



CAPITOLO 1

L'INCENDIO IN COMPARTIMENTO



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

L'incendio in un compartimento chiuso rappresenta il problema fondamentale della sicurezza antincendio negli edifici. Limitare la propagazione delle fiamme e contenere, smaltendoli verso l'esterno, i fumi caldi, costituisce la sfida di ogni progetto antincendio, fatto salvo, ovviamente, l'obiettivo primario che resta quello di evitare "l'evento incendio".

La combustione dell'oggetto/oggetti nel compartimento inizialmente non è influenzata dalle condizioni esistenti nel compartimento ma, quando la concentrazione di ossigeno inizia a diminuire e le temperature interne iniziano a crescere, allora le condizioni del compartimento assumono un ruolo importante nel comportamento dell'incendio. Le fasi dell'incendio possono essere descritte nel modo seguente, con la precisazione che non si considerano in questa analisi i fuochi covanti (smoldering fires) e la fase di decadimento dell'incendio stesso.



1. **Fase di innesco:** è la fase principale dell'incendio, dove i vapori delle sostanze combustibili, siano esse solide o liquide, iniziano il processo di combustione. In questa fase la combustione è ancora controllabile.
2. **Fase di sviluppo:** in seguito all'accensione di materiale combustibile, l'incendio si sviluppa intorno a questo materiale e può coinvolgere altri oggetti combustibili vicini. La concentrazione di O₂ e le temperature non sono molto differenti da quelli normali, anche se localmente possono essere elevate, e l'incendio si comporta come se la combustione avvenisse all'aria aperta
3. **Fase di Flashover:** il flashover rappresenta un drammatico incremento delle condizioni d'incendio, dovuto al suo confinamento. Può essere provocato da diverse situazioni:
 - la rapida accensione e propagazione di fiamme a causa del'aumento del flusso termico;



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

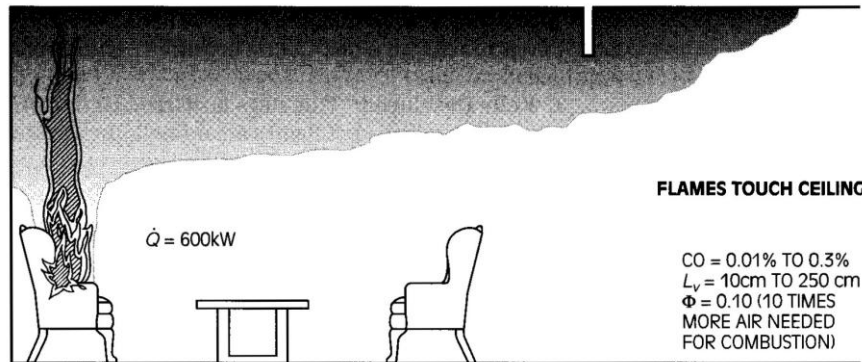
l'accumulo di gas caldi combustibili e la loro improvvisa accensione quanto entrano in contatto con aria ricca di O₂;
- l'aumento del tasso di combustione \dot{m}'' e la rapida propagazione di fiamme attraverso la stanza/compartimento.

3. **Incendio generalizzato**: tutto il materiale presente partecipa alla combustione, la temperatura raggiunge valori elevatissimi (anche oltre 1000 °C) e la combustione è incontrollabile. La fase è controllata solo dalla ventilazione.
4. **Raffreddamento**: fase, solitamente, post-conclusiva dell'incendio e che comporta il raffreddamento della zona interessata ed è in concomitanza con il solidificarsi al suolo delle sostanze volatili più "pesanti" dei residui della combustione

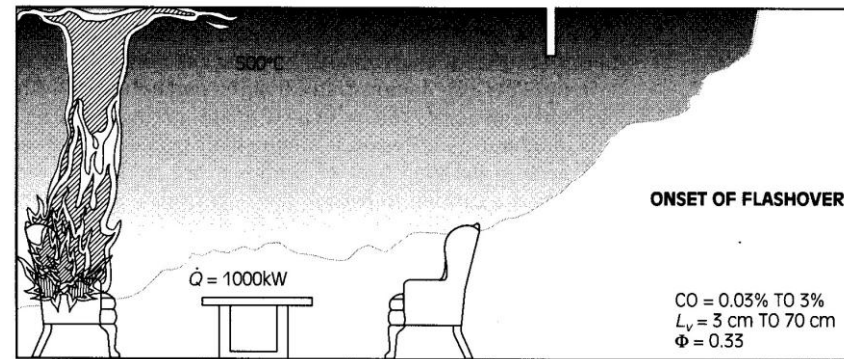


Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

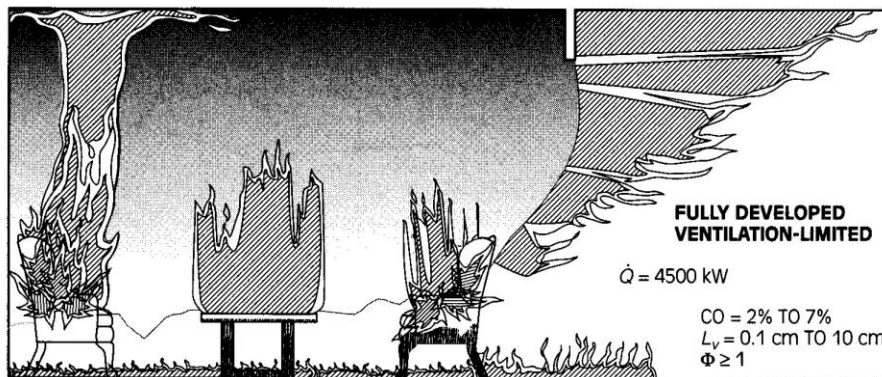
Si riportano tre immagini esemplificative delle fasi dell'incendio.



(a)

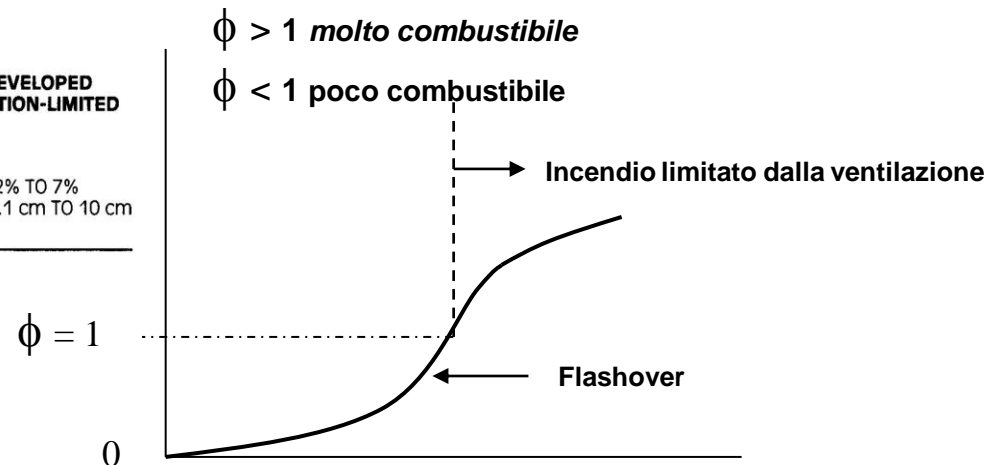


(b)



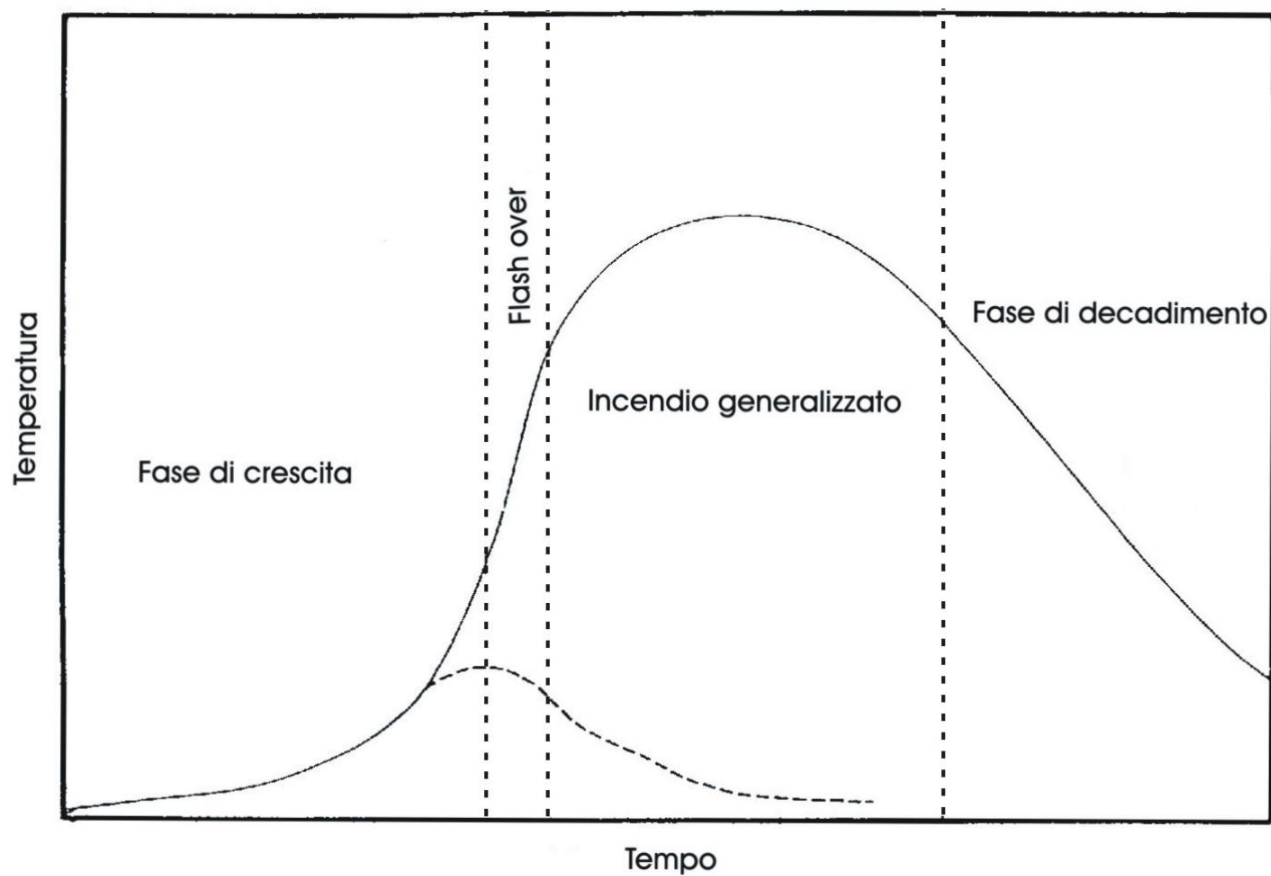
(c)

Il grafico invece correla il rapporto di equivalenza con le fasi di incendio





Il grafico rappresenta la classica rappresentazione delle varie fasi di un incendio, compresa la fase di decadimento





La velocità di crescita dell'incendio

La velocità di crescita dell'incendio dipende dal processo di accensione, dalla propagazione delle fiamme che ne definiscono il perimetro e dal tasso di combustione. Per incendi che coinvolgono mobili, suppellettili o merci varie non è possibile descrivere il fenomeno con semplici formule. In ogni caso ogni oggetto coinvolto dalla combustione deve avere un suo caratteristico tempo di crescita. Per convenzione, si è fissato questo tempo come quello necessario per ottenere un picco del tasso di rilascio dell'energia termica pari ad 1MW. Varie sperimentazioni, su varie scale, hanno permesso la compilazione di tabelle di materiali ed oggetti che riportano questo valore. Si è anche trovato che il tasso di rilascio termico segue approssimativamente una legge proporzionale al quadrato del tempo

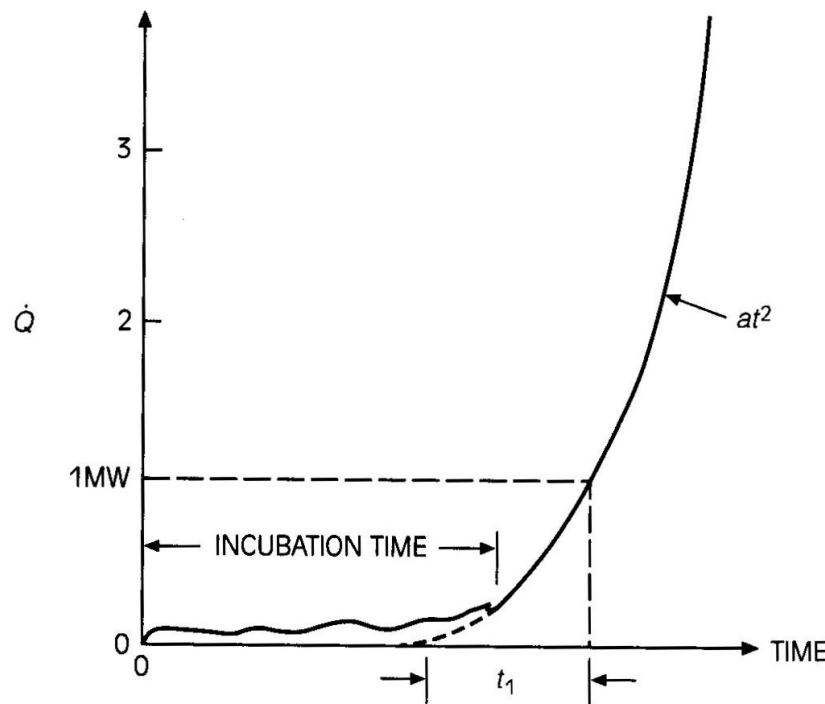
$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (\text{Equ. 1.1})$$

dove α è una costante associata all'oggetto. Se t_1 è il tempo caratteristico per raggiungere 1 MW, allora $\alpha = 1 \text{ MW}/(t_1)^2$



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Questa espressione è stata correlata con dati sperimentali, tralasciando la parte iniziale dell'incendio, e ottenendo il seguente grafico:



La relazione quadratica si è dimostrata utile per una prima classificazione del tipo di incendio ed è stata adottata dalle NFPA 72B NFPA 92B per standardizzare gli incendi in relazione agli impianti di rivelazione ed ai sistemi di gestione dei fumi. La classifica adottata prevede:

Crescita lenta $\rightarrow t_1 = 600 \text{ s}$

Crescita media $\rightarrow t_1 = 300 \text{ s}$

Crescita veloce $\rightarrow t_1 = 150 \text{ s}$

Crescita ultraveloce $\rightarrow t_1 = 75 \text{ s}$

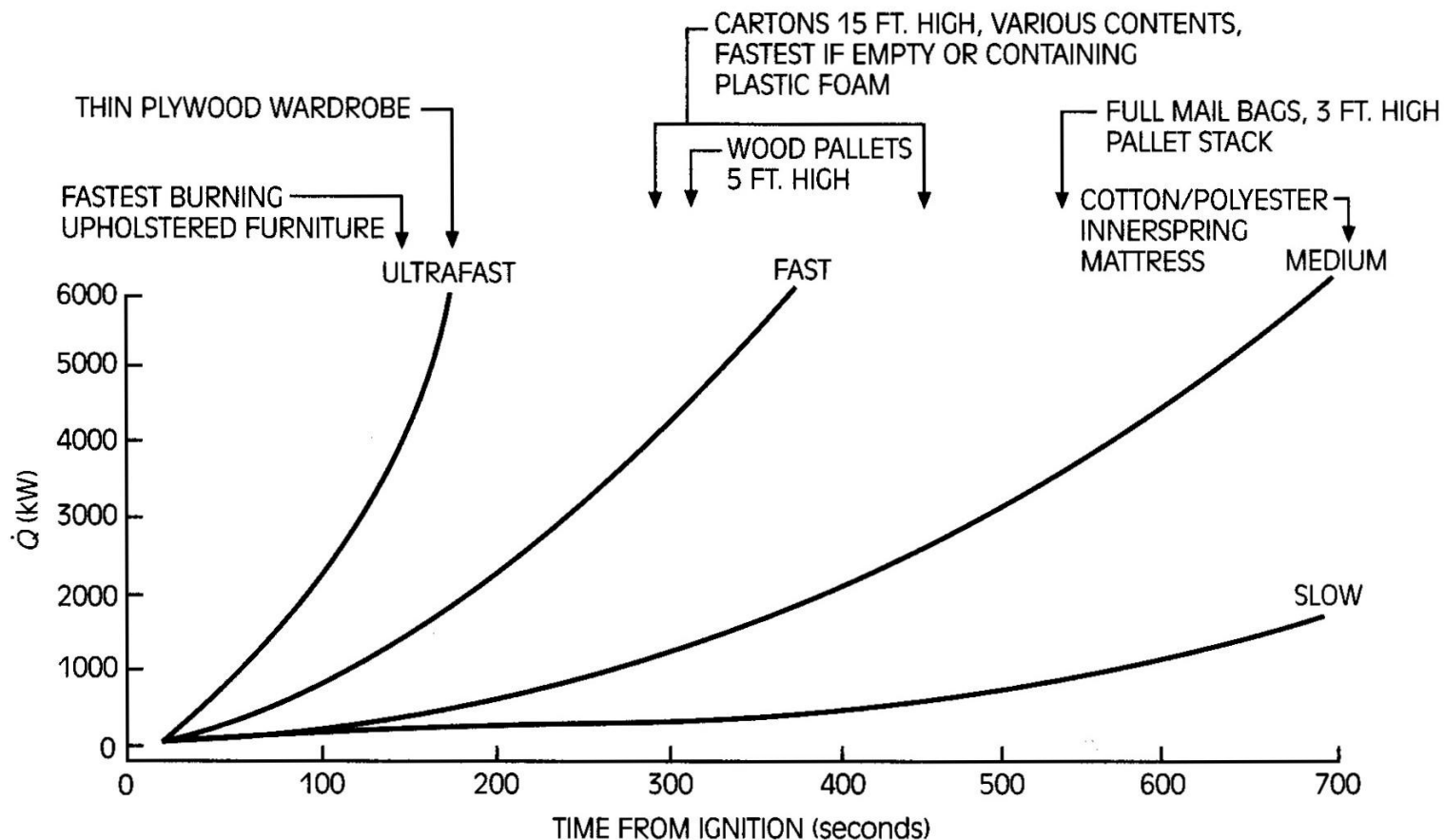


Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Characteristic times to reach 1 MW for t^2 fires.

Commodity	t_1 (s)
Wood pallets, stacked 1 1/2 ft high	155–310
Wood pallets, stacked 5 ft high	92–187
Wood pallets, stacked 10 ft high	77–115
Wood pallets, stacked 16 ft high	72–115
Mail bags, filled, stored 5 ft high	187
Cartons, compartmented, stacked 15 ft high	58
Paper, vertical rolls, stacked 20 ft high	16–26
Cotton, polyester garments in 12 ft high rack	21–42
“Ordinary combustibles” rack storage, 15–30 ft high	39–262
Paper products, densely packed in cartons, rack storage, 20 ft high	461
PE letter trays, filled, stacked 5 ft high on cart	189
PE trash barrels in cartons, stacked 15 ft high	53
PE bottles packed in compartmented cartons, 15 ft high	82
PE bottles in cartons, stacked 15 ft high	72
PE pallets, stacked 3 ft high	145
PE pallets, stacked 6–8 ft high	31–55
PU mattress, single, horizontal	115
PU insulation board, rigid foam, stacked 15 ft high	7
PS jars packed in compartmented cartons, 15 ft high	53
PS tubs nested in cartons, stacked 15 ft high	115
PS insulation board, rigid foam, stacked 14 ft high	6
PUS bottles packed in compartmented cartons, 15 ft high	8
PP tubs packed in compartmented cartons, 15 ft high	9
PP and PE film in rolls, stacked 14 ft high	38
Distilled spirits in barrels, stacked 20 ft high	24–39

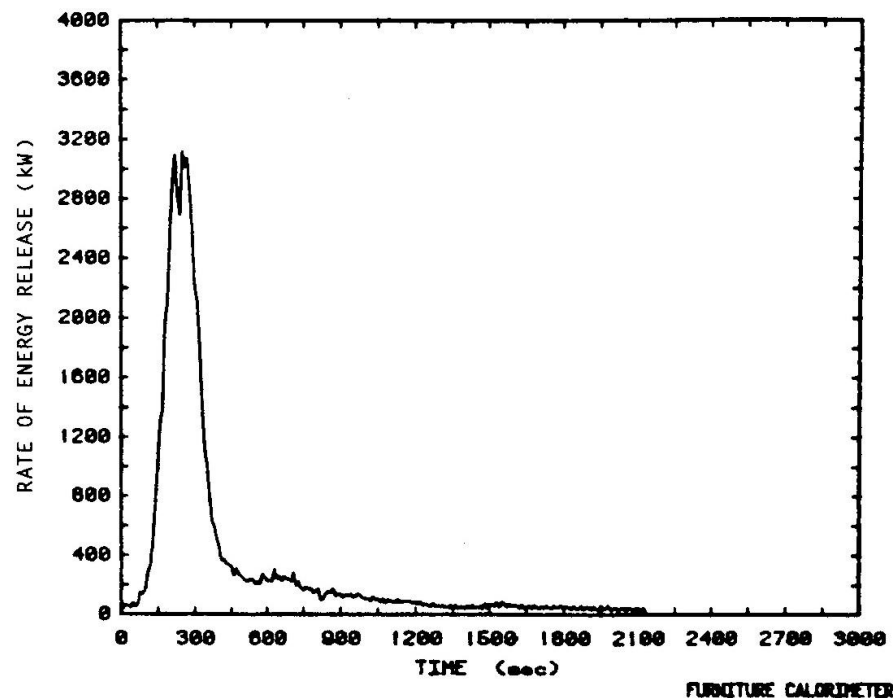
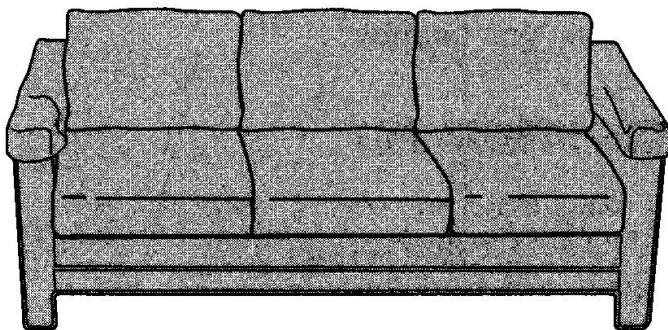
La tabella affianco riporta i tempi caratteristici per vari materiali variamente sistemati mentre il grafico riportato nella slide seguente compendia vari tipi di incendi con evoluzione quadratica



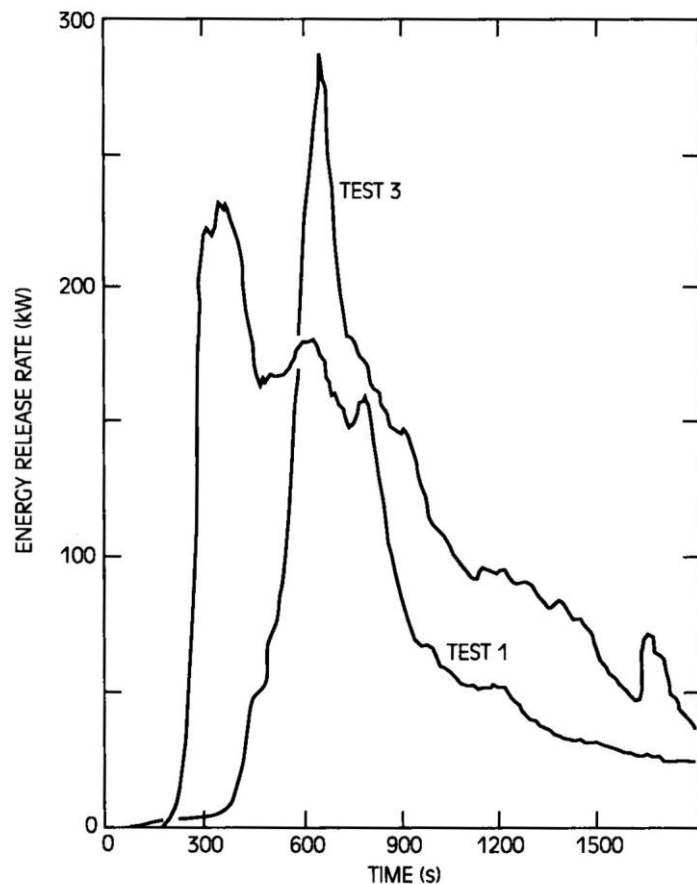


Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

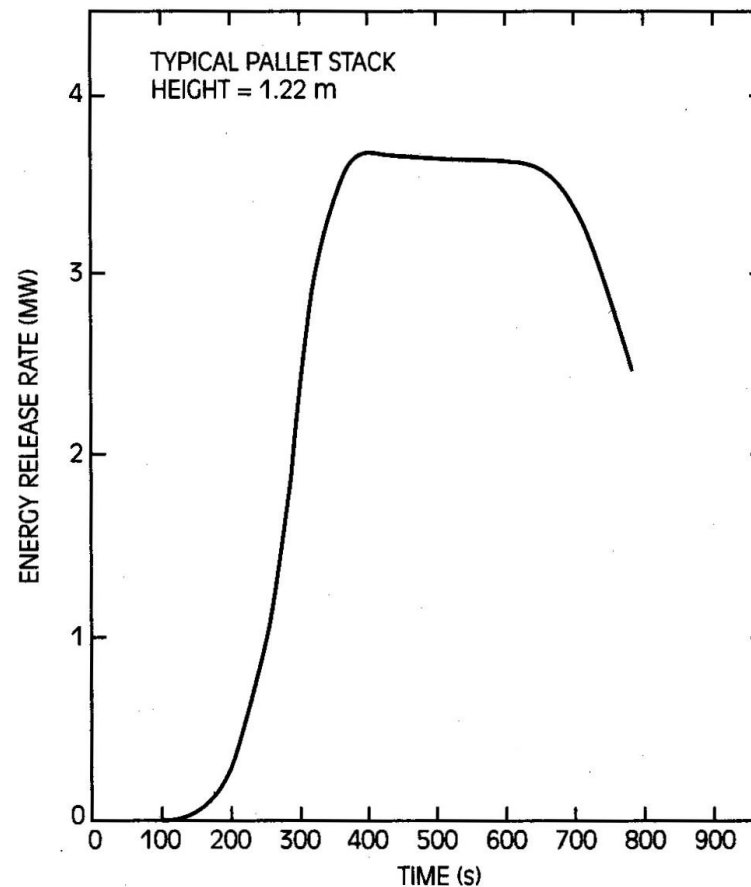
Di seguito sono riportati alcuni grafici che illustrano la curva di rilascio termico di alcuni materiali.



Divano a tre posti



Televisione



Catasta di pallets di legno



La crescita dell'incendio e la ventilazione

La ventilazione gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo di un incendio e pertanto è necessario capire gli ordini di grandezza delle portate di aria che si possono riscontrare in un compartimento. Infatti non bisogna pensare alla ventilazione soltanto in termini di porte aperte o di rotture dei vetri delle finestre: l'aria disponibile per una combustione affluisce da ogni zona di comunicazione tra il compartimento e l'ambiente esterno. Anche le infiltrazioni naturali degli infissi e delle strutture, in particolari edifici, possono costituire quantità notevoli di aria per la combustione. Il modello che è stato usato per descrivere la correlazione tra ventilazione e potenza termica rilasciata consiste nel bilanciamento di due termini.

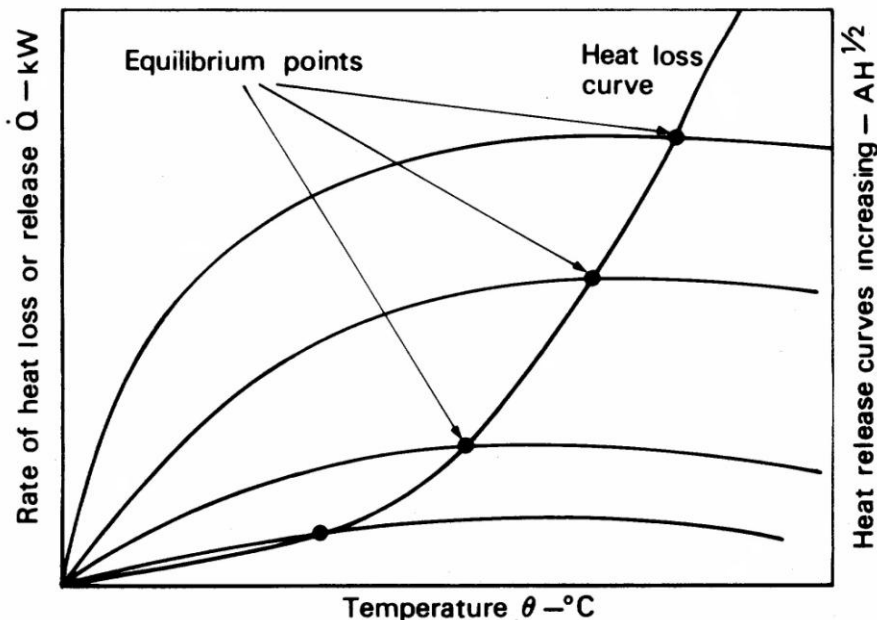
- Il calore rilasciato, espresso in termini di aria che affluisce verso il locale;
- Le perdite di energia termica verso l'esterno.

Per entrambi i termini la velocità di trasporto termico è funzione della temperatura del compartimento. Pertanto una certa portata di aria permetterà all'incendio di crescere fino ad un punto di equilibrio in cui il

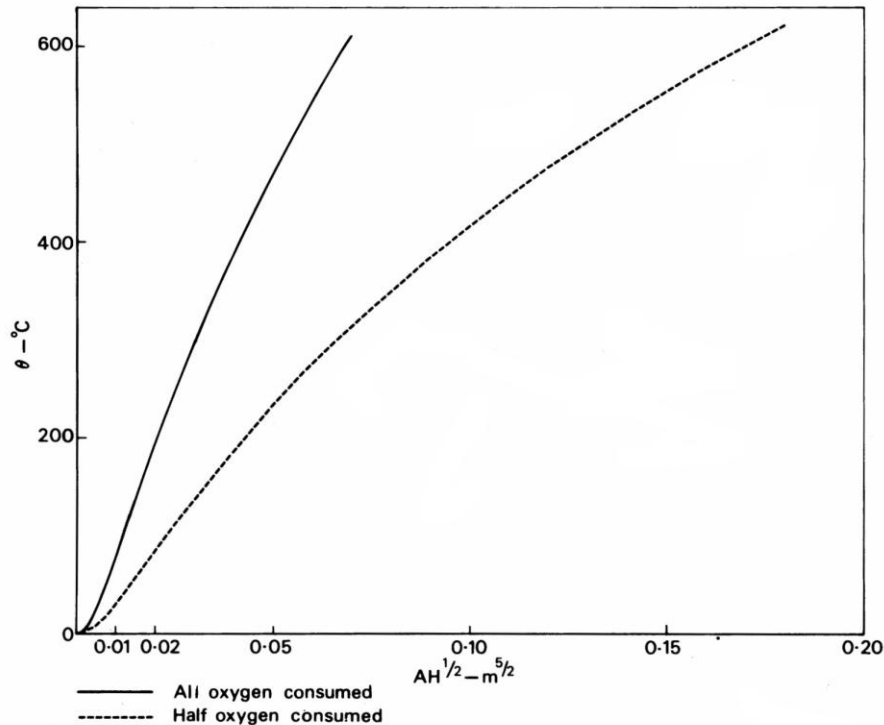


Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

calore prodotto uguaglia il calore disperso. Il punto di equilibrio è stabile se l'incendio è controllato dalla disponibilità di aria e quindi, se non avvengono altre modificazioni nel sistema, l'incendio non crescerà ulteriormente. Se invece accadrà, per esempio, la rottura di una finestra, la crescita riprenderà verso un altro punto di equilibrio. Tale situazione è sintetizzata nel grafico seguente.



L'intersezione delle curve del tasso di rilascio termico con la curva delle perdite di calore fornisce i punti di equilibrio. Graficando i valori della temperatura del compartimento ai vari punti di equilibrio in funzione del fattore di ventilazione $A_w h^{1/2}$ otteniamo la correlazione con le aperture di ventilazione, così come illustrato nel grafico seguente.



Per dare un'idea dell'intervallo dei valori di $A_w h^{1/2}$ si deve pensare che una porta aperta (che probabilmente permetterà una crescita ininterrotta fino al flashover) ha un $A_w h^{1/2}$ di circa $2.25 \text{ m}^{5/2}$ mentre un $A_w h^{1/2} = 0.01 \text{ m}^{5/2}$ corrisponde ad una apertura quadrata di 160 mm di lato. Occorre valutare correttamente il fattore di apertura. Se in un compartimento esistono diverse aperture la cui forma,

altezza e distanza del davanzale dal pavimento è simile, allora è possibile semplicemente sommare i vari $A_w h^{1/2}$ ma se invece la situazione geometrica è più complessa questa approssimazione non è più valida in quanto l'asse neutro è la risultante degli assi neutri delle varie aperture. Studi effettuati da Bullen sull'efficacia di buone chiusure in un compartimento sotto per bloccare la crescita dell'incendio hanno



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

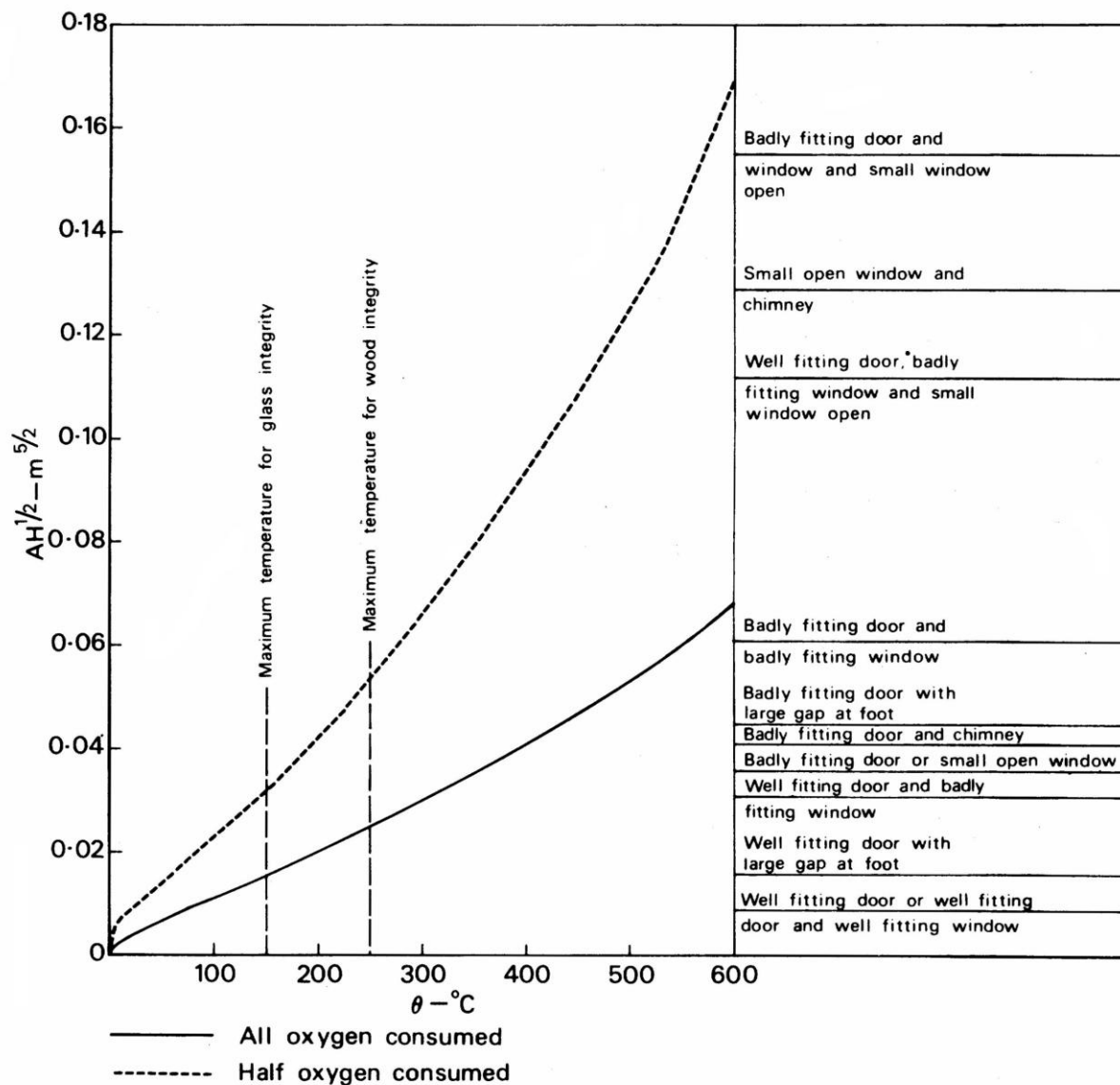
dimostrato che una porta ben chiusa, nel senso che le infiltrazioni sono ridotte al minimo, equivale ad un'apertura quadrata di 150 mm e con **fattore di ventilazione pari a $0.009 \text{ m}^{5/2}$** , disposta in modo baricentrica rispetto all'asse neutro. Essa corrisponde ad una porta 2 x 0.8 m con connessure da 1 mm. Nell'ipotesi che tale porta abbia una connessura inferiore, a livello di pavimento, pari a 10 mm, il fattore di apertura sale a **$0.016 \text{ m}^{5/2}$** . Nel caso la connessura superiore sia pari a 4 mm il fattore di apertura vale **$0.036 \text{ m}^{5/2}$** .

Se la temperatura del compartimento supera i 500 °C è facile che ci si trovi in prossimità del flashover. A questa temperatura una porta ordinaria in legno resiste per pochi minuti. Sotto i 250°C la carbonizzazione del legno è molto lenta ma oltre questo valore la velocità di reazione aumenta rapidamente. Nella slide seguente è riportato un grafico che mostra la coorelazione tra l'aumento di temperatura, rispetto all'ambiente, del compartimento, il fattore di ventilazione, la concentrazione di ossigeno. A fianco è riportata anche l'equivalenza in termini di infiltrazioni.

Corpo Nazionale Vigili del fuoco



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica





Il flashover

Il fenomeno del flashover, allo stato attuale degli studi, è considerato un fenomeno di instabilità del sistema incendio, secondo la teoria delle criticità sviluppata da Semenov. Il momento in cui il calore emesso dall'incendio non riesce più ad essere smaltito e inizia una fase di accumulazione, rappresenta la transizione da un regime ad un altro, transizione a cui si dà il nome di flashover. In una slide precedente si può osservare l'andamento del rapporto di equivalenza in funzione del tempo: **prima del flashover il rapporto è inferiore ad 1** in quanto brucia poco combustibile in relazione all'aria disponibile. Il rapporto stechiometrico – cioè **rapporto di equivalenza pari ad 1** – si raggiunge proprio nel momento del flashover.

Dopo si entra nella fase di incendio generalizzato dove tutto il combustibile brucia ed, al contrario, la disponibilità di aria diminuisce drasticamente: **il rapporto di equivalenza diventa maggiore di 1**.



In termini di equazioni possiamo quindi scrivere che all'inizio dell'incendio, quando il comportamento è simile a quello di fiamme all'aperto, l'equazione di bilancio dell'energia può essere scritto come:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \quad (\text{Equ. 1.2})$$

Durante la fase di crescita aumenta il contributo emissivo delle fiamme e pertanto l'equazione (1.2) si modifica:

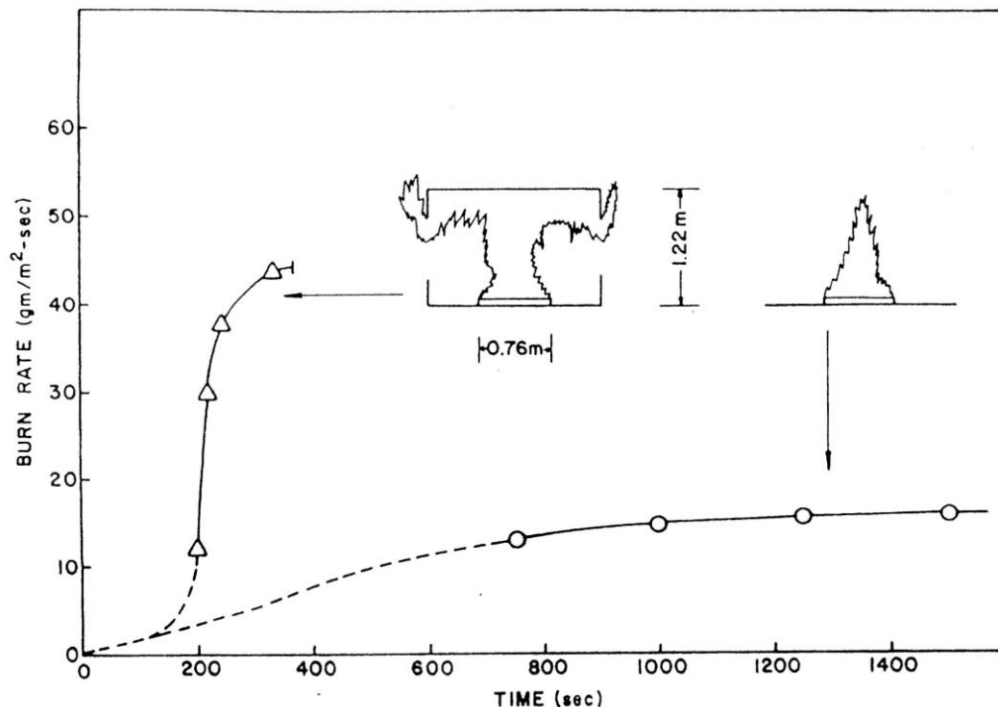
$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' + \dot{Q}_E'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \quad (\text{Equ. 1.3})$$

Per molti combustibili si può stimare che circa il 30% dell'energia termica liberata nelle fiamme è irraggiata verso l'ambiente circostante mentre il resto si disperde convettivamente nel pennacchio. Questa energia è assorbita dagli altri combustibili presenti con innalzamento della T superficiale. Se questa raggiunge la T_{ig} si ha accensione ed ulteriore contribuzione all'energia temica che si accumula all'interno.



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Nel grafico seguente si può osservare il comportamento di una lastra di polimetilmetacrilato, bruciata all'aperto e poi sotto una cappa che agiva come il soffitto e la parte superiore delle pareti di una stanza.



Il massimo tasso di combustione è tre volte più grande di quello all'aperto e viene ottenuto in circa un terzo del tempo. Questo effetto è abbastanza generale ma la sua magnitudo dipende dal tipo di combustibile e dalle dimensioni del compartimento.

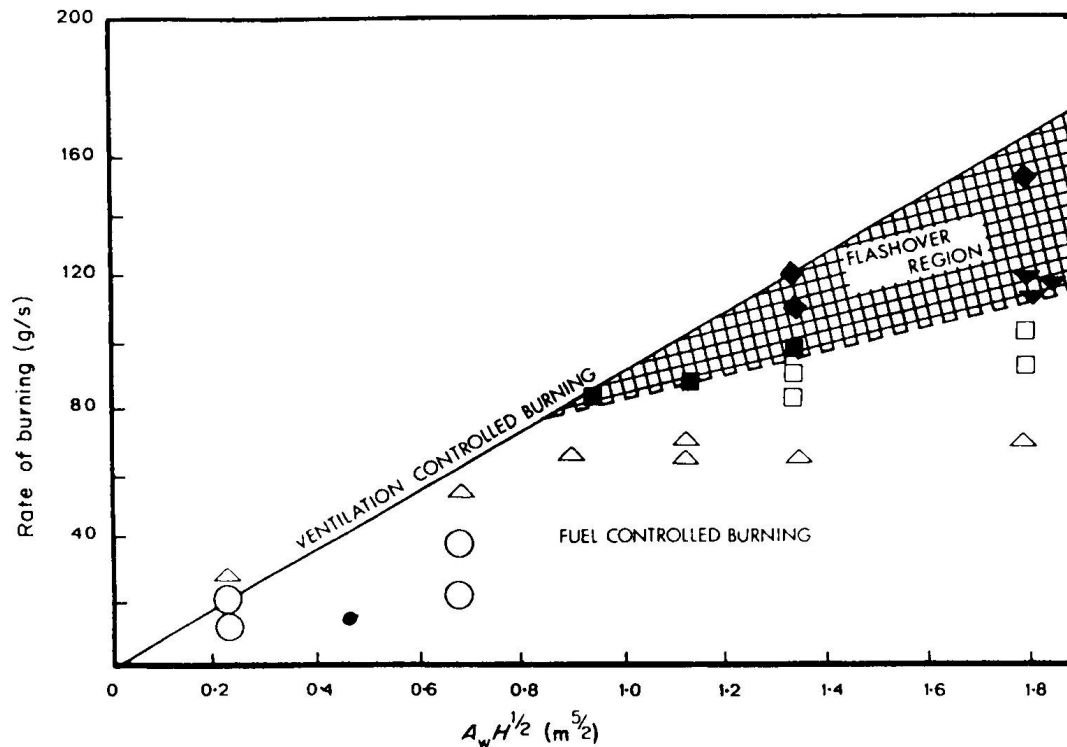
Esistono diversi approcci per stimare l'insorgenza del flashover dentro un locale. Essi si basano su bilanci semplificati di massa ed energia unitamente a correlazioni con sperimentazioni in locali di dimensioni e caratteristiche normalizzate.



La relazione originaria, proposta da Kawagoe nel 1958, correla area ed altezze delle aperture verticali di ventilazione con sperimentazioni effettuate mediante cataste di legno, quindi un carico d'incendio definito. Il tasso di combustione in un compartimento (è importante ricordare che questi “compartimenti” erano stanze di dimensioni ridotte) sotto condizioni di ventilazione limitate può essere calcolato mediante l'equazione:

$$\dot{m} = KA_w \sqrt{H} \cdot \cdot \cdot (kg / s) \quad (\text{Equ. 1.4})$$

dove A_w ed H sono rispettivamente l'area e l'altezza delle aperture di ventilazione e K una costante che vale circa $0.09 \text{ kg/m}^{5/2} \text{ s}$. Hagglund perfezionò le sperimentazioni su cataste di legno in un locale $2.9 \times 3.75 \times 2.7 \text{ m}$, monitorando continuamente il tasso di combustione. I dati furono riassunti nel grafico presentato nella slide successiva, dove il tasso di combustione è riportato in funzione del fattore $A_w H^{1/2}$. Si notò che gli incendi che raggiungevano il flashover (identificato da fiamme che fuoriuscivano dalla porta e temperature superiori ai 600°C sotto il soffitto)



sono distribuiti in una regione ben definita, quella identificata nel grafico da un retino. Si osservò che il flashover non avveniva per tassi di combustione inferiori ad 80 g/s e comunque esisteva un limite inferiore che variava con la ventilazione secondo la seguente espressione:

$$\dot{m}_{lim} = 50.0 + 33.3 A_w \sqrt{H} \dots (g / s) \quad (\text{Equ. 1.5})$$

Il tasso di combustione diventa indipendente dalla ventilazione per grandi valori di $A_w H^{1/2}$. Le considerazioni precedenti, sebbene relative ad un singolo compartimento alto 2.7 m, suggeriscono un principio più generale:



si deve superare – e mantenere per un certo tempo - un valore inferiore del tasso di combustione affinché avvenga il flashover. E' stato verificato che l'incendio di singoli mobili imbottiti può condurre al flashover se il loro tasso di combustione è abbastanza alto.

Esistono altre correlazioni semplici per stimare il tasso di rilascio termine **minimo** che può produrre il flashover per un determinato compartimento. Per esempio Thomas, eseguendo un bilancio semplificato di energia trovò una relazione in cui il primo termine rappresenta la superficie totale interna del compartimento ed il secondo invece l'entalpia che fuoriesce dalle aperture di ventilazione:

$$\dot{Q} = 7.8A_T + 378A\sqrt{h} \quad (\text{Equ. 1.6a})$$

Il parametro $A\sqrt{h}$ è usualmente chiamato “fattore di ventilazione” mentre quanto è diviso per l'area totale A_T viene definito “fattore di apertura”.



Babrauskas ha sviluppato un modello semplice per la stima dell'energia minima necessaria allo sviluppo del flashover, fissando il salto di temperatura a 575 °C:

$$\dot{Q} = 750A\sqrt{h} \quad (\text{Equ. 1.6b})$$

Anche Hagglund ha derivato un'espressione mediante un modello a due zone:

$$\dot{Q} = 1050A_T \left(\frac{1.2}{\frac{A_T}{A_w \sqrt{h}}} + 0.247 \right)^3 \quad (\text{Equ. 1.6c})$$

McCaffrey effettuò un'analisi di regressione su oltre cento sperimentazioni per ricavare una correlazione tra energia sviluppata nel compartimento e temperature nello strato superiore caldo.



Da questa correlazione ricavò la seguente equazione (equazione MQH):

$$\dot{Q}_{FO} = 740 \left(h_k A_T A_w \sqrt{h_w} \right)^{1/2} \quad (\text{Equ. 1.7})$$

dove \dot{Q} è espresso in kW, A_T e A_w in m² e h_k in kW/m² K. Il parametro A_T rappresenta la superficie totale del compartimento compresa l'area A_w delle aperture. Il valore di h_k può essere preso pari a $\sqrt{k\rho c / t}$ oppure può essere semplificato ponendolo pari a k/δ dove δ è lo spessore delle pareti del compartimento.

Nel lavoro originale k, ρ e c erano riferiti a pareti in cartongesso ed il tempo caratteristico t era fissato in 200 s, valore congruo per un incendio di mobile imbottito. \dot{Q}_{FO} rappresenta la potenza necessaria per produrre uno strato caldo di circa 500 °C sotto il soffitto. Il parametro h_k rappresenta il coefficiente di scambio dell'equ. $\dot{Q}_{loss} = h_h A_T (T - T_\infty)$

L'equ. 1.7 ha una particolarità: un aumento del 100% di uno dei parametri A_T , A_w e h_k produce un incremento di solo il 41% della potenza necessaria per ottenere il flashover.



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

La relazione di MQH è interessante nello studio dell'evoluzione di un incendio di compartimento perché fornisce la crescita di temperatura prima del flashover. Essa si scrive:

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 1.63 \left(\frac{\dot{Q}}{c_p \rho_{\infty} T_{\infty} A_w \sqrt{g h_w}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{c_p \rho_{\infty} A_w \sqrt{g h_w}} \right)^{-1/3} \quad (\text{Equ. 1.8})$$

Assumendo: $C_p=1$ kJ/kg K, $\rho_{\infty}=1.18$ kg/m³, $T_{\infty}=295$ K, $g=9.81$ m/s² si ottiene l'espressione semplificata:

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{h_k A_T A_w \sqrt{h_w}} \right)^{1/3} \quad (\text{Equ. 1.9})$$

dove

$$h_k = \sqrt{\frac{k \rho c_p}{t}} \quad \dots \quad \text{per } t \leq t_p$$

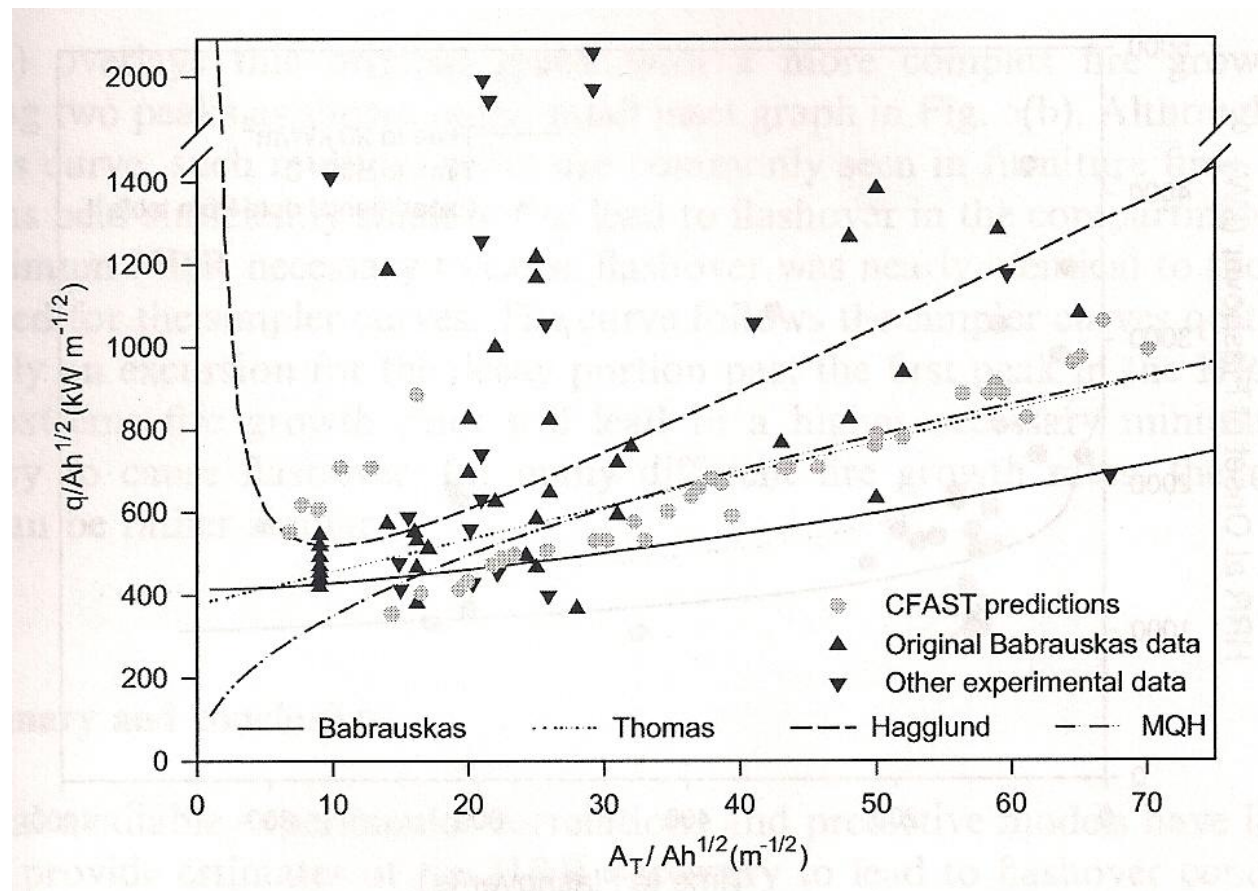
$$h_k = \frac{k}{\delta} \quad \dots \quad \text{per } t > t_p$$

$$t_p = \frac{\rho c_p}{k} \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \quad \text{Tempo di penetrazione (s)}$$



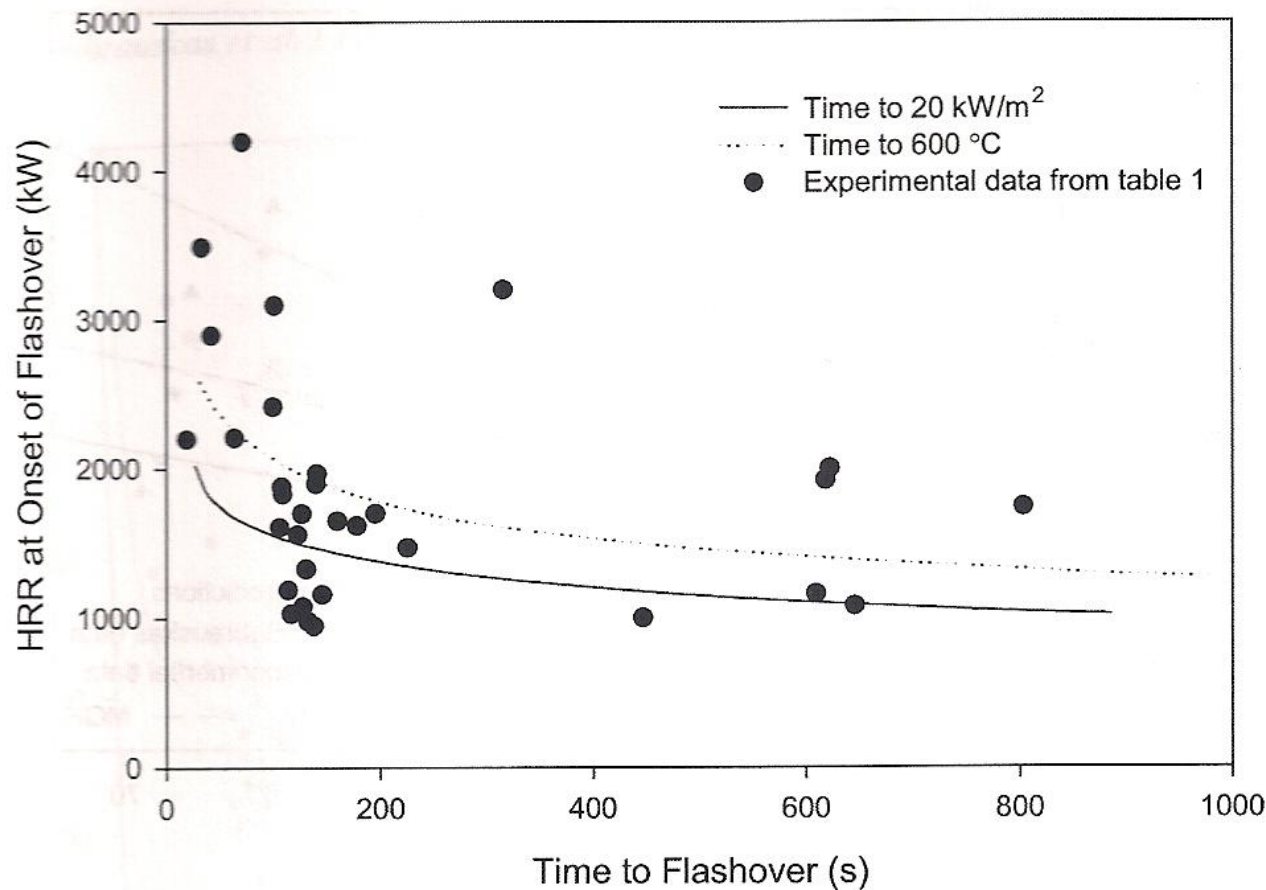
Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Il grafico sottostante mostra la correlazione, in funzione dell'inverso del fattore di apertura, tra potenze minime al flashover ricavate sperimentalmente e quelle ricavabile dalle espressioni precedenti.





Il grafico sottostante mostra invece la predizione della potenza minima al flashover per incendi di tipo t^2 e comparate con dati sperimentali.





Il postflashover

Immediatamente dopo il flashover le superfici esposte di tutti gli oggetti combustibili nel compartimento prenderanno fuoco ed il tasso di rilascio termico si incrementerà fino ad un massimo, producendo elevate temperature. Queste si manterranno fino a quando il tasso di combustione comincia a decrescere per mancanza di combustibile. E' in questa fase di incendio generalizzato che gli elementi strutturali del compartimento sono fortemente sollecitati dal punto di vista termico/meccanico e possono collassare. La ventilazione e la natura, la distribuzione e la quantità del combustibile disponibile hanno una significativa importanza sulla severità dell'incendio.

Gli studi effettuati negli anni '50 soprattutto in Giappone hanno dimostrato come il tasso di combustione dipenda fortemente dalle dimensioni e dalla forma delle aperture di ventilazione.

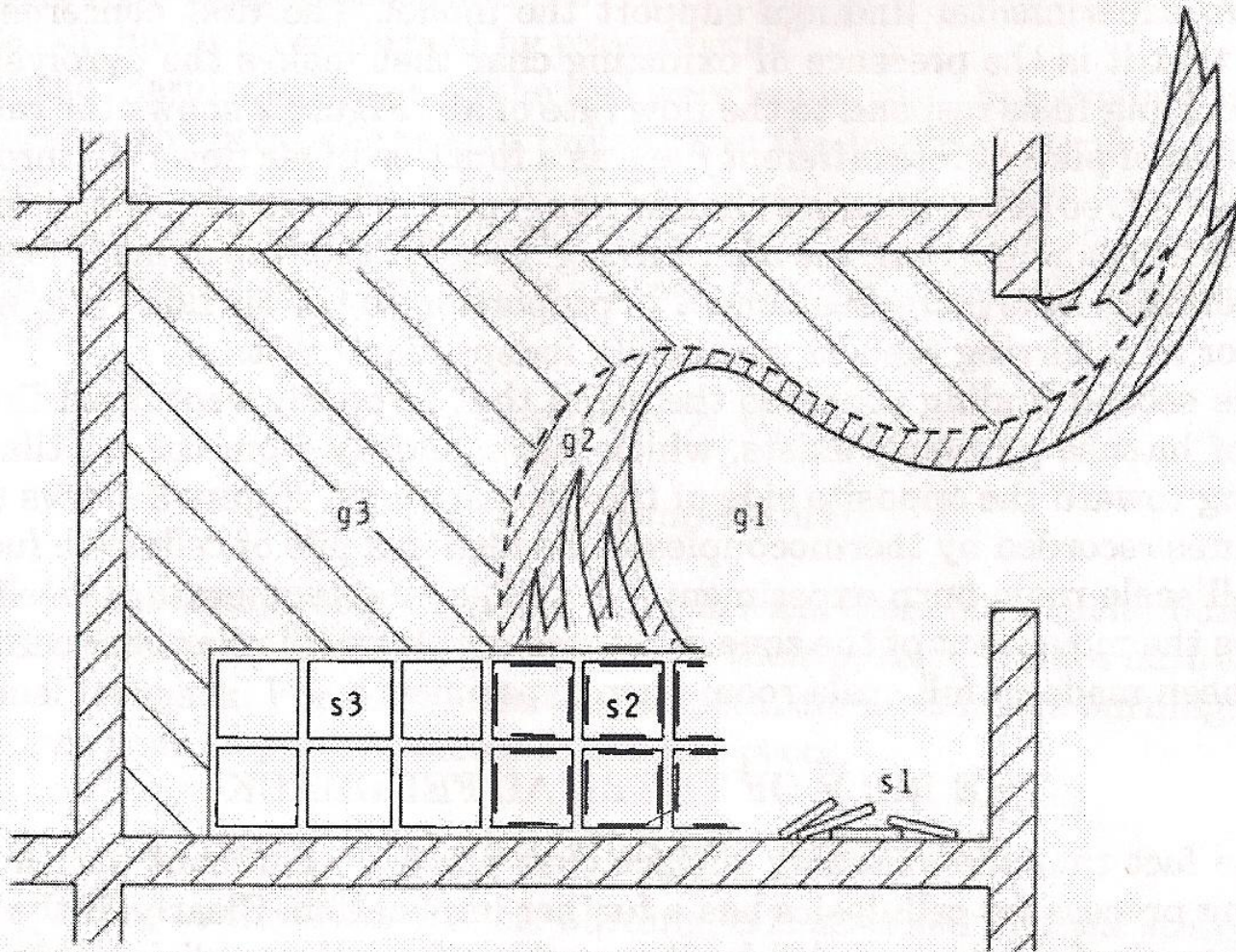


Figure 1. Modeling of fully developed compartment fires: char forming fuels.



L'equazione che correla molto bene il tasso di combustione con le caratteristiche di ventilazione rimane quella di Kawagoe che riscriviamo con diversa unità di misura:

$$\dot{m} = 5.5 A_w \sqrt{H_0} \cdot (kg / min) \quad (\text{Equ. 1.10})$$

Qualche volta la costante numerica non rappresenta bene il modello da descrivere e numerosi studi successivi hanno rilevato che esiste un intervallo di valori del fattore di ventilazione entro cui la relazione è particolarmente valida. L'interpretazione corrente è che dentro questo intervallo il tasso di combustione è controllato dalla velocità con cui l'aria può affluire nel compartimento: in pratica si tratta di incendi controllati dalla ventilazione come nel postflashover. Si deve comunque tener presente che se le aperture di ventilazione diventano più grandi, si raggiungerà una condizione in cui il tasso di combustione diventa indipendente dalla grandezza delle aperture ed è invece determinato dall'area del materiale che brucia e dalle sue caratteristiche. Questa deviazione dell'equ. 5.10



è ben illustrata nel grafico seguente elaborato da Thomas.

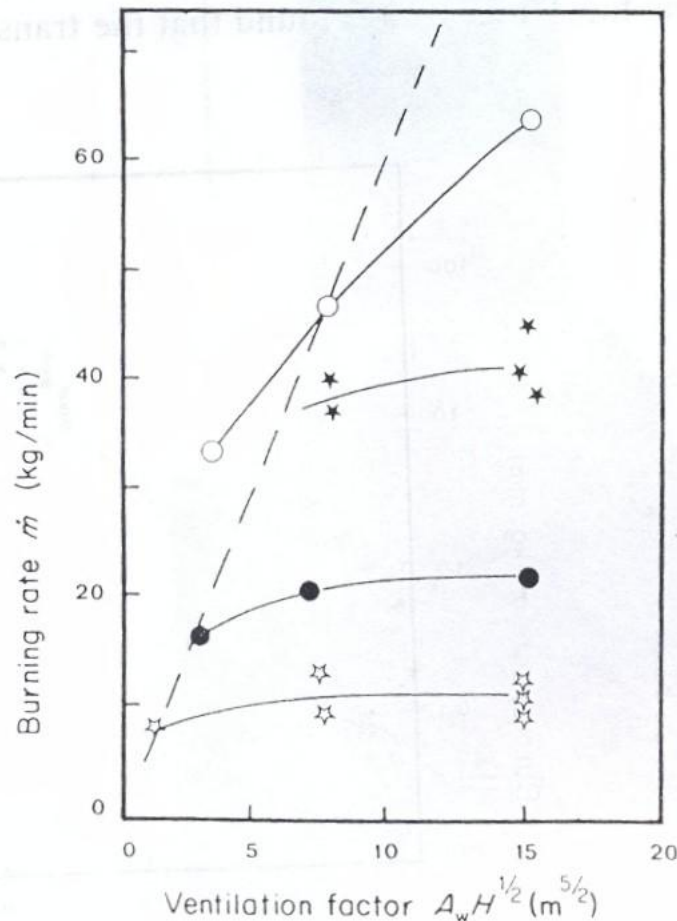


Figure 10.2 Variation of mass burning rate with $A_w H^{1/2}$ for large ventilation openings and different fire loads (wood cribs). ☆ 7.5 kg/m²; ● 16 kg/m²; ★ 30 kg/m²; ○ 60 kg/m². Dashed line (---) represents Equation (1) for the ventilation-controlled fire (Thomas *et al.*, 1967). (Reproduced by permission of The Controller, HMSO. © Crown Copyright.)



Nel momento in cui si instaura il postflashover il compartimento può essere modellato come una camera di combustione ben miscelata e quindi scompaiono le divisioni tra le due zone superiore ed inferiore. I gas caldi lasciano il compartimento sopra l'asse neutro mentre aria fresca affluisce sotto di esso e questi flussi sono pilotati solo dalle forze di galleggiamento. Inoltre si ipotizza che non ci nessuna interazione tra flusso in entrata e flusso in uscita. Valgono pertanto le relazioni già illustrate nel capitolo 4.

Law e Thomas hanno elaborato per questa fase dell'incendio una espressione per calcolare il picco di temperatura che può aversi nel compartimento. Nel caso di ventilazione naturale si ha

$$\Delta T_{\max} = 6000 \left[\frac{(1 - e^{-0.036\eta})}{\eta^{1/2}} \right] (1 - e^{-0.05\psi})$$

Dove A_T =area totale escluse sup. ventilazione A_W

$$\eta = (A_T / A_W H^{1/2})$$

$$\psi = L_f / (A_T A_W)^{1/2}$$

L_f = carico d'incendio in kg equivalenti di legno

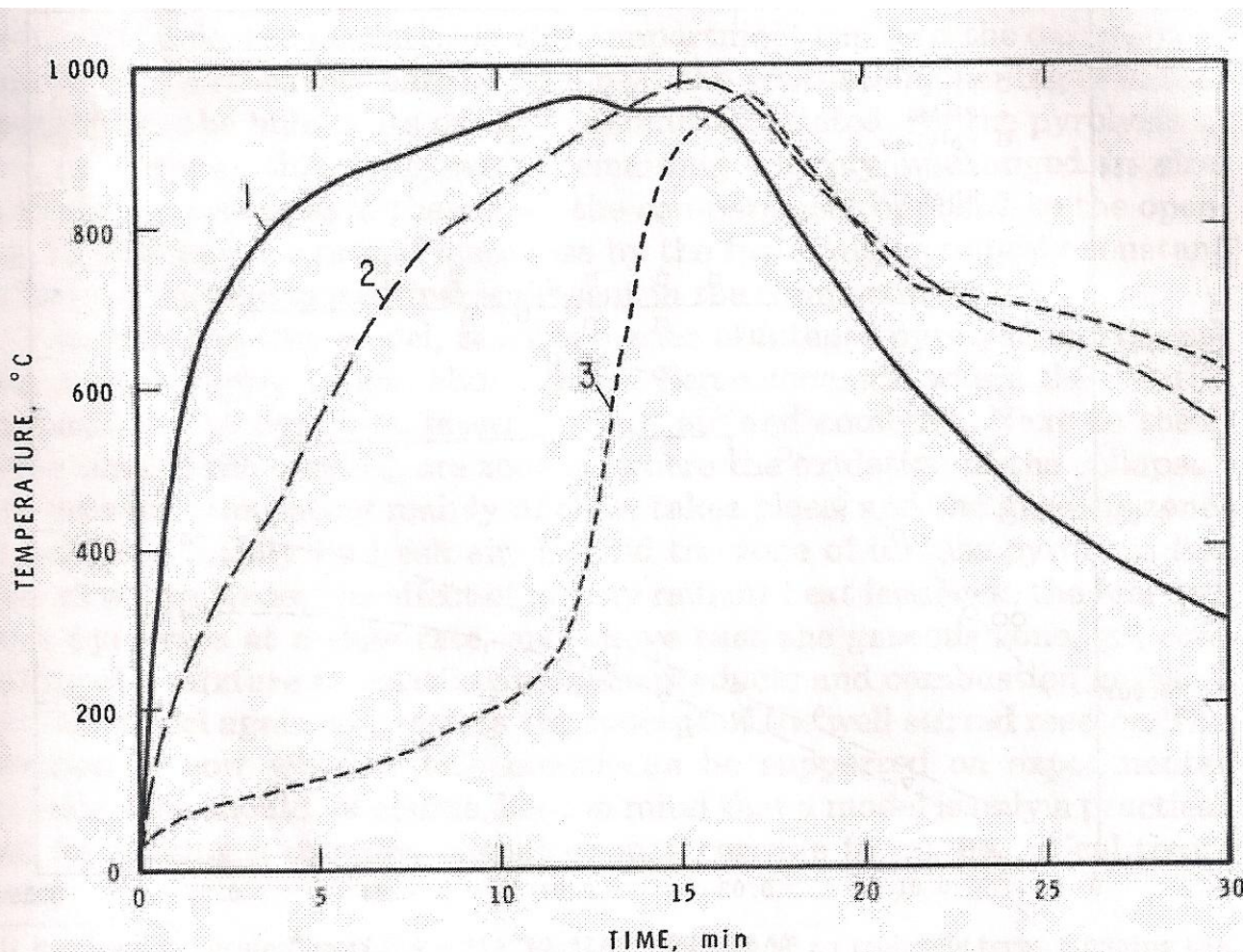


Figure 3. Illustration of zonal pyrolysis in ventilation-controlled fires of cellulotics in a small scale room-burn experiment. Thermocouples: 1 — near window, 2 — middle of room, 3 — near far side of room.



CAPITOLO 2

PARAMETRI CARATTERISTICI DELL'INCENDIO



Tasso di combustione (Burning rate)

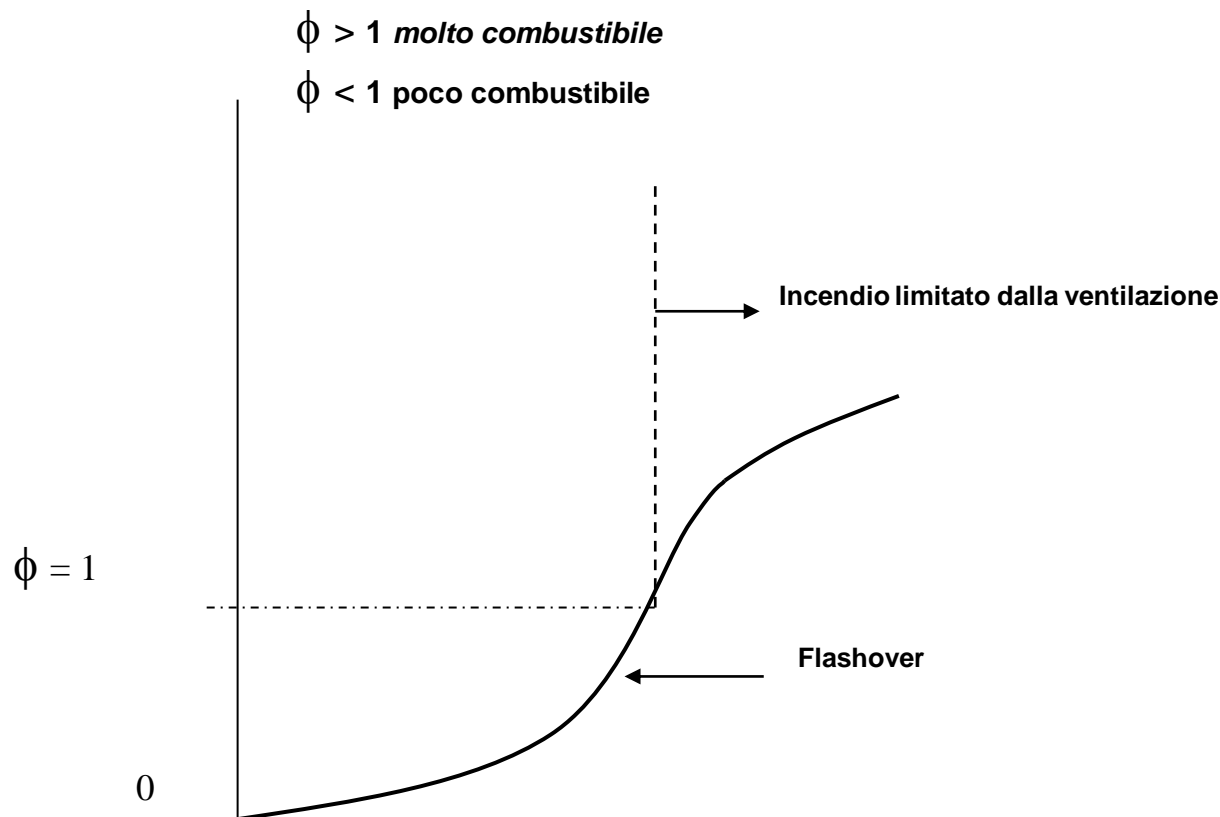
Quando un combustibile liquido o solido bruciano si ha una contemporanea perdita di massa, per evaporazione o pirolisi. Questa perdita di massa \dot{m} spesso viene identificata con il tasso di combustione. In effetti questa è una inesattezza perché, in genere, non tutto il combustibile vaporizzato viene bruciato. Esiste infatti un cosiddetto “**rapporto di equivalenza**” che misura quanto la reazione di combustione è stechiometrica, cioè se esiste sovrabbondanza di vapori di combustibile o di ossigeno.

$$\phi = \frac{\text{massa} \cdot \text{di} \cdot \text{combustibile} \cdot \text{disponibile}}{\text{massa} \cdot \text{di} \cdot \text{ossigeno} \cdot \text{disponibile}}$$

rapporto · stechiometrico · ponderale · tra · combustibile · e · ossigeno

Se $\phi < 1$ la combustione è **povera** di combustibile.

Se $\phi > 1$ la combustione è **ricca** di combustibile



Se $\phi < 1$ la combustione è **povera** di combustibile.

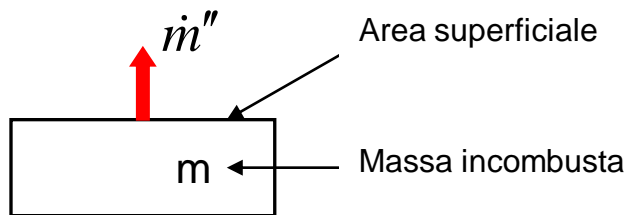
Se $\phi > 1$ la combustione è **ricca** di combustibile



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

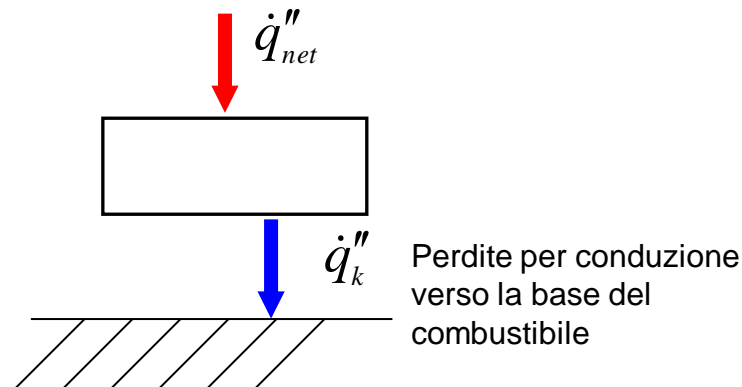
In linea di massima l'equivalenza perdita di massa=tasso di combustione può essere accettabile; invece è necessario tener conto della differenza nel caso di un compartimento contenente materiale combustibile ed insufficiente afflusso di aria.

Esaminiamo ora una porzione di solido (o liquido) che brucia ed applichiamo le equazioni della conservazione della massa e dell'energia:



$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} + \dot{m}'' = 0 \quad (\text{Equ. 2.1})$$

Flusso termico netto sulla superficie



Variazione, per unità di area, dell'energia necessaria alla vaporizzazione

$$\frac{1}{A} \frac{dU}{dt} + \dot{m}''L = \dot{q}_{net}'' - \dot{q}_k'' \quad (\text{Equ. 2.2})$$

Variazione dell'energia interna per unità di area



Il parametro L è definito come “calore di gassificazione” e si trova tabellato per diversi materiali. Per materiali solidi è un parametro derivato sperimentalmente mentre per i liquidi coincide con il calore di evaporazione ed è una proprietà derivata da altri parametri termodinamici.

<i>Burning rate di liquidi</i>	
	<i>(g/m² s) (D = 1 m)</i>
Metanolo	~ 17
Eptano	~ 75
Acetone	~34
Benzina	~ 48
Kerosene	~ 38
Petrolio greggio	~ 28
JP-4	~ 50

<i>Burning rate di oggetti ed insiemi di arredo</i>	
	<i>(g/s)</i>
Cestino da ufficio	2-6
Sedia imbottita	10-50
Divano imbottito	30-80
Materasso	40-120
Camera da letto	~ 130
Studio	~ 40
Cucina	~ 180



Tasso di rilascio termico (RHR)

Strettamente collegato al tasso di combustione è il tasso di rilascio termico (rate heat release).

La termochimica può fornire informazioni sull'energia totale che un determinato combustibile può rilasciare quando viene completamente bruciato e questo parametro è il potere calorifico, superiore ed inferiore, che si determina mediante il calorimetro di Mahler (bomba calorimetrica). Ma questo parametro è ben diverso dalla “portata termica” che viene rilasciata durante un incendio in quanto questo parametro, tipicamente transiente, dipende da diversi fattori quali, ad esempio, il regime di ventilazione e la forma del combustibile. In ogni caso è questo tasso di rilascio termico a descrivere in termini energetici – e quindi di pericolo – l'evoluzione di un incendio.



La conoscenza del tasso di combustione, unitamente al calore di combustione, ci permette di calcolare il tasso di rilascio termico attraverso la relazione:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot \Delta H_c \quad (\text{Equ. 2.3})$$

dove ΔH_c è il potere calorifico inferiore. Quindi la relazione sottintende una combustione completa, con efficienza pari al 100%. In effetti questa situazione è rara, anche in presenza di sovrabbondanza di aria di combustione. La formazione di particolato abbassa il rendimento delle reazioni di ossidazione. Pertanto si stima che per prodotti contenenti forti quantità di ritardanti di fiamma l'efficienza di combustione oscilla tra 0,3 e 0,4 mentre per prodotti che contengono al loro interno ossigeno (es. il poliossimetilene) l'efficienza può arrivare anche a 0,9. Questi valori sono riferiti a combustioni all'aperto. In incendi di compartimento le sono completamente differenti. In primo luogo è probabile che siano presenti combustibili differenti, ognuno con tassi di combustione diverso dagli altri



e cinetiche diverse. A fronte di queste complicazioni il tasso di rilascio termico è il parametro che bisogna calcolare per capire l'evoluzione delle temperature nel compartimento. Se si assume però che l'incendio è controllato dalla ventilazione – e quindi perde importanza il carico d'incendio – e che tutta l'aria che entra nel compartimento partecipa alla combustione all'interno di esso, allora il tasso di rilascio termico può ricavarsi dall'espressione:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{air} \cdot \Delta H_{air} \quad (\text{Equ. 2.4})$$

dove \dot{m}_{air} è la portata d'aria che entra nel compartimento e ΔH_{air} è il calore di combustione per unità di massa d'aria consumata (3000 kJ/kg). La massa d'aria può essere approssimata con la relazione:

$$\dot{m}_{air} = 0.52 \cdot A_w \sqrt{h} \quad (\text{Equ. 2.5})$$

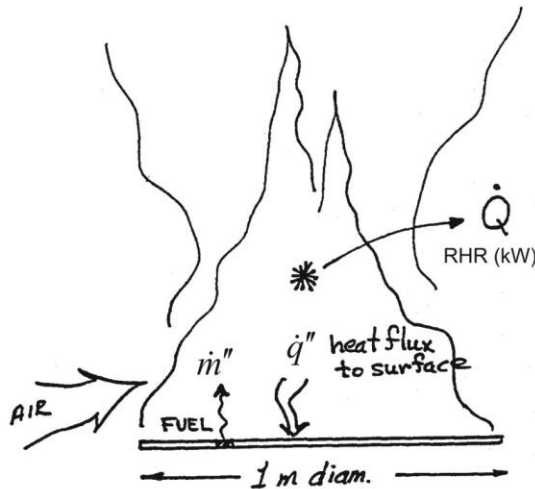
dove A_w è l'area effettiva di ventilazione (m²) ed h l'altezza delle aperture di ventilazione (m)



Nel modello esposto è implicito il fatto che il processo di combustione è stechiometrico, anche se la portata di aria potrebbe non esser sufficiente a bruciare tutti i vapori combustibili presenti nel compartimento. In effetti se il rapporto \dot{m} / \dot{m}_{air} è maggiore del rapporto stechiometrico ($\phi > 1$) i vapori in eccesso usciranno, attraverso le aperture di ventilazione, dal compartimento e si incendieranno appena si misceleranno con l'aria esterna dando origine a fiamme la cui lunghezza dipende, tra le altre cose, dal rapporto di equivalenza. Infine, nell'uso dell'equ. 3.5, è implicito il fatto che l'incendio brucia al massimo del suo tasso di combustione per tutta la durata, il che significa che è controllato dalla quantità di combustibile presente (carico d'incendio). *Questo metodo ovviamente sovrastima la severità di incendi controllati dal combustibile ed in cui sono presenti grandi aperture di ventilazione.*



Esempio di calcolo di tasso di rilascio termico



Calcolare il tasso di combustione per una pozza di 1 m di diametro, costituita alternativamente da polisterene, eptano e legno. Trattare il legno come una catasta ed assumere il tasso di combustione massimo specifico (pozza di grande diametro). Calcolare anche il flusso termico netto che dalle fiamme irraggia verso il combustibile e contribuisce ad infiammarlo.

Polistirene

Da manuale troviamo che per polisterene granulare che fonderà si ha:

$$\dot{m}'' = 38 \cdot \text{g} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\Delta H_c = 39.85 \cdot \text{kJ} / \text{g}$$

$$L = 1.70 \cdot \text{kJ} / \text{g}$$

Considerato che l'area è pari 0,785 m² si ha:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c = 38 \times 0.785 \times 39.85 = 1189 \cdot \text{kW}$$

$$\dot{q}'' = \dot{m}'' L_c = 38 \times 1.70 = 65 \cdot \text{kW} / \text{m}^2$$



Eptano

Vari autori forniscono per l'eptano i seguenti valori:

$$\dot{m}'' = 76 \cdot g / m^2 \cdot s$$

$$\Delta H_c = 44.6 \cdot kJ / g$$

$$L = 0.50 \cdot kJ / g$$

Considerato che l'area è pari 0,785 m² si ha:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c = 76 \times 0.785 \times 44.6 = 2661 \cdot kW$$

$$\dot{q}'' = \dot{m}'' L_c = 76 \times 0.50 = 38 \cdot kW / m^2$$

Legno

Da manuale troviamo per il legno i seguenti valori medi:

$$\dot{m}'' = 11 \cdot g / m^2 \cdot s$$

$$\Delta H_c = 15.0 \cdot kJ / g$$

$$L = 1.82 \cdot kJ / g$$

Consideriamo ancora un'area pari 0,785 m² anche se per un conto più esatto, si dovrebbe valutare tutta l'area esposta della catasta

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c = 11 \times 0.785 \times 15.0 = 130 \cdot kW$$

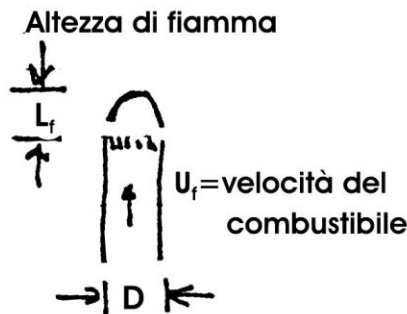
$$\dot{q}'' = \dot{m}'' L_c = 11 \times 1.82 = 20 \cdot kW / m^2$$

Si precisa che per il legno i valori di L riportati in letteratura variano tra 2 e 5 e pertanto il valore del flusso netto può variare fino a 55 kW/m²



Pennacchio dell'incendio (plume)

Il pennacchio dell'incendio è costituito dalla zona di combustione e dalle zone dove si esercita la spinta ascensionale dovuta alla fiamma diffusiva. Per incendi non molto estesi le velocità dei gas in questa zona sono relativamente piccole, soprattutto se comparate con quelle che esistono sopra incendi dovuti a rilascio di gas nell'atmosfera (jet flame). In questi ultimi predomina la quantità di moto mentre nei primi domina la forza ascensionale. I pennacchi possono avere regimi di flusso laminari o turbolenti. Nella esposizione che segue si considerano pennacchi di tipo assi-simmetrici risultanti da focolai di dimensioni circolari



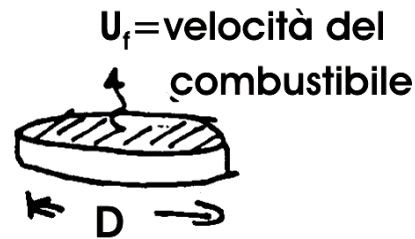
Candela: fiamma laminare diffusiva

$$L_f \approx 1 \div 5 \cdot cm$$

$$D \approx 1 \div 10 \cdot cm$$



Fiamma turbolenta diffusiva, dominata dalla spinta ascensionale



Velocità tipica risulta per esempio:

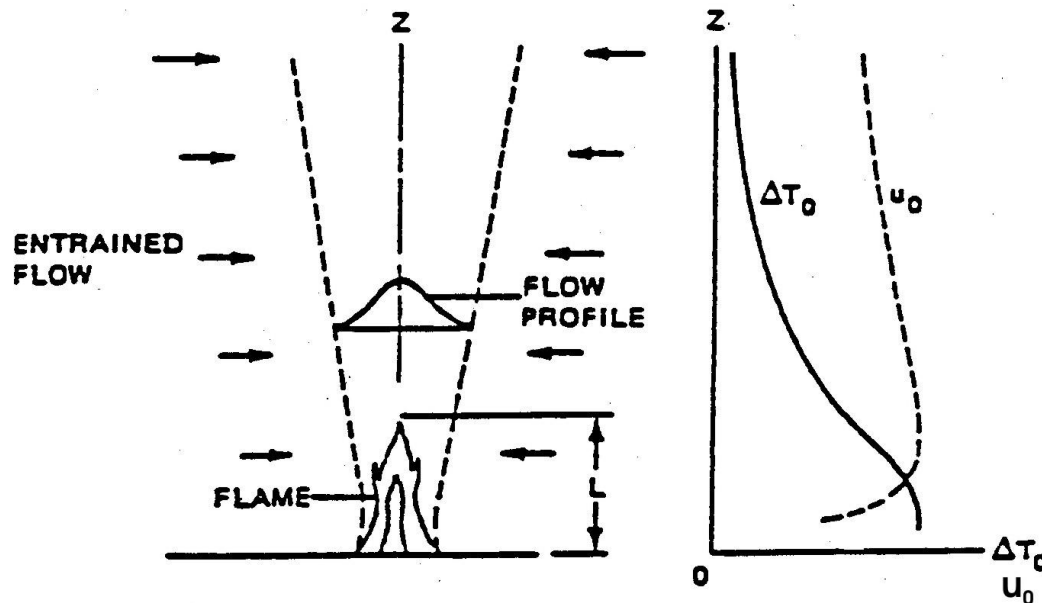
$$u_f \approx \frac{1}{\rho_f} \frac{\dot{q}_{net}''}{L} \approx \frac{1}{2 \cdot \text{kg} / \text{m}^3} \frac{40 \cdot \text{kW} / \text{m}^2}{2000 \cdot \text{kJ} / \text{kg}} = 1 \cdot \text{cm} / \text{s}$$

Nel caso di fiamme dominate dalla quantità di moto (jet flames) le velocità risultano molto superiori ad 1 cm/s e possono raggiungere velocità supersoniche. Questa configurazione non è rappresentativa di un incendio naturale.



Velocità caratteristiche di un pennacchio a convezione naturale

L'aria che affluisce nella zona dell'incendio, che si comporta come una pompa entalpica, rappresenta la maggior parte della massa che costituisce il pennacchio. La velocità dell'aria è sufficientemente elevata affinché il flusso sia di tipo turbolento: questo contribuisce alla miscelazione del comburente con il combustibile vaporizzato.



Nel zona del pennacchio si individuano due velocità:

V_c = velocità dei gas caldi

V_e = velocità aria di richiamo

La V_e dipende da V_c

$$V_e = \alpha V_c$$

dove $\alpha \approx 0.1$



In un pennacchio di tipo *debolmente* ascensionale possiamo scrivere con buona approssimazione che:

$$\frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho_{\infty}} \approx \frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}}$$

Dove, come al solito, il pedice ∞ indica che valori alla temperatura ambiente

Usando il termine di velocità che compare nella formula di Bernoulli, possiamo scrivere:

$$\rho_{\infty} v_c^2 \times Area \approx \Delta \rho \cdot g \times Volume$$

Poniamo $Volume/Area \sim l_c$ dove l_c è una lunghezza caratteristica. Quindi:

$$v_c \approx \sqrt{\frac{\Delta T}{T_{\infty}} g \cdot l_c}$$

Adesso scriviamo v_c e l_c in funzione del tasso di rilascio termico dell'incendio \dot{Q}



Possiamo scrivere con buona approssimazione:

$$\dot{Q} = \rho_{\infty} c_p v_c T_{\infty} l_c^2$$

da cui possiamo ricavare

$$v_c = \sqrt{g} \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{1/5}$$

(Equ. 2.6)

$$l_c = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

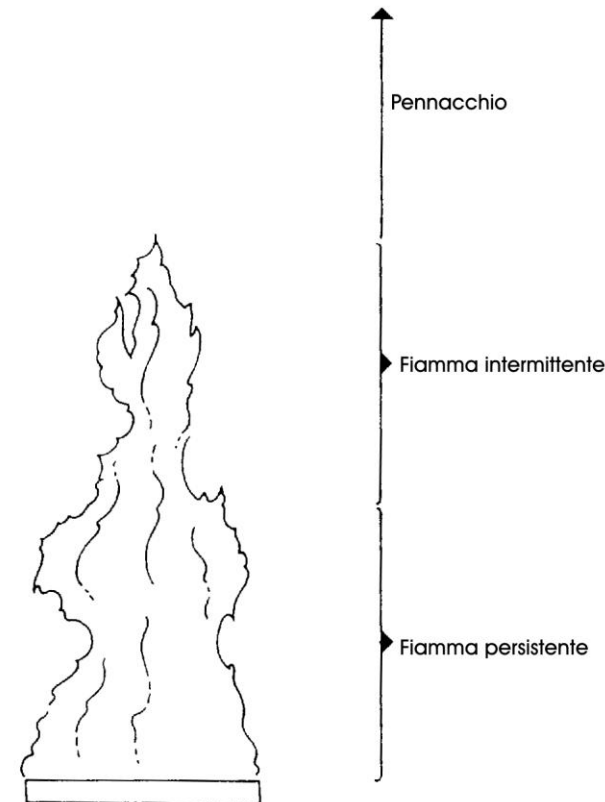
(Equ. 2.7)



Altezza di fiamma

Al di sopra del materiale che sta bruciando si individuano 3 zone distinte:

- zona di persistenza della fiamma: immediatamente al di sopra del bruciatore, dove c'è un flusso di gas la cui velocità va aumentando;
- zona di fiamma intermittente: al di sopra della precedente, dove il flusso di gas è all'incirca costante;
- zona del “plume” galleggiante: al di sopra della precedente, dove la velocità del flusso di gas e la temperatura diminuiscono con l'altezza





Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

L'energia rilasciata dalla combustione può essere scomposta in due parti: la quota convettiva e la quota radiante. La parte convettiva è legata alla temperatura dei prodotti della combustione e si manifesta con i gas caldi che si innalzano sopra le fiamme e riscaldano il soffitto o altre parti che incontrano lungo il loro cammino.

La parte radiante si avverte anche a distanza come onda termica. In generale le fiamme diffusive (tipiche degli incendi) irradiano un po' di più delle fiamme premiscelate e pertanto la loro quota convettiva è minore. Di conseguenza la temperatura di fiamma risulta minore. La luminosità delle fiamme diffusive è generalmente proporzionale all'irraggiamento termico dell'incendio. Per fiamme diffusive abbastanza grandi la maggior parte dell'irraggiamento è dovuto alle particelle incandescenti di fuliggine, costituite soprattutto da frammenti agglomerati di combustibile pirolizzato incandescente. Il fumo nero che si eleva sopra la regione delle fiamme è una porzione del particolato che esce dalle fiamme senza essere ossidato.



I gas che si alzano per effetto convettivo sono dotati di una certa velocità e quindi di una quantità di moto. Quando la quantità di moto e la gravità o la spinta ascensionale diventano confrontabili è necessario introdurre un numero adimensionale – il numero di Froude – per quantificare i valori relativi dei due fenomeni.

In generale si può scrivere:

$$Fr = \frac{U^2}{gD}$$

dove U è la velocità e D il diametro, anche equivalente, della superficie interessata dal fenomeno. Per l'incendio possiamo esprimere il numero di Froude in termini di tasso di rilascio termico e scrivere:

$$Fr \propto \frac{\dot{Q}^2}{D^5} = C \left(\frac{\dot{Q}}{D^{5/2}} \right)^2 \quad (\text{Equ. 2.8})$$

dove C è una costante in cui confluiscono le proprietà del combustibile, la geometria della sorgente dell'incendio e la gravità.

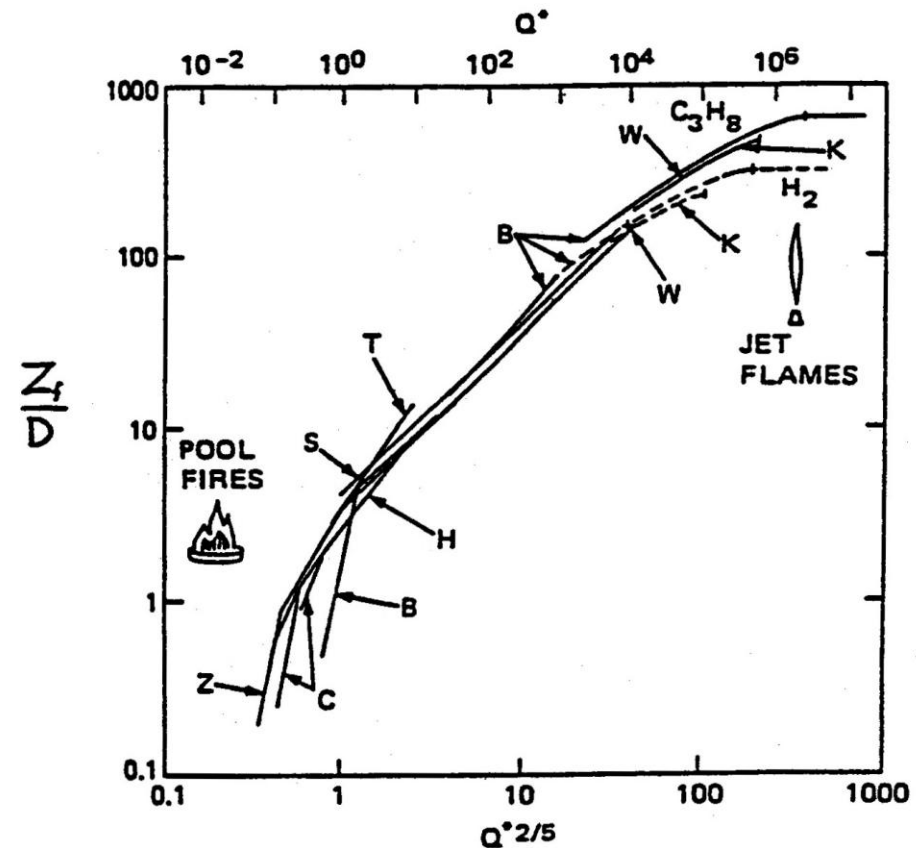


Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

L'intera gamma dei regimi delle fiamme diffusive può essere rappresentata su un grafico in funzione del numero di Froude. Questa gamma è sostanzialmente divisa in tre parti:

Fr piccoli, Fr intermedi e Fr grandi.

In tutti e tre i regimi sono importanti due parametri: l'altezza di fiamma e la frazione radiante. Il grafico accanto mostra l'altezza di fiamma come funzione di Fr per fiamme diffusive non laminari. Per comprimere la scala orizzontale si scelto un numero di Froude modificato.





Il numero modificato si scrive: $\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}}$ (Equ. 2.9)

dove i parametri termofisici sono valutati alla temperatura ambiente e D è il diametro dell'incendio. Questa relazione ha notevole importanza nella modellazione fluidodinamica ai volumi finiti in quanto da essa è possibile ricavare il diametro caratteristico dell'incendio che è fondamentale nell'analisi di sensibilità per capire l'intervallo di dimensioni della mesh da usare per la modellazione. Il diametro caratteristico è dato da

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (\text{Equ. 2.10})$$

Normalmente si sceglie una dimensione di mesh compresa tra il 10% ed il 40% di D^*



L'altezza di fiamma risulta direttamente correlata con la lunghezza caratteristica l_c vista precedentemente, secondo la relazione

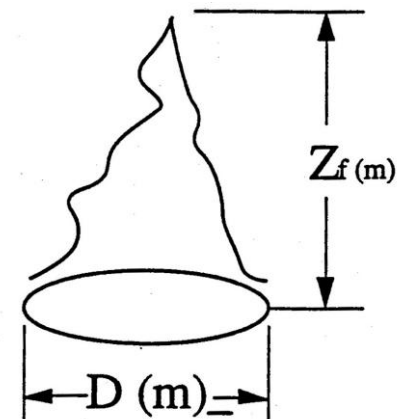
$$\frac{l_f}{D} \approx \frac{l_c}{D}$$

$$\frac{l_f}{D} \approx \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} D^{5/2}} \right)^{2/5}$$

Heskestad ha ricavato una relazione, valida soprattutto per gli incendi di pozza:

$$Z_f = 0.23 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D \quad (\text{Equ. 1.11})$$

dove \dot{Q} è espresso in kW





Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Applicando la relazione di Heskestad ai valori di \dot{Q} ricavati nell'esempio svolto nel paragrafo relativo al tasso di rilascio termico otteniamo

Polistirene $\rightarrow Z_f = 2.89 \text{ m}$

Eptano $\rightarrow Z_f = 4.37 \text{ m}$

Legno $\rightarrow Z_f = 0.59 \text{ m}$

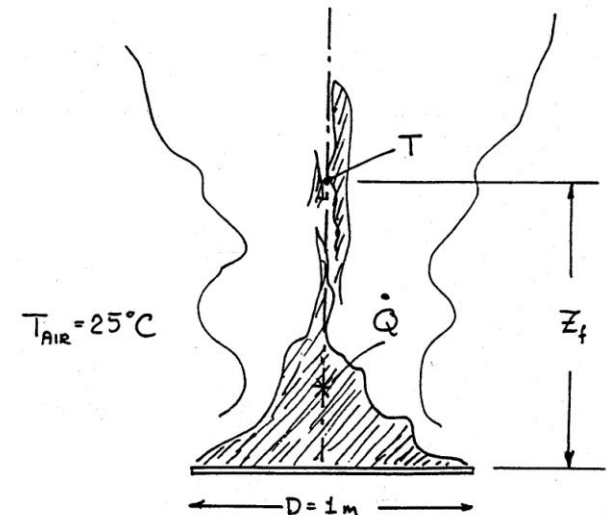
Applicando il grafico riportato nella pagina seguente si può anche ricavare la corrispondente temperatura, fissata la T ambiente a 25°C

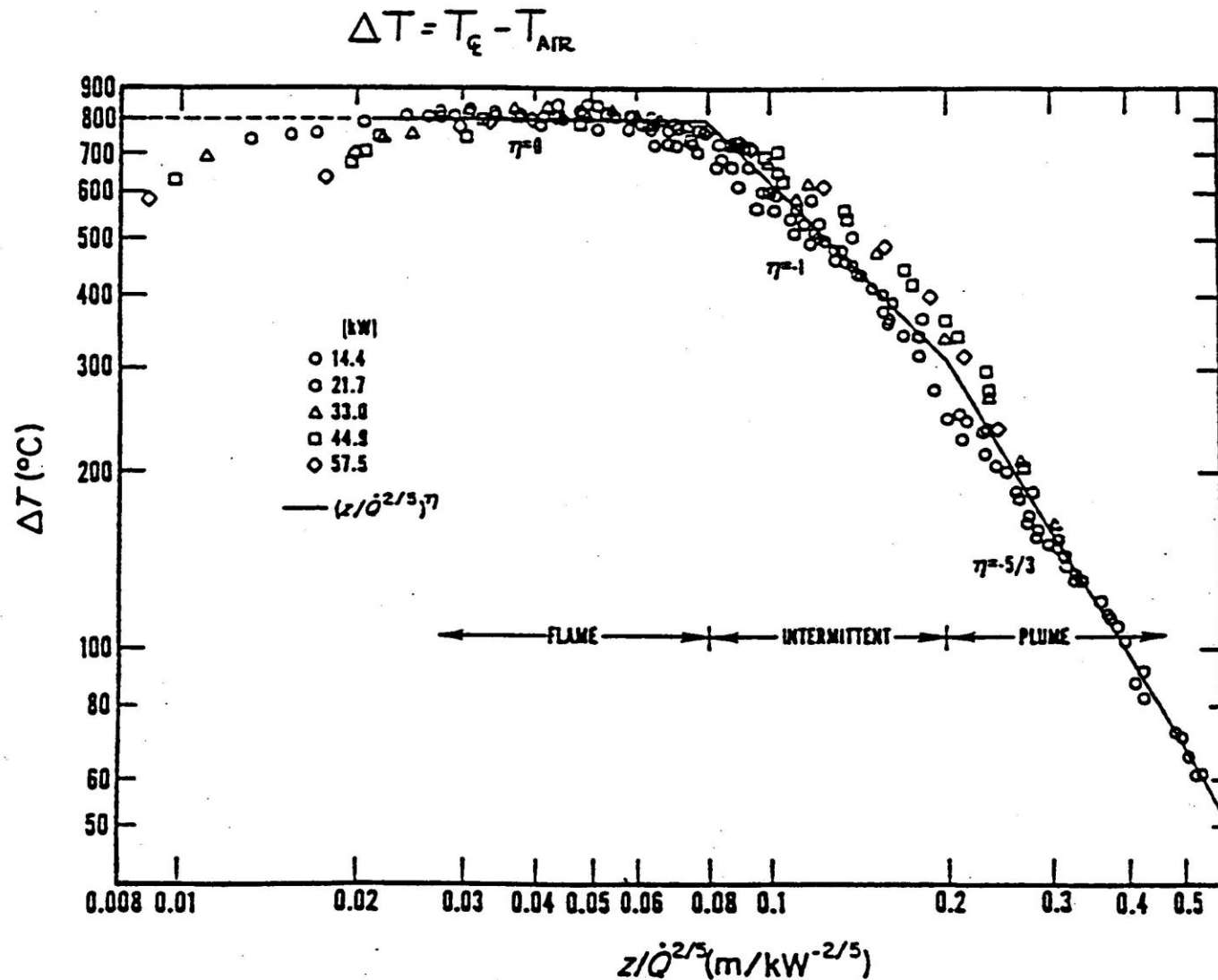
Polisterene $\rightarrow Z_f = 2.89 \text{ m} \rightarrow 405^\circ\text{C}$

Eptano $\rightarrow Z_f = 4.37 \text{ m} \rightarrow 355^\circ\text{C}$

Legno $\rightarrow Z_f = 0.59 \text{ m} \rightarrow 745^\circ\text{C}$

La T del legno è indicativa della regione fiammeggiante continua e non propriamente di Z_f , probabilmente per il mancato uso dell'area esposta nella relazione del tasso di rilascio.



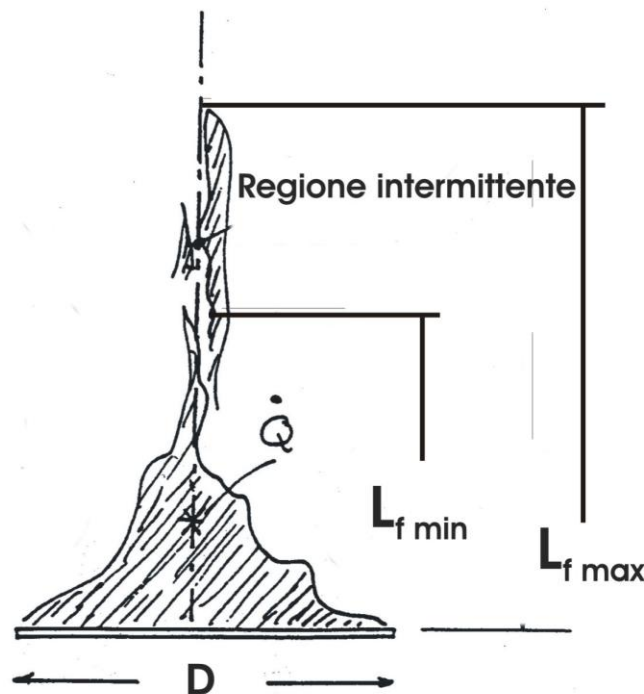


Temperatura dell'asse del pennacchio secondo McCaffrey



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Esistono altre relazioni che caratterizzano l'altezza di fiamma. Hasemi ha ricavato due equazioni che permettono di valutare l'altezza della regione continua $L_{f \min}$ e l'altezza globale di fiamma $L_{f \max}$, compresa la regione intermittente.



$$L_{f \max} = 0.21 \cdot \dot{Q}^{2/5}$$

$$L_{f \min} = 0.11 \cdot \dot{Q}^{2/5}$$

Per le configurazioni d'angolo si possono usare le equazioni:

$$L_{f \max} = 0.118 \cdot \dot{Q}^{3/5}$$

$$L_{f \min} = 0.075 \cdot \dot{Q}^{3/5}$$



Il ceiling jet

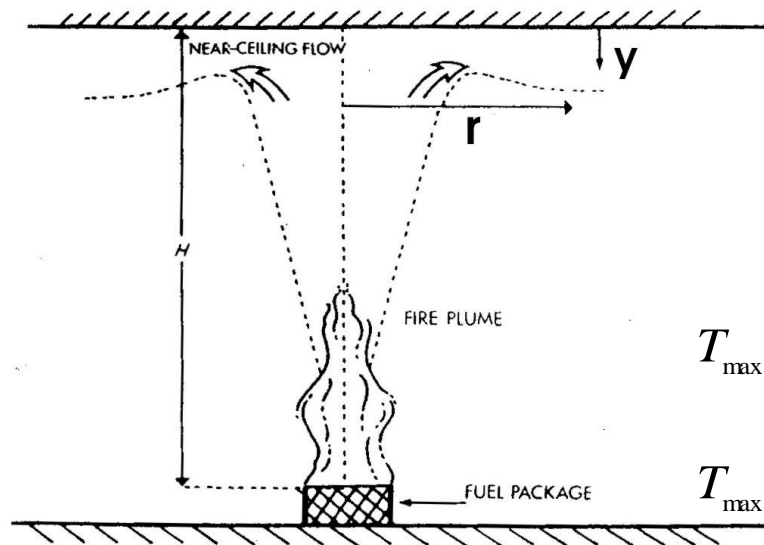
Quando l'incendio è all'aperto non ci sono barriere fisiche che limitano il movimento verticale del pennacchio o restrizioni all'aria di richiamo che si introduce lungo la superficie assiale del plume. Se invece l'incendio è confinato dentro un compartimento la risultante restrizione di richiamo di aria fresca assume un ruolo significativo. In un pennacchio di tipo ascensionale la temperatura decresce meno rapidamente con l'altezza poiché la velocità di miscelazione con aria fresca risulta essere molto minore che nel caso di incendio all'aperto. Anche le fiamme diventano più grandi in quanto devono incrementare la loro superficie per catturare più aria possibile necessaria a bruciare il combustibile vaporizzato.

Se l'estensione verticale del pennacchio è limitata dal soffitto i gas caldi saranno deviati e formeranno una corrente orizzontale adiacente al soffitto stesso (ceiling jet). In questa fase i gas caldi cederanno calore sia per irraggiamento verso il basso che per conduzione/convezione verso il soffitto con il risultato di raffreddarsi mano a mano che si allontanano dall'asse



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

delle fiamme. Sono state ricavate alcune equazioni per valutare la temperatura del ceiling jet che assume una particolare rilevanza sia ai fini della valutazione della resistenza al fuoco delle strutture che della progettazione di un impianto di rivelazione.



Alpert ha mostrato che la massima temperatura vicino al soffitto ad una certa radiale posizione r dall'asse del fuoco può essere descritto dalle seguenti equazioni:

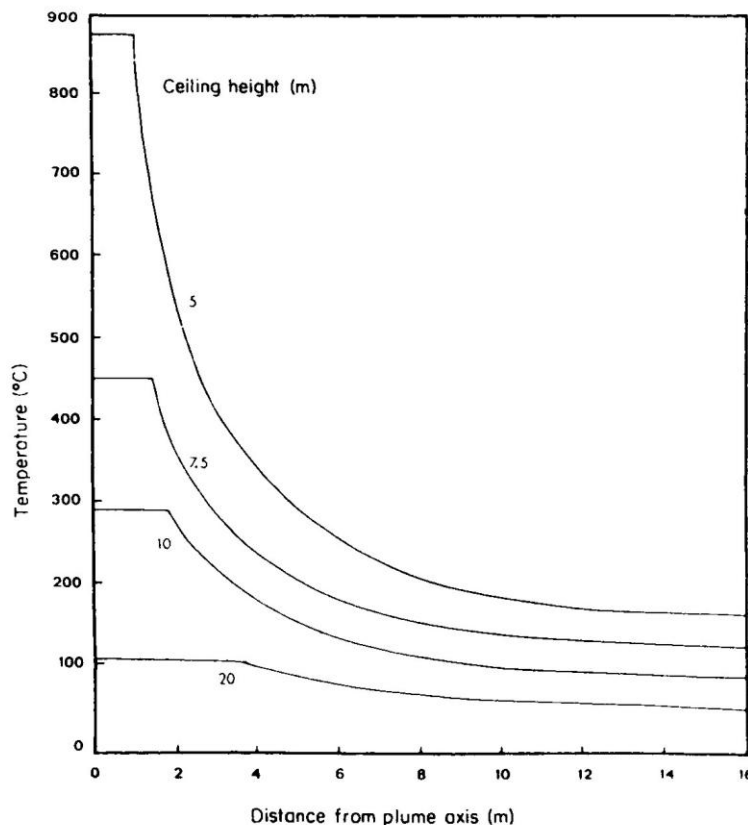
$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{5.38(\dot{Q} / r)^{2/3}}{H} \dots \text{se } r > 0.18H \quad (\text{Equ. 2.11a})$$

$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{16.9(\dot{Q} / r)^{2/3}}{H^{5/3}} \dots \text{se } r \leq 0.18H \quad (\text{Equ. 2.11b})$$

La seconda condizione vale per la zona dove le fiamme battono direttamente contro il soffitto.



Se le fiamme sono adiacenti ad una parete o in un angolo la temperatura risulterà maggiore perché il flusso sotto il soffitto è rallentato. Se ne può tenere conto moltiplicando le (2.11a) e (12.11b) rispettivamente per un fattore due e quattro. Nel grafico seguente si riporta la dipendenza di T_{max} da r ed H per un incendio da 20 MW.



Se il soffitto è sufficientemente basso o l'incendio esteso per ottenere il battimento delle fiamme contro la struttura, non solo le fiamme avranno una deflessione orizzontale ma si otterrà una notevole estensione delle stesse a causa della riduzione dell'aria di richiamo. In questo caso la differenza di densità tra i due strati agisce a sfavore del processo di miscelazione e quindi occorre più tempo ai vapori per bruciare.



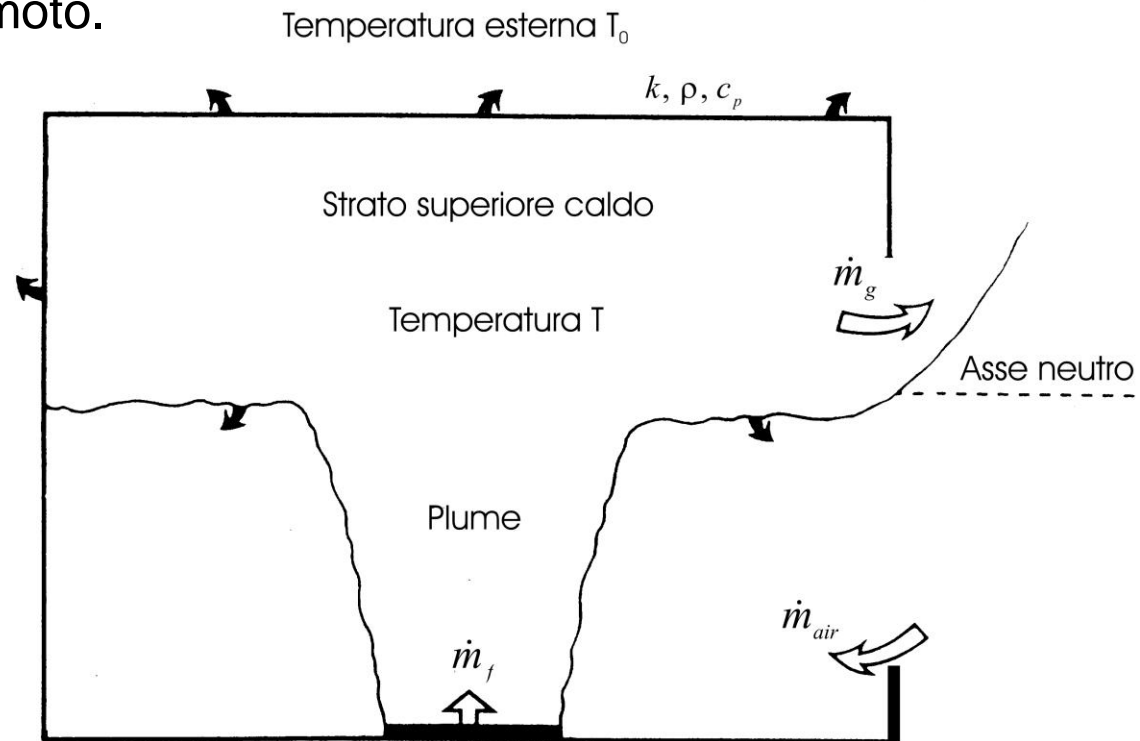
CAPITOLO 3

FLUIDODINAMICA DEL COMPARTIMENTO



I flussi gassosi

Per comprendere il regime dei flussi gassosi all'interno di un compartimento dove si è sviluppato un incendio è necessario modellizzare il medesimo riducendolo ad un volume di controllo dove poi effettuare i bilanci di massa e di quantità di moto.



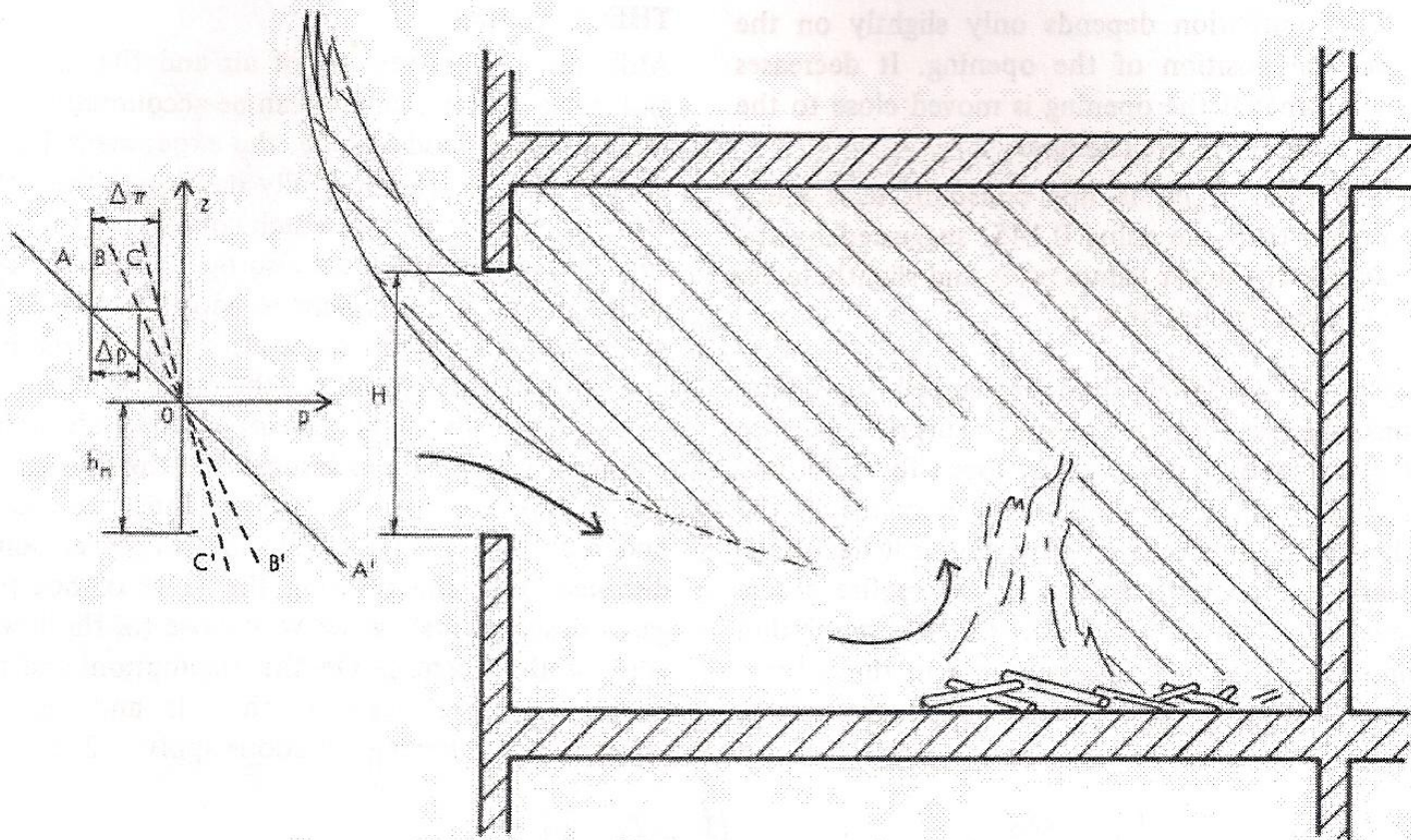


Fig. 3. A burning compartment and relevant pressure-height relations.



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Relativamente al modello riportato possiamo scrivere:

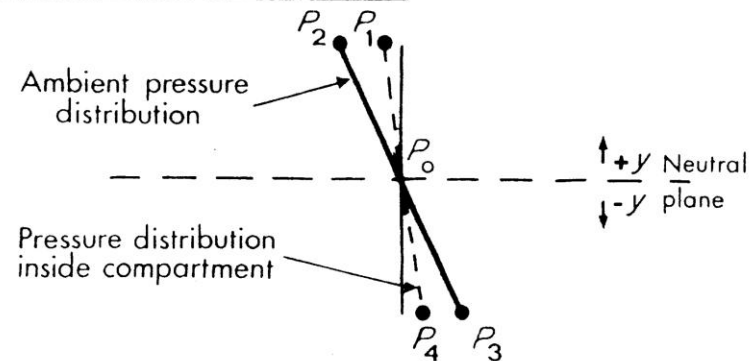
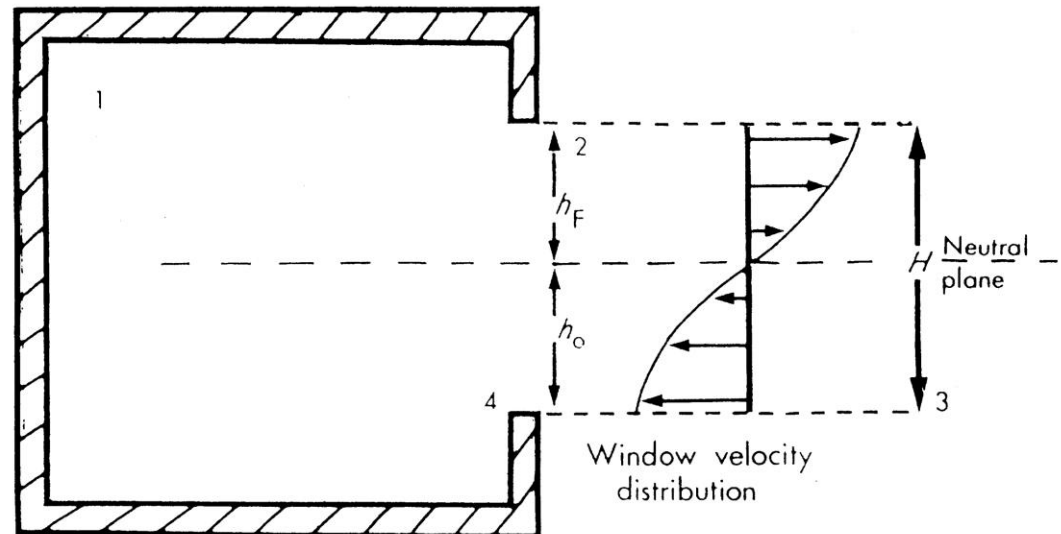
$$\dot{m}_f = \dot{m}'' A_f$$

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{q}_{flame}'' + \dot{q}_{ext}''}{L}$$

$$\phi \equiv \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_{air}''}{1 / r}$$

Facciamo le seguenti ipotesi:

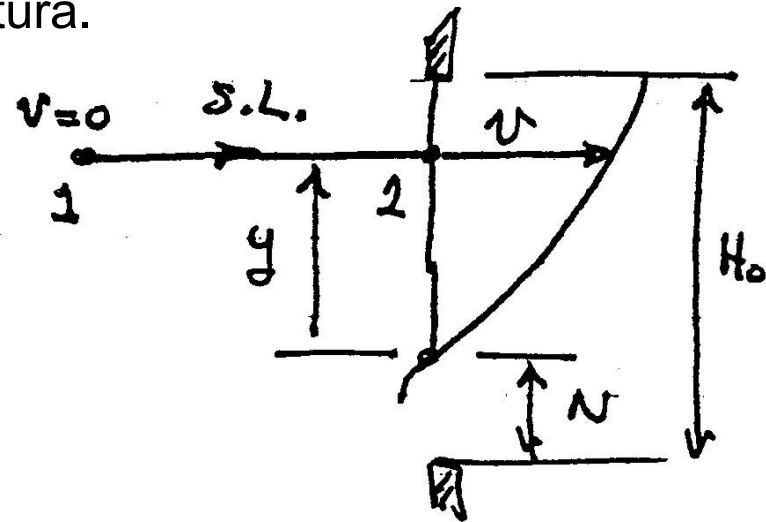
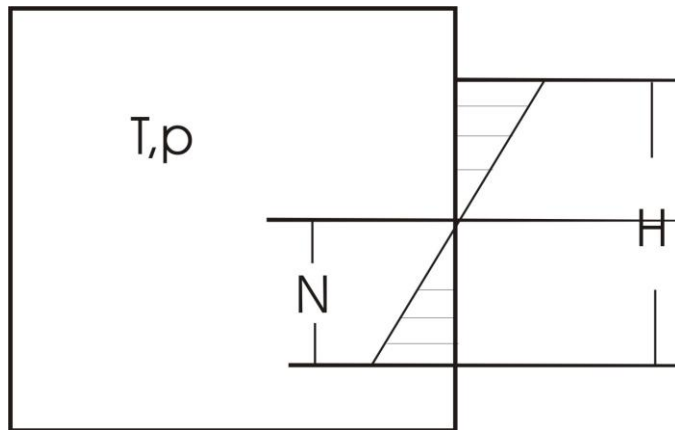
- si applica l'equazione di Bernoulli
- l'apertura si comporta come un'orifizio
- Il flusso parte da fermo
- la densità è costante lungo una linea di flusso
- le pressioni sono di tipo statico



Pressure increases as y decreases →



H_o è l'altezza dell'apertura, W la sua larghezza, N è la distanza dell'asse neutro dal limite inferiore dell'apertura.



Si assume anche che la posizione 2 è riferita alla vena contratta relativa al flusso uscente in cui la pressione è uguale a quella dell'esterno. Possiamo scrivere per le pressioni:

nel compartimento
$$p(y) = p(0) - \rho gy \quad (\text{Equ. 3.1})$$

nel flusso esterno
$$p_{\infty}(y) = p_{\infty}(0) - \rho_{\infty} gy \quad (\text{Equ. 3.2})$$



Ma $p(0)=p_{\infty}(0)$ (Equ. 4.3)

Inoltre, per Bernoulli, possiamo scrivere:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{v^2}{2} + \frac{p_{\infty}}{\rho} \quad (\text{Equ. 4.4}) \quad \text{Combinando le 4 equaz. precedenti si ottiene}$$

$$v = \left[\frac{2}{\rho} (p - p_{\infty}) \right]^{1/2} = \left[2 \left(\frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho} \right) g y \right]^{1/2} \quad (\text{Equ. 3.3})$$

Dall'equazione di stato si desume che le differenze di pressione tra l'interno e l'esterno sono piccole ma sufficienti a creare i flussi di entrata e di uscita. Ovunque la pressione è praticamente costante e vicina al valore di 1 atm. Quindi possiamo scrivere che $\rho T = \rho_{\infty} T_{\infty}$ o, similmente,

$$\frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho} = \frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}} \quad (\text{Equ. 3.4})$$

Integrando rispetto alla sezione dell'apertura ed introducendo un coefficiente di efflusso C pari a 0.7 possiamo calcolare il flusso in uscita:



$$\dot{m}_{out} = C \frac{2}{3} \rho_{\infty} W_0 H_0^{3/2} \left[2g \left(\frac{T_{\infty}}{T} \right) \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T} \right) \right]^{1/2} \left(1 - \frac{N}{H_0} \right)^{3/2} \quad (\text{Equ. 3.5})$$

Nello stesso modo possiamo calcolare il flusso in entrata:

$$\dot{m}_{in} = C \frac{2}{3} \rho_{\infty} W_0 H_0^{3/2} \left[2g \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T} \right) \right]^{1/2} \left(\frac{N}{H_0} \right)^{3/2} \quad (\text{Equ. 3.6})$$

Se assumiamo che il flusso è stazionario e che la portata di combustibile vaporizzato \dot{m}_f è trascurabile rispetto alla portata di aria \dot{m}_{air} possiamo scrivere:

$$\frac{\dot{m}_{air}}{\frac{2}{3} C \sqrt{2g} \rho_{\infty} W_0 H_0^{3/2}} = \frac{\theta^{1/2} (1 - \theta)^{1/2}}{(1 + \theta^{1/3})^{3/2}} \quad (\text{Equ. 3.7a}) \quad \text{dove:} \quad \theta = \frac{T_{\infty}}{T}$$

$$W_0 H_0^{3/2} = A_0 \sqrt{H_0}$$

$$\frac{N}{H_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\theta^{1/3}}} \quad (\text{Equ. 3.7b}) \quad (\text{Fattore di ventilazione})$$



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Assumiamo alcuni valori usuali e poniamo:

$$T_{\infty}=300 \text{ K} , T= 1200 \text{ K}, N/H_0=0.387, \rho_{air}=1,2 \text{ kg/m}^3$$

e scriviamo che:

$$\dot{m}_{air} = \frac{2}{3} C \sqrt{2g \rho_{\infty}} A_0 \sqrt{H_0} \cdot f(\theta) = 0.51 A_0 \sqrt{H_0} \cdot \dots (kg / s)$$

Per $\theta \rightarrow 1$ $N/H_0 \rightarrow 0.5$ e $\dot{m}_{air} = 0$

Pertanto, per trovare il flusso di aria di richiamo, è plausibile usare l'espressione:

$$\dot{m}_{air} = 0.51 A_0 \sqrt{H_0} \cdot \dots (kg / s)$$

Nel caso di combustione controllata dalla ventilazione, cioè $\phi > 1$, si ha

$$\dot{Q} = \dot{m}_{air} \left(\frac{\Delta H}{r} \right) \approx 0.51 A_0 \sqrt{H_0} \cdot \frac{kg}{s} \times 3 \frac{kJ}{g_{air}} 10^3 \approx 1530 A_0 \sqrt{H_0} \cdot kW$$

$$T - T_{\infty} = 910 \left(\frac{A_0 \sqrt{H_0}}{h_k A} \right)^{1/3} \propto \left(\frac{A}{A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{-1/3}$$



Dir. Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica

Per incendi controllati dal combustibile cioè $\phi < 1$ e nel caso in cui l'area del combustibile disponibile è proporzionale all'area superficiale totale del compartimento A, si scrive:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \Delta H = \dot{m}_f'' \Delta H A_f$$

$$\text{se } \dot{m}_f'' \cdot A_f \propto A$$

$$T - T_\infty = \propto \left[\frac{(\dot{m}_f'' \Delta H)^2 A}{A_0 \sqrt{H_0}} \right]^{1/3}$$