_f = L_L + h_{eq} / 2 = 2,74 \text{ m}$$

(8) La temperatura della fiamma nella finestra è data da:

$$T_w = 520 / [1 - 0,4725 (L_f \cdot w_t / Q)] + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{B.14})$$

con $L_f \cdot w_t / Q < 1$

$$L_f \cdot w_t / Q = 0,35 < 1$$

$$T_w = 644 \text{ } ^\circ\text{C}$$

FORMULE DEL CODICE

5. La potenza termica radiante dell'incendio convenzionale E_1 è imposta come segue in funzione del carico di incendio specifico q_f del compartimento retrostante l' i -esima piastra radiante:

se $q_f > 1200 \text{ MJ/m}^2$:

$$E_1 = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1000 + 273,16)^4 = 149 \text{ kW/m}^2 \quad \text{S.3-6}$$

se $q_f \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$:

$$E_1 = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (800 + 273,16)^4 = 75 \text{ kW/m}^2 \quad \text{S.3-7}$$

Nel nostro caso, attraverso il calcolo eseguito, si può assumere

$$T = 644 + 273,16 = 917,16 \text{ K}$$

$$E_1 = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 917,16^4 = 40120 \text{ w/m}^2 = 40 \text{ kw/m}^2$$

Assai inferiore ai 75 Kw/m² previsti dal codice.

Occorre dimostrare che

$$F_{2-1} \cdot E_1 \cdot \varepsilon_f < E_{\text{soglia}} \quad \text{S.3-3}$$

con:

F_{2-1} fattore di vista

E_1 potenza termica radiante dovuta all'*incendio convenzionale* [kW/m²]

ε_f emissività della fiamma

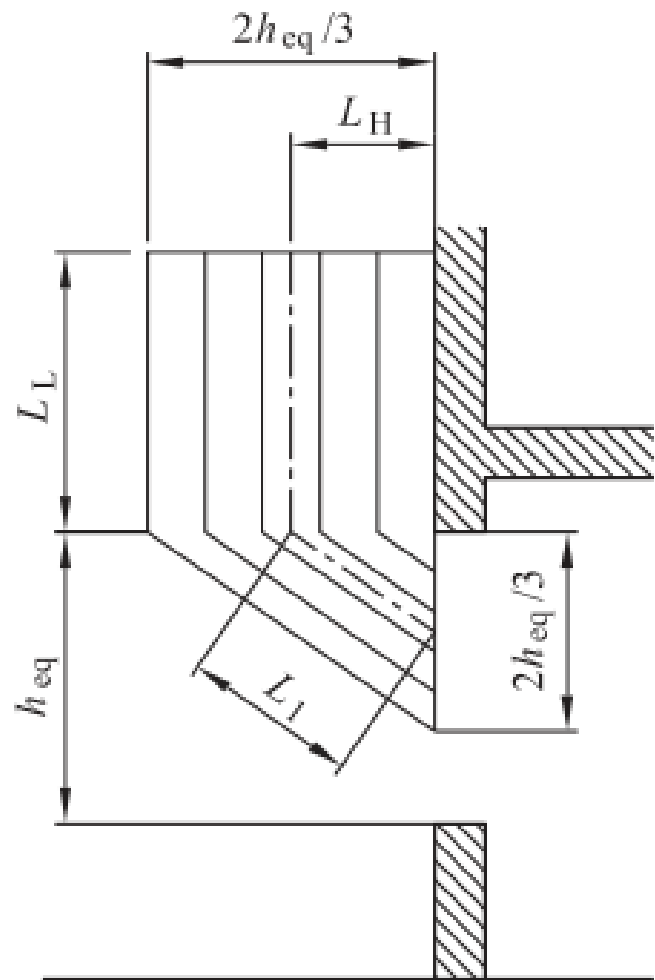
E_{soglia} soglia di irraggiamento dell'incendio sul bersaglio [kW/m²]

(11) L'emissività della fiamma può essere valutata come:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f}$$

dove:

d_f è lo spessore della fiamma [m].



2

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-(0.3 \cdot 2/3 \cdot 2.35)} = 0,37$$

Da calcoli eseguiti risulta:

$$F_{2-1} = 2/\pi \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) = 0,097$$

$$F_{21} * E_1 * \epsilon_f = 1,44 < 12,6 \text{ Kw/ m}^2$$

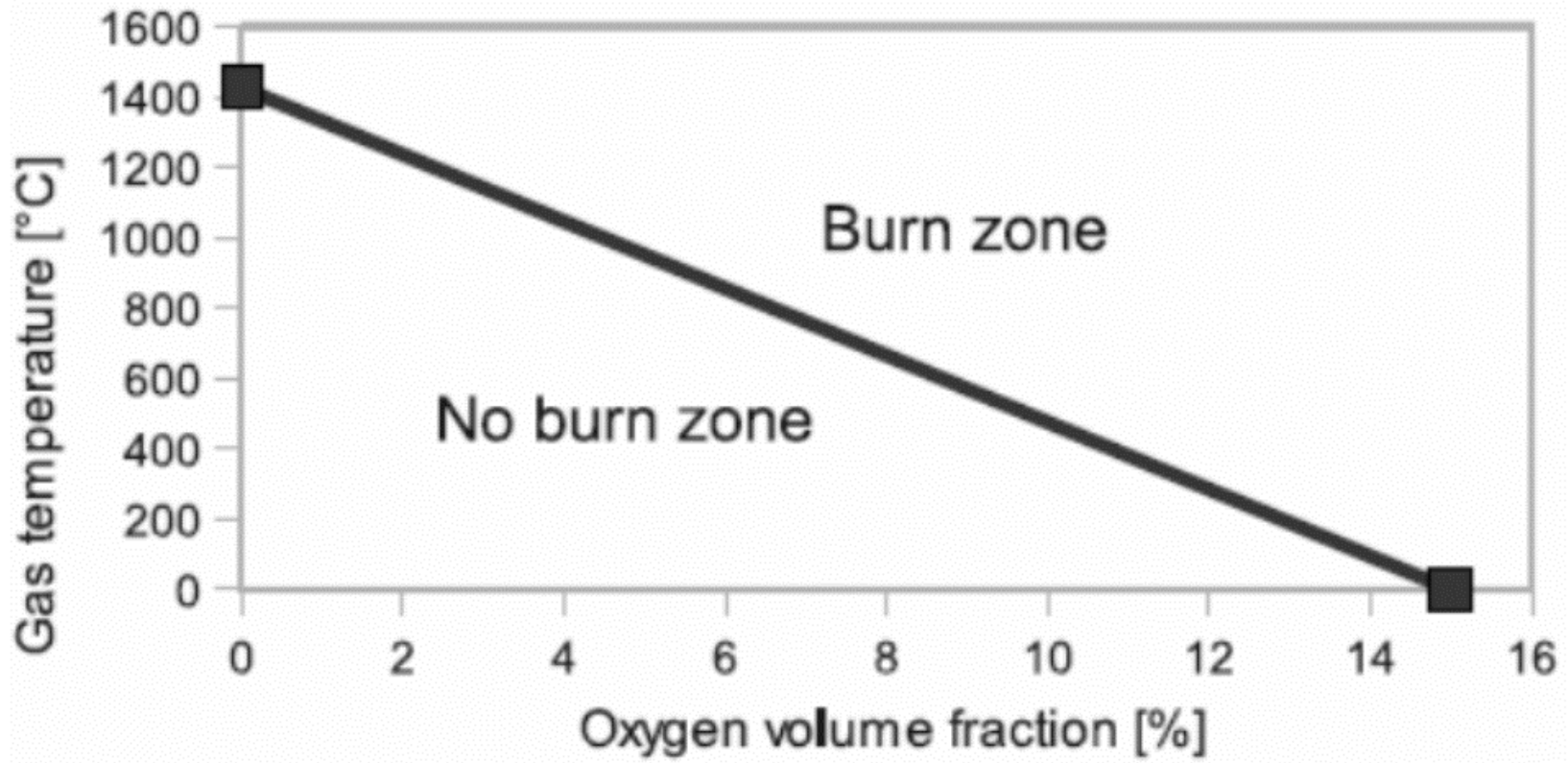
INCENDI IN AMBIENTI NON VENTILATI

L'energia derivante dalla completa combustione dei materiali depositati nel magazzino sarebbe di $q_f \times A_f = 480 \text{ m}^2 \times 1146,2 = 550.080 \text{ MJ}$.

Supponendo che nel magazzino, non vi sia afflusso d'aria nella fase iniziale, il volume d'aria disponibile sarebbe

$$V = 480 \times 7,30 = 3.504 \text{ m}^3$$

La concentrazione minima di ossigeno a 500° per la combustione viene considerata cautelativamente al 9%.



Nell'aria la % di O₂ è il 21%.

Il volume di ossigeno utilizzato nella combustione fino al raggiungimento del 9% sarà

$$VO_2 = 3504 \times (21-9)/100 = 420,5 \text{ m}^3$$

E' noto dalla letteratura tecnica che l'energia termica rilasciata dai combustibili per unità di volume è di circa $H_{O_2} 17 \times 10^3 \text{ KJ/m}^3_{O_2}$

Si avrà che l'energia limite che potrebbe svilupparsi in assenza di ventilazione sarebbe di

$$E_{\text{limite}} = 420,5 \times 17.000 = 7.148,2 \times 10^3 \text{ KJ} = 7.148,2 \text{ MJ}$$

Di molto inferiore all'energia che si sarebbe potuta sviluppare dalla combustione di tutto il materiale presente.

Trattandosi di incendio a sviluppo rapido $t_{\alpha} = 150 \text{ sec}$

$$\text{Da cui } \alpha = 1000/150^2 = 0.0444$$

Il tempo limite in cui la combustione si arresterebbe spontaneamente è di

$T_{\text{limite}} = (3 \times V_{O_2} \times H_{O_2} / \alpha) 0.333 = 785 \text{ sec}$ (circa 13 minuti).

Inoltre l'RHR limite sarebbe pari a

$RHR_{\text{limite}} = \alpha \times t_{\text{limite}}^2 = 0.044 \times 785^2 = 27.332 \text{ kW}$

INCENDI IN AMBIENTI CON VENTILAZIONE LIMITATA

Si esamina inoltre il caso in cui le aperture consentono una ventilazione del 20% della loro superficie.

A seguito di prove di laboratorio (Kawagoe) è stato riscontrato che quando l'incendio raggiunge il suo massimo sviluppo la sua propagazione e la sua progressione dipende da uno specifico parametro, ovvero il fattore di ventilazione O :

$$O = \left[A_V \sqrt{h_{eq}} \right] / A_t$$

Se il fattore di ventilazione risulta superiore a $O > 0.06-0.07$ esiste la possibilità di flashover;

dove :

A_v è la somma delle superfici di ventilazione $A_{v,i}$ di altezza h_i

$$h_{eq} = \frac{\sum_i A_{v,i} h_i}{\sum_i A_{v,i}}$$

h_{eq} l'altezza equivalente

A_t la somma delle superfici che delimitano il compartimento.

Si avrebbe:

| Apertura | $A_{v,i}$ | h_i | $A_{v,i} \cdot h_i$ |
|--------------------|-----------|-------|---------------------|
| aperture ovest | 10,56 | 5,11 | 53,9616 |
| aperture ovest | 2,904 | 1 | 2,904 |
| Aperture sud | 27 | 2,5 | 67,5 |
| $A_v \text{ m}^2$ | 40,464 | | 124,3656 |
| $H_{eq} \text{ m}$ | 3,073488 | | |

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Superficie pareti | 990,6 |
| pavimento | 480 |
| soffitto | 480 |
| At m ² | 1950,6 |
| $O = Av \cdot heq^{0,5}/At =$ | 0,036367741 |

Essendo $O < 0.07$ non avverrebbe il Flashover.

Grazie dell'attenzione