

# CODICE DI PREVENZIONE INCENDI

## Capitolo S.8- Controlli di fumo e calore

- Ing. Giovanni Longobardo
- 3 Febbraio 2022

## Argomenti del Capitolo S.8

Premessa

Livelli di prestazione

Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Soluzioni progettuali

Soluzioni conformi per il livello di prestazione II

Soluzioni conformi per il livello di prestazione III

Soluzioni alternative

Aperture di smaltimento di fumo e calore d'emergenza

Caratteristiche

Dimensionamento

Verifica della distribuzione uniforme delle aperture di smaltimento

Sistemi di ventilazione forzata orizzontale del fumo e del calore

Sistemi per l'evacuazione di fumo e calore

Segnaletica

Riferimenti

**La presente misura antincendio ha come scopo l'individuazione dei presidi antincendio da installare nell'attività per consentire il *controllo, l'evacuazione o lo smaltimento dei prodotti della combustione* in caso di incendio.**

In generale, la misura antincendio di cui al presente capitolo si attua attraverso la realizzazione di:

- a. *aperture di smaltimento di fumo e calore d'emergenza del paragrafo S.8.5;*
- b. *sistemi di ventilazione orizzontale forzata del fumo e del calore (SVOF) di cui al paragrafo S.8.6;*
- c. *sistemi per l'evacuazione di fumo e calore (SEFC) descritti al paragrafo S.8.7.*

## **S.8.2 - Sono disponibili tre livelli di prestazione attribuibili ai compartimenti**

<b>Livello di prestazione</b>	<b>Descrizione</b>
<b>I</b>	Nessun requisito
<b>II</b>	Deve essere possibile smaltire fumi e calore dell'incendio dai compartimenti al fine di facilitare le operazioni delle squadre di soccorso.
<b>III</b>	Deve essere mantenuto nel compartimento uno strato libero dai fumi che permetta: <ul style="list-style-type: none"><li>• la salvaguardia degli occupanti e delle squadre di soccorso,</li><li>• la protezione dei beni, se richiesta.</li></ul> Fumi e calore generati nel compartimento non devono propagarsi ai compartimenti limitrofi.

### S.8.3 Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

La tabella S.8-2 riporta i criteri *generalmente accettati per l'attribuzione dei singoli livelli di prestazione*.

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Compartimenti dove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"><li>• non adibiti ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto;</li><li>• carico di incendio specifico <math>q_f \leq 600 \text{ MJ/m}^2</math>;</li><li>• per compartimenti con <math>q_f &gt; 200 \text{ MJ/m}^2</math>: superficie lorda <math>\leq 25 \text{ m}^2</math>;</li><li>• per compartimenti con <math>q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2</math>: superficie lorda <math>\leq 100 \text{ m}^2</math>;</li><li>• non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative;</li><li>• non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.</li></ul>
II	Compartimento non compreso negli altri criteri di attribuzione.
III	In relazione alle risultanze della valutazione del rischio nell'ambito e in ambiti limitrofi della stessa attività (es. attività con elevato affollamento, attività con geometria complessa o piani interrati, elevato carico di incendio specifico $q_f$ , presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità significative, presenza di lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio, ...).

Questa misura antincendio progettuale è progettata secondo le indicazioni contenute nei paragrafi S.5 – S.6 – S.7

### **S.8.4.1 - Soluzioni conformi per il livello di prestazione II:**

1. Per ogni compartimento deve essere prevista la possibilità di effettuare lo *smaltimento di fumo e calore d'emergenza secondo quanto indicato al paragrafo S.8.5.*
2. In esito alle risultanze della valutazione del rischio, è ammesso installare *sistemi di ventilazione forzata orizzontale del fumo e del calore (SVOF) secondo quanto indicato al paragrafo S.8.6, anche in luogo delle aperture di smaltimento di fumo e calore d'emergenza*, in particolare in attività complesse dove risulti necessario garantire la sicurezza delle squadre di soccorso creando una via da accesso libera da fumi e calore sino alla posizione dell'incendio

### **S.8.4.2 - Soluzioni conformi per il livello di prestazione III:**

Deve essere installato un *sistema di evacuazione di fumi e calore (SEFC), naturale (SENF) o forzato (SEFFC)* secondo quanto indicato al paragrafo S.8.7.

### S.8.4.3 - Soluzioni alternative:

1. Sono ammesse *soluzioni alternative per tutti i livelli di prestazione*.
2. Al fine di dimostrare il raggiungimento del *livello di prestazione*, il progettista deve impiegare **uno dei metodi del paragrafo G.2.7**.
3. In tabella S.8-3 sono riportate alcune modalità *generalmente accettate per la progettazione di soluzioni alternative*. Il progettista può comunque impiegare modalità diverse da quelle elencate.

Oggetto della soluzione	Modalità progettuale
Aperture di smaltimento di fumo e calore d'emergenza (§ S.8.5)	Si dimostri, <b>anche con metodi analitici</b> , che i soccorritori possano smaltire fumo e calore dell'incendio nella configurazione considerata o grazie ad un impianto di smaltimento meccanico. Possono essere impiegati i metodi di progettazione descritti nell'Appendice G "Smaltimento di fumo e calore di emergenza" della norma UNI 9494-1 e nell'Appendice H "Requisiti dei sistemi meccanici per lo smaltimento del fumo e calore di emergenza" della norma UNI 9494-2.
Distribuzione uniforme delle aperture di smaltimento (§ S.8.5.3)	Sia garantita l'accessibilità protetta per i soccorritori a tutti i piani dell'attività e la disponibilità in prossimità di attrezzature e dispositivi di protezione antincendio, oppure si dimostri il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza per i soccorritori impiegando i metodi di cui al capitolo M.3.
Caratteristiche degli SVOF (§ S.8.6)	In assenza di norme, TS o TR adottati dall'ente nazionale di normazione, possono essere utilizzati i principi di progettazione e le modalità di installazione e gestione contenute in prCEN/TS 12101-11.
Tutti i casi	Si dimostri il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza



### S.8.4.3 - Soluzioni alternative

Cosa vuol dire “*uno dei metodi* del paragrafo G.2.7.”?

#### Metodi di progettazione della sicurezza antincendio

La tabella G.2-1 elenca i metodi per la progettazione della sicurezza antincendio impiegabili da parte del *progettista* per:

- a. la *verifica delle soluzioni alternative al fine di dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione (paragrafo G.2.6.5.2);*
- b. la *verifica del livello di prestazione attribuito alle misure antincendio al fine di dimostrare il raggiungimento dei pertinenti obiettivi di sicurezza antincendio (paragrafo G.2.6.4).*



### S.8.4.3 - Soluzioni alternative

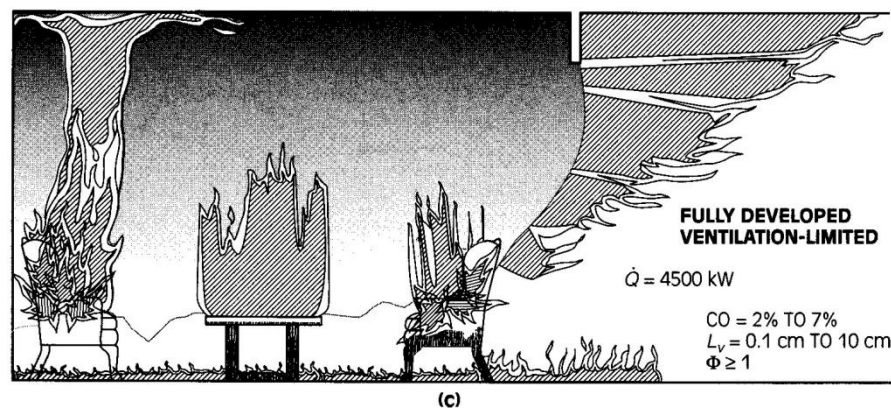
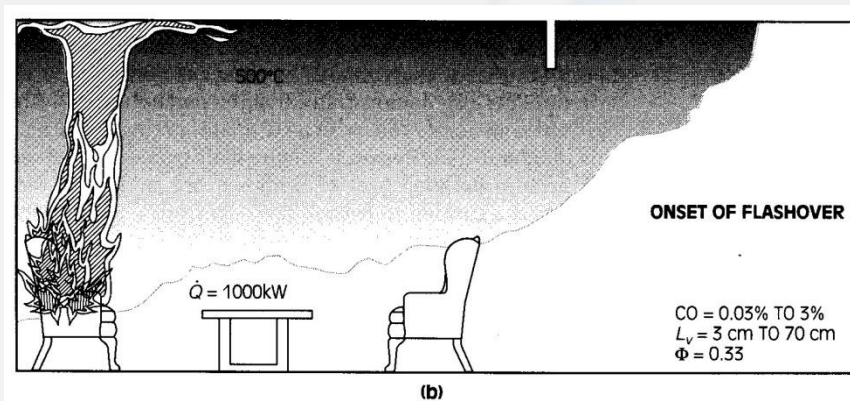
Cosa vuol dire “*uno dei metodi del paragrafo G.2.7.*”?

Tabella G.2-1 (valida per qualsiasi misura antincendio)

Metodi	Descrizione e limiti di applicazione
Applicazione di norme o documenti tecnici	Il <i>progettista</i> applica norme o documenti tecnici adottati da organismi europei o internazionali, riconosciuti nel settore della sicurezza antincendio. Tale applicazione, fatti salvi gli obblighi connessi all'impiego di prodotti soggetti a normativa comunitaria di armonizzazione e alla regolamentazione nazionale, deve essere attuata nella sua completezza, ricorrendo a soluzioni, configurazioni e componenti richiamati nelle norme o nei documenti tecnici impiegati, evidenziandone specificatamente l'idoneità, per ciascuna configurazione considerata, in relazione ai profili di rischio dell'attività.
Soluzioni progettuali che prevedono l'impiego di prodotti o tecnologie di tipo innovativo	L'impiego di prodotti o tecnologie di tipo <i>innovativo</i> , frutto della evoluzione tecnologica, è consentito in tutti i casi in cui l'idoneità all'impiego possa essere attestata dal <i>professionista antincendio</i> , in sede di verifica ed analisi sulla base di una valutazione del rischio connessa all'impiego dei medesimi prodotti o tecnologie, supportata da pertinenti certificazioni di prova riferite a: <ul style="list-style-type: none"><li>• norme o specifiche di prova nazionali;</li><li>• norme o specifiche di prova internazionali;</li><li>• specifiche di prova adottate da laboratori a tale fine autorizzati.</li></ul>
Ingegneria della sicurezza antincendio	Il <i>professionista antincendio</i> applica i metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio, secondo procedure, ipotesi e limiti indicati in particolare nei capitoli M.1, M.2 e M.3 oppure in base a principi tecnico-scientifici riconosciuti a livello nazionale o internazionale.
Prove sperimentali	<p>Il <i>professionista antincendio</i> esegue prove sperimentali in scala reale o in scala adeguatamente rappresentativa, finalizzata a riprodurre ed analizzare dal vero i fenomeni (es. chimico-fisici e termodinamici, esodo degli occupanti, ...) che caratterizzano la problematica oggetto di valutazione avente influenza sugli obiettivi di prevenzione incendi.</p> <p>Le prove sperimentali sono condotte secondo protocolli standardizzati oppure condivisi con la Direzione centrale per la prevenzione e la sicurezza tecnica del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco.</p> <p>Le prove sono svolte alla presenza di rappresentanza qualificata del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco, su richiesta del responsabile dell'attività.</p> <p>Le prove devono essere opportunamente documentate. In particolare i rapporti di prova dovranno definire in modo dettagliato le ipotesi di prova ed i limiti d'utilizzo dei risultati. Tali rapporti di prova, ivi compresi filmati o altri dati monitorati</p>

### S.8.5 – Aperture di smaltimento fumo e calore d'emergenza

1. A differenza dei SEFC, correttamente dimensionati, **lo smaltimento di fumo e calore d'emergenza non ha la funzione di creare un adeguato strato libero dai fumi durante lo sviluppo dell'incendio, ma solo quello di facilitare l'opera di estinzione dei soccorritori.**
2. *Lo smaltimento di fumo e calore d'emergenza può essere realizzato per mezzo di aperture di smaltimento dei prodotti della combustione verso l'esterno dell'edificio. Tali aperture coincidono generalmente con quelle già ordinariamente disponibili per la funzionalità dell'attività (es. finestre, lucernari, porte, ...).*



### S.8.5.1 – Caratteristiche delle Aperture di smaltimento fumo e calore d'emergenza

1. *Le aperture di smaltimento devono essere realizzate in modo che:*
  - a. sia possibile smaltire fumo e calore da tutti gli ambienti del compartimento;
  - b. fumo e calore smaltiti non interferiscano con il sistema delle vie d'esodo, non propaghino l'incendio verso altri locali, piani o compartimenti.
2. *Le aperture di smaltimento devono essere protette dall'ostruzione accidentale durante l'esercizio dell'attività.*
3. Devono essere previste indicazioni specifiche per la gestione in emergenza delle aperture di smaltimento (capitolo S.5).
4. *Le aperture di smaltimento sono realizzate secondo uno dei tipi d'impiego previsti nella tabella S.8-4.*

**In relazione agli esiti della valutazione del rischio, una porzione della superficie utile delle aperture di smaltimento dovrebbe essere realizzata con una modalità di tipo SEa, SEb, SEc.**

**S.8.5.1 – Caratteristiche delle Aperture di smaltimento fumo e calore d'emergenza***Tabella S.8-4: Tipi di realizzazione delle aperture di smaltimento*

<b>Tipo di impiego</b>	<b>Descrizione</b>
SEa	Permanentemente aperte
SEb	Dotate di sistema automatico di apertura con attivazione asservita ad IRAI
SEc	Provviste di elementi di chiusura (es. infissi, ...) ad apertura comandata da posizione protetta e segnalata
SEd	Provviste di elementi di chiusura non permanenti (es. infissi, ...) apribili anche da posizione non protetta
SEe	Provviste di elementi di chiusura permanenti (es. lastre in polimero PMMA, policarbonato, ...) per cui sia possibile l'apertura nelle effettive condizioni d'incendio (es. condizioni termiche generate da incendio naturale sufficienti a fondere efficacemente l'elemento di chiusura, ...) o la possibilità di immediata demolizione da parte delle squadre di soccorso.

**S.8.5.2 Dimensionamento delle Aperture di smaltimento fumo e calore d'emergenza**

1. La superficie utile minima complessiva SE delle aperture di smaltimento di piano è calcolata come indicato in tabella S.8-5 in funzione del carico d incendio specifico  $q_f$  (capitolo S.2) e della superficie lorda di ciascun piano del compartimento A.
2. La superficie utile SE può essere suddivisa in più aperture. Ciascuna apertura dovrebbe avere forma regolare e superficie utile  $\geq 0,10 \text{ m}^2$ .

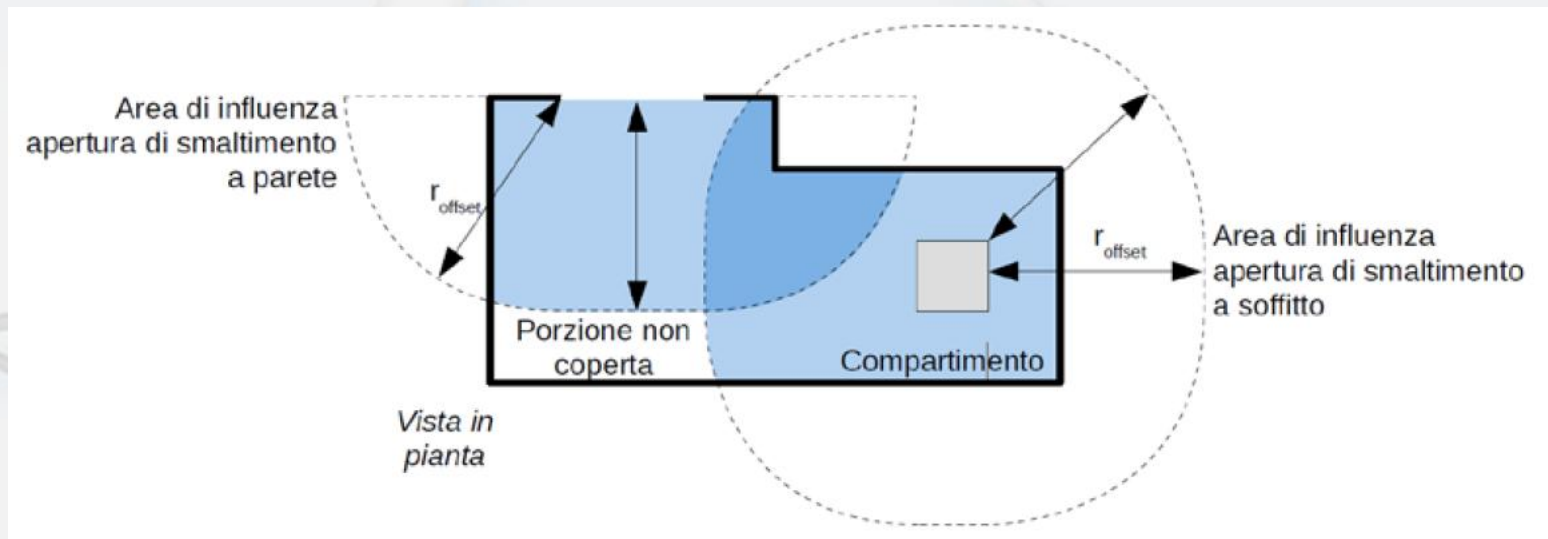
*Tabella S.8-5: Tipi di dimensionamento per le aperture di smaltimento*

Tipo di dimensionamento	Carico di incendio specifico $q_f$	SE [1] [2]	Requisiti aggiuntivi
SE1	$q_f \leq 600 \text{ MJ/m}^2$	$A/40$	-
SE2	$600 < q_f \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$	$A \cdot q_f / 40000 + A/100$	-
SE3	$q_f > 1200 \text{ MJ/m}^2$	$A/25$	10% di SE di tipo SEa o SEb o SEc
[1] Con SE superficie utile delle aperture di smaltimento in $\text{m}^2$			
[2] Con A superficie lorda di ciascun piano del compartimento in $\text{m}^2$			



### S.8.5.3 Verifica della distribuzione uniforme delle aperture di smaltimento

1. Le aperture di smaltimento dovrebbero essere distribuite uniformemente nella porzione superiore di tutti i locali, al fine di facilitare lo smaltimento dei fumi caldi dagli ambiti del compartimento.
2. L'uniforme distribuzione in pianta delle aperture di smaltimento può essere verificata imponendo che il compartimento sia completamente coperto in pianta dalle aree di influenza delle aperture di smaltimento ad esso pertinenti (illustrazione S.8-1), **imponendo nel calcolo un raggio di influenza  $r$  offset pari a 20 m** o altrimenti determinato secondo le risultanze della valutazione del rischio.



## S.8.6 Sistemi di ventilazione forzata orizzontale del fumo e del calore

1. ***I sistemi di ventilazione orizzontale forzata possono essere progettati per uno o più dei seguenti obiettivi di sicurezza in caso di incendio:***
  - a. *fornire condizioni tenibili per le squadre di soccorso da un punto di accesso sino alla posizione dell'incendio;*
  - b. proteggere le vie di esodo, ad esclusione di quelle nel compartimento di primo innesco;
  - c. agevolare lo smaltimento di fumo e calore dall'attività dopo l'incendio e ripristinare rapidamente le condizioni di sicurezza.
2. **Devono essere inoltre soddisfatti i seguenti requisiti:**
  - a. l'attivazione dello SVOF deve essere effettuata solo dopo l'evacuazione degli occupanti dal compartimento di primo innesco;
  - b. in caso di presenza di sistemi automatici di inibizione, controllo o estinzione dell'incendio (es. sprinkler, ...) deve essere garantita la compatibilità di funzionamento con lo SVOF utilizzato;
  - c. in presenza di IRAI devono essere previste funzioni di comunicazione e controllo dello stato dello SVOF.
3. **Devono essere previste indicazioni specifiche per la gestione in emergenza dello SVOF (capitolo S.5).**



### S.8.7 Sistemi per l'evacuazione di fumo e calore

1. **I SEFC creano e mantengono uno strato d'aria sostanzialmente indisturbato nella porzione inferiore dell'ambiente protetto mediante l'evacuazione di fumo e calore prodotti dall'incendio.** Mantengono le vie di esodo libere da fumo e calore, agevolano le operazioni antincendio, ritardano o prevengono il *flashover* e quindi la generalizzazione dell'incendio, limitano i danni agli impianti di servizio o di processo ed al contenuto dell'ambito protetto, riducono gli effetti termici sulle strutture dell'ambiente protetto, agevolano il ripristino delle condizioni di sicurezza dell'attività dopo l'emergenza.
2. **Si considerano soluzione conforme** i SEFC progettati, installati e gestiti in conformità alle norme:
  - a. UNI 9494-1, per SEFC ad evacuazione *naturale* (SENFC),
  - b. UNI 9494-2, per SEFC ad evacuazione *forzata* (SEFFC).

*Nota Le soluzioni conformi per i SEFC risultano essere praticabili solo nel campo di diretta applicazione delle norme UNI 9494-1 ed UNI 9494-2. Al di fuori del campo di applicazione diretta, si deve ricorrere ad altra norma tecnica o ad una soluzione alternativa.*

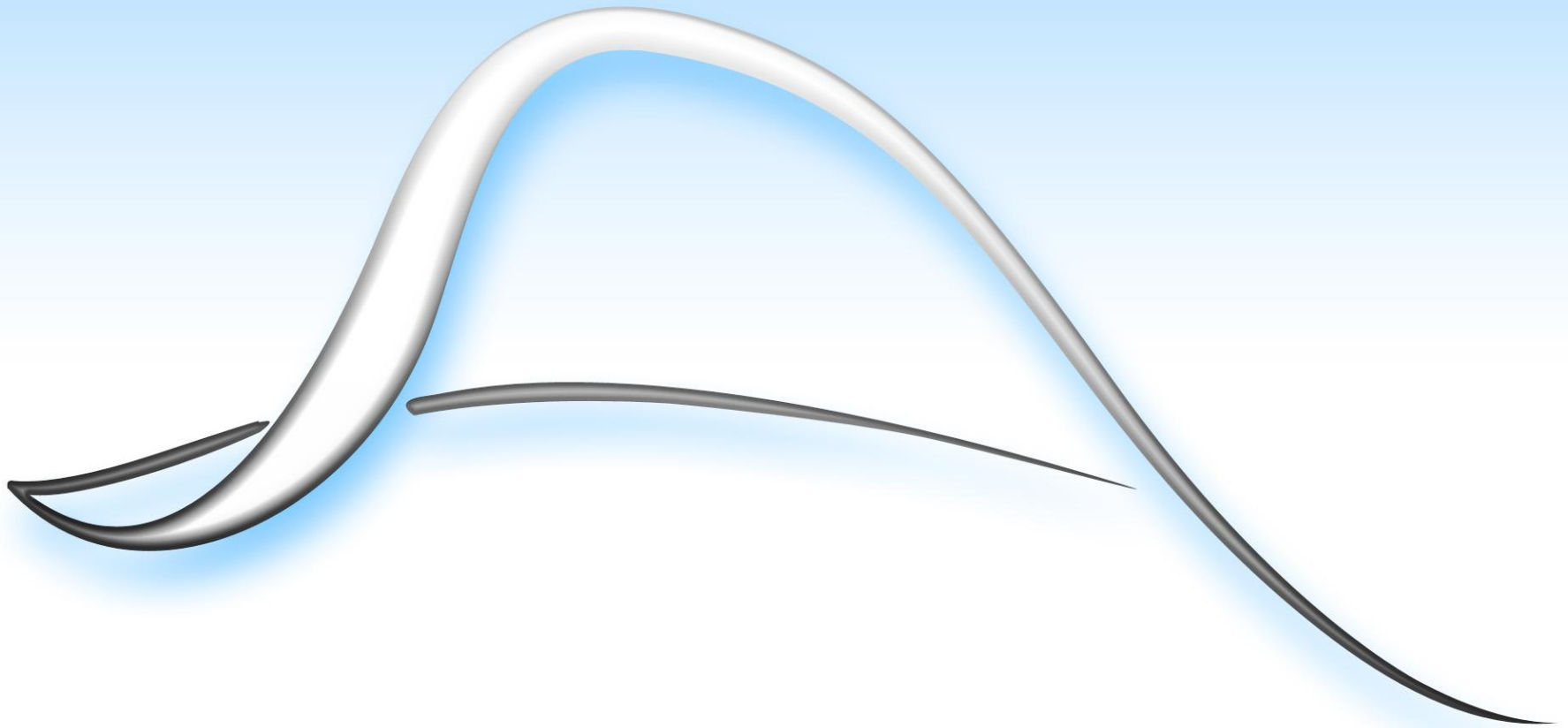
3. **Devono inoltre essere soddisfatti i seguenti requisiti:**
  - a. in caso di presenza di sistemi automatici di inibizione, controllo o estinzione dell'incendio (es. sprinkler,...) deve essere garantita la compatibilità di funzionamento con il SEFC utilizzato;
  - b. in presenza di IRAI devono essere previste funzioni di comunicazione e controllo dello stato dell'impianto SEFC.

### **S.8.8 Segnaletica**

I presidi antincendio devono essere indicati da segnaletica di sicurezza UNI EN ISO 7010.



## FUMO E VENTILAZIONE: FONDAMENTI TEORICI E GESTIONE PROGETTUALE



## Il fumo: generazione e propagazione

Nel suo testo fondamentale “An introduction to fire dynamics” Drysdale cita una definizione del fumo data da un altro noto studioso che recita:

**“il fumo è costituito dai prodotti gassosi originati da materiale organico che brucia ed in cui piccole particelle solide e liquide sono disperse”.**

Tale definizione è da preferirsi alle tante esistenti in quanto enfatizza il fatto che il fumo è formato integralmente sia da particolato, solido e liquido, sia da gas e che tali componenti non possono essere considerati separatamente. Questo accoppiamento fornisce quella pericolosa combinazione di oscuramento degli ambienti e di tossicità che rappresenta la causa principale di morte in caso di incendio.

La quantità di fumo prodotto durante un incendio dipende fortemente dalla natura del materiale che sta bruciando mentre **la quantità di gas caldi che trasporta questo fumo sotto forma di particolato dipende invece dalle dimensioni del focolare e dal tasso di combustione, in pratica dalla potenza dell'incendio.**

## Il fumo: generazione e propagazione

Il numero ed il tipo di prodotti gassosi che si formano e la loro distribuzione è estremamente sensibile alla variazioni, sia pur piccole, che avvengono nello scenario “incendio”.

Un altro parametro fondamentale che regola la produzione di specie chimiche che si formano durante la combustione è la ventilazione.

Ogni reazione chimica di combustione è caratterizzata da una sua “idealità” che è espressa dal rapporto stechiometrico. In tali condizioni avviene la completa conversione delle specie chimiche (combustibile + aria) nei prodotti di combustione.

Ovviamente le condizioni di ventilazione possono mutare: si può avere **superventilazione o sottoventilazione**, ambedue condizioni caratterizzate da presenza di fiamma.

Può anche aversi una condizione di carenza di ossigeno, al limite della possibilità di combustione, con brace senza fiamma (smoldering).

Le condizioni di sottoventilazione rappresentano un serio pericolo in quanto durante una combustione incompleta viene prodotto ossido di carbonio (CO) ed aumenta la produzione di composti cianidrici (HC).

## **Il fumo: generazione e propagazione**

Anche il particolato dipende da una combustione incompleta e poiché in un incendio, nella regione delle fiamme e al di là delle condizioni di ventilazione, esistono sempre zone con carenza di ossigeno, avremo sempre produzione di fumo. In queste zone una certa quantità di specie volatili che evaporano dalla superficie del combustibile vengono pirolizzate con formazioni di idrocarburi aromatici policiclici che si ritengono i precursori del nerofumo.

Il fumo si muove sotto l'influenza di forze che si manifestano sotto la forma di gradienti di pressione nell'interno della massa di fluido.

Per il movimento di tali masse di fumo all'interno di compartimenti o, più in generale di edifici, tali forze sono originate da:

1. spinte di galleggiamento dovute a differenze di temperature tra temperature esterna ed interna , con conseguente modificazione delle densità delle masse gassose;
2. spinte di galleggiamento origiante direttamente dall'incendio;
3. effetti dovuti alla spinta del vento dall'esterno;
4. spinte fluidodinamiche legate al sistema di ventilazione degli ambienti.

## Il fumo: generazione e propagazione

Tutti questi parametri concorrono insieme a determinare la direzione predominante del fumo e la sua velocità negli ambienti.

Le spinte di galleggiamento di cui al punto 1) devono essere prese in considerazione quando si analizzano edifici di grande altezza o comunque strutture molto articolate che si sviluppano su varie quote, come ad esempio una stazione metropolitana di profondità. In questo tipo di strutture sono comuni “effetti camino” dovuti alla grande differenza di temperatura tra fumi caldi che possono essere originati in basso e temperatura ambiente dell'esterno.

In caso di ambienti particolarmente articolati le masse di fumo e gas caldi, nel percorso verso l'uscita, tendono a raffreddarsi e a perdere di velocità, anche per attrito con le pareti, e quindi ad aumentare il tempo di permanenza nella struttura.

**Si ricorda che il raffreddamento è fatto a spese delle strutture circostanti che quindi si riscaldano.**

Anche gli impianti di ventilazione possono concorrere ad aggravare la situazione in ambienti invasi da grandi quantità di fumo, se non correttamente progettati e corredati di procedure di emergenza in caso di incendio.



## Opacità e riduzione della visibilità

Il cambiamento di visibilità è probabilmente il primo effetto tangibile che si produce durante un incendio, anche prima che lo stesso divenga una minaccia seria dal punto di vista termico.

Si ricordi sempre che l'erogazione di fumo da un incendio, anche piccolo, è sempre molto veloce in quanto la pirolisi del materiale (gassificazione) inizia a temperature a circa 80-100 °C.

La visibilità viene progressivamente attenuata dal fumo dovuto alle particelle, in particolare nerofumo ma anche alla presenza di sostanze catramose condensanti. Il nerofumo dà al fumo il classico colore nero. Le sostanze catramose, normalmente prodotte in combustioni iperventilate, danno un fumo grigiastro.

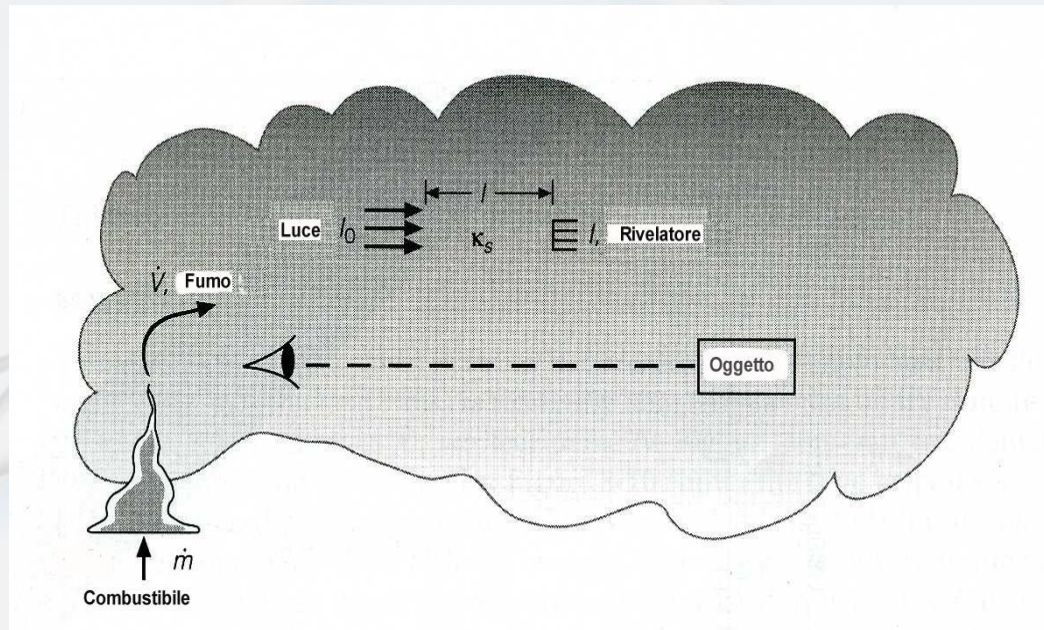
Il parametro che misura l'attenuazione di visibilità (per assorbimento e rifrazione) è il coefficiente di estinzione **ks**. Esso può essere usato per calcolare la riduzione dell'intensità luminosa  $I$  lungo un cammino ottico.

## Opacità e riduzione della visibilità

L'intensità originale ( in condizioni normali)  $I_0$  è ridotta dal fumo secondo la relazione

$$I = I_0 \exp(-k_s l)$$

L'abilità di vedere attraverso il fumo è detta visibilità  $L_v$  ed è correlata con il coeff. di estinzione  $k_s$ . La figura sottostante schematizza il fenomeno.



## Opacità e riduzione della visibilità

L'intensità originale ( in condizioni normali)  $I_0$  è ridotta dal fumo secondo la relazione

$L_v$  rappresenta la distanza massima alla quale un oggetto può essere visto e riconosciuto attraverso il fumo. La quantità densità ottica  $D_m$  è correlata direttamente alla produzione di particolato solido e di aerosol nel fumo. Questo parametro può essere facilmente misurato.

Si riportano in tabella alcuni valori relativi a vari combustibili

Combustibile	$D_m(m^2/g)$
Eptano	0,190
Polimetilmetacrilato	0,109
Cloruro di polivinile (Grani)	0,400
Schiuma di poliuretano	0,326
Legno (pino, abete)	0,037

## Opacità e riduzione della visibilità

Il coefficiente di estinzione dipende dalla concentrazione del particolato e può essere calcolato relativamente ad un dato burning rate e ad un certo flusso volumetrico di fumo mediante la seguente relazione

$$k_s = \frac{\dot{m}D_m}{\dot{V}}$$

Risulta chiaro che per ciascun valore di  $k_s$  esiste un corrispondente valore di visibilità, secondo la relazione

$$L_v = \frac{C_v}{D_0}$$

dove  $D_0$  è la densità ottica per lunghezza di cammino ottico unitario e vale  $2,3 k_s$  mentre  $C_v$  varia tra 1 e 4 e dipende dall'illuminazione dell'oggetto.

## La ventilazione: elementi fluidodinamici

Se un compartimento è chiuso o se si trova nella fase iniziale di un incendio, prima che il fumo fuoriesca attraverso le aperture, la dinamica è quella tipica del riempimento.

L'interfaccia del fumo si muove verso dall'alto verso il basso per riempire il compartimento ed anche se questo ha delle perdite verso l'esterno, esso continuerà a riempirsi se l'incendio è sufficientemente vigoroso.

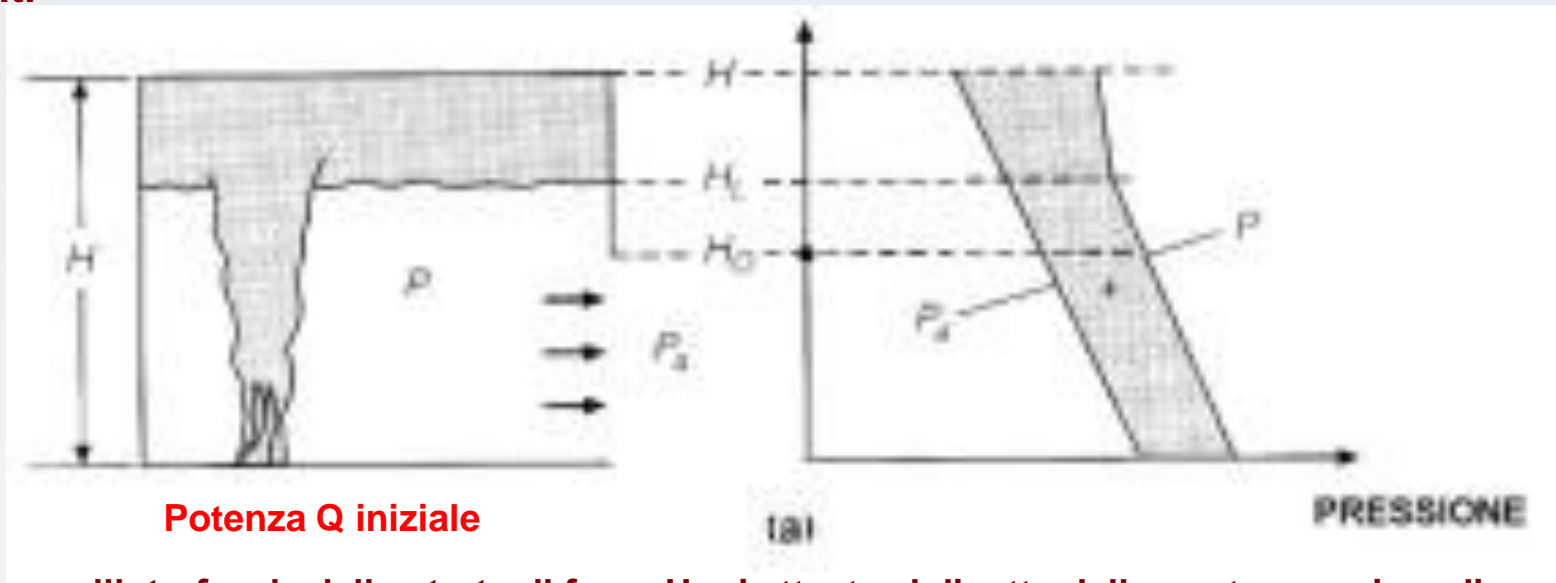
Tutti gli edifici presentano infiltrazioni verso l'esterno in quanto non sono perfettamente sigillati. **Nell'interno la pressione in presenza di incendio varia molto poco, quel tanto necessario per attivare il moto dei gas presenti.**

In ogni caso si produrrà una leggera pressione positiva che sarà sufficiente per provocare la fuoriuscita dei gas e del fumo.

In alcuni casi può accadere che le fiamme si estinguano per carenza di ossigeno, con caduta della temperatura: la pressione si inverte diventando negativa ma questo fenomeno richiama aria dall'esterno che può rivitalizzare le braci riattivando le fiamme.

## La ventilazione: elementi fluidodinamici

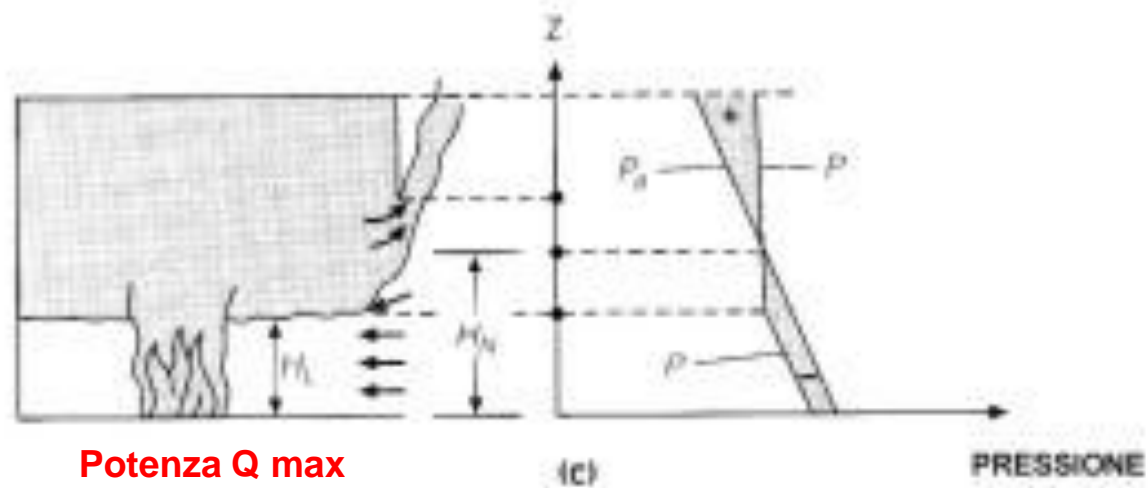
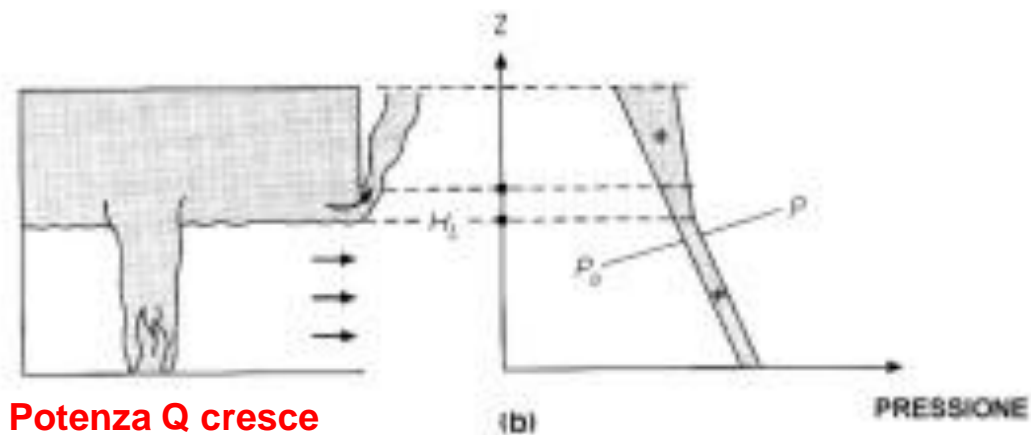
L'andamento qualitativo del flusso e della pressione sono riportati nelle immagini seguenti



Appena l'interfaccia dello strato di fumo  $H_L$  si attesta al disotto della quota superiore di un'apertura, **il flusso attraverso l'apertura comincia a diventare bidirezionale**. Da quel momento il flusso in entrata diventa circa uguale a quello in uscita. I due flussi sono separati da un piano virtuale, detto piano neutro, che divide l'altezza  $H_0$  dell'apertura in due parti: la quota del piano neutro varia tra  $H_0/2$  e  $H_0/3$  quando il compartimento è invaso dalle fiamme. In tale caso lo strato di fumo può abbassarsi fino a pochi centimetri dal pavimento.

Nell'ipotesi di fuoriuscita dei fumi dal compartimento verso compartimenti adiacenti, posti alla stessa quota o a quote superiori, la dinamica del movimento dei fumi diventa complessa

## La ventilazione: elementi fluidodinamici



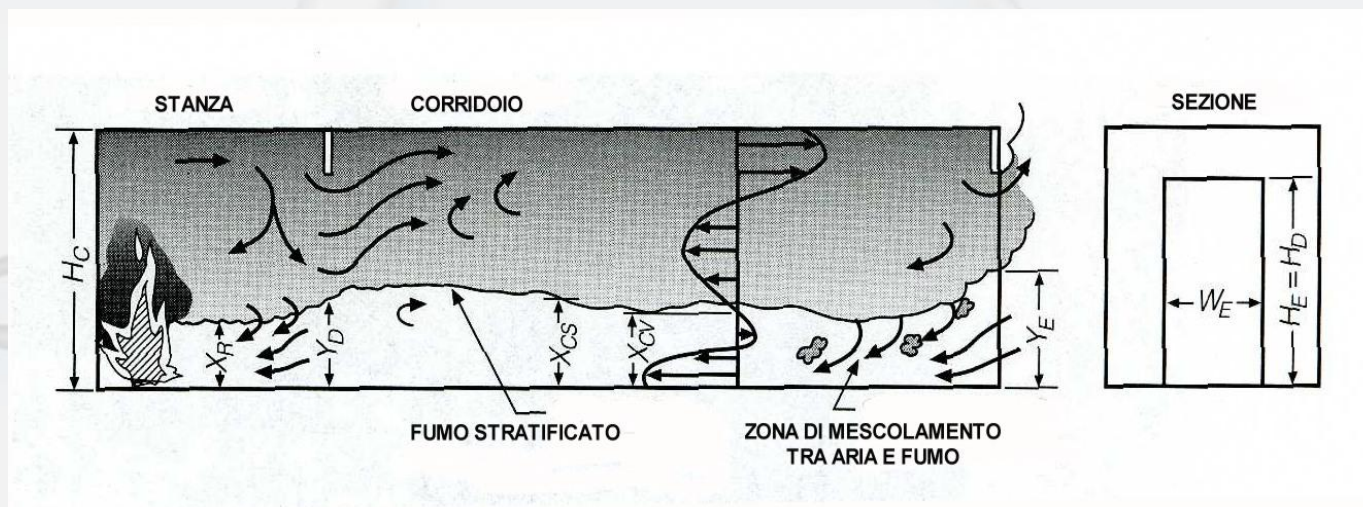


## La ventilazione: elementi fluidodinamici

La figura seguente mostra il flusso di fumo in un corridoio che sfocia con un apertura.

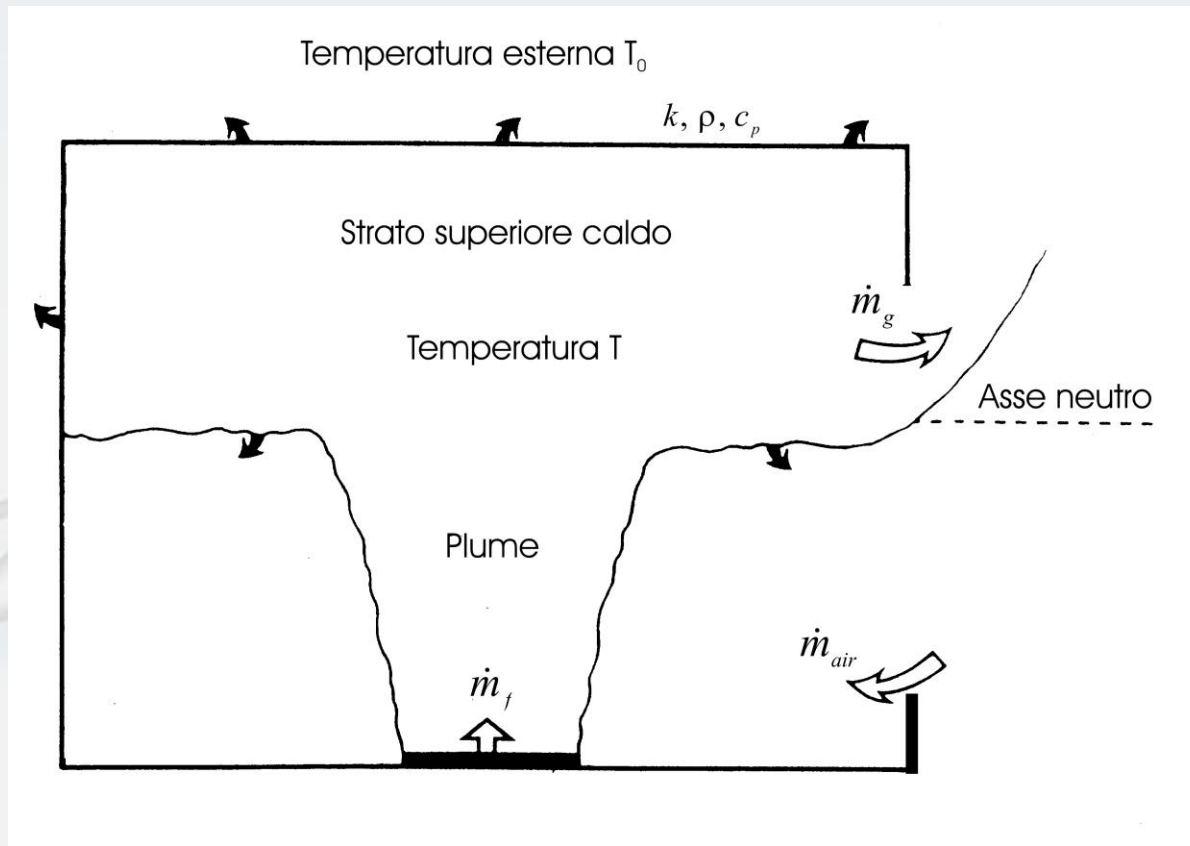
Uno strato di fumo la cui altezza di interfaccia dipende dalle dimensioni dell'apertura si forma lungo il corridoio: più è piccola questa apertura, più è bassa quell'interfaccia.

Nel caso di compartimenti comunicanti con vani molto alti che possono funzionare come camini, una volta che il fumo ha invaso il vano verticale il flusso (tiraggio) dipende dall'apertura del camino, dalla sua altezza e dalle condizioni di vento all'esterno.



## La ventilazione: elementi fluidodinamici

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.



## La ventilazione: elementi fluidodinamici

Relativamente al modello riportato possiamo scrivere:

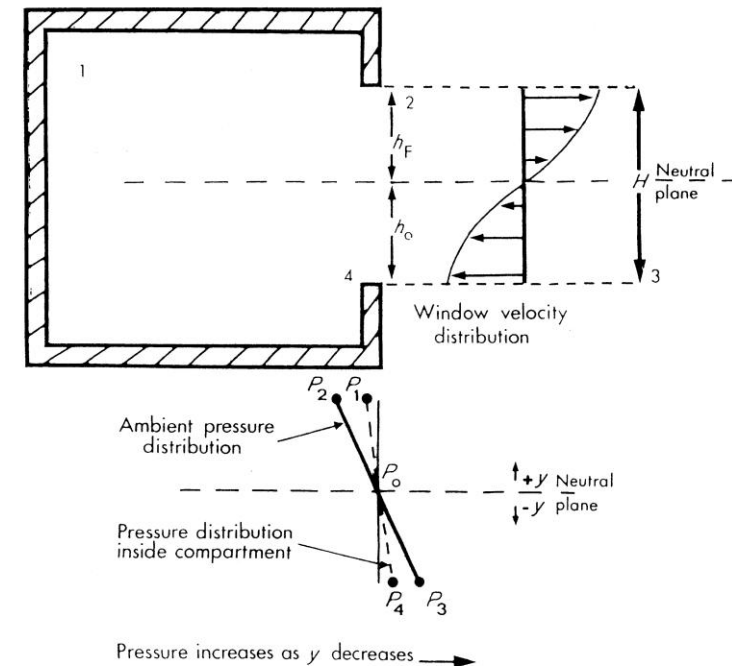
$$\dot{m}_f = \dot{m}'' A_f$$
$$\dot{m}_f = \frac{\dot{q}_{flame}'' + \dot{q}_{ext}''}{L}$$
$$\phi \equiv \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_{air}''}{1 / r}$$

Dove  $\phi$  è il rapporto di equivalenza ovvero

$$\phi = \frac{\text{massa} \cdot \text{di} \cdot \text{combustibile} \cdot \text{disponibile}}{\text{massa} \cdot \text{di} \cdot \text{ossigeno} \cdot \text{disponibile}} \cdot \frac{\text{rapporto} \cdot \text{stechiometrico} \cdot \text{ponderale} \cdot \text{tra} \cdot \text{combustibile} \cdot \text{e} \cdot \text{ossigeno}}{1}$$

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

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

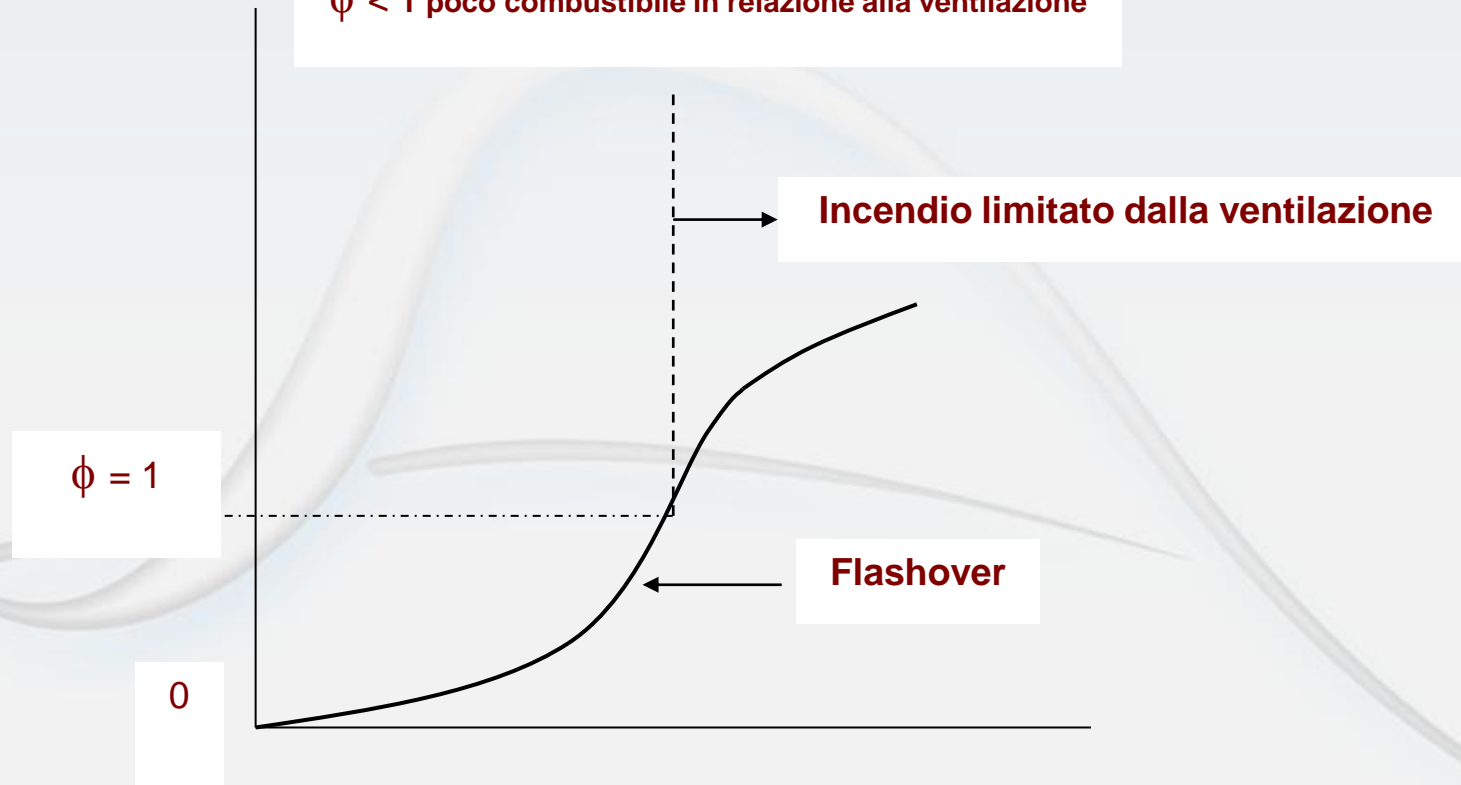


## La ventilazione: elementi fluidodinamici

Rapporto di equivalenza in funzione delle fasi di incendio:

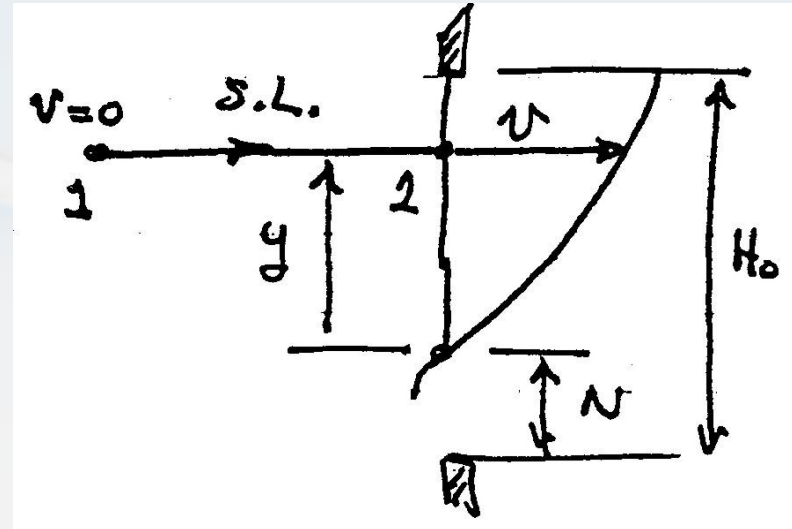
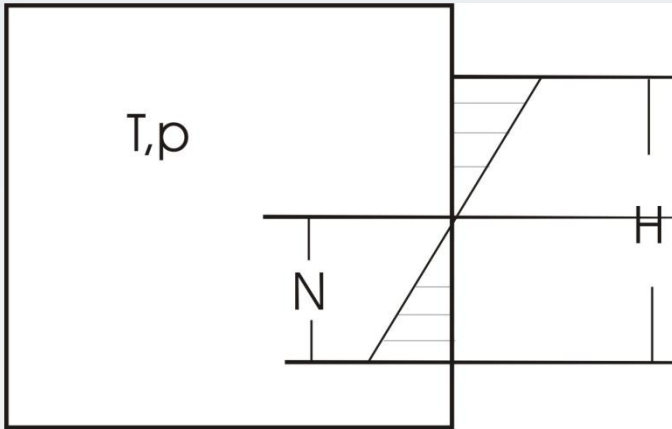
$\phi > 1$  molto combustibile in relazione alla ventilazione

$\phi < 1$  poco combustibile in relazione alla ventilazione



## La ventilazione: elementi fluidodinamici

$H_o$  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

$$p(y) = p(0) - \rho g y$$

nel flusso esterno

$$p_{\infty}(y) = p_{\infty}(0) - \rho_{\infty} g y$$

## La ventilazione: elementi fluidodinamici

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

Inoltre, per Bernoulli, possiamo scrivere:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{v^2}{2} + \frac{p_{\infty}}{\rho}$$

Combinando le 4 equaz. precedenti si ottiene

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

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:

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

## La ventilazione: elementi fluidodinamici

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

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

Nello stesso modo possiamo calcolare il flusso in entrata:

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

Se assumiamo che il flusso è stazionario e che la portata di combustibile vaporizzato è trascurabile rispetto alla portata di aria possiamo scrivere:

$$\frac{\dot{m}_{air}}{\frac{2}{3} C \sqrt{2g} \rho_{\infty} W_0 H_0^{3/2}} = \frac{\theta^{1/2} (1 - \theta)^{1/2}}{(1 + \theta^{1/3})^{3/2}}$$

dove:

$$\theta = \frac{T_{\infty}}{T}$$

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

**(Fattore di ventilazione)**

$$\frac{N}{H_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\theta^{1/3}}}$$



## La ventilazione: elementi fluidodinamici

Assumiamo alcuni valori usuali e poniamo:

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

e scriviamo che:

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

Per  $\theta \rightarrow 1$   $N/H_0 \rightarrow 0.5$  e  $\dots = 0$

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

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

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

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

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

## Metodologia generale di controllo del fumo

Due regole fondamentali regolano la gestione di controllo del fumo dovuto ad un incendio:

- il fumo non deve invadere le vie di fuga
- il fumo deve essere evacuato velocemente verso l'esterno. (Misura S.8)

Per quanto riguarda il primo punto, i metodi per ottenere il controllo si basano su zone filtro dotate di porte resistenti al fuoco e all'infiltrazione di gas e su impianti che creano sovrappressioni in direzione contraria a quella di movimento del fumo, comprese anche barriere d'aria localizzate che creano zone a pressione diversa.

La tecnica della sovrappressione è molto usata nei paesi anglossassoni, dove già da molti anni sono stati effettuati studi molto accurati, con particolare riguardo ad edifici di grande altezza e strutture commerciali costituite da grandi atri. È stato trovato che una pressione differenziale di  $25\div50 \text{ N/mq (Pa)}$  è sufficiente a fronteggiare la maggior parte delle situazioni, con esclusione di alcuni edifici con altezze molto grandi dove l'effetto camino può superare questi valori.

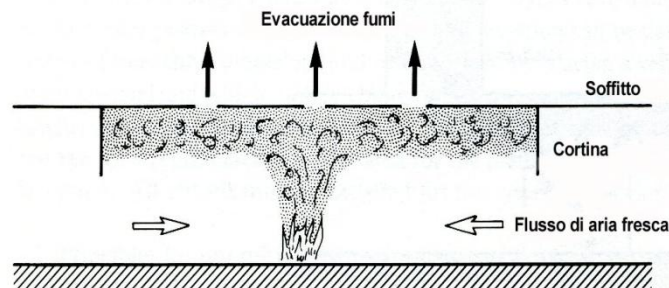
## Metodologia generale di controllo del fumo

Ad esempio il British Standard Code of Practice prescrive il valore di 50 N/mq in condizioni di emergenza. Questo effetto può essere ottenuto incrementando in tempi molto brevi la normale portata di ventilazione.

Ovviamente la necessaria potenza dei ventilatori di pressurizzazione può essere ottenuta mediante un accurato studio delle fuoriuscite di aria attraverso le aperture della struttura.

In linea generale il sistema di pressurizzazione deve essere realizzato in modo che attraverso una porta aperta passi un flusso d'aria con una velocità media di 0,75 m/s.

La seconda necessità di evacuare velocemente il fumo verso l'esterno porta all'adozione di soluzioni architettoniche che impediscano la veloce propagazione ( $1\div 3$  m/s) a soffitto del fumo (ceiling jet) e l'instradamento di questo verso condotti verticali o comunque aperture verso l'ambiente esterno. come mostrato nella figura seguente.



## Metodologia generale di controllo del fumo

La tecnica di contenimento è attuata mediante l'installazione di cortine che interrompano la continuità di soffitti molto estesi in lunghezza, ritardando così la propagazione del fumo. Si fa notare che la velocità dei prodotti gassosi a soffitto libero è decisamente maggiore di quella di una persona normale che cammina a passo molto veloce e pertanto la necessità di frenarli diventa imperativa per evitare minacce mortali.

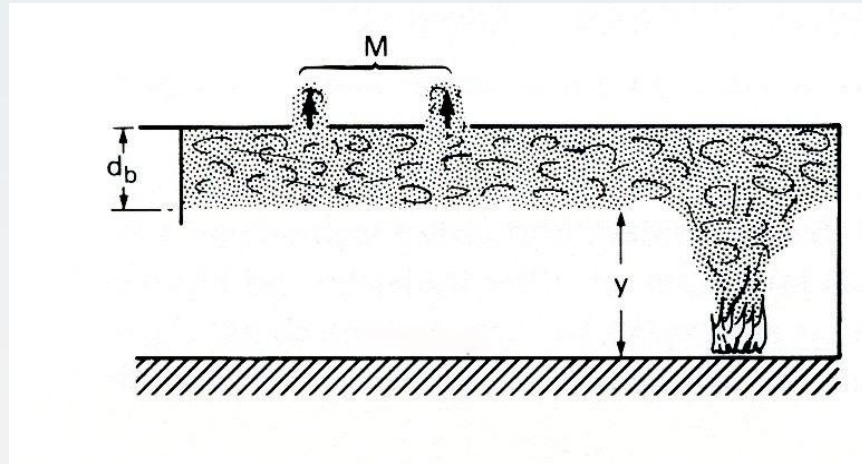
In un compartimento sotto incendio i gas caldi salgono dal pennacchio verso il soffitto richiamando aria alla base del focolare in maniera talmente elevata **che non si fa un grosso errore considerare il volume dei fumi costituito essenzialmente da aria calda**. La portata di aria richiamata può essere approssimativamente calcolata con le seguenti relazioni

$$m_s = 0.065 \dot{Q}^{1/3} Y^{5/3} \quad \text{Con altezza di fiamma} < H_{\text{soff}}$$

$$m_s = 0.055 \dot{Q}^{1/2} Y \quad \text{Con altezza di fiamma} \Rightarrow H_{\text{soff}} \text{ (fiamme impattanti)}$$

## Metodologia generale di controllo del fumo

dove  $m_s$  è la portata di fumo (kg/s)  
 $Q$  è la potenza dell'incendio (kW)  
 $Y$  è l'altezza dalla base del focolare all'interfaccia dello strato di fumo (strato libero)



Si noti che la portata di fumo  $m_s$  dovrebbe essere calcolata in termini di derivata rispetto al tempo (ovvero  $m(t)$ ) in quanto funzione della curva di crescita dell'incendio.

## Metodologia generale di controllo del fumo

Si può usare anche la seguente relazione in cui la potenza dell'incendio è sostituita dal suo perimetro, se stimabile

$$\dot{m}_s = 0,188 \cdot Py^{1/2} \cdot (kg / s)$$

Si riporta anche un grafico per una stima di tipo speditivo, funzione del perimetro dell'incendio e dell'altezza dello strato libero.

