

Gli incendio di progetto

Focus tecnico: Ruolo degli scenari di incendio in un progetto di FSE ed in particolar modo la scelta dell'incendio da modellare analizzando alcuni degli elementi chiave da considerare.

Giugno
2021

ING. PAOLO PERSICO

01



Argomenti trattati

Introduzione generale agli scenari di incendio

- Ruolo dello scenario di incendio nell'ambito di un lavoro di FSE
- In che cosa consiste stabilire uno scenario di incendio
- Relazione tra scenario e obiettivi del progetto

Analisi elementi chiave di uno scenario di incendio:

- Potenza termica (Focus)
- Condizioni al contorno (ubicazione, ventilazione, impianti di protezione)

Analisi di due esempi pratici



Ruolo di uno scenario di incendio nell'ambito di un progetto di FSE

Cuore dell'Ingegneria Prestazionale

Dalla loro modellazione è possibile verificare il raggiungimento degli obiettivi di prevenzione incendi

Costituiscono il risultato dell'analisi del rischio

L'identificazione degli scenari parte da un'approfondita analisi del rischio incendio dell'attività



Cosa rappresenta uno scenario di incendio ?

Rappresentano la
schematizzazione degli
eventi che possono
ragionevolmente verificarsi
in relazione alle:

**Caratteristiche del
focolaio**

**Caratteristiche
dell'edificio**

**Caratteristiche degli
occupanti**

In che cosa consiste definire uno scenario di incendio ?

01

Stabilire dove si sviluppa l'incendio

Quali locali sono interessati? Quale piano? Quali sono le fonti di innesco? Qual'è il primo oggetto che brucia

02

Che area del compartimento interessa

Un incendio localizzato? Interessa un solo oggetto? Interessa tutto il compartimento?

03

Che potenza termica rilascia

Determinare i KW rilasciati dalla sorgente volumetrica in relazione al materiale presente, alla geometria del compartimento e alle condizioni di ventilazione.

04

Con quale velocità di crescita si sviluppa

Il rateo di crescita in base alla tipologia di materiali presenti e alle condizioni di stoccaggio

05

Quali condizioni al contorno dell'ambiente è importante inserire

Aperture di ventilazioni? Elementi della geometria significativi? Stato di apertura/chiusura delle porte? Più piani o un singolo piano?

06

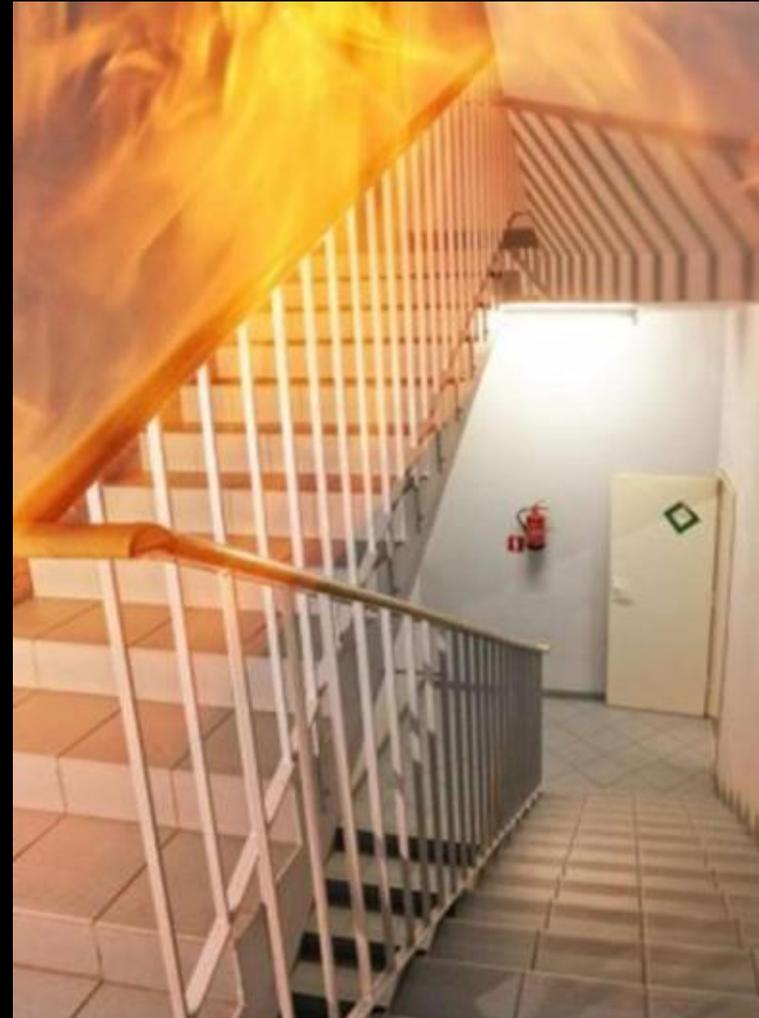
Che ruolo hanno gli impianti di protezione

é presente un impianto sprinkler? C' è un impianto di rilevazione e allarme ? Sono presenti impianti di evacuazione fumo e calore?

Relazione tra scenari e obiettivi

Sicurezza dell'esodo

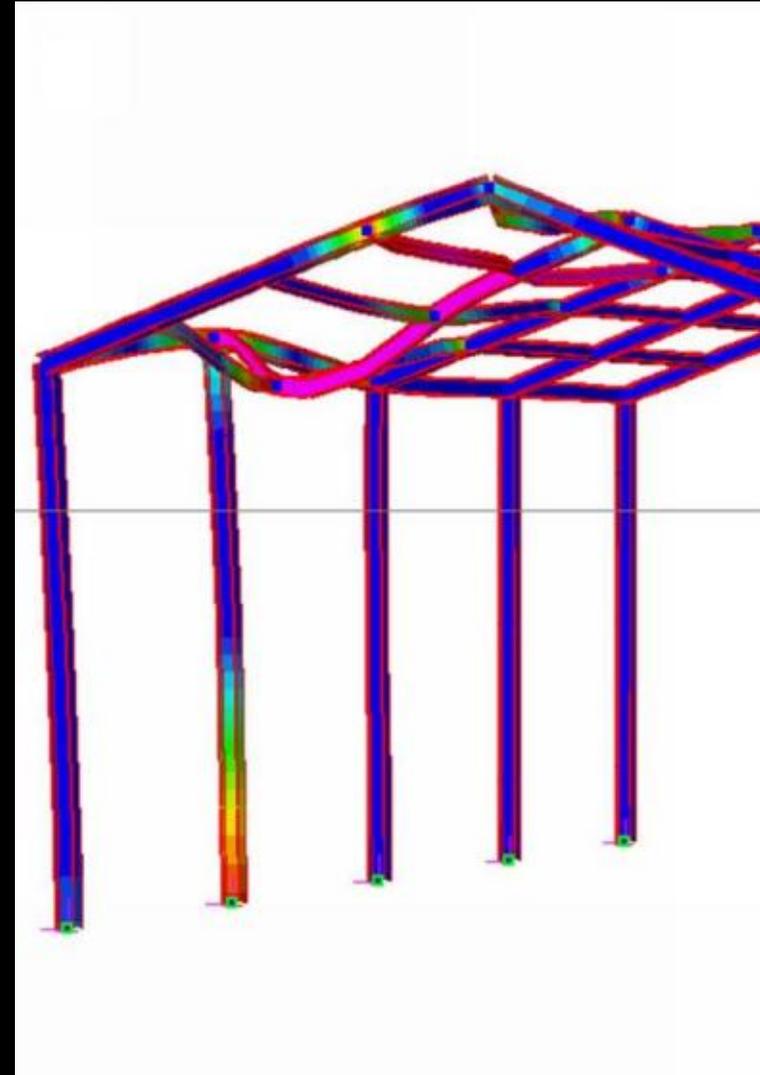
- **Localizzazione:** In prossimità delle vie di esodo, locali non presidiati, locali dei piani inferiori
- **Materiali:** preferibilmente materiali che emettono molto fumo e hanno ratei di crescita rapidi
- **Estensione:** anche un singolo oggetto o più oggetti ma prima del flashover
- **Tipologia di struttura:** elementi a soffitto calati ("serbatoi di fumo"). Piani edificio
- **Geometria degli ambienti:** Altezze e volumi
- **Aperture di ventilazione/comunicazioni:** finestre in genere chiuse, comunicazioni tramite porte aperte/chiusure.



Relazione tra scenari e obiettivi

Resistenza al fuoco delle strutture

- **Localizzazione:** zone con carico di incendio concentrato; zone a maggior carico di incendio
- **Materiali:** in genere tutti i materiali del compartimento
- **Estensione:** tutto il compartimento
- **Tipologia di struttura:** schema strutturale, tipologia di vincoli, condizioni di carico, materiali che costituiscono la struttura
- **Geometria degli ambienti:** soprattutto altezza e dimensioni in pianta
- **Aperture di ventilazione:** elemento importante da valutare



Relazione tra scenari e obiettivi

Collasso implosivo delle strutture

- **Localizzazione:** zone con carico di incendio concentrato; zone del compartimento a ridosso di elementi di confine
- **Materiali:** in genere materiali con alto potere calorifico, materiali che tendono a bruciare più rapidamente
- **Estensione:** a partire da incendi localizzati sotto elementi vulnerabili o elementi maggiormente significativi in base allo schema strutturale
- **Tipologia di struttura:** schema strutturale, tipologia di vincoli, condizioni di carico
- **Geometria degli ambienti:** soprattutto altezza e dimensioni in pianta
- **Aperture di ventilazione:** possono alterare in modo significativo il profilo di riscaldamento dell'ambiente



Quali sono gli elementi chiave di uno scenario di incendio?



09

Caratteristiche del focolaio

Insieme di elementi che rappresentano l'incendio all'interno del compartimento

Caratteristiche dell'edificio

Insieme delle condizioni al contorno e tutti gli elementi che possono alterare la propagazione dell'incendio o la diffusione dei fumi

Caratteristiche degli occupanti

Insieme delle condizioni al contorno legate agli occupanti del compartimento che in un'analisi finalizzata alla sicurezza dell'esodo possono condizionare alcune scelte relative all'incendio di progetto

Caratteristiche dell'edificio

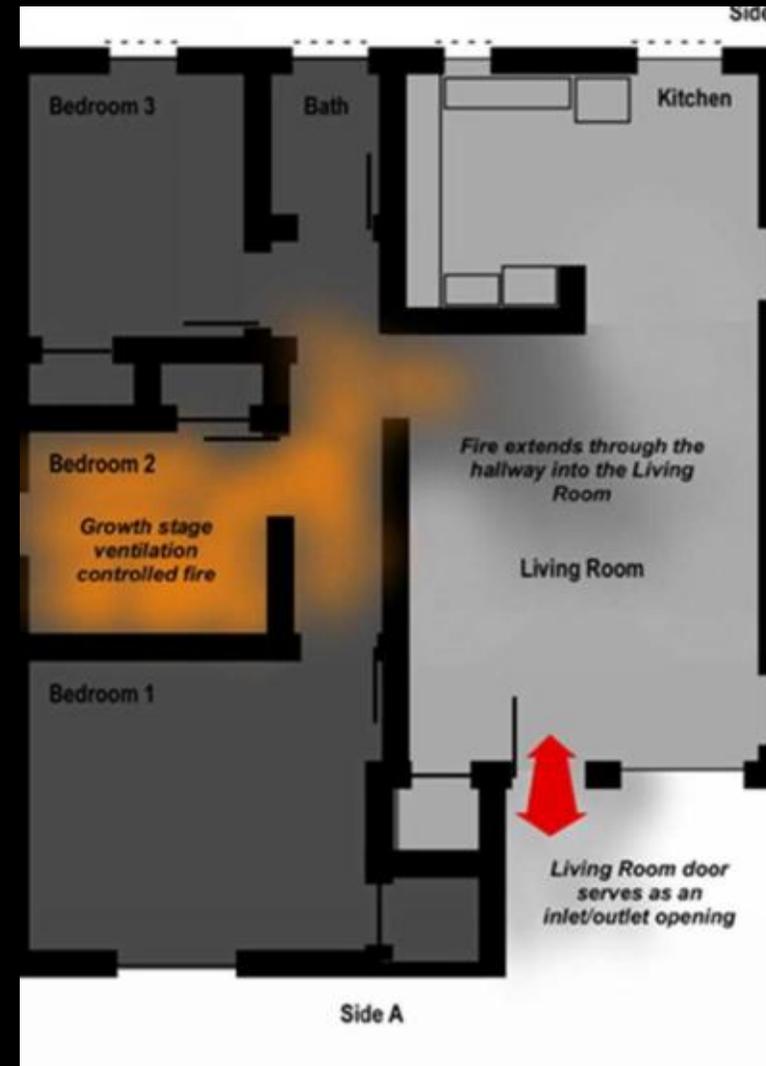
CONDIZIONI AL CONTORNO

Caratteristiche dell'edificio

- Dimensioni geometriche
- Numero di piani
- Materiali da costruzione e tecnica costruttiva
- Altezza e geometria delle aperture
- Ubicazioni aperture di ventilazione (orizzontali/verticali)
- Proprietà termiche di eventuali rivestimenti/controsoffitti
- Proprietà termiche delle tamponature
- Presenza di elementi basso fondenti (lucernari)
- Presenza di impianti di protezione attiva
- Presenza di compartimenti anticendio

Condizioni ambientali

- Vento esterno
- Temperature esterne
- Distanze o interconnessioni con altri fabbricati



Caratteristiche occupanti

CONDIZIONI AL CONTORNO

- Numero;
- Distribuzione nell'edificio;
- Familiarità con l'ambiente
- Addestramento e conoscenza delle procedure di allarme
- Prontezza (addormentati o svegli);
- Particolari destinazioni d'uso (ospedali, carceri, alberghi ecc.)
- Presenta di punti focali;
- Capacità fisiche, sensoriali e mentali;



Caratteristiche del focolaio

INCENDIO DI PROGETTO

Analizzare:

- Possibili fonti di innesco efficaci (ubicazione, tipologia)
- Caratteristiche dei combustibili presenti nel compartimento
- Modalità di stoccaggio
- Quantità di materiali
- Distribuzione del combustibile nel compartimento



Con il fine di:

- Localizzazione nell'ambiente dell'incendio
- Rateo di sviluppo dell'incendio
- Reazione di combustione rappresentativa
- Rateo di produzione fumo rappresentativo dei materiali coinvolti
- **Rateo di rilascio termico - HRR**



+

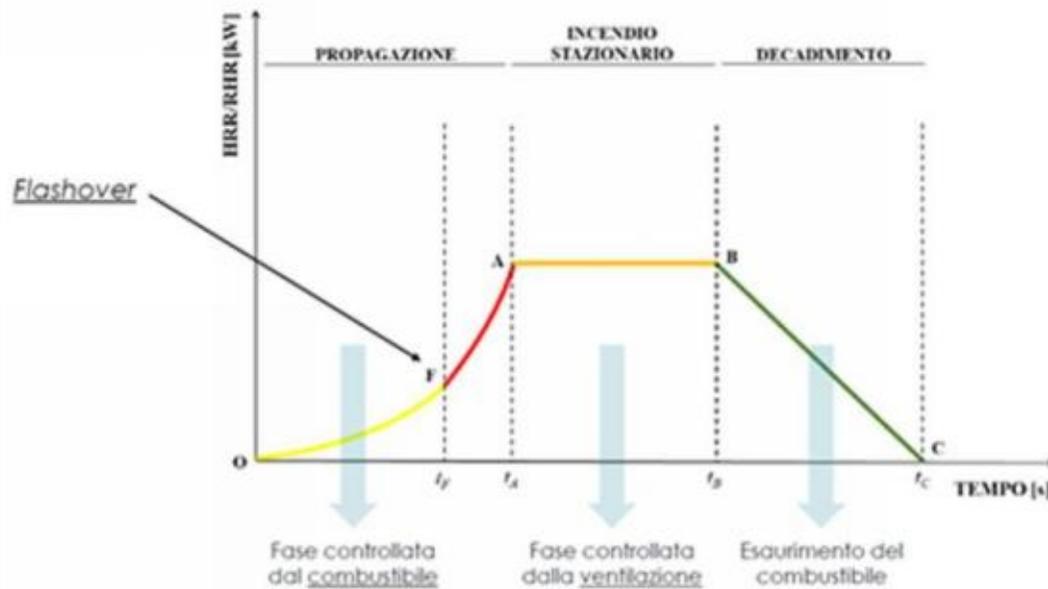
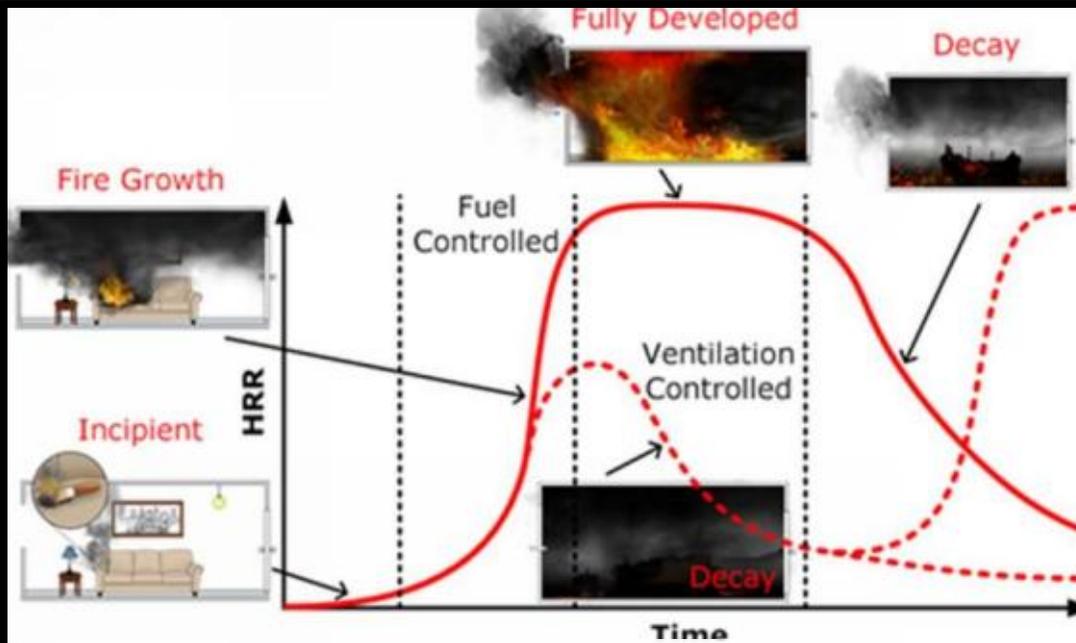
Evoluzione incendio in una stanza

Le fasi di un incendio



Evoluzione incendio in una stanza

Le fasi di un incendio



Evoluzione di un incendio in un grande compartimento - Depositi

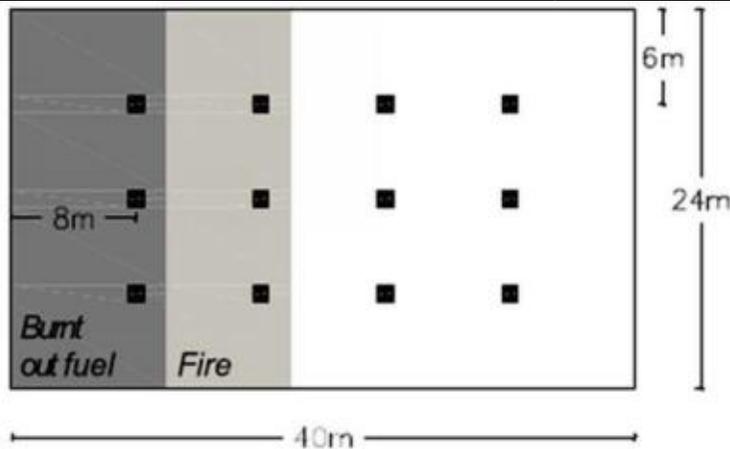
+

- Principali peculiarità di questi ambienti

01

Compartimenti di grandi dimensioni

I compartimenti possono avere superfici oltre i 10.000 mq e altezze ben superiori a 6 m



02

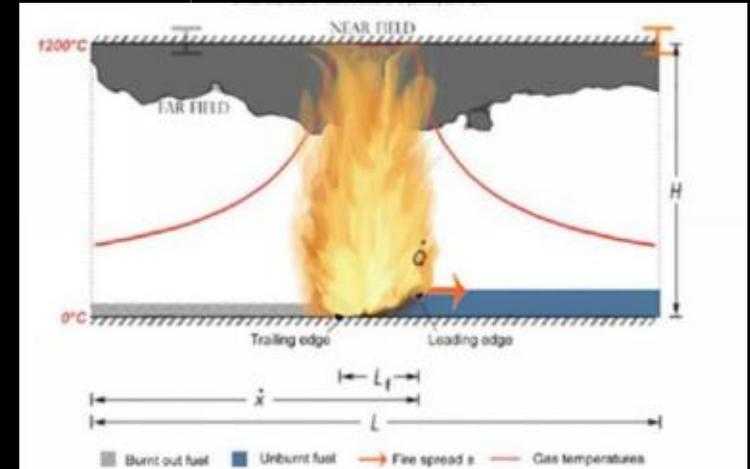
Superficie di ventilazione

Presenza di ampie superfici di ventilazione a soffitto. Shed o lucernari basso-fondenti

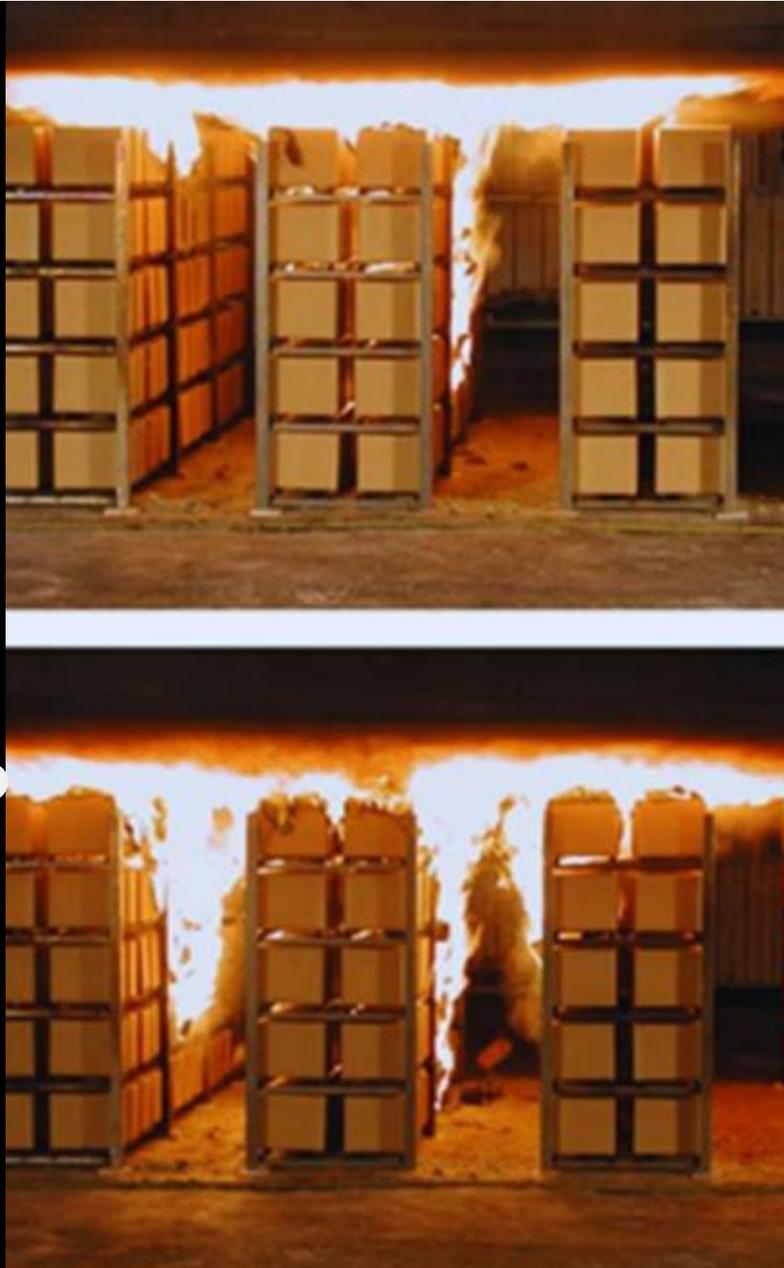
03

Distribuzione tridimensionale delle merce

Nei depositi le scaffalature possono superare i 12 m di altezza pertanto si ha elevato sviluppo verticale dell'incendio

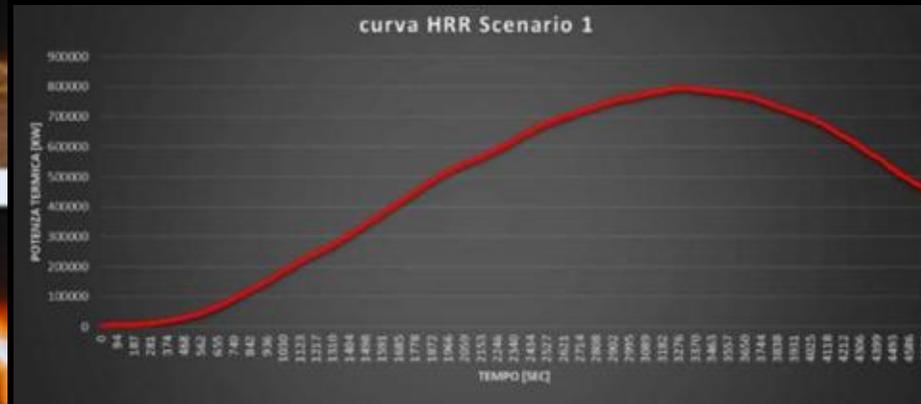


+



Possibile evoluzione di un incendio in un grande compartimento

Le fasi di un incendio



Raggiunti quasi 800 MW

Non si è ancora verificato flashover nell'ambiente

Trascorsi quasi 60 min di incendio

Decadimento della potenza termica non legato a carenza di ossigeno

Focus

Metodologia di stima curve HRR

Utilizzo di equazioni analitiche

Formule matematiche per descrivere l'andamento dell'HRR in condizione di incendi controllati dal combustibile e in incendi controllati dalla ventilazione

Utilizzo focolari predefiniti

Incendi di progetto preconfezionati dal normatore

Procedura analitica

A partire dal materiale combustibile iniziatore dell'incendio con formule analitiche si risale alla sequenza di successive accensioni

Andamento stimato con l'utilizzo di software

Metodo equivalente al precedente ma l'evoluzione dell'incendio è stimata dal software



Equazioni analitiche

Modellazione analitica della curva di rilascio termico per incendi controllati dal combustibile (in genere condizioni pre-flashover o compartimenti di grandi dimensioni)

$$RHR_{max} = RHR_f \times Af$$

HRR max **non limitato** dalle superfici di ventilazione

I valori RHR_f sono i valori raggiunti nella fase stazionaria dell'incendio pienamente sviluppato durante prove sperimentali in aria libera. Alcuni di questi valori sono reperibili nell'appendice E dell'Eurocodice 1 o nelle tabelle 5.2.a e 5.2.b della NFPA 92 B:

Table B.5.2(a) Unit Heat Release Rate for Commodities

Commodity	Btu/sec ft ² of Floor Area	kW/m ² of Floor Area
Wood pallets, stacked 1 1/2 ft high (6-12% moisture)	125	1,420
Wood pallets, stacked 5 ft high (6-12% moisture)	350	4,000
Wood pallets, stacked 10 ft high (6-12% moisture)	600	6,800
Wood pallets, stacked 16 ft high (6-12% moisture)	900	10,200
Mail bags, filled, stored 5 ft high	35	400
Cartons, compartmented, stacked 15 ft high	150	1,700
PE letter trays, filled, stacked 5 ft high on cart	750	8,500
PE trash barrels in cartons, stacked 15 ft high	175	2,000
PE fiberglass shower stalls in cartons, stacked 15 ft high	125	1,400
PE bottles packed in compartmented cartons	550	6,200
PE bottles in cartons, stacked 15 ft high	175	2,000
PU insulation board, rigid foam, stacked 15 ft high	170	1,900
PS jars packed in compartmented cartons	1,250	14,200

Possiamo conoscere la potenza termica emessa per unità di superficie



Se non sono noti i materiali che bruciano possibile usare i valori per attività



Table 10.3. Examples of peak heat release rates based only on estimated use and occupancy, found in [7]. The 5 MW peak heat release rate is considered to be for smaller rooms such as those in offices, apartments and health care units [7]. The 10 MW peak heat release rate is based on value for shopping centres [2].

Occupancy	Peak HRR [kW]
Office and schools	5 000
Dwelling, hotel, health care unit	5 000
Public assembly hall, shop	10 000

Table 10.4. Examples of suggested heat release rate per unit area for fuel-controlled fires, based on occupancy [42]. The HRRPUA is given for the estimated maximum area of the fire [42].

Occupancy	HRRPUA, \dot{Q}'' [kW/m ²]
Dwelling	250
Hospital (room)	250
Hotel (room)	250
Library	500
Office	250
Classroom of a school	250
Shopping centre	250
Theatre (cinema)	500
Transport (public spaces)	250

Equazioni analitiche

Modellazione analitica della curva di rilascio termico per incendi controllati dal combustibile (in genere condizioni pre-flashover o compartimenti di grandi dimensioni)

$$RHR_{max} = RHR_f \times A_f$$

$$RHR = RHR_{PUA} \cdot A_f = \dot{m} A_f \Delta H_{c,eff} = \dot{m} A_f \Delta H_c \gamma$$

RHR [kW] potenza termica totale emessa

RHR_{PUA} [kW/m²] potenza termica emessa per unità di superficie

A_f [m²] superficie orizzontale di bruciamento del combustibile

m [kg/(s m²)] portata massiva per unità di superficie (pirolisi)

ΔH_{c,eff} [kJ/kg] calore di combustione efficace

γ [-] efficienza di combustione (0.6-0.7 per incendi fumosi)

$$m = \dot{Q}'' / L_v$$

Massimo rateo di combustione che un materiale potrebbe avere se il calore perso nella sua massa fosse zero.



Rif. *Fire Dynamics - Drysdale*

Rif. *SFPE Handbook*

$$RHR = \gamma \dot{Q}'' (\Delta H_c / L_v)$$

In letteratura sono tabellati per alcuni materiali i valori del rapporto tra il potere calorifico e l'energia termica necessaria per produrre la pirolisi di 1 kg di combustibile (L_v).

Materie plastiche

- Bassi valori di L_v
- Alti valori di H_c
- Q_l per i materiali a bassa densità (isolanti) molto basso

Conseguenze:

- rapidità di innesco
- potenze termiche maggiori

Equazioni analitiche

Modellazione analitica della curva di rilascio termico per incendi controllati dalla ventilazione (in genere condizioni post-flashover e compartimenti di limitate dimensioni)

$$RHR_{max} = 0,10 m H_u A_v \sqrt{h_{eq}}$$

HRR max **limitato** dalle superfici di ventilazione

- m: fattore di partecipazione alla combustione (0,8 cellulose - 1 per altri materiali)
- H_u potere calorifico inferiore del legno pari a 17500 kJ/kg.
- A_v area totale delle aperture verticali su tutte le pareti del compartimento [m²]
- h_{eq} : altezza equivalente delle aperture verticali
- $A_{v,i}$ area dell'apertura verticale i-esima [m²]
- h_i altezza dell'apertura verticale i-esima

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

Se la relazione è verificata seguirà la fase stazionaria di durata così determinata:

- Bilanciamento dell'energia disponibile:

$$0,7 q_f \times S_p = \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3 + RHR_x \times (t_B - t_A)$$

- Tempo t_B

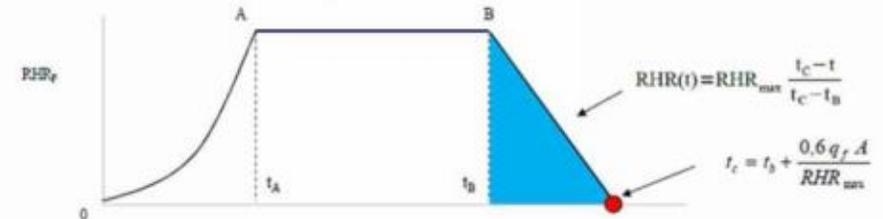
$$t_B = t_A + \frac{0,7 q_f \times S_p - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_a^2} t_A^3}{RHR_x}$$



decadimento

- Secondo UNI EN 1991-1-2 RHR_x si mantiene costante sino al consumo dell'70% del combustibile
- Il decadimento di RHR può essere stimato con andamento lineare uguagliando l'energia spesa da t_B a t_C con quella residua si ottiene:

$$\text{energia spesa} \int_{t_B}^{t_C} RHR(t) dt = \frac{1}{2} RHR_x (t_C - t_B) = 0,3 q_f \times S_p \quad \text{energia residua}$$



Limitazioni:

La correlazione è basata sul concetto che, quando si raggiungono condizioni di scarsa presenza di ossigeno, la potenza termica massima emessa dipende dal massimo quantitativo di aria che può fluire attraverso le aperture verticali (porte e finestre su pareti). Il rateo di combustione è pertanto uguale al rateo di ingresso di aria nell'ambiente:

$$\dot{m}_a = 0.52 A_w \sqrt{h_w} \text{ kg/s.} \quad (2)$$

Being aware of the stoichiometric ratio ($r = 5.2 \text{ kg air/kg}$ burning material for wooden fire loads resp. furnishings), that is the required amount of air for the combustion per kg of burning material, the burning rate can be assumed as

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_a}{r} = \frac{0.52}{5.2} A_w \sqrt{h_w} = 0.1 A_w \sqrt{h_w} \text{ kg/s.} \quad (3)$$

Inserting Eq. (3) in Eq. (1) supplies the rate of heat release of a ventilation-controlled fire, which corresponds to annex E of Ref. [4]:

$$\dot{Q}_v = 0.1 A_w \sqrt{h_w} \gamma H_{\text{net}} \text{ MW.} \quad (4)$$

La relazione, quindi:

- non tiene conto delle dimensioni del compartimento ed è stata sviluppata partendo dagli studi su compartimenti di piccole dimensioni di Thomas nei quali può considerarsi valida la formula (2); **Ossia compartimenti nei quali la temperatura può considerarsi uniforme in tutto il volume e maggiore di 300 °C** - Encluse Fire _Quintiere
- **non contempla, infine, la presenza di aperture di ventilazione a soffitto (superfici orizzontali)**, presenti in molti grandi depositi.
- è stata sviluppata per materiali a base lignea, in quanto il rateo stechiometrico d'aria della formula è 5,2 ad esempio per il polietilene $r = 14,6 \text{ kgaria/kgcombustibile}$ e il potere calorifico è superiore 35 MJ/kg.

Le origini della formula con i suoi limiti applicativi sono riportati nell'articolo "A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings" (4) i cui autori sono appunto J. Zehfussa, D. Hosser

Focolari predefiniti

Incendi di progetto i cui parametri rappresentativi sono forniti direttamente dal normatore

Codice Italiano

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_c	150 s (fast)	75 s (ultra-fast)
RHR _{max} totale RHR _{max} per m ² di superficie del focolare	5 MW 250-500 kW/m ² [1]	50 MW 500-1000 kW/m ² [1]
Resa in particolato Y _{smoke}	Pre flashover: 0.07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0.14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0.18 kg/kg [4] Post flashover: 0.36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio Y _{CO}	Pre flashover: 0.10 kg/kg [5] Post flashover: 0.40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo ΔH_c	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio Y _{CO2}	1.5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua Y _{H2O}	0.82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR(t) in irraggiamento (Radiative fraction)	35% [3]	

[1] Da impiegare in alternativa all'RHR_{max} totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato.
 [2] Robbins A.P., Wade C.A., Study Report No.185 "Soot Yield Values for Modelling Purposes – Residential Occupancies", BRANZ, 2008
 [3] "C/VM2 Verification method: Framework for fire safety design", New Zealand Building Code
 [4] "SFPE handbook of fire protection engineering", NFPA, 4th ed., 2008, Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da polyurethane flexible foams.
 [5] Stec A.A., Hull T.R., "Fire Toxicity", Woodhead Pub., 2010, § 2.4 con $\Phi = 1.25$ (underventilated fire)
 [6] In alternativa alle rese Y_{CO2} e Y_{H2O}, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico CH₂O_{0.5}.

Tabella M.2-2: Focolari predefiniti

Codice Neozelandese

Table 2.1 Pre-flashover design fire characteristics

Building use	Fire growth rate (kW)	Species	Radiative fraction	Peak HRR/ HRR/m ²
All buildings including storage with a stack height of less than 3.0 m	0.0469 t ²	Y _{smoke} = 0.07 kg/kg Y _{CO} = 0.04 kg/kg	0.35	20 MW 500 – 1000 kW/m ² 250 kW/m ² (3)
Carparks (no stacking)	0.0117 t ²	$\Delta H_c = 20$ MJ/kg	0.35	
Capable of storage to a stack height of between 3.0 m and 5.0 m above the floor	0.188 t ²	Y _{CO2} = 1.5 kg/kg ⁽¹⁾ Y _{H2O} = 0.82 kg/kg ⁽¹⁾	0.35	50 MW
Capable of storage to a stack height of more than 5.0 m above the floor and car parks with stacking systems	0.00068 t ² H		0.35	1000–2500 kW/m ² 250 kW/m ² (3)

NOTE:

t = time in seconds

H = height to which storage is capable of in metres

Y = yield kg/kg

ΔH_c = heat of combustion

(1) As an alternative to CO₂ + H₂O yields use generic fuel as CH₂O_{0.5} and calculate yields.

(2) In a CFD model the fire is intended to be modelled as a plan area where the size is determined from the peak HRR/m².

A range is provided for HRR/m² to accommodate different HRR and mesh sizes.

(3) Use in a zone model.

Limitazioni:

È escluso l'impiego dei focolari predefiniti nei casi in cui si valuti che i focolari attesi risultino più gravosi di quelli previsti in tabella M.2-2.

Focolari predefiniti

Incendi di progetto i cui parametri rappresentativi sono forniti direttamente dal normatore

Table 26.8 HRR values of palletized and rack-storage commodities tested at FM

Test	Commodity	Storage ht. (m)	Peak HRR (kW m ⁻²)
SP-4	PS jars in compartmented CB cartons	4.11	16,600
SP-13	PS foam meat trays, wrapped in PVC film, in CB cartons	4.88	10,900
SP-23	PS foam meat trays, wrapped in paper, in CB cartons	4.90	11,700
SP-30A	PS toy parts in CB cartons	4.48	5,210
SP-35	PS foam insulation	4.21	26,000
SP-44	PS tubs in CB cartons	4.17	6,440
SP-15	PE bottles in compartmented CB cartons	4.20	5,330
SP-22	PE trash barrels in CB cartons	4.51	28,900
SP-43	PE bottles in CB cartons	4.41	4,810
SP-6	PVC bottles in compartmented CB cartons	4.63	8,510
SP-19	PP tubs in compartmented CB cartons	4.26	5,870
SP-34	PU rigid foam insulation	4.57	1,320
SP-41	Compartmented CB cartons, empty	4.51	2,470
RS-1	CB cartons, double tri-wall, metal liner	2.95	1,680
RS-2	" "	2.95	1,490
RS-3	" "	2.95	1,680



Table 42.3 HRR/PUA for various palletized commodities stacked in 2 x 2 array of 2, 3, and 4 pallets high [7]

Commodity	Storage height (m)	Time of peak (s)	Peak HRR/floor area (kW/m ²)	Peak HRR/PUA (kW/m ²)
PE trash barrels in CB cartons	4.51	578	28,900	3118
PS foam insulation	4.21	373	26,000	2982
PS jars in compartmented CB cartons	4.11	439	16,600	1945
PS foam meat trays, wrapped in paper, in CB cartons	4.9	113	11,700	1172
PS foam meat trays, wrapped in PVC film, in CB cartons	4.88	103	10,900	1096
PVC bottles in compartmented CB cartons	4.63	488	8510	897
PS cups in compartmented CB cartons	5.94	148	3030	675
PS cups in compartmented CB cartons	4.42	100	6580	723
PS tubs in CB cartons	4.17	447	6440	745

SFPE Handbook

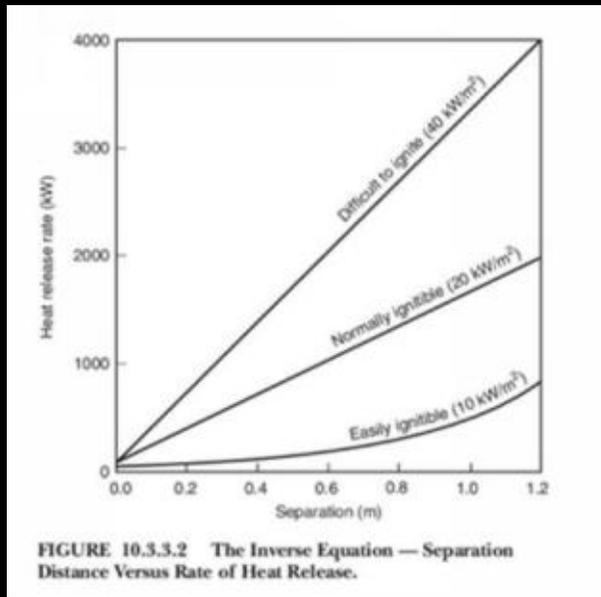
Fire Science and Technology 2015 – “Defining the heat release rate per unit area for use in fire safety engineering analysis (3) - Fleischmann

Limitazioni:

È escluso l'impiego dei focolari predefiniti nei casi in cui si valuti che i focolari attesi risultino più gravosi di quelli previsti in tabella M.2-2.

Procedura analitica

A partire dal combustibile iniziatore dell'incendio si risale alla sequenza delle accensioni



RHR_{min} [kW]	Tipologia di materiale	Esempi
$30 \cdot 10^{(D+0.08)/0.89}$	Facilmente accendibile (10 kW/m ²)	Tende, tappeti, giornali, ...
$30 \cdot (D + 0.05)/0.019$	Normalmente resistente all'ignizione (20 kW/m ²)	Poltrone imbottite, materiali con bassa inerzia termica
$30 \cdot (D + 0.02)/0.0092$	Difficilmente accendibili (40 kW/m ²)	Legno, plastiche termoindurenti, materiali con alta inerzia termica

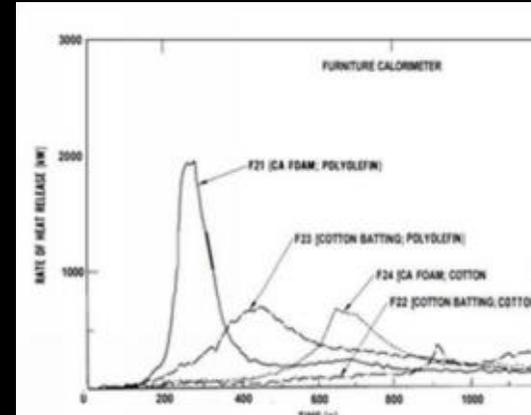
NFPA 555: Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover

Limitazioni:

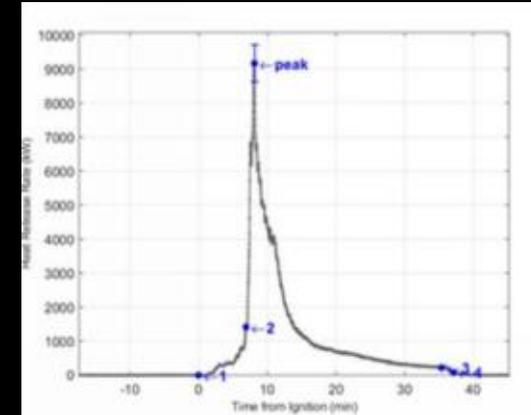
È applicabile in piccoli locali con pochi oggetti all'interno dai quali si può procedere ad una determinazione dei successivi inneschi.

Procedura analitica

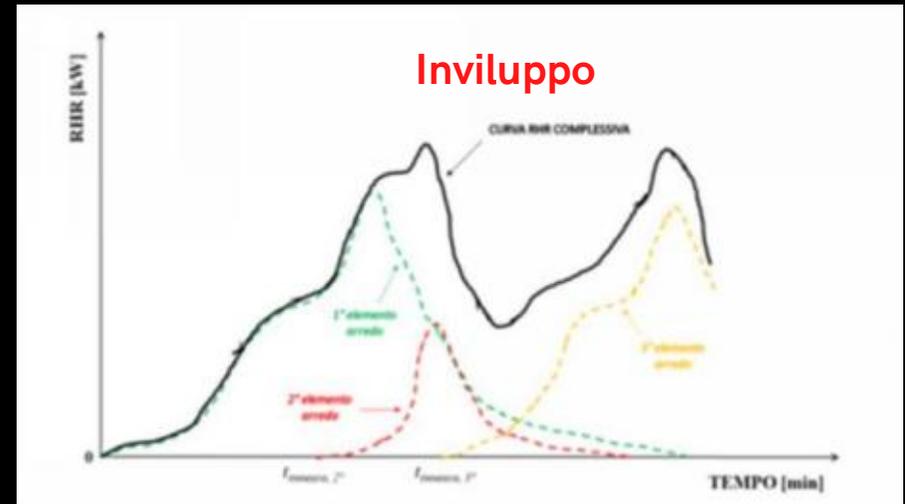
A partire dal combustibile iniziatore dell'incendio si risale alla sequenza delle accensioni



1 innesco



2 innesco



Procedura analitica con l'uso di un software

A partire dal combustibile iniziatore dell'incendio il software risale alla sequenza delle accensioni- Pirolisi semplificata



- Grandi compartimenti oltre 1000 mq
- Depositi intensivi di grande altezza
- Presenza di aperture di ventilazione a soffitto
- Grande quantità di oggetti combustibili presenti

I metodi precedentemente illustrati sono di difficile applicazione e in alcuni casi sarebbero applicati al di fuori dei loro limiti applicativi

Procedura analitica con l'uso di un software

A partire dal combustibile iniziatore dell'incendio il software risale alla sequenza delle accensioni- Pirolisi semplificata



Pirolisi controllata: prevede che lo sviluppo e la propagazione dell'incendio sia gestito direttamente dal software di modellazione, definendo però l'utente la curva di rilascio termico per ciascun elemento che può prendere fuoco. (Non si fa uso quindi del modello di pirolisi del Software)

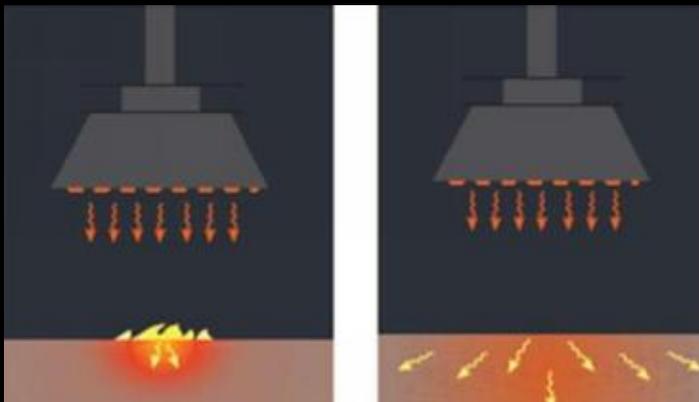
Significa definire per ogni blocco di materiale combustibile le seguenti proprietà:

- Conducibilità termica;
- Calore specifico;
- Densità;
- Temperatura di innesco pilotato;
- Curva di rilascio termico (sorgente volumetrica singola)

**Inerzia
termica**

Procedura analitica con l'uso di un software

A partire dal combustibile iniziatore dell'incendio il software risale alla sequenza delle accensioni- Pirolisi semplificata



Tempo di
innesco

$$t_{ig(thick)} = \frac{\frac{\pi}{4} k \rho c_p (T_{ig} - T_0)^2}{(\dot{q}_e - \chi \dot{q}_{cr})^2} \quad (36.1)$$

(rif. SFPE Handbook)

Flusso termico incidente calcolato dal software

Il progettista fornisce al software le proprietà termodinamiche necessarie allo sviluppo del **modello di trasmissione del calore** per determinare i successivi inneschi del materiale derivanti dal riscaldamento di ogni singola faccia del blocco per effetto dell'irraggiamento termico e del calore convettivo trasportato dal fumo.

- Conducibilità termica (K);
- Calore specifico (Cp);
- Densità (ρ);
- Temperatura di innesco pilotato (T_{ig});

Procedura analitica con l'uso di un software

Non particolari limitazioni ma Attenzione

Modellazione materiali combustibili

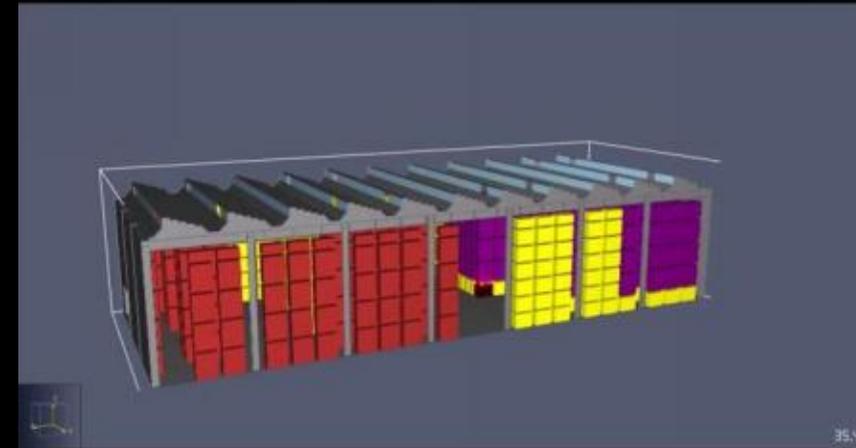
La geometria delle unità di carico e le rispettive distanze è molto importante pertanto la mesh va accuratamente scelta

Schematizzazione materiali

Le unità di carico sono spesso composte da molti materiali è necessario omogenizzare le caratteristiche dell'unità

Scelta proprietà termodinamiche e curva HRR

è necessaria un analisi letteraria per ricercare le proprietà termiche dei materiali e una potenza termica di rilascio rappresentativa



Quando una finestra diventa una superficie di ventilazione aperta

Le finestre si rompono negli incendi a causa dello stress termico dovuto al riscaldamento differenziale della parte centrale e del bordo ombreggiato



La temperatura dei gas di 300 °C è stata indicata come limite inferiore per raggiungere la rottura di un vetro (Riferimento Russo)

Studi della BRI riportano:

- una temperatura di 360 °C per vetri di spessore di 3 mm e una temperatura di 450 ° per vetri di spessore da 4 a 6 mm.
- doppi vetri da 6mm si romperanno non prima dei 600 °C e per i vetri temperati non è da aspettarsi una rottura prima del raggiungimento del flashover nella stanza.

"Glass breakage in fires"

by Dr. Vytenis Babrauskas, Fire Science and Technology Inc -2005

Esperimenti condotti hanno però mostrato che la rottura catastrofica che determina la caduta del vetro e la creazione di una apertura di ventilazione avviene a temperature più alte di quando si è formata la prima frattura. Dai risultati ottenuti si è stimato che sono necessarie da 4 a 8 fratture prima che un vetro cada definitivamente

Quando una finestra diventa una superficie di ventilazione aperta

Non è sufficiente la formazione di una cricca per determinare la completa caduta del vetro



Il codice Neozelandese consiglia di assumere che i vetri non resistenti al fuoco cadano completamente quando lo strato cado di gas raggiunge i **500°C**.

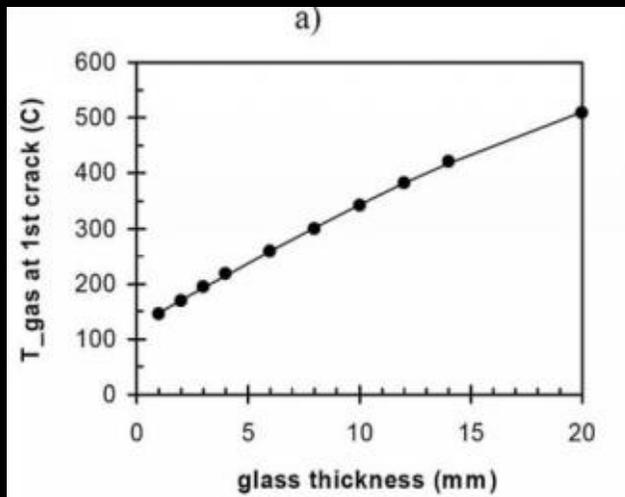
Table 1. Summary of the results of the glass-fallout analyses presented in this Chapter.

Source of experimental data	No. of cracks	Calculated hot gas layer temperature (°C)	Calculated average glass temperature (°C)
Hassani et al. (1994/1995): An experimental investigation into the behaviour of glazing in enclosure fire.	5	550–590	410–430
Loss Prevention Council (Anon. 1999): Study concerning fire spread in multi-storey buildings with glazed curtain wall facades.	8	820–880	620–650
	7	730–760	545–570
Shields et al. (2001): Study on the performance of single glazing elements exposed to enclosure corner fires of increasing severity.	5	ca. 560	380–410
Shields et al. (2002): Study on the performance of a single glazing assembly exposed to a fire in the centre of an enclosure.	5	650–680	380–410
Hietaniemi et al. (2002): An investigation of fire safety issues related to building cavity spaces. Appendix F: glass-breaking study using a fire-resistance furnace.	7 ^{a)}	710–730	520–540
	8 ^{a)}	770–810	595–625
McHaffey et al. (2004): Tests 1 and 2 of the series of fire experiments in furnished houses.	6	700–720	460–490
	4	740–800	500–540

a) Seven cracks correspond to a minor glass fallout and 8 cracks to a major fallout.

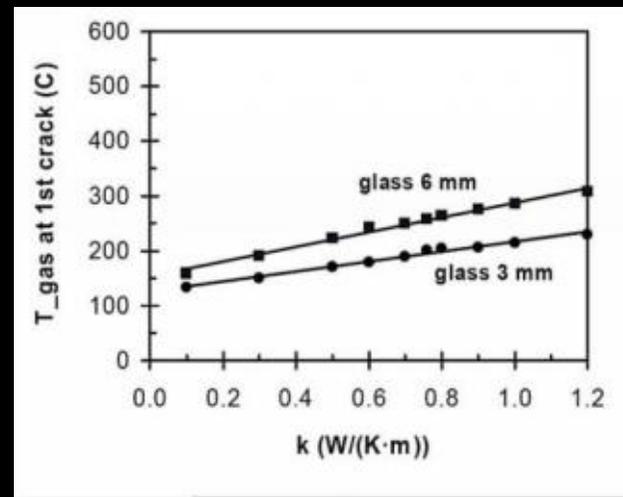
Quando una finestra diventa una superficie di ventilazione aperta

Fattori da cui dipende la rottura di un vetro



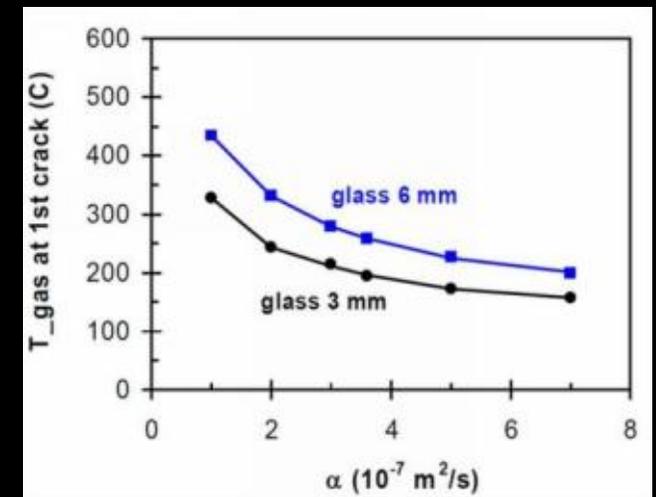
Spessore del vetro

La temperatura del gas per formare la prima cricca aumenta linearmente con lo spessore del vetro



Conduttività termica

La temperatura del gas per formare la prima cricca aumenta linearmente con la conduttività

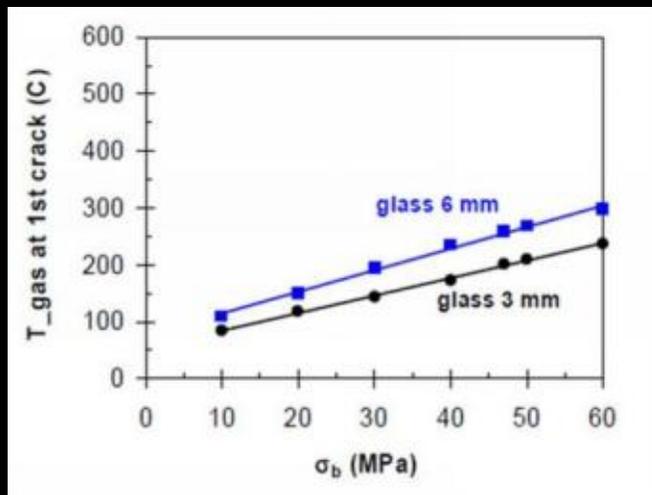


Diffusività termica

La temperatura del gas per formare la prima cricca diminuisce al crescere della diffusività ossia al crescere della capacità del materiale di accumulare calore

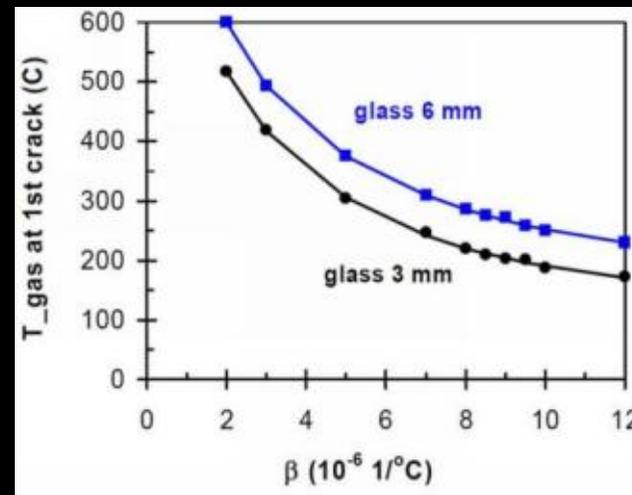
Quando una finestra diventa una superficie di ventilazione aperta

Fattori da cui dipende la rottura di un vetro



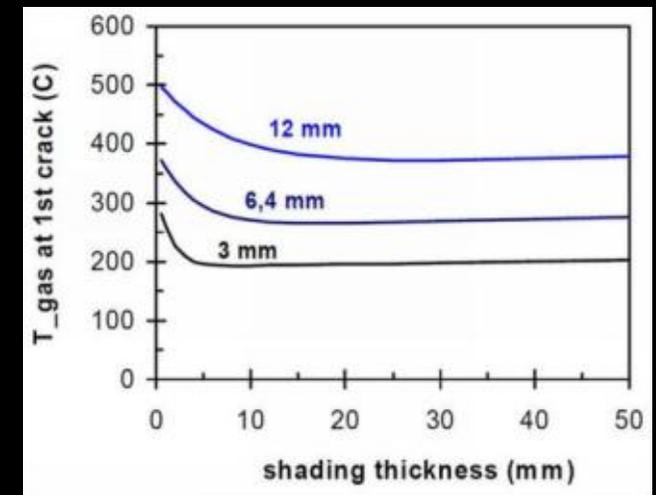
Sollecitazione di rottura

La temperatura del gas aumenta linearmente all'aumentare della sollecitazione di rottura del vetro.



Coefficiente di espansione lineare

Rappresenta il fattore che influenza la generazione del campo di stress termico indotto dal calore nel vetro. Minore è il coefficiente minore sarà il campo di stress indotto e di conseguenza maggiori saranno le temperature necessarie per la rottura.



Spessore dell'infisso

All'aumentare dello spessore di pochi mm si ha una rapida diminuzione della temperatura necessaria per la formazione della prima cricca.