

2020

# COMPORTAMENTO DEI COMBUSTIBILI

## COMPORTAMENTO DEI COMBUSTIBILI

### 1 Solidi

La combustione dei combustibili solidi avviene per stadi. I combustibili solidi a certa temperatura emettono sostanze volatili infiammabili (processo di distillazione detto pirolisi), che a contatto con l'aria (esistendo la temperatura di accensione) bruciano con fiamma.

Una parte del calore prodotto riscalda la massa adiacente del combustibile, con emissione di ulteriori sostanze volatili infiammabili (altra pirolisi) che alimenteranno e manterranno la fiamma. La combustione continua in questo modo fino all'esaurirsi di tutti i vapori infiammabili per poi proseguire sotto forma di brace.

La combustione dei solidi è influenzata dalla natura, dalla pezzatura e dall'umidità contenuta.

Consideriamo un pezzo di legno di grandi dimensioni.

Un fiammifero, nonostante la fiamma raggiunta 1000 °C, non riesce ad accenderlo. Questo è dovuto allo scarso contatto della grande massa di combustibile con l'ossigeno dell'aria ed alla grande massa che deve essere portata alla temperatura di ignizione. Se il legno viene ridotto in piccole masse vi è maggior contatto tra le parti del legno con l'aria e quindi è più facile che avvenga l'accensione con il fiammifero.

Se ancora si riduce la dimensione del legno (trucioli) si ha abbastanza contatto tra questo e l'ossigeno dell'aria e certamente con il calore prodotto dal fiammifero si ha il fuoco. Se si continua a ridurre la dimensione della pezzatura del legno fino ad arrivare alla polvere è sufficiente una scintilla perché avvenga una combustione pericolosa.

La **temperatura di combustione** è la massima temperatura che si può raggiungere nella combustione del materiale, quando sia evitata ogni perdita di calore.

La **temperatura di ignizione o di accensione** è la temperatura minima alla quale deve essere portata una sostanza combustibile perché la sua combustione inizi senza necessità di innesco e, da quel momento in poi possa mantenersi, senza ulteriori apporti di calore.

La temperatura di ignizione o di accensione si chiama anche "**temperatura di auto ignizione**" per ricordare appunto la circostanza che quando una sostanza combustibile è portata in aria alla sua temperatura di ignizione comincia a bruciare e la sua combustione procede soltanto con l'apporto del calore da essa stessa prodotto.

I combustibili solidi vengono distinti in:

- difficilmente combustibili (le sostanze che prendono fuoco a contatto con la sorgente d'ignizione e che non sono capaci di continuare a bruciare appena si allontana la sorgente d'ignizione);
- combustibili (le sostanze che prendono fuoco a contatto con la sorgente d'ignizione e che sono capaci di continuare a bruciare da soli);
- facilmente accendibili (le sostanze che iniziano a bruciare rapidamente per effetto di una sorgente d'ignizione debole quale la scintilla, il fiammifero, il corto circuito di un impianto elettrico, ecc.);
- difficilmente accendibili (le sostanze che prendono fuoco per effetto di una sorgente d'ignizione ad elevata energia).

| Sostanza        | Temperatura di accensione °C |
|-----------------|------------------------------|
| Acetone         | 540                          |
| Benzina         | 250                          |
| Gasolio         | 220                          |
| Idrogeno        | 560                          |
| Alcool metilico | 455                          |
| Carta           | 230                          |
| Legno           | 220÷250                      |
| Gomma sintetica | 300                          |
| Metano          | 537                          |

Tabella 2.2 Temperatura di accensione

| Sostanza   | Temperatura di combustione °C |               |
|------------|-------------------------------|---------------|
|            | Massima Teorica               | Massima Reale |
| Metano     | 2218                          | 1880          |
| Etano      | 2226                          | 1895          |
| Propano    | 2232                          | 1925          |
| Butano     | 2237                          | 1895          |
| Fiammifero | -                             | Oltre 1000    |
| Idrogeno   | 2205                          | -             |

Tabella 2.3 Temperatura di combustione

## 2 Liquidi

I combustibili liquidi non bruciano come tali ma come vapori, originati al di sopra della superficie del liquido, che si comportano come i gas combustibili.

Per **temperatura di infiammabilità o punto di infiammabilità** di un combustibile liquido, si intende la più bassa temperatura alla quale il liquido emette immediatamente, sopra la sua superficie libera, vapori che mescolati all'aria possono dare, con questa, miscele infiammabili mediante una fiamma esterna.

Al raggiungimento della temperatura di infiammabilità (che è diversa per ciascuna sostanza), la superficie del liquido emette vapori in quantità tali che, mescolati con l'aria danno luogo ad una combustione in presenza di innesco. Il calore sviluppato provoca l'evaporazione di ulteriore liquido che, combinandosi con l'ossigeno dell'aria mantiene la combustione. Poiché più bassa è la temperatura di infiammabilità di un liquido più grave è il pericolo d'incendio, in tutte le legislazioni di sicurezza contro gli incendi, i liquidi

infiammabile sono divisi in più classi, ognuna delle quali è definita da una temperatura o punto di infiammabilità.

Le normative Italiane fanno riferimento alla seguente classificazione:

**Categoria «A»** - Liquidi i cui vapori possono dar luogo ad esplosioni. Liquidi aventi un punto di infiammabilità inferiore a 21°C (petroli greggi, etere di petrolio, benzine, ecc.)

**Categoria «B»** - Liquidi infiammabili. Liquidi aventi un punto di infiammabilità compreso fra 21°C e 65 °C (petrolio raffinato, acqua ragia minerale, alcool etilico, metilico, ecc.).

**Categoria «C»** - Liquidi combustibili. Liquidi aventi punto di infiammabilità compreso fra 65°C e 125°C (oli minerali, lubrificanti, nafta Mazut, gasoil, nafta per diesel, ecc.).

Per i liquidi infiammabili esiste un **campo di infiammabilità**, al di fuori del quale la combustione non avviene. Il campo di infiammabilità è compreso fra due limiti di infiammabilità, il **limite superiore** (limite al di sopra del quale l'aria è insufficiente per innescare e mantenere la combustione) ed il **limite inferiore** (limite al di sotto del quale i vapori prodotti dal liquido sono insufficienti ad innescare e mantenere la combustione).

Si noti che fra i combustibili liquidi fanno eccezione alcuni olii vegetali che, a contatto con l'aria, possono ossidarsi direttamente in fase liquida emettendo calore.

| Sostanza          | Temperatura di infiammabilità °C |
|-------------------|----------------------------------|
| Gasolio           | 65                               |
| Acetone           | -18                              |
| Benzina           | -20                              |
| Gasolio           | 65                               |
| Alcool metilico   | 11                               |
| Alcool etilico    | 13                               |
| Toluoro           | 4                                |
| Olio lubrificante | 149                              |

Tabella 2.4 Temperatura di infiammabilità

| Sostanza  | Limite inferiore di infiammabilità<br>% in volume | Limite superiore di infiammabilità<br>% in volume |
|-----------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Acetone   | 2.5                                               | 13                                                |
| Ammoniaca | 15                                                | 18                                                |
| Benzina   | 1                                                 | 6.5                                               |
| Gasolio   | 0.6                                               | 6.5                                               |

|          |   |      |
|----------|---|------|
| Idrogeno | 4 | 75.6 |
| Metano   | 5 | 15   |

Tabella 2.5 Limiti di infiammabilità

### 3 Gassosi

Il comportamento dei combustibili gassosi nella combustione è analogo a quello dei vapori dei liquidi infiammabili, tenendo presente però che il sistema gassoso (combustibile-comburente) può essere:

- chimicamente uniforme, caso in cui il combustibile ed il comburente sono miscelati prima dell'ignizione (per esempio becco Bunsen, cannello da saldatura o taglio, bruciatori per gas di città);
- chimicamente non uniforme, caso in cui l'ignizione e la combustione avvengono simultaneamente al mescolamento del gas e del comburente.

Anche per i combustibili gassosi vale quanto già detto per i liquidi infiammabili, relativamente ai limiti di infiammabilità.

Infatti per questi sistemi, oltre alla presenza del materiale combustibile, del comburente, di un punto d'ignizione a temperatura uguale o superiore a quella di ignizione del materiale combustibile, deve sussistere una quarta e fondamentale condizione e cioè, la proporzione relativa del combustibile gassoso rispetto a quella del comburente gassoso (ossigeno o aria), deve essere compresa entro due limiti determinati. Questi limiti si riferiscono a percentuali in volume del gas combustibile rispetto alla sua miscela con aria, si definiscono rispettivamente, limite inferiore e superiore di infiammabilità, corrispondono alla più bassa e alta concentrazione in volume del gas combustibile della miscela al di sotto o al di sopra della quale non è possibile che l'ignizione, iniziata in un punto di essa, possa propagarsi a tutta la miscela presente.

Spesso il limite di infiammabilità, di miscele di gas o vapori combustibili con l'aria, vengono confusi con i limiti di esplosività. I limiti di infiammabilità delimitano la composizione di una miscela, nella quale la fiamma si può propagare nella miscela stessa, senza produrre una pressione apprezzabile sulle pareti del recipiente che la contiene. I limiti di esplosività si possono considerare quelli che delimitano la composizione di quelle miscele, nelle quali la fiamma si propaga attraverso l'intero volume della miscela stessa, sviluppando una pressione notevole sulle pareti del recipiente che la contiene.

Si noti che i gas e i vapori di liquidi infiammabili vengono classificati in:

- pesanti - quelli la cui densità è maggiore dell'aria (g.p.l., benzine, ecc.);
- medi - quelli la cui densità è pressoché uguale a quella dell'aria (etilene, ossido di carbonio, acetilene, ecc.);
- leggeri - quelli la cui densità è minore di quella dell'aria (metano, idrogeno, ecc.).

## IL FUOCO DI PROGETTO

I fuochi di progetto sono caratterizzati solitamente in termini di seguenti variabili rispetto al tempo:

- tasso di rilascio di calore (HRR);
- tasso di produzione di sostanze tossiche;
- tasso di produzione del fumo;
- formato del fuoco (compresa la lunghezza della fiamma);
- tempo di accadimento degli eventi chiave quale il FLASHOVER.

Altre variabili quali la temperatura, l'emissività e la posizione possono essere utilizzate per particolari tipi di analisi numerica.

L'incendio può essere descritto utilizzando (a seconda dello scopo o dell'analisi che si intende condurre) il valore istantaneo di una o più delle variabili sopra descritte, durante tutto il periodo dello sviluppo e della propagazione dell'incendio stesso.

In genere, un incendio si sviluppa dal momento dell'innesco fino a una fase detta di sviluppo completo, ed infine decade per esaurimento del combustibile.

Un incendio generalmente è caratterizzato dalle seguenti fasi:

- **fase iniziale:** questa fase può essere caratterizzata da varie cause di origine, che possono essere per esempio una combustione senza fiamma, con la fiamma, un innesco per irraggiamento o doloso mediante l'utilizzo di una sostanza infiammabile;
- **fase di sviluppo:** questa fase è caratterizzata da un periodo, più o meno ampio, in funzione della velocità di combustione dei combustibili utilizzati, di propagazione del fuoco fino al flashover;
- **fase a sviluppo completo:** questa fase è caratterizzata da una velocità di combustione e dalla produzione di potenza termica sostanzialmente costante; questa fase può essere controllata:
  - o dal combustibile: quando vi è nell'ambiente dove si verifica l'incendio una presenza pressoché illimitata di ossigeno per la combustione; in questo caso il quantitativo di materiale che brucia è funzione esclusivamente del materiale combustibile stesso e quindi delle sue proprietà chimiche e fisiche (pezzatura, disposizione spaziale all'interno del locale)
  - o dal comburente: in questo caso si parla di incendi controllati dalla ventilazione, per indicare che la combustione dipende essenzialmente dall'apporto di ossigeno per la combustione
- **fase di decadimento:** questa fase è caratterizzata dal declino della severità dell'incendio, in termini di potenza termica emessa e dipende o dall'esaurimento del combustibile oppure dall'intervento di un impianto di protezione attiva o dalle squadre di soccorso;
- **estinzione:** quando all'interno dell'ambiente vi è più energia di quanta ne viene prodotta.

È opportuno ricordare la definizione di flashover:

*La ISO TR 13387-2 "Fire Safety Engineering - Part 2: Design fire scenarios and design fires", indica che il FLASHOVER è una fase di transizione in corrispondenza della quale la temperatura dello strato di gas caldi a soffitto raggiunge il valore di 600 °C ed il flusso termico a livello del pavimento è pari a 20 kW/m<sup>2</sup>.*

Il Flashover è caratterizzato da una transizione veloce, da un fuoco localizzato, alla combustione di tutte le sostanze combustibili presenti all'interno di un compartimento.

L'effetto del flashover sull'incendio di progetto, è la modifica del tasso di scarico di calore HRR, che viene portato, pressoché istantaneamente, fino alla fase di sviluppo completo. Un incendio sviluppato completamente può essere controllato dalla ventilazione o dal combustibile.

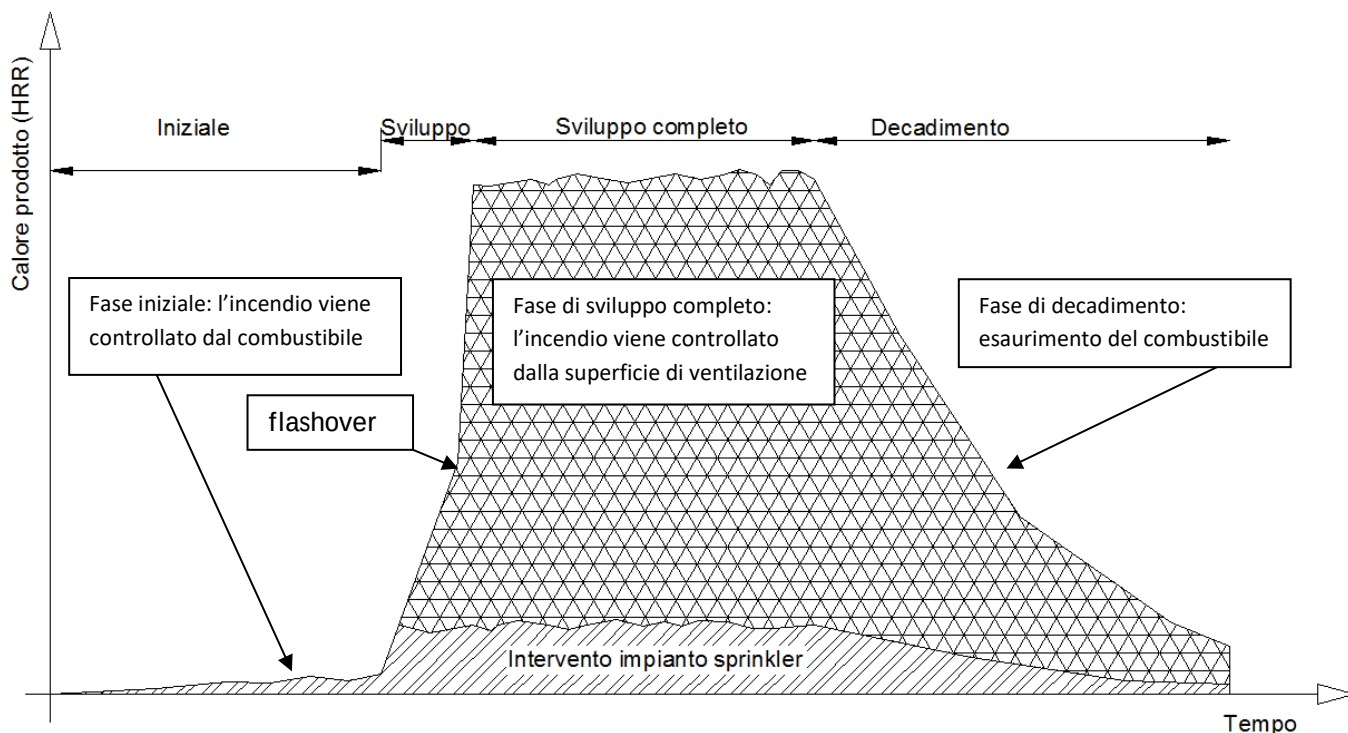


Fig. 2.3 Curva HRR di rilascio di calore (Heat Release Rate)

La curva HRR (Heat Release Rate) è il miglior modo di rappresentare un incendio, la curva rappresenta il rateo (velocità) con il quale è rilasciata l'energia. La curva HRR rappresenta il rateo di energia fornita per unità di tempo. L'HRR è la grandezza che influenza molte altre caratteristiche di un ambiente coinvolto in un incendio.

All'aumentare di HRR, la temperatura ed la velocità di aumento della temperatura crescono entrambi, accelerando lo sviluppo dell'incendio. L'incremento dell'HRR provoca una riduzione della concentrazione di ossigeno, un incremento dei prodotti gassosi e di particolato generato da una combustione incompleta. L'HRR è direttamente collegato anche al quantitativo di acqua necessario al controllo dell'incendio.

Quando un combustibile brucia, l'energia totale che può essere rilasciata dipende dal potere calorifico e dalla massa disponibile di combustibile.

Il potere calorifico totale, di conseguenza il carico di incendio, è un valore importante da calcolare, ma comunque è più importante valutare il rateo con il quale l'energia viene rilasciata. HRR è influenzata da molte caratteristiche del combustibile come il rapporto tra massa e superficie, la posizione (orizzontale, verticale), la geometria, la modalità di deposito ecc..

Istante per istante un incendio produce energia sotto forma di calore variabile e funzione del potere calorifico e della velocità di combustione.

Ad ogni istante dell'incendio corrisponde un valore di potenza termica rilasciata che, espressa in KW è pari a:

$$\text{HRR} (t) = H \times V (t)$$

dove:

HRR = Heat Release Rate (KW)

H = Potere calorifico (KJ/Kg)

V = velocità di combustione (Kg/s)

L'analisi della dinamica della combustione è fondamentale per la scelta degli scenari di incendio, un incendio con un picco di potenza relativamente basso ma con rapido sviluppo, può risultare più critico per la sicurezza delle persone di un altro che presenti un picco più alto, ma sviluppo lento.

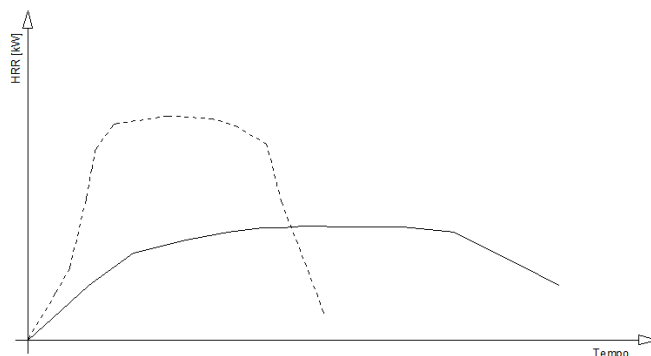


Fig. 2.4 Curve HRR

Nella figura 2.4 sono rappresentate curve HRR, relative a due incendi che coinvolgono uguali quantità e qualità di combustibile, quindi rappresentano due carichi di incendio uguali, l'area sottesa alle due curve rappresenta l'energia termica rilasciata, ed è uguale.

Pur essendo con carico di incendio uguale, la curva HRR indicata con la linea tratteggiata rappresenta un incendio che si sviluppa più rapidamente (è il caso di legno con una diversa pezzatura, più piccola). L'incendio rappresentato dalla curva tratteggiata, nella fase iniziale di crescita dell'incendio, crea nell'ambiente condizioni più pericolose per la salute delle persone e sollecita maggiormente gli elementi costruttivi.

Il carico d'incendio, indica il quantitativo di energia termica che viene rilasciato durante la combustione di tutto il materiale combustibile presente all'interno di un determinato compartimento, il dato non dà nessuna indicazioni in merito alle modalità di rilascio dell'energia.

Il carico di incendio, è una grandezza che deve essere utilizzata per effettuare valutazioni del rischio incendio nella fase successiva al flashover, in quanto solamente in tale fase, è lecito assumere che la combustione si sia effettivamente propagata completamente nell'ambiente; ne consegue che, qualora si voglia verificare la sicurezza delle persone, durante un incendio che si origina all'interno di un edificio, occorre esaminare la fase precedente il flashover, di crescita dell'incendio e la contestuale diffusione dei prodotti della combustione.

Per effettuare un'analisi delle condizioni di incendio, è necessario individuare nello scenario previsto la probabile variazione nel tempo della potenza termica rilasciata che, indica appunto, la reale entità di combustibile coinvolto nello sviluppo dell'incendio.

Lo studio degli effetti che l'incendio produce in un locale, durante la prima fase di sviluppo fino all'approssimarsi del flashover, è molto importante per valutare la sicurezza delle persone, in quanto

successivamente nell'ambiente si creano condizioni in grado di provocare all'organismo umano seri ed irreparabili danni, anche per brevissimi periodi di esposizione ai prodotti della combustione.

Gli effetti provocati da un incendio sono principalmente influenzati dal valore della potenza termica totale rilasciata, è quindi fondamentale procedere ad una stima accurata della sua variazione nel tempo.

In definitiva:

- se lo scopo della creazione e dello studio di uno scenario di incendio è la salvaguardia della vita umana, occorre studiare la fase di incendio precedente il flashover;
- se lo scopo della creazione e dello studio di uno scenario di incendio è la verifica delle condizioni strutturali di un compartimento soggetto a incendio, occorre studiare la fase di incendio successiva il verificarsi del flashover.

I fattori che determinano il tasso caratteristico di sviluppo di un incendio sono descritti in ISO/TR 13387-1 e prendono in considerazione:

- la natura dei combustibili;
- la disposizione geometrica del combustibile;
- la geometria del compartimento;
- la combustibilità dei materiali;
- le caratteristiche del tasso di rilascio di calore;
- le aperture di ventilazione;
- il flusso di calore esterno;
- l'area della superficie esposta.

È importante notare che il risultato degli scenari di progetto è molto sensibile alla scelta dell'incendio di progetto, in particolare al tasso di sviluppo dell'incendio stesso.

## Fuochi $\alpha t^2$

La maggior parte dei fuochi che non coinvolgono liquidi infiammabili, gas oppure combustibili leggeri come la schiuma polimerica, si sviluppano relativamente lentamente. Mentre il fuoco aumenta di dimensioni, il tasso di sviluppo dello stesso accelera.

Il tasso di sviluppo del fuoco è espresso generalmente in termini di tasso di produzione di energia (HRR). Generalmente, per la definizione degli scenari viene utilizzato un tasso di rilascio di energia di tipo esponenziale. La formulazione esponenziale più comunemente utilizzata è comunemente indicata come fuoco di tipo  $\alpha t^2$ .

In un tal fuoco, il tasso di rilascio di calore è dato dall'espressione:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \left( \frac{t}{t_g} \right)^2$$

dove:

$t_g$  è il tempo di sviluppo che coincide con il tempo necessario al raggiungimento del tasso di scarico di calore di riferimento  $\dot{Q}_0$ .

Per convenzione, si è fissato questo tempo come quello necessario per ottenere un picco del tasso di rilascio dell'energia termica  $\dot{Q}_0$  uguale ad 1 MW. Varie sperimentazioni, hanno permesso la compilazione di tabelle di materiali ed oggetti che riportano questo valore.

La funzione rappresentativa del tasso di rilascio del calore può quindi essere rappresentata con una funzione del tipo :

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

dove:

$\dot{Q}$  = tasso di rilascio di calore del fuoco (HRR)

$\alpha$  = coefficiente di crescita del fuoco

$t$  = tempo (sec.)

gli incendi vengono classificati in funzione della velocità di crescita, che per definizione può essere:

- Slow = Lenta
- Medium = Media
- Fast = Veloce
- Ultra-Fast = Ultraveloce

Con riferimento al tempo per raggiungere un rateo di rilascio termico (potenza di fuoco) pari a 1055 KW ( 1000 BTU) si ha:

| Tipo di crescita dell'incendio | Tempo Caratteristico | Coeff. di crescita |
|--------------------------------|----------------------|--------------------|
| <i>Crescita lenta</i>          | 600                  | 0.00293            |
| <i>Crescita media</i>          | 300                  | 0.01172            |
| <i>Crescita veloce</i>         | 150                  | 0.04690            |
| <i>Crescita ultra veloce</i>   | 75                   | 0.18760            |

Tabella 2.6 Tempo di crescita dell'incendio

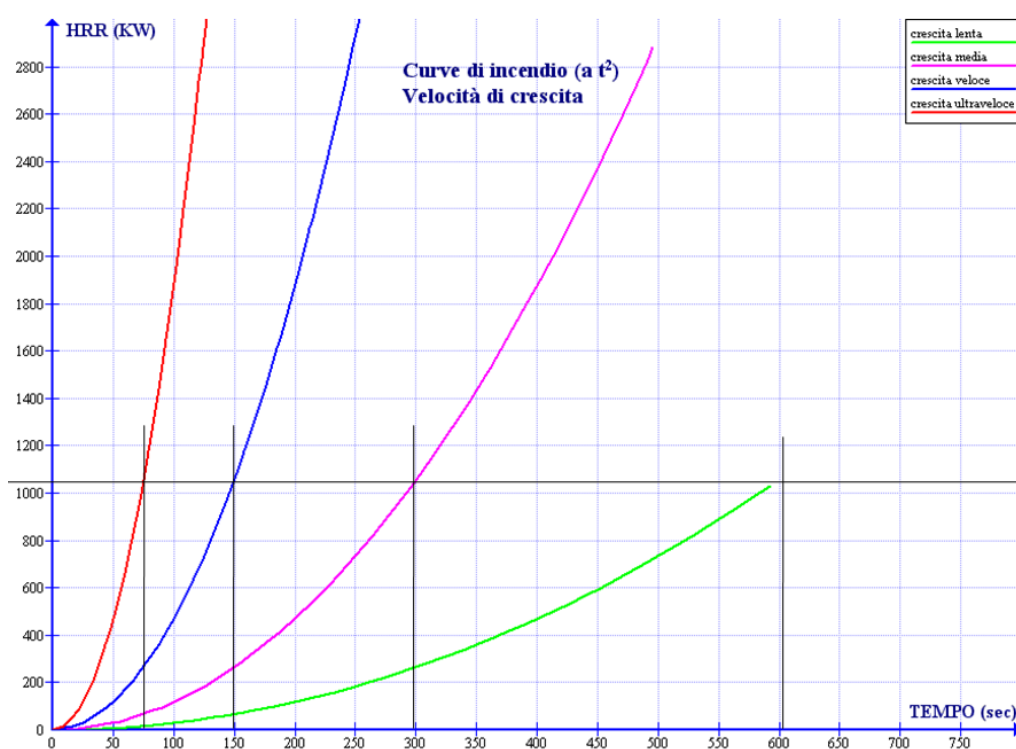


Fig. 2.5 Curve HRR di sviluppo d'incendio

La selezione della categoria, adatta per uno scenario d'incendio particolare, deve considerare i fattori descritti sopra. Il “*giudizio esperto di ingegneria*” è necessario per la selezione della categoria adatta di sviluppo del fuoco.

Per gli scenari di progetto, in cui la disposizione geometrica del combustibile è conosciuta, la selezione della categoria può essere basata sui dati sperimentali o su simulazione numerica.

Utili indicazioni sulla scelta delle curve HRR per merci immagazzinate si può ricavare dalla NFPA 204 “*Guide for Smoke and Heat Venting, National Fire Protection Association*” e dal manuale di SFPE “*Handbook of Fire Protection Engineering*”.

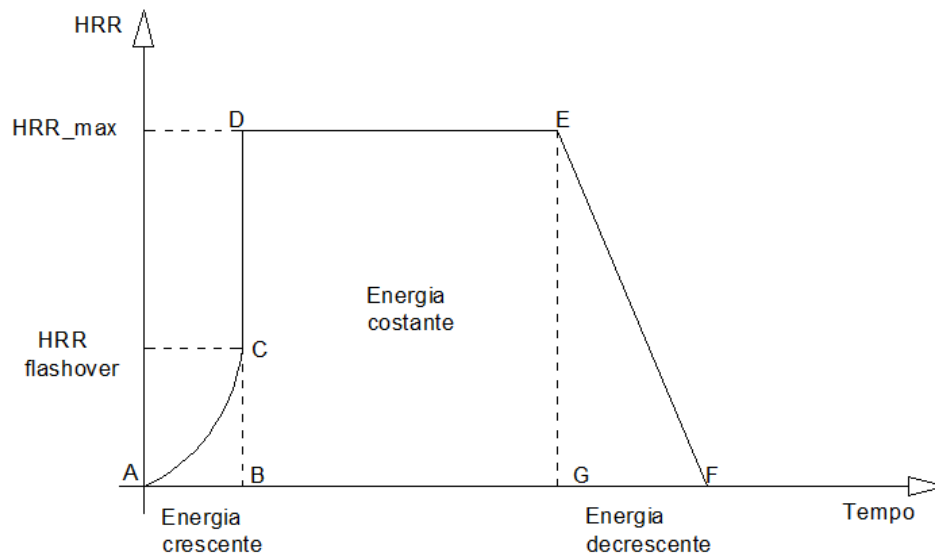
In assenza di dati più specifici, la seguente Tabella, con dati tratti dalla Tabella A.1 della ISOTR13387-2 e dalla tabella E.5 dell'Eurocodice EN 1991-1-2, può fornire dati utili.

| <b>Velocità massima di rilascio di calore <math>HRR_t</math></b>          |                                           |                |                                     |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| <b>Tipo attività</b>                                                      | <b>Velocità di crescita dell'incendio</b> | <b>T (sec)</b> | <b><math>HRR_t</math> (KW / mq)</b> |
| Casa civile abitazione                                                    | Media                                     | 300            | 250                                 |
| Ospedale (camera)                                                         | Media                                     | 300            | 250                                 |
| Albergo (camera)                                                          | Media                                     | 300            | 250                                 |
| Biblioteca                                                                | Veloce                                    | 150            | 500                                 |
| Ufficio                                                                   | Media                                     | 300            | 250                                 |
| Aula di una scuola                                                        | Media                                     | 300            | 250                                 |
| Centro commerciale                                                        | Veloce                                    | 150            | 500                                 |
| Teatro-Cinema                                                             | Veloce                                    | 150            | 500                                 |
| Trasporti (spazio pubblico)                                               | Lenta                                     | 600            | 250                                 |
| Mobili imbottiti e mobilia accatastata vicino a rivestimenti combustibili | Ultra veloce                              | 75             | -                                   |
| Arredamento leggero                                                       | Ultra veloce                              | 75             | -                                   |
| Materiale da imballaggio nei rifiuti                                      | Ultra veloce                              | 75             | -                                   |
| Deposito di plastica espansa                                              | Ultra veloce                              | 75             | -                                   |
| Cartone o scatole di plastica disposte verticalmente                      | Ultra veloce                              | 75             | -                                   |
| Forniture di ufficio distribuite orizzontalmente                          | Media                                     | 300            | -                                   |
| Monitor e materiali per la suddivisione delle stazioni di lavoro          | Veloce                                    | 150            | -                                   |
| Coperte e materassi                                                       | Veloce                                    | 150            | -                                   |
| Rivestimenti per pavimenti                                                | Lenta                                     | 600            | -                                   |
| Casse del negozio                                                         | Media                                     | 300            | -                                   |

**Tabella 2.7 Velocità di rilascio del calore (HRR) in funzione del tipo di attività**

## COSTRUZIONE APPROSSIMATA DELLA CURVA HRR

Si illustra di seguito un metodo per la determinazione della curva HHR per un compartimento.



Per la costruzione della curva HRR occorre determinare:

- il valore di HRR di flashover mediante l'utilizzo della formula di Thomas<sup>1</sup>
- il valore del HRR massimo utilizzando la formula di Kawagoe
- l'energia totale che potenzialmente l'incendio può sviluppare  $E_{tot}$  (area ACDEF)
- l'energia  $E_{crescente}$  relativa al tratto crescente della curva (area ACB)
- l'energia  $E_{costante}$  relativa al tratto costante della curva (area BDEG)
- l'energia  $E_{decescente}$  relativa al tratto calante della curva (area EFG)

### Calcolo HRR di flashover

Per la costruzione della curva HRR occorre determinare anzitutto il valore di HRR di flashover mediante l'utilizzo della formula di Thomas.

$$HRR_{flashover} = 7,8A_{room} + 378 (A_{vent} \sqrt{H_{vent}})$$

dove:

$A_{room}$  area totale (pavimento+soffitto+pareti laterali) di tutte le superfici che delimitano l'ambiente al netto delle aperture presenti

$A_{vent}$  Area delle aperture di ventilazione

$H_{vent}$  Altezza delle aperture di ventilazione

<sup>1</sup> SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section Three, CHAPTER 6  
NFPA 555 - Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover - punto A.5.2

Nel caso di più aperture si utilizzano l'area e l'altezza equivalente.

$$(A_{vent} \sqrt{H_{vent}})_{equiv} = \sum_{i=1}^n (A_i \sqrt{H_i})$$

Per determinare il tempo di raggiungimento del flashover, ipotizzando una crescita di tipo  $\dot{Q} = \alpha t^2$  si ha:

$$t_{flash} = \sqrt{\frac{HRR_{Flashover}}{\alpha}}$$

Dove  $\alpha$  è il coefficiente di crescita dell'incendio prima definito.

### **Calcolo HRR massimo**

Occorre quindi determinare il valore del HRR massimo utilizzando la formula di Kawagoe

$$HRR_{max} = \chi \times \Delta H \times 1/2 \times A_{vent} \sqrt{H_{vent}}$$

$\chi$  Efficienza della combustione generalmente si assume uguale a 1

$\Delta H$  Calore prodotto della combustione di un combustibile per Kg di aria (valore circa 3000)

$A_{vent}$  Area delle aperture di ventilazione

$H_{vent}$  Altezza delle aperture di ventilazione

### **Calcolo dell'energia totale**

L'energia totale  $E_{tot}$  (area ACDEF) corrisponde con il valore del carico di incendio, dato dalla

$$q = \sum_{i=1}^n g_i \times H_i \quad [MJ/m^2]$$

dove

$g_i$  massa dell'i-esimo materiale combustibile [kg]  
 $H_i$  potere calorifico inferiore dell'i-esimo materiale combustibile [MJ/kg]

### **Calcolo dell'energia crescente**

Per determinare la curva HRR nelle varie fasi dell'incendio occorre anzitutto ipotizzare la velocità di sviluppo dell'incendio. Si ipotizza un incendio con curva di crescita media, si ha quindi:

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

Assumendo  $\alpha$  in funzione del tipo di crescita dell'incendio (per esempio 0.01172 per incendio a crescita media)

Si può calcolare il tempo di crescita dell'incendio fino al flashover, si ha:

$t_{flashover} = \sqrt{\frac{E_{flashover}}{\alpha}}$  e quindi si può ottenere la  $E_{crescente}$  ponendola uguale alla  $E_{flashover}$  integrando la

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

Si trova l'area sottesa alla curva ABC

### **Calcolo dell'energia costante**

L'Eurocodice 1 UNI-EN 1991-1-2 (appendice E punto E.4) prevede che la curva HRR nella fase di massimo sviluppo corrisponde al 70% del carico d'incendio totale consumato. La fase di riduzione può essere assunta di forma lineare con inizio quando il 70% del carico d'incendio è combusto, e fine quando il carico d'incendio è completamente combusto.

Relativamente alla fase costante dell'incendio dove l'energia è uguale a  $E_{costante}$  (area BDEG) si avrà:

$$E_{costante} = 70\% E_{tot} - E_{crescente}$$

Di conseguenza si può calcolare il tempo nel quale l'energia si mantiene costante:

$$t_{costante} = E_{costante} / HRR_{max}$$

### **Calcolo dell'energia decrescente**

L'energia decrescente sarà uguale al 30% dell'energia totale (tratto decrescente lineare della curva area EFG).

$$E_{deccrescente} = 30\% E_{tot}$$

L'energia in fase decrescente è praticamente rappresentata da un triangolo (area EFG) può essere quindi calcolato il tempo necessario affinché l'energia decresca fino a zero.

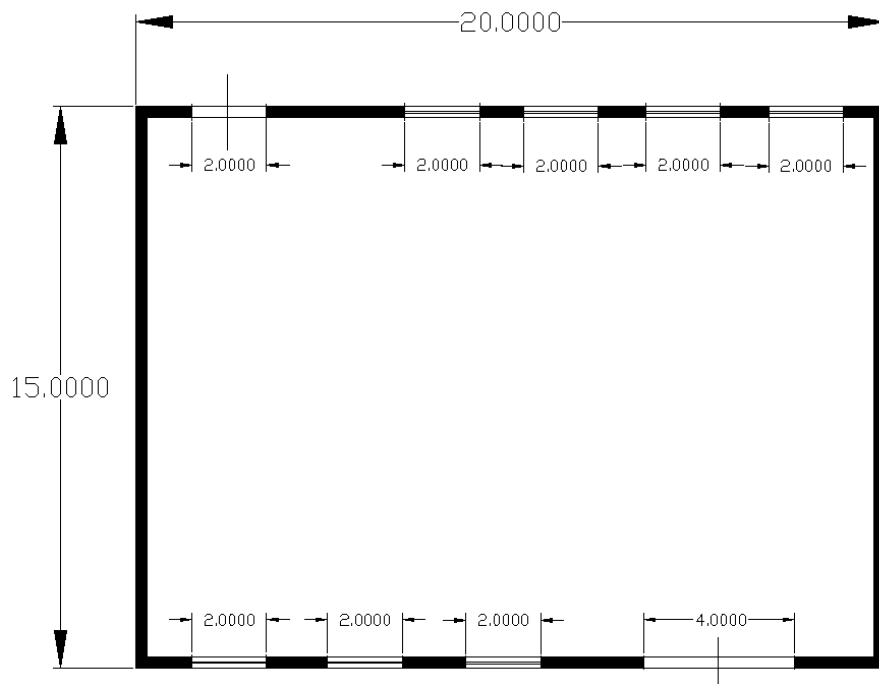
$$1/2 \times t_{deccrescente} \times HRR_{max} = E_{deccrescente}$$

$$t_{deccrescente} = 2 \times E_{deccrescente} / HRR_{max}$$

### Esempio:

Calcolare la curva HRR per un locale con le seguenti caratteristiche:

- Carico di incendio (legno) 15000 Kg - incendio a crescita lenta
- Potere calorifico della legna 18.42 [MJ/Kg]
- Superficie 300 m<sup>2</sup> (dimensioni 15 x 20 m)
- H = 6 m
- n. 1 porta 2 x 3 (h) m
- n. 1 porta 4 x 3 (h) m
- n. 7 finestre 2 x 1 (h) m



L'energia totale prodotta dall'incendio è data da:

$$E_{tot} = 15000 \text{ (Kg legna)} \times 18.42 \text{ (MJ/Kg)} = 276300 \text{ MJ}$$

Il carico di incendio specifico di progetto vale  $E_{tot} / 300 \text{ (m}^2\text{)} = 921 \text{ MJ/m}^2$

$$A_{room} = 2 \times 15 \times 6 + 2 \times 20 \times 6 + 2 \times 15 \times 20 - (2 \times 3 + 4 \times 3 + 7 \times 2 \times 1) = 988 \text{ m}^2$$

$$\sum_{i=1}^n (A\sqrt{H})_i = 2 \times 3 \times \sqrt{3} + 4 \times 3 \times \sqrt{3} + 7 \times (2 \times 1) \times \sqrt{1} = 45.27$$

$$HRR_{max} = 1 \times 3000 \times 1/2 \times 45.27 = 67905 \text{ kW} = 244458 \text{ MJ}$$

$$HRR_{flashover} = 7.8 \times 988 + 378 \times 45.27 = 24818 \text{ kW} = 89345 \text{ MJ}$$

In considerazione di quanto riportato dall'Eurocodice 1, si considera che il 70% dell'energia totale dall'incendio sia prodotta durante la fase crescente e la fase costante di massima emissione di energia, si ha:

$$E_{crescente} + E_{costante} = 70\% E_{tot} = 0.7 \times 276300 = 193410 \text{ MJ}$$

Per determinare la curva HRR nelle varie fasi dell'incendio occorre anzitutto ipotizzare la velocità di sviluppo dell'incendio. Si ipotizza un incendio con curva di crescita media, si ha quindi:

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

con  $\alpha = 0.01172$  (incendio a crescita lenta)

Si può calcolare il tempo di crescita dell'incendio fino al flashover

$$t_{flashover} \sqrt{\frac{E_{flashover}}{\alpha}} = \sqrt{\frac{24818}{0.01172}} = 1455,18 \text{ s} = 24,25 \text{ min}$$

e quindi si può ottenere la energia rilasciata dall'incendio nella fase crescente  $E_{crescente} = (\text{area ABC})$

$$E_{flashover} = 1/3 E_{Flashover} t = 1/3 \times 24818 \times 1455,18 = 12038,22 \text{ MJ}$$

relativamente alla fase costante dell'incendio dove l'energia è uguale a  $E_{costante}$  (area ABC)

si avrà:

$$E_{costante} = 70\% E_{tot} - E_{crescente} = 0.7 \times 276300 - 12038,22 = 181371,78 \text{ MJ}$$

e quindi possibile calcolare il tempo di durata della fase costante dell'incendio

$$t_{costante} = E_{costante} / HRR_{max} = 181371,78 / 244,458 = 742 \text{ s} = 12,36 \text{ min}$$

infine si calcola il tempo di durata dell'incendio durante la fase finale (tratto decrescente lineare della curva area EFG).

$$E_{deccrescente} = 30\% E_{tot} = 0.3 \times 276300 = 82890 \text{ MJ}$$

L'energia in fase decrescente è praticamente rappresentata da un triangolo (area EFG)

$$1/2 \times t_{deccrescente} \times HRR_{max} = E_{deccrescente} \rightarrow t_{deccrescente} = 2 \times E_{deccrescente} / HRR_{max}$$

$$t_{deccrescente} = 2 \times 82890 / 244,458 = 678,15 \text{ sec} = 11,30 \text{ min}$$

in definitiva si ha:

$$t_{flashover} = 24,25 \text{ min}$$

$$t_{costante} = 10,36 \text{ min}$$

$$t_{deccrescente} = 11,30 \text{ min}$$

## TIPOLOGIA DEGLI INCENDI

### ***Incendi a sviluppo completo***

A seguito del flashover, gli incendi tendono a raggiungere velocemente una fase a sviluppo completo, in cui il tasso di combustione sarà funzione del combustibile e/o della ventilazione disponibile (disponibilità di ossigeno per la combustione). Al raggiungimento del flashover, si perviene al massimo tasso di scarico del calore, si ha un valore più o meno grande in funzione del tipo di incendio, controllato dalla ventilazione oppure controllato dal combustibile.

Nella determinazione della risposta strutturale, si adottano scenari di incendio relativi alla fase di post-flashover che sono caratterizzati in termini di alte temperature generate dall'incendio.

Le caratteristiche dell'ambiente, relative allo scambio di calore per convezione e per irraggiamento, possono avere un notevole impatto sul riscaldamento degli elementi strutturali e degli elementi componenti il sistema di compartimentazione, pertanto è necessario selezionare con molta attenzione lo scenario relativo.

### ***Incendi controllati dalla ventilazione***

Il tasso di rilascio di calore (HRR) di un incendio controllato dalla ventilazione, può essere determinato in funzione del quantitativo di aria che entra nel compartimento.

La ricerca ha indicato che l'afflusso di aria, in un compartimento interessato da un incendio, è proporzionale al fattore di ventilazione che dipende essenzialmente dalla geometria delle aperture di ventilazione. Il tasso di massa del combustibile, interessato dal processo della combustione può allora essere valutato in funzione dell'aria presente all'interno del compartimento. Nel 1917, Thornton ha dimostrato che per molti liquidi organici e gas, la quantità di calore rilasciata per unità di massa di ossigeno consumata per la combustione, è quasi sempre costante. Huggett, ha scoperto che l'assunto è valido anche per i solidi organici ed ha ottenuto un valore medio per la costante di 13.1 kJ/g di ossigeno.

La regola del Thornton implica che sia sufficiente misurare l'ossigeno consumato in un sistema di combustione, per determinare il calore netto rilasciato. Questa idea è la base del metodo della misura dell'ossigeno consumato per la misurazione del tasso di scarico di calore di un incendio.

Quindi in base alla legge di Thornton sarà necessario calcolare il 21% della energia liberata per Kg di Ossigeno per valutare l'energia liberata per Kg di aria. In altre parole rapportando i 13.1 MJ/Kg relativi all'ossigeno al contenuto dello stesso in aria del 21%, si ricava il valore di 2.75 MJ/kg di aria. La Society of Fire Protection Engineering (SFPE), nello Handbook of Fire Protection Engineering riporta un valore di energia liberata per Kg di aria uguale a 3.0 MJ/kg.

Il metodo di cui sopra, basato sul fattore di ventilazione, sottovaluta la severità del fuoco in compartimenti con le diverse aperture di ventilazione poste ai livelli di soffitto e del pavimento, inoltre, il metodo non può essere utilizzato per grandi compartimenti.

### ***Incendi controllati dal combustibile***

Gli incendi controllati dal combustibile sono meno frequenti rispetto agli incendi controllati dalla ventilazione, e generalmente si verificano soltanto in particolari situazioni, quali per esempio quelle relative a compartimenti dove sono immagazzinate merci ed è presente un elevato livello di ventilazione.

La velocità di combustione degli incendi controllati dal combustibile, dipende dalla natura e dalla disposizione geometrica del combustibile. La percentuale (tasso) di materiale che brucia dipende dall'area della superficie del combustibile esposta all'incendio. Nella maggior parte delle applicazioni pratiche, questi fattori sono difficili da determinare. Per le geometrie semplici e ben definite, quali per esempio le cataste di legna, sono state determinate delle relazioni che collegando il tasso di pirolisi del combustibile alla massa iniziale del combustibile per unità di superficie ed alla massa restante del combustibile per unità di superficie.

### ***Incendi parametrici***

Le temperature che derivano dagli incendi controllati dalla ventilazione dipendono dal tasso di scarico di energia (HRR) che a sua volta dipende dalla ventilazione, dalle proprietà termiche delle pareti dai pavimenti e dai solai del compartimento e dalla durata dell'incendio (che dipende dalla densità del carico di incendio). La famiglia delle curve di incendio Tempo-temperatura, al variare dei differenti fattori di ventilazione e della densità di carico di incendio, sono definite "incendi parametrici".

La ricerca, per la determinazione delle formule matematiche descrittive degli incendi parametrici, è stata condotta sui piccoli compartimenti con fuochi di combustibili cellulosici. Le curve di incendio Tempo-temperatura, relative agli incendi parametrici, generalmente sono applicabili quando l'incendio è controllato dalla ventilazione.

Le curve parametriche, possono essere utilizzate come "**modello numerico semplificato**" di post-flashover, quindi come "**curve naturali d'incendio**", ai sensi del punto 4.2 del Decreto del Ministero dell'Interno del 9 marzo 2007, come programma di riscaldamento (curva Tempo-temperatura) degli elementi strutturali, al fine del calcolo analitico della resistenza al fuoco.

Le temperature di pre-flashover e la durata di esposizione sono generalmente basse rispetto ai valori di post-flashover e possono essere trascurate; l'origine dell'incendio di progetto in termini temporali, può essere fatto coincidere generalmente con l'inizio del flashover.

In Italia vengono generalmente utilizzate due tipologie di curve di incendio parametriche:

- *la curva di Patterson, Magnusson e Thor* prevista dal bollettino CNR n° 192 del 28 dicembre 1999;
- *la curva di Wickstrom* prevista dall'eurocodice 2 - UNI-ENV 1992-1-2.

Le curve parametriche sono descritte compiutamente nella capitolo dedicato alla resistenza al fuoco delle strutture.

### ***2.8.5 Curva standard tempo-temperatura***

Le curve standard tempo-temperatura sono utilizzate per la determinazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali. Queste curve hanno una base empirica e non tengono conto delle variabili che generalmente influenzano lo sviluppo di un incendio. La loro applicazione nell'ingegneria della sicurezza antincendio è limitata ad un'approssimazione delle temperature raggiunta da un incendio in un dato istante. Le curve standard sono descritte compiutamente nel capitolo dedicato alla resistenza al fuoco delle strutture.