Ordine dei Ingegneri
della provincia di Modena

Fire Safety Engineering

Secondo Modulo: ESERCIZI DI F.S.E. SVILUPPATI SENZA L'UTILIZZO DI SOFTWARE

Mercoledì, 4.10.20213
14:30 – 16:30

Ing. Daniele Andriotto
Fire Engineer
393 5283518
andriottodaniele@gmail.com

Calcolo della Potenza RHR

Ricordiamoci che è una previsione di come potrebbe essere la curva di potenza

- Calcolo proposto da codice

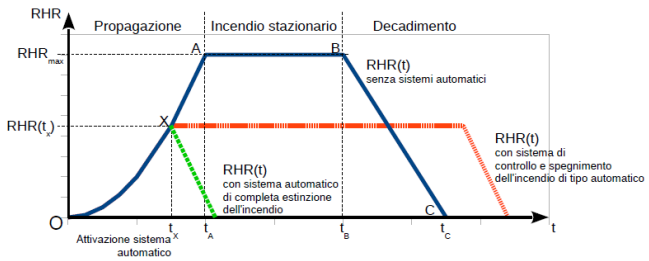
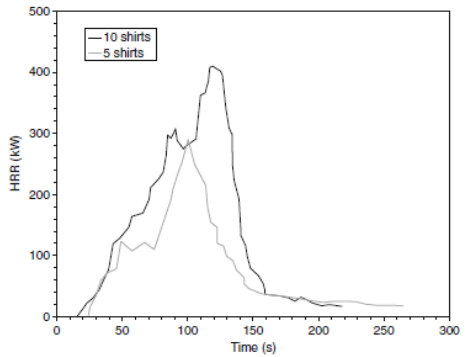


Illustrazione M.2-1: Fasi dell'incendio

- Evidenze da prove sperimentali



M.2.4.3 Incendio

1. A seconda dell'obiettivo dell'analisi, la descrizione dell'incendio consiste nella caratterizzazione quantitativa del focolare, in quanto sorgente di *energia termica* e di *prodotti della combustione*, secondo i seguenti parametri ove rilevanti ai fini della tipologia dell'analisi:
   a. localizzazione del focolare;
   b. tipologia di focolare: covante o con fiamma;
   c. quantità, qualità e distribuzione spaziale del materiale combustibile;
   d. fonti d'innesco;
   e. curva RHR (*rate of heat release)*, quale potenza termica prodotta dal focolare al variare del tempo RHR(t);
   f. generazione dei prodotti della combustione presi in considerazione (es. CO e particolato).
2. Ai fini della caratterizzazione quantitativa del focolare il professionista antincendio può:
   a. impiegare dati sperimentali ottenuti da misura diretta in laboratorio secondo metodologia scientifica consolidata;
   b. usare dati pubblicati da fonti autorevoli e condivise. Il professionista antincendio *cita sempre* con precisione tali fonti e *verifica la corrispondenza* del campione di prova sperimentale (quantità, composizione, geometria e modalità di prova) con quello previsto nello scenario di incendio di progetto, utilizzando un approccio ragionevolmente conservativo;
   c. impiegare delle *metodologie di stima*. Nel paragrafo M.2.6 si descrivono alcune metodologie di stima mutuate dalla letteratura citata al paragrafo M.2.8.
3. In alternativa, può impiegare i focolari predefiniti di cui al paragrafo M.2.7 nell'ambito delle limitazioni ivi specificate.

CALCOLO CURVA RHR

POTENZA MASSIMA

$$RHR_{max} = RHR_f A_f$$

CRESCITA (t_a)

$$t_A = \sqrt{RHR_{max} \frac{t_\alpha^2}{1000}}$$

STAZIONARIA (t_b)

$$t_B = t_A + \frac{70\%\ q_f A_f - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3}{RHR_{max}}$$

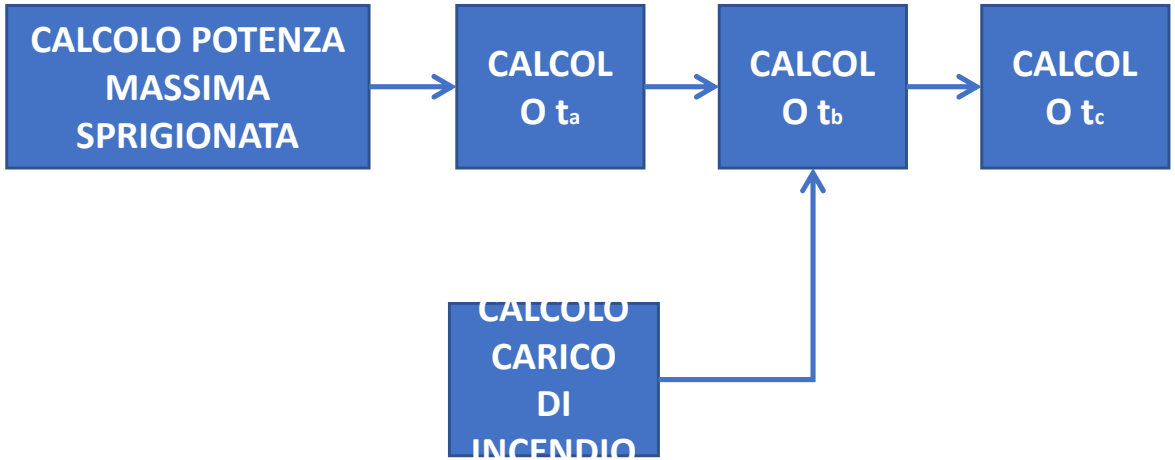
DECADIMENTO (t_c)

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\%\ q_f A_f}{RHR_{max}}$$

6. La fase di incendio stazionario termina al tempo t_B, tempo di inzio della fase di decadimento, in cui il 70% dell'*energia termica inizialmente disponibile* $q_f \cdot A_f$ è stata rilasciata nel compartimento antincendio. Il valore dell'energia q_f è valutato conformemente alle indicazioni contenute nel capitolo S.2.

1. Il tempo t_C, trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento è consumato il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile:

SCHEMA CALCOLO CURVA RHR



Calcolo della RHR Max

Occorre stimare la massima potenza che sarà raggiunga dall'incendio

FOCOLARI PREDEFINITI oppure Letteratura Tecnica

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_α	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_{soot}	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 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.

Tabella M.2-2: Focolari predefiniti

Eurocodice

Velocità di crescita dell'incendio e RHR_f per differenti destinazioni d'uso

Velocità massima di rilascio di calore RHR_f			
Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_α [s]	RHR_f [kW/m^2]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Calcolo di t_a

Definizione della velocità di crescita

δ_α	t_α [1]	Criteri
1	600 s lenta	Ambiti di attività con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m², oppure ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo trascurabile all'incendio.
2	300 s media	Ambiti di attività ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio.
3	150 s rapida	Ambiti con presenza di significative quantità di materiali plastici impilati, prodotti tessili sintetici, apparecchiature elettriche e elettroniche, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1). Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con 3,0 m < h ≤ 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS3 oppure attività classificate HHP1, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti con impianti tecnologici o di processo che impiegano significative quantità di materiali combustibili. Ambiti con contemporanea presenza di materiali combustibili e lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
4	75 s ultra-rapida	Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con h > 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS4 oppure attività classificate HHP2, HHP3 o HHP4, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti ove siano presenti o in lavorazione significative quantità di sostanze o miscele pericolose ai fini dell'incendio, oppure materiali plastici cellulari/espansi o schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.
A meno di valutazioni più approfondite da parte del progettista (es. dati di letteratura, misure dirette, …), si ritengono *non significative* ai fini della presente classificazione almeno le quantità di materiali nei compartimenti con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m². [1] Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio. [2] Con h altezza d'impilamento.		

Tabella G.3-2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_α	150 s (*fast*)	75 s (*ultra-fast*)
RHR_{max} totale RHR_{max} per m² di superficie del focolare	5 MW 250-500 kW/m² [1]	50 MW 500 -1000 kW/m² [1]
Resa in particolato Y_{soot}	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]

Tabella M.2-2: Focolari predefiniti

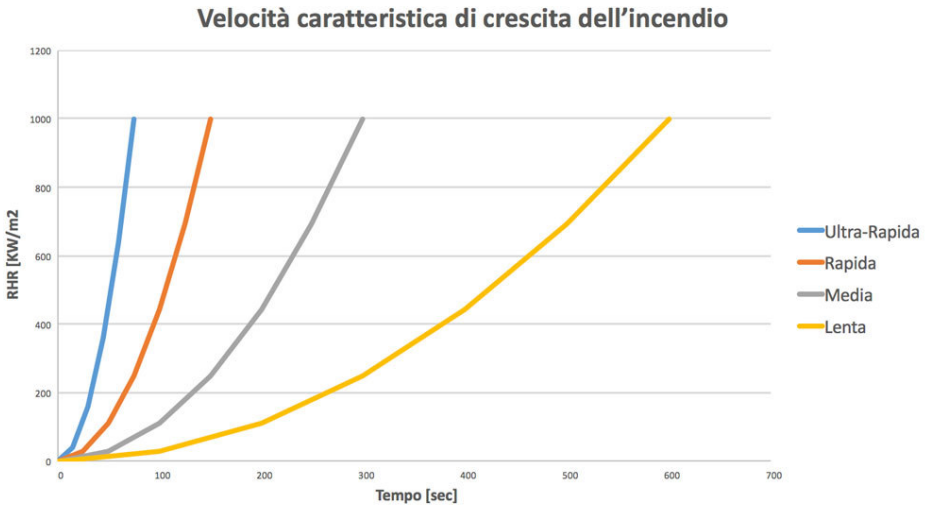
Eurocodice

Velocità di crescita dell'incendio e RHR_f per differenti destinazioni d'uso

Velocità massima di rilascio di calore RHR_f			
Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_α [s]	RHR_f [kW/m²]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Calcolo di t_a

Definizione della velocità di crescita



Crescita	t alfa		alfa
Lenta	600		0,003
Media	300		0,011
Fast	150		0,044
Ultra fast	75		0,178

Esempio di calcolo

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
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]

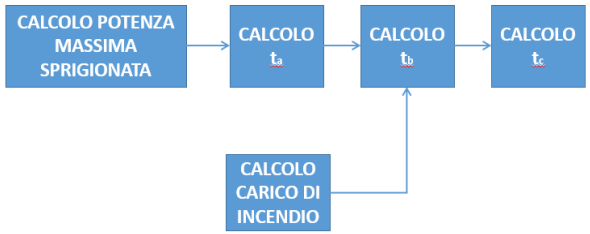
RHR Max 5.000 kW

Velocità di crescita dell'incendio e RHR_f per differenti destinazioni d'uso

Velocità massima di rilascio di calore RHR_f			
Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_α [s]	RHR_f [kW/m^2]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500

Velocità di crescita biblioteca veloce

$$t_A = \sqrt{RHR_{max} \frac{t_\alpha^2}{1000}}$$ **= 335 s**

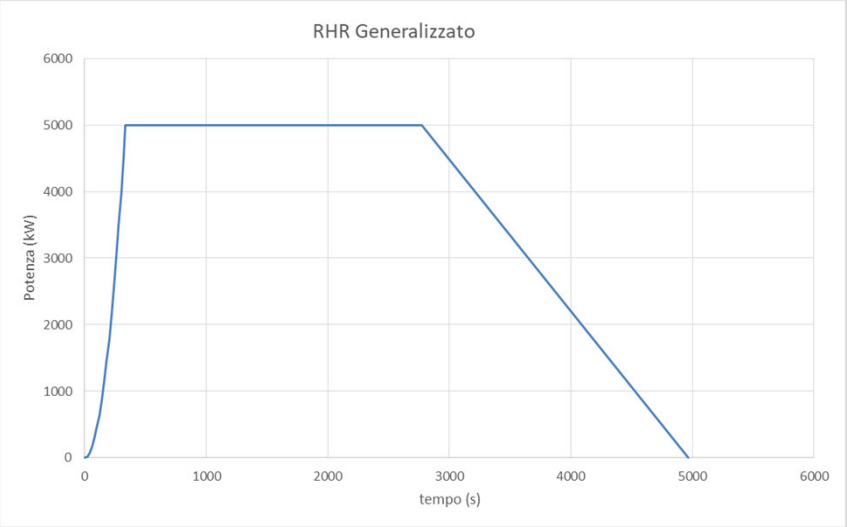


Esempio di calcolo

Stimando un carico di incendio di 18.000 MJ

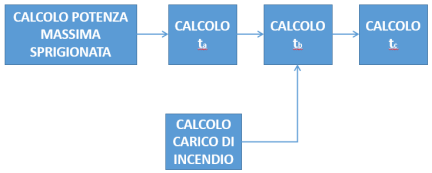
Attività	Valore medio [MJ/m²]	Frattile 80% [MJ/m²]
Civili abitazioni	780	948
Ospedali (stanza)	230	280
Alberghi (stanza)	310	377
Biblioteche	1500	1824
Uffici	420	511
Scuole	285	347
Centri commerciali	600	730
Teatri (cinema)	300	365
Trasporti (spazio pubblico)	100	122

Tabella S.2-10: Densità di carico di incendio da UNI EN 1991-1-2



$$t_B = t_A + \frac{70\%\ q_f A_f - \frac{1}{3}\frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3}{RHR_{max}}$$ **= 2777 s**

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\%\ q_f A_f}{RHR_{max}}$$ **= 4966 s**



CONSIDERAZIONI FINE CALCOLO

M.2.7 Focolare predefinito

1. Qualora si intenda omettere le valutazioni in merito alla descrizione quantitativa del focolare di cui al paragrafo M.2.4, possono essere impiegati i *focolari predefiniti* descritti quantitativamente secondo il metodo indicato nel paragrafo M.2.6, impiegando i valori dei parametri di cui alla tabella M.2-2.
2. 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.

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio t_α	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_{soot}	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 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 $CH_2O_{0,5}$.

Tabella M.2-2: Focolari predefiniti

Il focolare predefinito può essere quindi usato, ma è responsabilità del progettista «validarlo» in base all'attività che si sta progettando

CONSIDERAZIONI FINE CALCOLO – Velocità di crescita

G.3.2.1 Determinazione

1. Il profilo di rischio R_{vita} è attribuito in relazione ai seguenti fattori:

   δ_{occ}: caratteristiche *prevalenti* degli occupanti;

Nota Per *"prevalenti"* si intendono le caratteristiche degli occupanti che per numerosità e tipologia sono più rappresentativi dell'attività svolta nell'ambito considerato in qualsiasi condizione d'esercizio. Ad esempio, un ufficio in cui vi sia modesta presenza solo occasionale e di breve durata di pubblico può essere classificato δ_{occ} = A.

   δ_{α}: velocità caratteristica *prevalente* di crescita dell'incendio, riferita al tempo t_{α} in secondi, impiegato dalla potenza termica per raggiungere il valore di 1000 kW.

Nota Per *"prevalente"* si intende la caratteristica rappresentativa del rischio di incendio in qualsiasi condizione d'esercizio. Ad esempio, la presenza nelle attività civili di limitate quantità di prodotti infiammabili per la pulizia adeguatamente stoccati non è considerata significativa e dunque neanche prevalente.

   Le tabelle G.3-1 e G.3-2 guidano il progettista nella selezione dei fattori δ_{occ} e δ_{α}.

2. Il progettista può selezionare il valore di t_{α} anche ricorrendo ad una delle seguenti opzioni:

   a. dati pubblicati da fonti autorevoli e condivise,

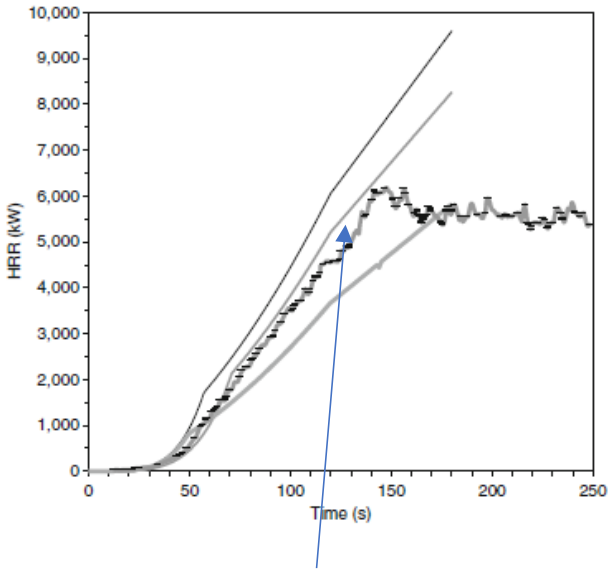
   b. determinazione diretta della curva RHR (*rate of heat release*) relativa ai combustibili effettivamente presenti e nella configurazione in cui si trovano, secondo le indicazioni del capitolo M.2 o tramite misure presso *laboratorio di prova*, secondo protocolli sperimentali consolidati.

Nota Le definizioni di *RHR* e di *laboratorio di prova* sono riportate nel capitolo G.1. Ad esempio, utili riferimenti per la determinazione sperimentale della curva RHR sono le norme della serie ISO 9705, la norma ISO 24473, la norma ISO 16405, …

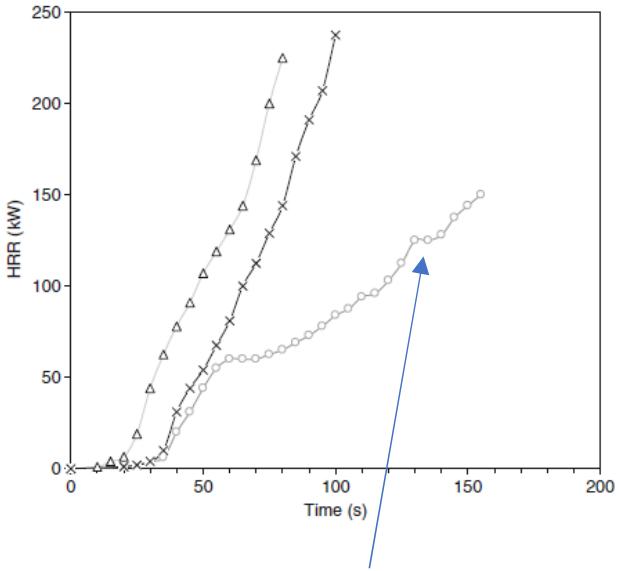
- Il calcolo del t_a va a braccetto con la scelta della velocità di crescita dell'incendio che a sua volta concorre all'individuazione dell' Rvita.

- **La velocità di crescita dell'incendio potrebbe essere**
  - **più veloce**
  - **più lenta**

Esempio di scaffalature in campo industriale

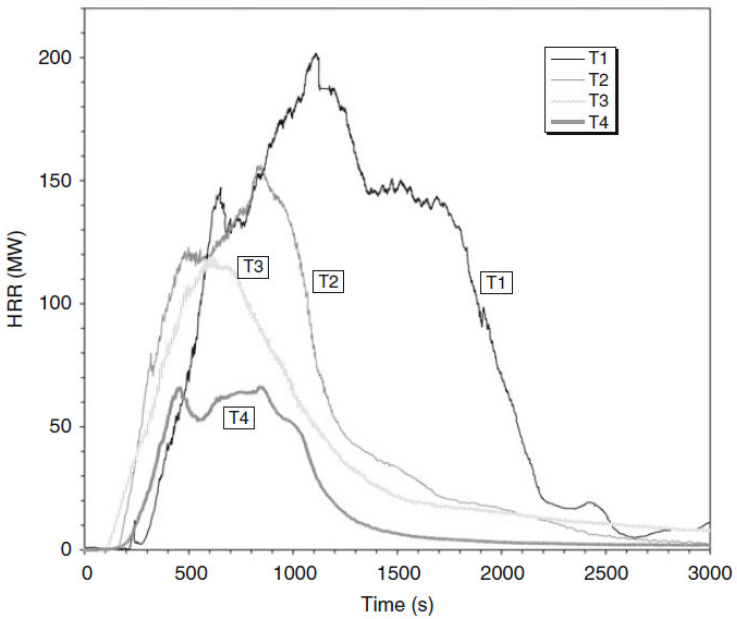


Materiale Plastico h = 4 m
Molto più che crescita ultrafast



Materiale incombustibile in packaging combustibile h = 3 m
Crescita lenta-media

CONSIDERAZIONI FINE CALCOLO – Potenza Massima



Potenze massime sviluppate da camion carichi di materiale

Maggiore di 50 MW

CONCLUSIONI

- **Focolari predefiniti sono un ottimo strumento ma è onere del progettista verificare che siano rappresentativi dell'attività**
- **Anche utilizzando le soluzioni conformi, in fondo, stiamo utilizzando l'ingegneria antincendio.**

Ci vengono forniti strumenti veloci per determinare velocità di crescita e potenza. Come per esempio la tabella G.3.2, ma viene sottolineato come siano assunzioni di cui il progettista si prende l'onere

δ_α	t_α [1]	Criteri
1	600 s lenta	Ambiti di attività con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m², oppure ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo trascurabile all'incendio.
2	300 s media	Ambiti di attività ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio.
3	150 s rapida	Ambiti con presenza di significative quantità di materiali plastici impilati, prodotti tessili sintetici, apparecchiature elettriche e elettroniche, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1). Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con 3,0 m < h ≤ 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS3 oppure attività classificate HHP1, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti con impianti tecnologici o di processo che impiegano significative quantità di materiali combustibili. Ambiti con contemporanea presenza di materiali combustibili e lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
4	75 s ultra-rapida	Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con h > 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS4 oppure attività classificate HHP2, HHP3 o HHP4, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti ove siano presenti o in lavorazione significative quantità di sostanze o miscele pericolose ai fini dell'incendio, oppure materiali plastici cellulari/espansi o schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.
A meno di valutazioni più approfondite da parte del progettista (es. dati di letteratura, misure dirette, …), si ritengono *non significative* ai fini della presente classificazione almeno le quantità di materiali nei compartimenti con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m². [1] Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio. [2] Con h altezza d'impilamento.		

Tabella G.3-2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio

G.3.2.1 Determinazione

1. Il profilo di rischio R_{vita} è attribuito in relazione ai seguenti fattori:

   δ_{occ}: caratteristiche *prevalenti* degli occupanti;

Nota Per "*prevalenti*" si intendono le caratteristiche degli occupanti che per numerosità e tipologia sono più rappresentativi dell'attività svolta nell'ambito considerato in qualsiasi condizione d'esercizio. Ad esempio, un ufficio in cui vi sia modesta presenza solo occasionale e di breve durata di pubblico può essere classificato δ_{occ} = A.

   δ_α: velocità caratteristica *prevalente* di crescita dell'incendio, riferita al tempo t_α in secondi, impiegato dalla potenza termica per raggiungere il valore di 1000 kW.

Nota Per "*prevalente*" si intende la caratteristica rappresentativa del rischio di incendio in qualsiasi condizione d'esercizio. Ad esempio, la presenza nelle attività civili di limitate quantità di prodotti infiammabili per la pulizia adeguatamente stoccati non è considerata significativa e dunque neanche prevalente.

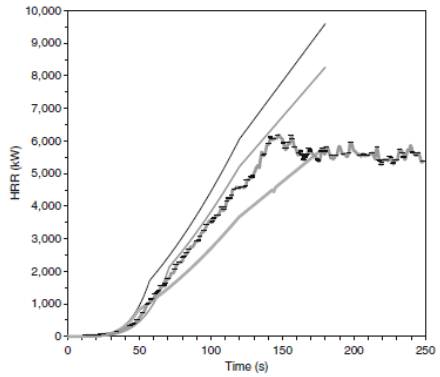
   Le tabelle G.3-1 e G.3-2 guidano il progettista nella selezione dei fattori δ_{occ} e δ_α.

2. Il progettista può selezionare il valore di t_α anche ricorrendo ad una delle seguenti opzioni:

   a. dati pubblicati da fonti autorevoli e condivise,

   b. determinazione diretta della curva RHR (*rate of heat release*) relativa ai combustibili effettivamente presenti e nella configurazione in cui si trovano, secondo le indicazioni del capitolo M.2 o tramite misure presso *laboratorio di prova*, secondo protocolli sperimentali consolidati.

Nota Le definizioni di *RHR* e di *laboratorio di prova* sono riportate nel capitolo G.1. Ad esempio, utili riferimenti per la determinazione sperimentale della curva RHR sono le norme della serie ISO 9705, la norma ISO 24473, la norma ISO 16405, …



Alcune Curve di potenza reali

Fig. 26.14 HRR of a small air conditioner with a plastic housing

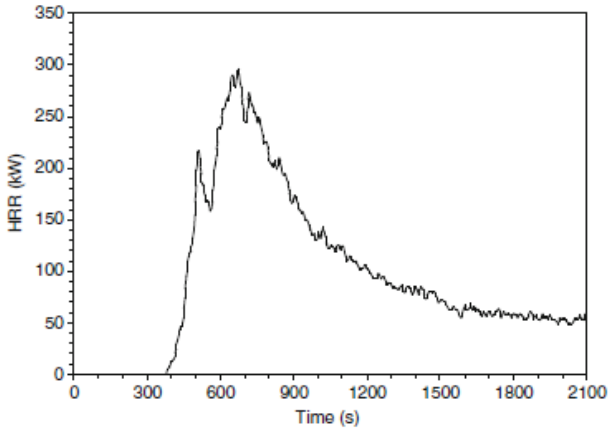
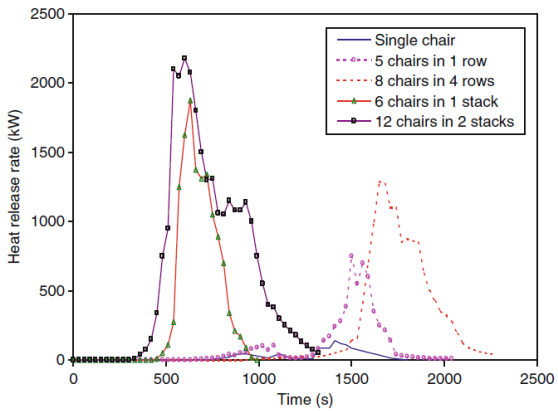
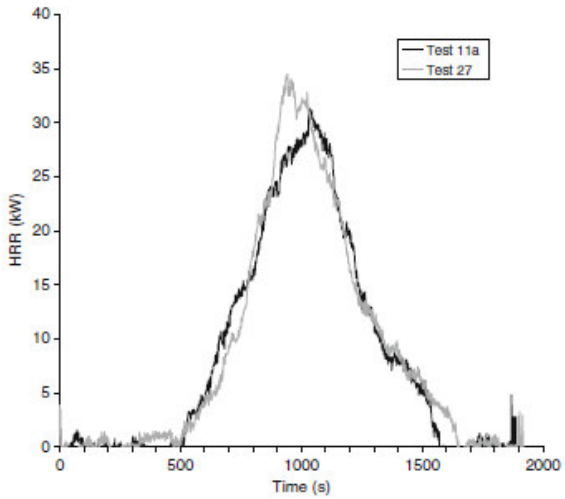


Fig. 26.20 HRR of stackable chairs, polypropylene with steel frame, no padding

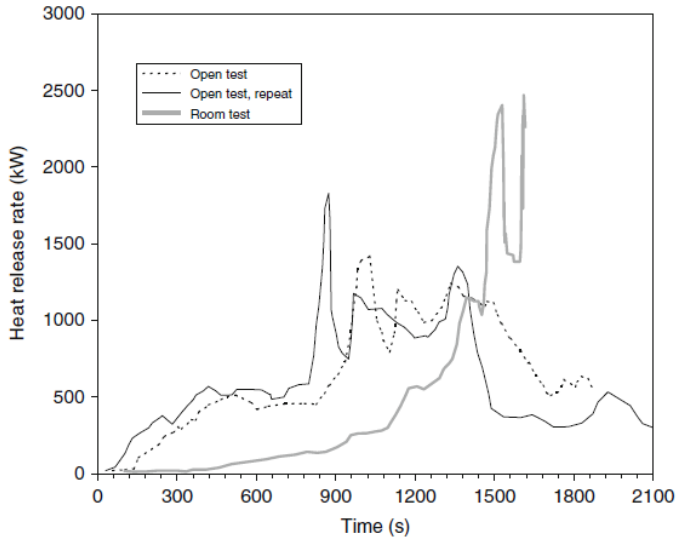


Riordiamoci che stiamo prevedendo una curva

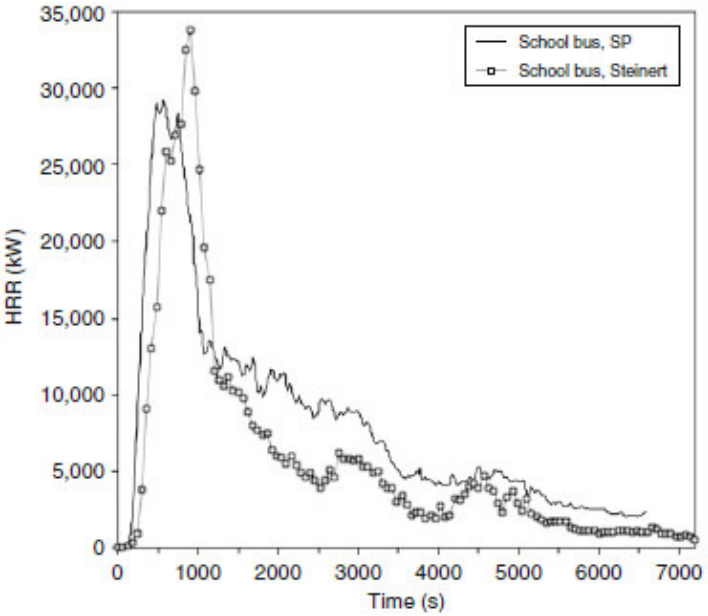
A titolo di esempio si riportano due curve di potenza relative a un semplice monitor dove si possono già notare delle differenze



Test di una workstation Open test risultati differenti.



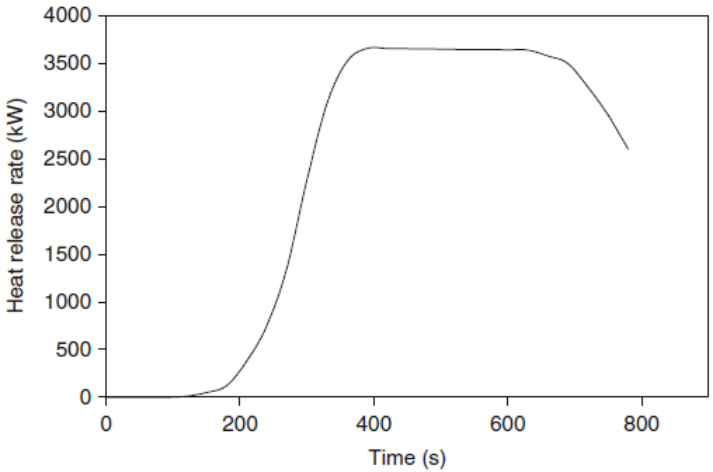
Curva RHR di uno scuola bus

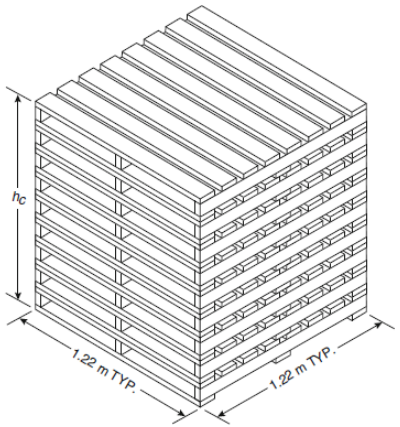


Sono dati interessanti ma che vanno maneggiati con cura e conoscenza

- **Come è fatto questo autobus?**
- **Dove è il punto di innesco dell'autobus?**
- **Occorre conoscere bene le condizioni al contorno del test, dove sono specificate anche le condizioni di innesco (potenza, tempo,…)**

Esempio di calcolo da letteratura

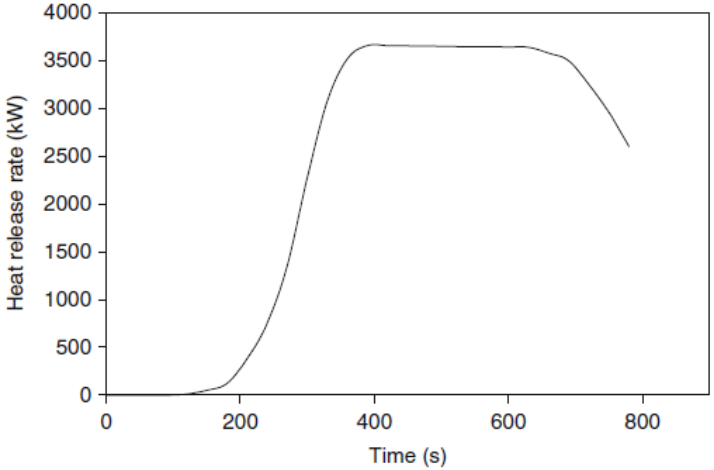


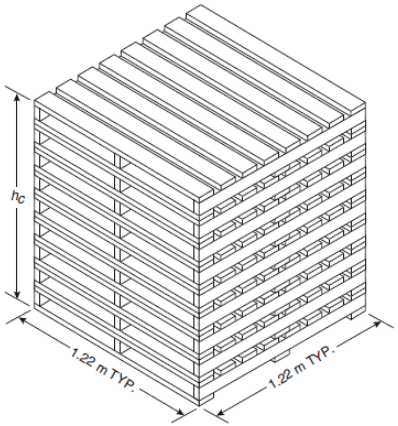


PS: Se siamo fortunati e abbiamo impilamento fino a 1,22 m siamo fortunati

HRR of a typical wood pallet stack (1.22 × 1.22 × 1.22 m high)

Esempio di calcolo da letteratura





HRR of a typical wood pallet stack (1.22 × 1.22 × 1.22 m high)

Se abbiamo un'altezza maggiore di 1,22 m dobbiamo determinare la curva suggerita dal codice ma impostando i parametro da letteratura

- **Velocità di crescita**
- **Potenza Massima**
- **Carico di incendio**

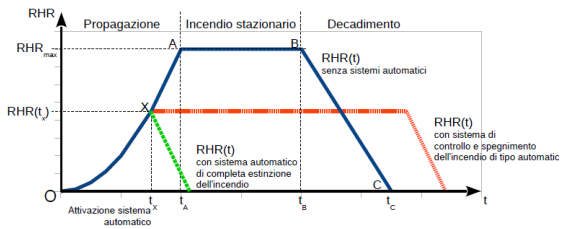
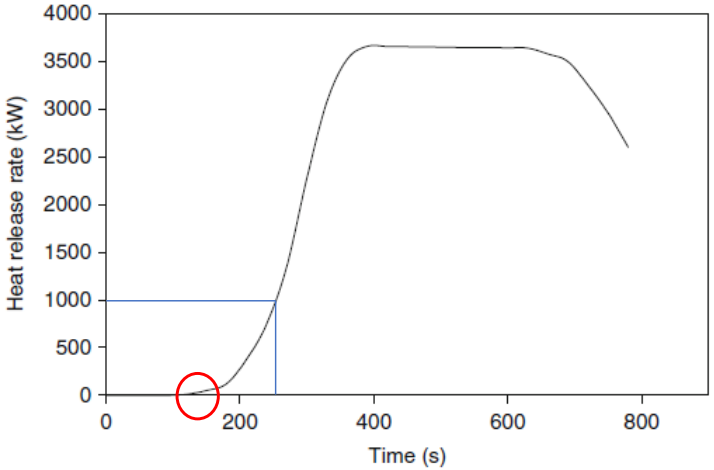
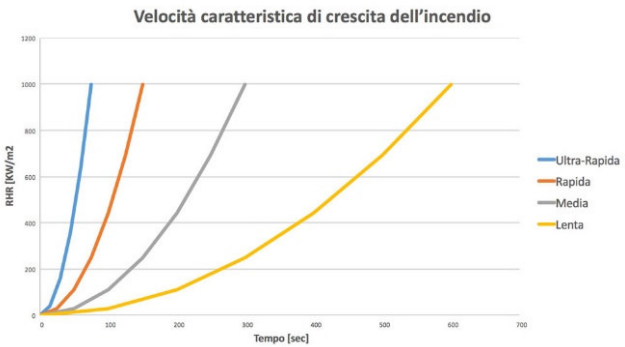


Illustrazione M.2-1: Fasi dell'incendio

Definizione della velocità di crescita





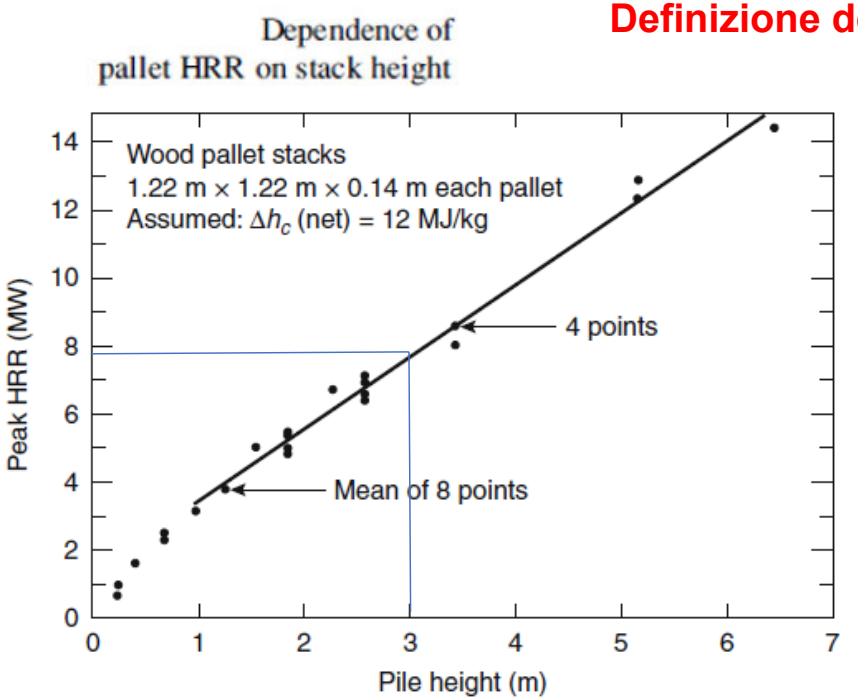
Il tempo al quale la circa «parte» è circa 100 s

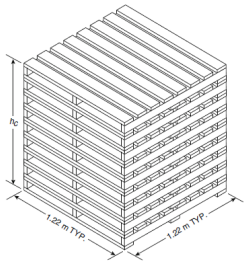
Il tempo al quale la curva «passa» per 1000 kW è circa 250 s

Il tempo per arrivare a 1000 kW è dunque circa 150 s

La crescita è dunque «Fast»

Definizione della Potenza Massima





Sempre da letteratura è possibile ricavarsi il valore della potenza massima in funzione dell'altezza di impilamento

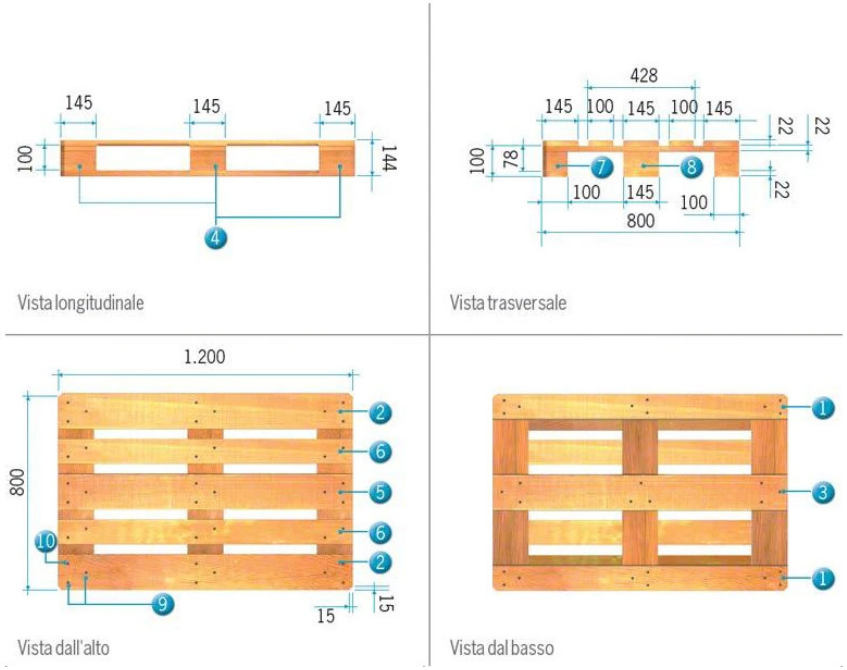
- **Attenzione alle assunzioni di base. Un pallet sopra all'altro e potere calorifico.**
- **Supponiamo un'altezza di tre metri → 8 MW**

Definizione del carico di incendio

Dimensioni dell'Europallet

L'Europallet segue la **norma UNI-EN 13698-1** che ne stabilisce i criteri costruttivi e quindi anche le dimensioni. Un Europallet **misura 1.200 x 800 mm**, pesa di solito intorno ai 25 kg e sopporta carichi fino a 1.500 kg (per carichi statici, senza muovere il bancale, può raggiungere un livello di carico fino a 4.000 kg).

Per saperne di più sui carichi statici è possibile consultare l'articolo del manuale dedicato alle tolleranze della pavimentazione industriale.



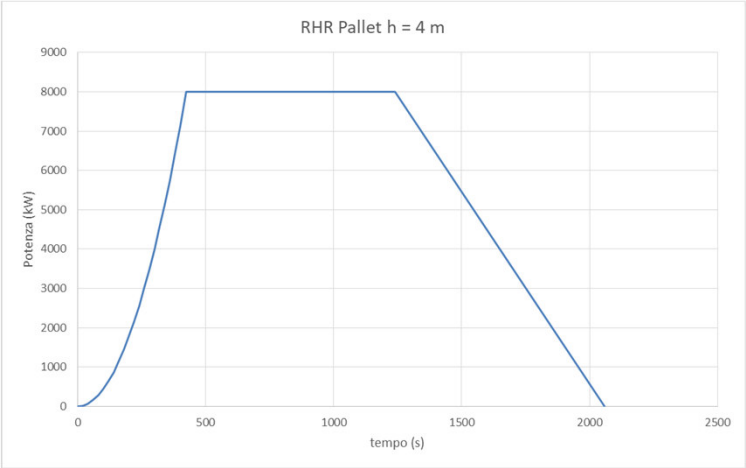
- **Un pallet circa 25 kg**
- **Spessore 12 cm**
- **Altezza 300 cm, numero pallet 25**
- **Legna totale kg 625**
- **17,5 MJ/kg**
- **TOT MJ = 10937 MJ**

Curva RHR Finale

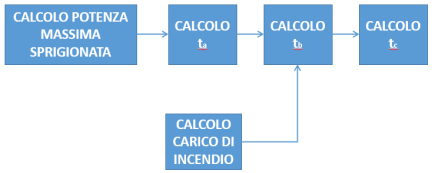
Stimando un carico di incendio di 10.937 MJ

$$t_A = \sqrt{RHR_{max} \frac{t_\alpha^2}{1000}}$$ **= 335 s**

$$t_B = t_A + \frac{70\%\ q_f A_f - \frac{1}{3} \frac{1000}{t_\alpha^2} t_A^3}{RHR_{max}}$$ **= 1240 s**



$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\%\ q_f A_f}{RHR_{max}}$$ **= 2060 s**



Effetti sulla curva RHR

M.2.6.2 Effetto dei sistemi di protezione attiva antincendio

1. Se nell'attività sono previsti *sistemi di controllo dell'incendio di tipo automatico* (es. impianto sprinkler), l'andamento della potenza termica rilasciata RHR(t) non raggiunge il valore massimo RHR_{max}, calcolato secondo quanto previsto al paragrafo M.2.6.3, che avrebbe potuto raggiungere in relazione alle condizioni del combustibile ed a quelle ambientali, ma può essere assunta costante e pari al valore di $RHR(t_x)$ raggiunto all'istante t_X di entrata in funzione dell'impianto automatico. Tale valore permane per un intervallo di tempo pari alla durata di alimentazione prevista per l'impianto, entro cui si presume che l'incendio controllato venga definitivamente estinto mediante l'intervento manuale.

Nota Allo stato attuale, in assenza di rapporti tecnici di validazione, i sistemi a deplezione di ossigeno non possono essere considerati per la modifica dell'andamento della potenza termica rilasciata RHR(t).

Nota L'assunzione del valore di $RHR(t_x)$ di entrata in funzione dell'impianto automatico dovrebbe essere supportata da dati di letteratura o normazione tecnica consolidata.

2. Se nell'attività sono invece previsti *sistemi automatici di estinzione completa dell'incendio* (es. ESFR, water mist, …), il loro effetto deve essere valutato caso per caso in relazione alla loro efficacia ed all'affidabilità di funzionamento.

3. In ogni caso il progettista è tenuto a attuare le misure e le limitazioni d'esercizio previste in GSA per i sistemi automatici di protezione attiva antincendio considerati in fase progettuale, affinché non possa verificarsi la riduzione del livello di sicurezza assicurato (capitolo M.1).

4. A differenza dell'attivazione dei sistemi automatici, l'intervento manuale effettuato dalle *squadre antincendio* non può essere considerato in fase progettuale ai fini della modifica dell'andamento della curva RHR(t).

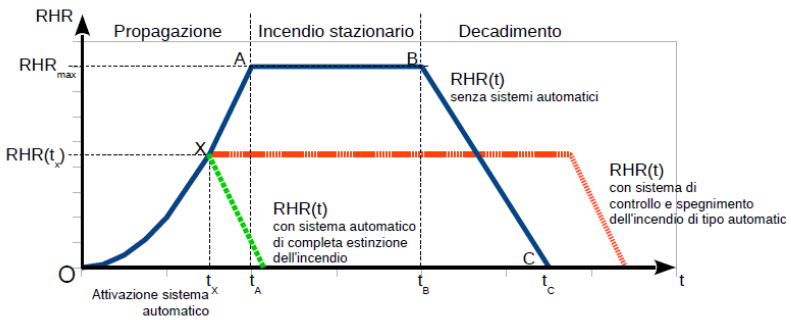
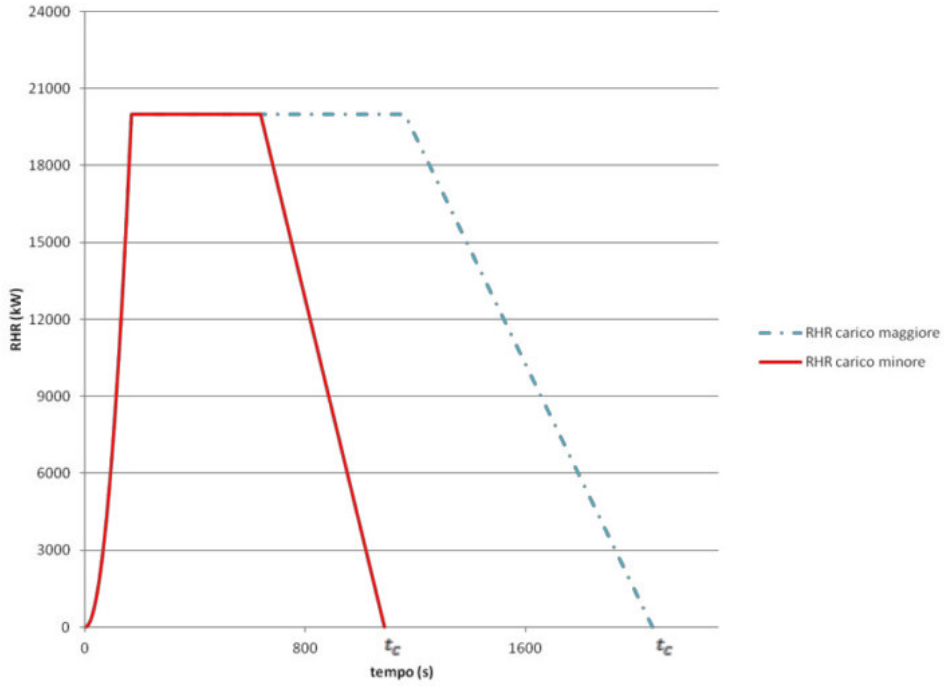


Illustrazione M.2-1: Fasi dell'incendio

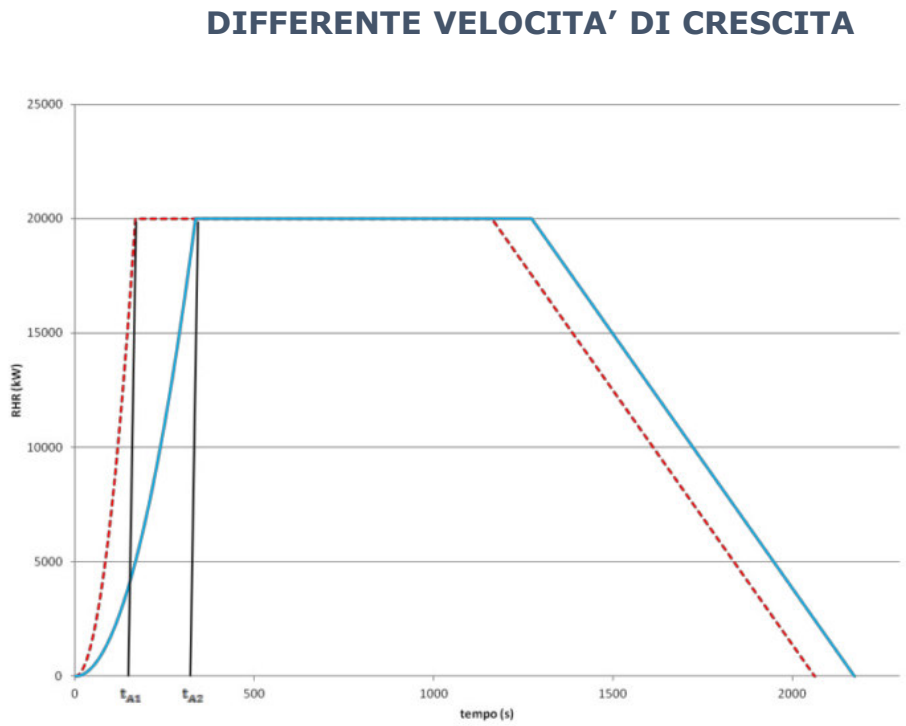
Effetti sulla curva RHR – Pari potenza e velocità di crescita

DIFFERENTE CARICO DI INCENDIO

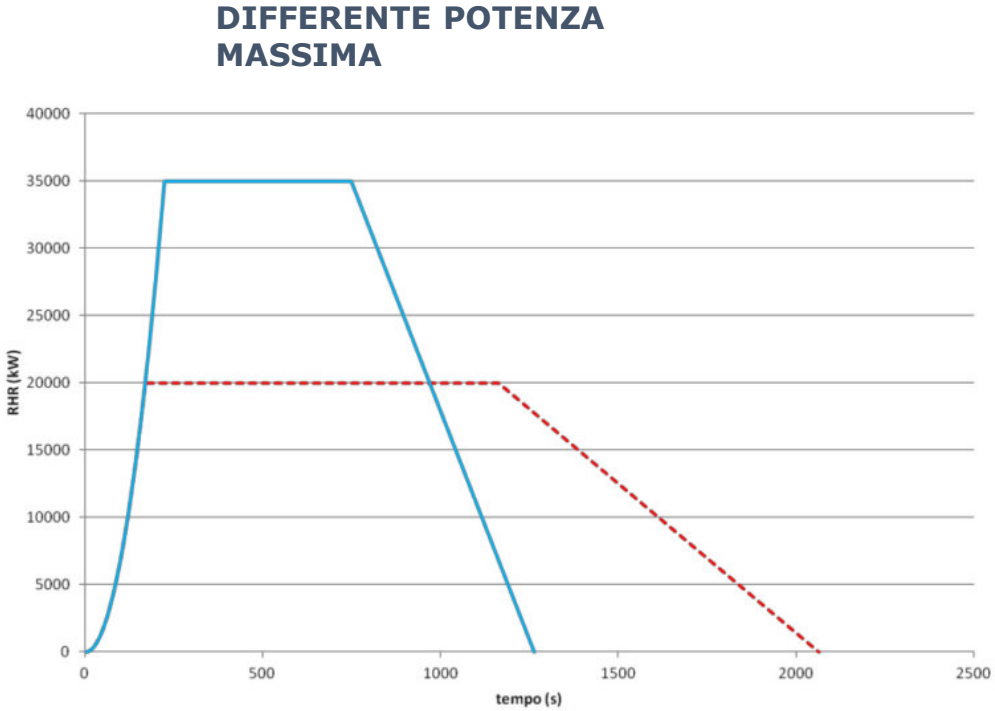


Curva Rossa 1000MJ – Curva Azzurra 2000MJ

Effetti sulla curva RHR – Pari potenza e Carico di incendio



Effetti sulla curva RHR – Pari carico di incendio e velocità di crescita



Curva Rossa 20MW - Curva Azzurra 35MW

Stima della quantità di fumo prodotto dall'incendio

- La quantità di fumo prodotto dall'incendio può essere stimata manualmente.
- Si tratta di una stima volutamente conservativa. Per un calcolo più preciso occorre rifarsi ai software o meglio ai test.
- I parametri che governano la combustione sono infatti difficili da controllare. Pensiamo alla combustione che può essere o non essere stechiometrica.

$$RHR = mc \ * Potere\ Calorifico$$

mc = velocità di combustione kg/s

Stima della quantità di fumo prodotto dall'incendio

$$\frac{RHR}{Potere\ calorifico} = mc\ (s)$$

Per ogni secondo, in funzione dell'andamento della potenza

$$Potere\ calorifico\ legno\ 17{,}5\ MJ/kg$$

$$\frac{kg\ fumo}{kg\ combustibile} = 0{,}018$$

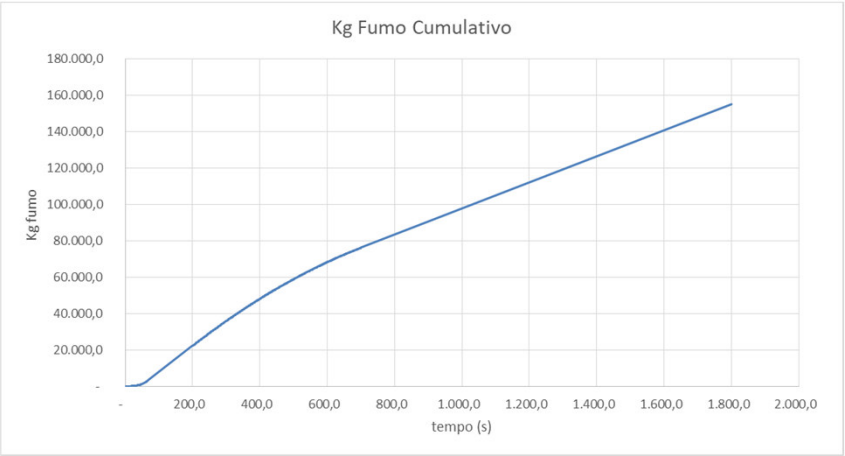
Tabella 6.1 - Valori medi del fattore ε di emissione di fumo per alcuni combu

Sostanza combustibile	ε (kg_{fumo}/kg_{comb})
alcool etilico	0,008
propano	0,024÷0,037
toluene	0,178
petrolio greggio	0,13
nylon	0,075÷0,090
poliestere	0,089÷0,112
lana	0,008
policarbonato	0,104÷0,130
poliuretano rigido	0,104÷0,227
poliuretano flessibile	0,131÷0,227
polistirene	0,150÷0,210
polipropilene	0,059÷0,12
polietilene	0,056÷0,102
legno	0,015÷0,018
politetrafluoroetilene (teflon)	0,003
policloruro di vinile	0,12÷0,172
polimetilmetacrilato	0,021÷0,022

Stima della quantità di fumo prodotto dall'incendio

$$tot\ kg\ fumo = mc\ * 0{,}018$$

Per ogni secondo, in funzione dell'andamento della potenza



Esempio di calcolo curva di fumo

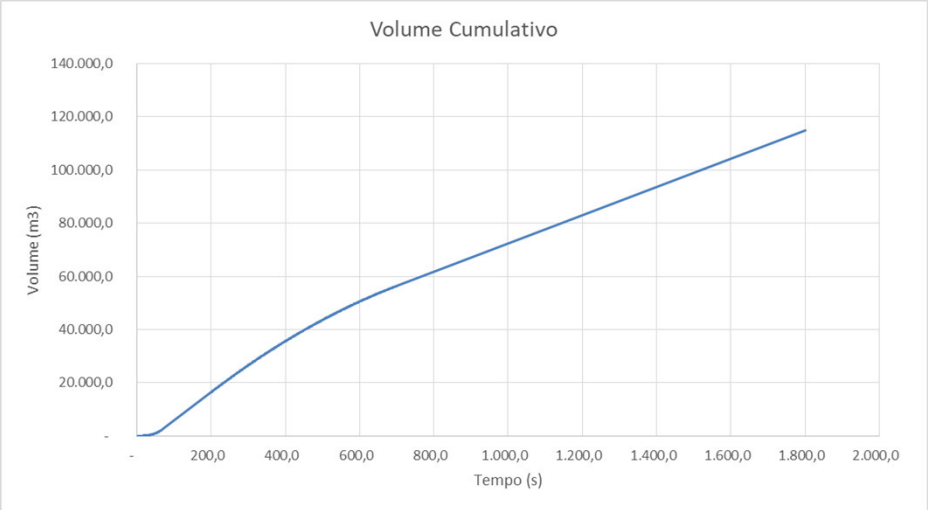
Stima della quantità di fumo prodotto dall'incendio

Abbiamo i kg dei fumi e occorre trovare il volume m3

$$\rho = \frac{144\,p}{R(T+460)}$$

$$\rho = \frac{p}{R(T+273)} \quad \text{for SI} \qquad (50.13)$$

where
ρ = density, lb/ft^3 (kg/m^3),
p = pressure, lb/in^2 (Pa),
R = gas constant, 53.34 ft lbf/lbm/°R (287 J/kg K)
T = temperature, °F (°C).



Considerando una TFumi pari a 200°C, limite indicato dal DM 18 Ottobre 2019 per la stratificazione

Densità fumi (200°C) = 0.74 kg/m3

Stima della quantità di fumo prodotto dall'incendio

- La quantità di fumo prodotto così calcolata è indicativa ed è molto cautelativa
- Può dare una stima di quanto tempo occorre per creare un layer libero da fumo.
- Attenzione che la densità dei fumi è legata alla T e in incendi grandi la densità ne è fortemente influenzata. Oltre al fatto che al diminuire del delta Temperatura, diminuiscono le forze di galleggiamento.
- Esistono modelli matematici manuale in funzione di determinate e caratteristiche del compartimento

Volume Compartimento

[redacted]

Volume Compartimento - Volume fumo

Simulazioni CFD

M.1.9 **Criteri di scelta e d'uso dei modelli e dei codici di calcolo**

1. Il professionista antincendio può optare tra i modelli di calcolo che le conoscenze tecniche di settore mettono a disposizione, sulla base di valutazioni inerenti la complessità del progetto.
2. Il professionista antincendio che adotta modelli di calcolo sofisticati, deve possedere una particolare competenza nel loro utilizzo, nonché un'approfondita conoscenza sia dei fondamenti teorici che ne sono alla base che della dinamica dell'incendio.
3. Allo stato attuale i modelli più frequentemente utilizzati sono:
   a. modelli analitici,

Nota Ad esempio, le correlazioni per i modelli di incendio localizzati o *fire plumes* di Zukoski, Heskestad, McCaffrey, Thomas, Hasemi e Nishiata, Alpert, …

   b. modelli numerici tra cui:
      i. modelli di simulazione dell'incendio a zone per ambienti confinati,

Nota Ad esempio, codici di calcolo CFAST, Ozone, …

      ii. modelli di simulazione dell'incendio di campo,

Nota Ad esempio, codici di calcolo CFX, FDS, Fluent, …

      iii. modelli di simulazione dell'esodo,

Nota Ad esempio, codice di calcolo FDS+EVAC, …

      iv. modelli di analisi termostrutturale.

Nota Ad esempio, codici di calcolo Abaqus, Adina, Ansys, Diana, Safir, …

4. Nel loro campo di applicazione, i modelli analitici garantiscono stime accurate di effetti specifici dell'incendio (es. il calcolo del tempo di *flashover* in un locale). Per analisi più complesse che coinvolgano interazioni dipendenti dal tempo di più processi di tipo fisico e chimico presenti nello sviluppo di un incendio si ricorre generalmente ai modelli numerici.
5. Per i parametri di input del modello più rilevanti deve essere svolta analisi di *sensibilità* dei risultati alla variazione del parametro di input. Ad esempio, i risultati dell'analisi non devono essere significativamente dipendenti dalle dimensioni della griglia di calcolo.
6. È ammesso l'utilizzo contemporaneo di più tipologie di modelli. Ad esempio:
   a. si possono usare modelli specifici per la valutazione del tempo di attivazione di un impianto di rivelazione o di spegnimento e della rottura di un vetro in funzione della temperatura, per poi inserire i dati ricavati in una modellazione effettuata con modelli di campo;
   b. si può utilizzare un modello a zone per valutare in una prima fase le condizioni di maggiore criticità del fenomeno, per poi approfondire la trattazione degli effetti con modelli di campo.

Occorre verificare che i risultai vadano a convergenza. Occorre rifare la mesh più piccola e verificare che i risultai tendano allo stesso risultato

Conoscenza avanzata dei modelli numerici

Alla base della CFD ci sono le equazioni di Navier-Stokes

Coordinates: (x,y,z)
Velocity Components: (u,v,w)

Time : t Pressure: p
Density: ρ Stress: τ
Total Energy: Et

Heat Flux: q
Reynolds Number: Re
Prandtl Number: Pr

Continuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

X – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right]$$

Y – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right]$$

Z – Momentum

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right]$$

Energy:

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r}\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right]$$
$$+ \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz})\right]$$

Equazione di stato

Equazioni del moto

Equazione della continuità (conservazione massa)

Equazione della quantità di moto

Equazione dell'energia

Coordinates: (x,y,z)
Velocity Components: (u,v,w)

Time : t Pressure: p
Density: ρ Stress: τ
Total Energy: Et

Heat Flux: q
Reynolds Number: Re
Prandtl Number: Pr

Continuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

X – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right]$$

Y – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right]$$

Z – Momentum

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right]$$

Energy:

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r}\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right]$$
$$+ \frac{1}{Re_r}\left[\frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz})\right]$$

MODELLO DI IRRAGGIAMENTO

Modelli semplificati forniscono una descrizione generale del fenomeno

- ✓ CFAST (NIST) – Peacock et al. (1993)

Modelli sofisticati richiedono conoscenze multidisciplinari

Combustione, Irraggiamento, produzione e movimento dei fumi, pirolisi

Fire Dynamic Simulator (NIST) – McGrattan et al. (1994-oggi)

- ➢ Modello di turbolenza: Large Eddy

NIST
Fire Research Division
Engineering Laboratory

FDS, Fire Dynamic Simulator, risolve numericamente una forma di equazioni di Navier-Stokes.

La Turbolenza è trattata attraverso la forma Smagorinsky di Large Eddy Simulation (LES).

**È possibile effettuare anche una simulazione numerica
diretta (DNS) se la griglia è abbastanza fine.**

La modalità LES è quella predefinita poiché comporta minore onere computazionale

CARATTERISTICHE PRINCIPALI E LIMITI DEL SOFTWARE
--Conoscenza dei modelli di calcolo--

Bassa velocità dei flussi (numero di Mach < 0.3) .

L'uso di FDS è limitato ai flussi caratterizzati da «bassa» velocità, in particolare al fumo e trasporto di energia termica dovuta agli incendi.

Questa caratteristica comporta che FDS non possa essere utilizzato per qualsiasi scenario che coinvolga velocità di flusso che si avvicinano alla velocità del suono, come le esplosioni, il flusso a ugelli, e detonazioni.

L'efficienza di FDS è dovuta:

- alla semplicità della sua griglia numerica,
- risolutore diretto per il campo di pressione.

- le caratteristiche geometriche non sono conformi alla griglia rettangolare,
- per il calcolo è necessario conoscere gli effetti dello strato limite.

CARATTERISTICHE PRINCIPALI E LIMITI DEL SOFTWARE

A proposito di software di calcolo e verifiche manuali

9. Incendio localizzato: focolaio d'incendio che interessa una zona limitata del compartimento antincendio, con sviluppo di calore concentrato in prossimità degli elementi costruttivi posti superiormente al focolaio o immediatamente adiacenti.

A *superficie lorda* del piano del compartimento o, nel caso degli incendi localizzati, *superficie lorda* effettiva di distribuzione del carico di incendio. [m^2]

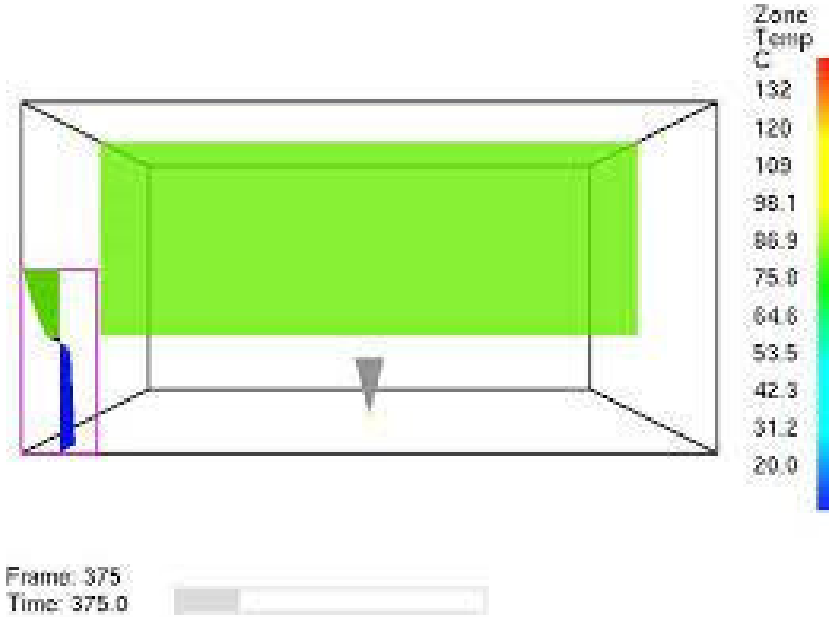
Abbiamo sempre le condizioni di un incendio localizzato, basti pensare alle zone di stoccaggio e alle zone di movimentazioni adiacenti per lo spostamento del materiale stoccato.

Se ricadiamo dentro il campo di applicazione di CFAST allora la dipendenza dalla verifica del carico d'incendio localizzato viene meno.

A proposito di software di calcolo e verifiche manuali

A tal proposito, vi segnalo che nell'ultima versione sono stati rimosse le limitazioni geometriche in favore di una limitazione sulla proporzionalità delle dimensioni del compartimento. Potete trovare i riferimenti in questo gruppo online: https://groups.google.com/g/cfast/c/Zvb0f07r1DE

Se questo elimina la dipendenza dalla verifica del carico d'incendio localizzato, va detto che è possibile chiudere il ragionamento sulle temperature generate localmente in presenza di un incendio localizzato con formule semplificate per cui basta un foglio di calcolo excel.



CFAST è un modello di incendio a due zone utilizzato per calcolare l'evoluzione della distribuzione del fumo, dei gas dell'incendio e della temperatura nei compartimenti di un edificio durante un incendio

COSA NON DEVE MANCARE IN NESSUNA RELAZIONE DI APPROCCIO INGEGNERISTICO:

"10 punti" minimi da definire per qualsiasi progetto con approccio ingegneristico.

Per questo farei riferimento ai punti M.2.4.1 - M.2.4.2 - M.2.4.3 del codice, sottolineando quelli più importanti:

- incendio controllato dal combustibile o dal comburente
- condizioni di ventilazioni più gravose per l'obiettivo
- software di calcolo utilizzato e relativa validazione (FDS + SAFIR + PATHFINDER)
- incendio localizzato o generalizzato
- tipologia del combustibile (altezza d'impilamento, quantità, stoccaggio, ect..)
- tipologia degli occupanti
- impianti presenti e loro interazione con la RHR
- caratteristiche delle strutture e geometria dei locali
- effetti sull'ambiente
- sistemi di gestione per il rispetto di quanto definito sopra

CONTACT

Ing. Diego Cecchinato - Fire Engineer
C. +39 348 9823213
diego.cecchinato@edilteco.it

Articoli **INGENIO**
https://www.ingenio-web.it/autori/cecchinato-diego

Bibliografia

- Rivista Antincendio, articolo “Resistenza al fuoco: l’impatto della Circolare DCPREV 9962 sulla progettazione secondo il Codice di Prevenzione Incendi “ Marco Antonelli, Daniele Andriotto, Diego Cecchinato.
- Rivista Antincendio, articolo “La valutazione della resistenza al fuoco con la curva dell'incendio naturale. Il ruolo dei sistemi di protezione“ di Daniele Andriotto, Giovanni Cosma, Luciano Nigro.
- Rivista Antincendio, articolo “ Eurocodice 3: la resistenza al fuoco delle strutture in acciaio e l'influenza del fattore di sezione Am/V» di Daniele Andriotto, Ermanno Andriotto
- SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition.
- “Progetto delle strutture resistenti al fuoco” di Buchanan Andrew H.; Gambarova Pietro; Felicetti Roberto. - Hoepli, Milano.
- UAE Fire Safety Code.
- BS 9999.
- Fruin, J. J. - Pedestrian Planning and Design (1987).
- Professor Bianco Università di Napoli II