

2.5 Heat release rate

Per descrivere le dimensioni di un incendio è necessario usare delle adeguate unità di misura; probabilmente il miglior modo di rappresentare un fuoco è basato sul rateo al quale è rilasciata l'energia.

Fisicamente lo HRR (**H**eat **R**elease **R**ate) è il calore rilasciato dalla combustione di un materiale per unità di tempo per unità di area (unità di peso su unità di volume). Esso può essere espresso in:

$$\left[\frac{1W}{cm^2} \right] = \left[\frac{24cal}{cm^2 \cdot s} \right] = \left[\frac{10kW}{m^2} \right] = \left[\frac{0,88Btu}{ft^2 \cdot s} \right]$$

Figura 97 - Unità dimensionale dell'HRR
(David R. Redsicker et John J. O'Connor)⁶⁴

Esso non dipende dalle proprietà intrinseche del materiale, ed è la grandezza che influenza molte altre caratteristiche di un ambiente coinvolto in un incendio. In tabella è riportato quanto detto:

TABLE 2—What is heat release rate (HRR)?

- Heat release rate is the heat released from a burning material per unit time per unit area (unit weight or unit volume).
- HRR may be expressed in various units of measure: $1 \text{ W/cm}^2 = 24 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} = 10 \text{ kW/m}^2 = 0.88 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{s}$.
- HRR is not an intrinsic property of a material.
- HRR values depend, in part, on the apparatus.

Figura 98 – Definizione dell'HRR
(Erwin L. Schaffer)⁶⁵

Come lo HRR aumenta, la temperatura ed il rateo di aumento della temperatura crescono entrambi, accelerando lo sviluppo dell'incendio. Inoltre l'incremento dell'HRR provoca una riduzione della concentrazione di Ossigeno e un incremento di 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 (<http://ingegneria.antincendio.it>)⁶⁶.

La Figura 99 illustra la base del problema fisico del flusso (Richard E., et al, Aprile 2005)⁶⁷.

Facendo scorrere diverse quantità di flussi volumetrici di ossigeno $V_{in}=V_{fin}=F$ con un OMF pari a 0,23 attraverso un volume di controllo V_0 in cui è presente un combustibile con una pressione

interna pari a quella atmosferica, la portata massica di ossigeno in uscita dal volume di controllo nell'unità di tempo a densità costante ρ è:

$$\dot{m}_{out} = \frac{d(\rho V [O_2])}{dt} = \rho [O_2] \frac{dV}{dt} + \rho V \frac{d[O_2]}{dt}$$

Equazione 11

Nella relazione precedente è riportato dv/dt ; esso esprime la variazione del volume nel tempo, che corrisponde al volume finale, mentre nel 2° termine “V” rappresenta il volume di controllo che è presente all'interno del contenitore (V_0).

In Figura 99 è rappresentato uno schema generale del test:

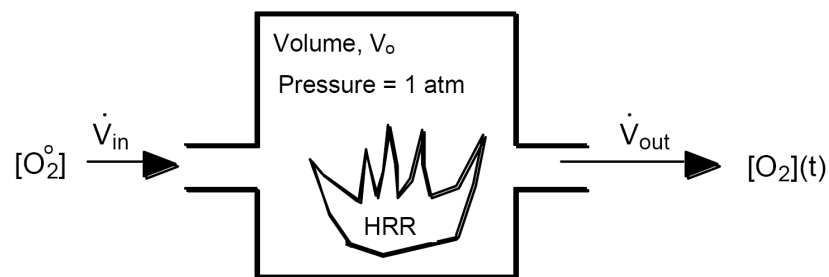


Figura 99 - compartment fire model

La massa di ossigeno consumata dal fuoco nell'unità di tempo, è data dal rapporto tra il Tasso di rilascio del calore (HRR) che dimensionalmente si misura in WATT^{XII}, ed il rilascio di calore per unità di massa di ossigeno consumato E (MJ/kg) nel volume di controllo.

Esso è definito dalla seguente relazione:

$$\dot{m}_{fire} = \frac{-HRR}{E}$$

Equazione 12

^{XII} **WATT** (simbolo: **W**) è l'unità di misura della potenza del Sistema Internazionale. Un watt equivale a 1 joule al secondo (1 J/s):

$$1W = 1 \frac{J}{s} = \frac{1Kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{1N \cdot m}{s}$$

La massa di ossigeno che entra nel volume di controllo è:

$$\dot{m}_{in} = \rho[O_2] \frac{dV}{dt} + \rho V \frac{d[O_2]}{dt} = \rho \dot{V}_{in} [O_2^o]$$

Equazione 13

Nell'equazione precedente la derivata $d[O_2]/dt = 0$ per un OMF pari a 0,23.

L'equazione di bilancio per l'ossigeno è:

$$\dot{m}_{in} - \frac{HRR}{E} = \dot{m}_{out}$$

Equazione 14

Sostituendo l'equazioni 1,2 e 3 all'interno della 4 è possibile ricavare il valore dell'HRR:

$$\dot{m}_{in} - \frac{HRR}{E} = \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_{in} - \frac{HRR}{E} = \dot{m}_{out}$$

$$\rho \dot{V}_{in} \cdot [O_2^o] - \frac{HRR}{E} = \rho \cdot [O_2] \cdot \frac{dV}{dt} + \rho \cdot V_0 \cdot \frac{d[O_2]}{dt}$$

$$-\rho \dot{V}_{in} \cdot [O_2^o] + \rho \cdot [O_2] \cdot \frac{dV}{dt} + \rho \cdot V_0 \cdot \frac{d[O_2]}{dt} = -\frac{HRR}{E}$$

$$-\dot{V}_{in} \cdot [O_2^o] + [O_2] \cdot \frac{dV}{dt} + V_0 \cdot \frac{d[O_2]}{dt} = -\frac{HRR}{\rho \cdot E}$$

$$-\frac{\dot{V}_{in}}{V_0} \cdot [O_2^o] + \frac{[O_2]}{V_0} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{d[O_2]}{dt} = -\frac{HRR}{\rho \cdot E \cdot V_0}$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} - \frac{\dot{V}_{in}}{V_0} \cdot [O_2^o] + \frac{[O_2]}{V_0} \cdot \frac{dV}{dt} = -\frac{HRR}{\rho \cdot E \cdot V_0}$$

ma $dV/dt = \dot{V}_{fin}$ ovvero la portata volumica finale ed inoltre come riportato precedentemente,

$\dot{V}_{in} = \dot{V}_{fin} = F$ pertanto si ha:

$$\frac{d[O_2]}{dt} - \frac{\dot{V}_{in}}{V_0} \cdot [O_2^o] + \frac{[O_2]}{V_0} \cdot \dot{V}_{fin} = -\frac{HRR}{\rho \cdot E \cdot V_0}$$

la relazione finale è la seguente:

$$\frac{d[O_2]}{dt} - \frac{F}{V_0} ([O_2^0] - [O_2]) = - \frac{HRR(t)}{\rho \cdot E \cdot V_0}$$

Equazione 15

Il valore del rapporto V_0/F è stato determinato tramite un sistema di risposta al tempo ed il rapporto è stato chiamato τ , inoltre la quantità $\rho V_0 E$ è stata posta pari a C .

$$\tau = \frac{V_0}{F}$$

$$C = \rho \cdot E \cdot V_0$$

L'ossigeno consumato nel tempo è definito dalla relazione:

$$\vartheta(t) = [O_2^0] - [O_2](t)$$

tale che:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = - \frac{d[O_2]}{dt}$$

ponendo queste quantità l'equazione su riportata risulta semplificata:

$$\frac{d[O_2]}{dt} - \frac{F}{V_0} ([O_2^0] - [O_2]) = - \frac{HRR(t)}{\rho \cdot E \cdot V_0}$$

$$- \frac{d\vartheta}{dt} - \frac{1}{\tau} \cdot \vartheta(t) = - \frac{HRR(t)}{C}$$

$$HRR(t) = C \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + C \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \vartheta(t)$$

$$HRR(t) = \frac{C}{\tau} \cdot \left(\vartheta(t) + \tau \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \right)$$

la relazione finale pertanto sarà:

$$HRR(t) = \frac{C}{\tau} \left\{ \theta + \tau \frac{d\theta}{dt} \right\} = \rho EF \left\{ \theta + \tau \frac{d\theta}{dt} \right\}$$

I parametri C e τ sono valutati usando un bruciatore a propano in un volume di controllo, generato da un HRR. La forma finale dell'HRR è la seguente:

$$HRR(t) = \chi \cdot \rho_p \cdot h_c^0 \cdot \dot{V}_p(t)$$

con:

- \dot{V}_p (m³/s) = Portata volumica istantanea di propano;
- $\rho_p = 1.83$ kg/m³ (STP) = Densità del combustibile che brucia (propano);
- $h_c^0 = 46.36$ MJ/kg = Calore di combustione del combustibile;
- χ (compreso tra 0 ed 1) = Efficienza di combustione del propano.

Se il coefficiente χ è sconosciuto, l'HRR può essere calcolato dalla perdita di massa oppure usando il cono calorimetro (*Richard Oswald Carvel*)⁵³.

Table 4.1 Representative Peak Heat Release Rates (Unconfined Burning)

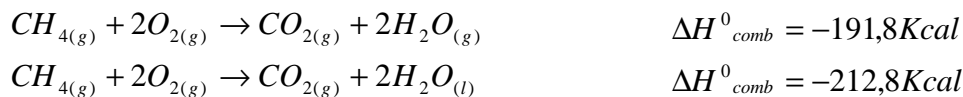
| Fuel (lb) | Peak HRR (kW) |
|--|---------------|
| Wastebasket — small (1.5-3) | 4-18 |
| Trash bags — 11 gal with mixed plastic and paper trash (2.5-7.5) | 140-350 |
| Cotton mattress (26-29) | 40-970 |
| TV sets (69-72) | 120-290 |
| Plastic trash bags/paper trash (2.6-31) | 120-350 |
| PVC waiting room chair — metal frame (34) | 270 |
| Cotton easy chair (39-70) | 290-370 |
| Gasoline/kerosene in 2 sq foot pool | 400 |
| Christmas trees — dry (14-16) | 500-650 |
| Polyurethane mattress (7-31) | 810-2630 |
| Polyurethane easy chair (27-61) | 1350-1990 |
| Polyurethane sofa (113) | 3120 |

From NFPA 921.

Figura 100 - Practical fire and arson investigation
(Di David R. Reddicke et, John J. O'Conno)⁵³

2.6 Calore di combustione

Le reazioni tra un elemento o un composto e ossigeno sono dette reazioni di combustione. Le entalpie molari standard di combustione ΔH^0_{comb} si riferiscono alla reazione in condizioni standard di una mole dell'elemento o del composto con $O_{2(g)}$. I valori sono determinati solitamente alla temperatura di 25°C. Poiché le reazioni di combustione possono essere condotte sperimentalmente, i ΔH^0_{comb} sono essenziali per calcolare la variazione d'entalpia di quelle reazioni per le quali la determinazione diretta risulta difficile o impossibile, in particolare per calcolare l'entalpia di formazione dei composti a partire dagli elementi costituenti ΔH^0_f . Per sostanze contenenti idrogeno uno dei prodotti della combustione è acqua. Poiché l'acqua formata può essere allo stato liquido o allo stato di vapore, occorre specificare se ci si riferisce a un caso o all'altro:



Nella tabella sottostante sono riportati alcuni calori di combustione di materiali conosciuti (Angelo Clerici et Sergio Morocchi)⁶⁸.

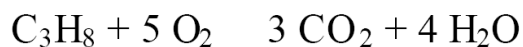
TABLE 1 — Total heat of combustion.

| Material | Heat of Combustion, cal/g |
|-----------------------------|------------------------------|
| Polyethylene | 10 830 |
| Asphalt | 9 530 |
| Magnesium (metal) | 5 760 |
| Aluminum (metal) | 5 405 |
| Pine wood | 4 560 |
| TNT (trinitrotoluene) | 3 615 |
| TNG (trinitroglycerine) | 1 620 |
| Dynamite (75%) | 1 290 |
| Gun cotton (nitrocellulose) | 1 055 |

Figura 101 – Calore di combustione di alcuni materiali
(Erwin L. Schaffer)⁶⁵

Nella relazione finale dello HRR è presente l'appena citato “Calore di combustione h_c^0 oppure indicato ΔH^0_{comb} ”. Esso è un parametro di notevole importanza che stabilisce qual è il calore sufficiente affinché un combustibile bruci. Dato che tutte le reazioni di combustione rilasciano di energia, è possibile stabilire per ogni combustibile qual è il calore di combustione che gli appartiene.

A titolo di esempio si considera un idrocarburo combustibile come il propano (C_3H_8) in cui i prodotti di combustione sono anidride carbonica e acqua:



Si tratta di un rapporto stechiometrico di reazione - la quantità di combustibile e ossigeno sono esattamente equilibrate inoltre la reazione è esotermica, cioè è presente produzione di calore.

Di questa reazione chimica supponendo che l'acqua prodotta, rimane in forma di vapore (una ragionevole ipotesi da fare quando si considerano gli incendi), il valore di ΔH^0_c (C_3H_8) è -2044 kJmol^{-1} , o anche $-46,45 \text{ kJg}^{-1}$ (una mole di propano = 44g).

Questi calori di combustione sono spesso determinati usando una bomba calorimetrica, ovvero un recipiente chiuso in cui, una certa quantità di combustibile è bruciato completamente in un clima in cui è presente ossigeno puro. In assenza di perdita di calore, la quantità di calore prodotto può essere calcolato dall'aumento di temperatura del calorimetro e dal suo contenuto. La differenza tra il cambiamento dell'entalpia del sistema (ΔH) e la variazione di energia interna (ΔU) è dovuto al lavoro svolto nel processo di espansione ($P\Delta V$):

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V$$

$P\Delta V$ può essere stimato utilizzando la legge dei gas ideali:

$$P\Delta V = \Delta nRT$$

Tali relazioni permettono tramite la determinazione del calore di formazione la determinazione del calore di combustione citato precedentemente. Il calore di formazione ottenibile tramite l'uso della bomba calorimetrica è definito come il cambiamento dell'entalpia quando un composto è formato nel suo stato normale a pressione atmosferica pari a 298K dai suoi elementi costitutivi, anche nei loro stati standard. Se i calori di formazione dei prodotti e dei reagenti di qualsiasi reazione chimica sono noti, come detto precedentemente è possibile determinare il calore di combustione del combustibile:

Per la combustione di propano si ha:

$$\Delta H_c (\text{C}_3\text{H}_8) = 3 \Delta H_f(\text{CO}_2) + 4 \Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) - \Delta H_f(\text{C}_3\text{H}_8) - \Delta H_f(\text{O}_2)$$

dove $\Delta H_f (\text{O}_2) = 0$ (per definizione).

Ciò comporta la legge di Hess; essa stabilisce che in una reazione chimica, l'entalpia è una funzione di stato, pertanto la variazione d'entalpia di una reazione dipende esclusivamente dallo stato iniziale (reagenti) e dallo stato finale (prodotti) e risulta indipendente dal cammino della reazione. In altri termini, in una reazione chimica la variazione d'entalpia è la stessa sia che il passaggio da reagenti a prodotti avvenga in un unico stadio sia con una serie di stadi successivi (*Angelo Clerici et Sergio Morocchi*)⁶⁸.

In questi ultimi anni si è sviluppato un metodo di misurazione diretta dell'HRR in riferimento ad un incendio. Essa si basa sul fatto che il calore di combustione di un comune combustibile è costante, se espresso in termini di consumo di ossigeno.

Per esempio per il propano di cui sopra, si può dire che per ogni mole di propano bruciato o per ogni 5 moli di ossigeno consumato, si sono prodotti 2044 kJ. Il calore di combustione può essere espresso come $\Delta H_{c,ox} = - 408,8 \text{ kJmol}^{-1}$ o $-12,77 \text{ kJg}^{-1}$ (una mole di ossigeno è 32g). Huggett ha osservato che la maggior parte tipici biologici liquidi e gas (esclusi etene e etyne) hanno $\Delta H_{c,ox} = - 12,72 \pm 3\% \text{ kJg}^{-1}$ di ossigeno e polimeri (esclusi Poliossimetilene) hanno $\Delta H_{c,ox} = - 13,02 \pm 4\% \text{ kJg}^{-1}$. Quindi, se il tasso di consumo dell'ossigeno può essere misurato, il tasso di rilascio del calore può essere anch'esso stimato direttamente. Questa è la base del cono calorimetro e di molti altri strumenti.

Il valore di $\Delta H_{c,ox}$ è generalmente considerato come $-13,1 \text{ kJg}^{-1} (\text{O}_2)$, assumendo una completa combustione. Una osservazione va però fatta sul calore di combustione dell'ossigeno; durante i comuni incendi, l'ossigeno presente nell'aria non è un gas puro pertanto è più utile prendere in considerazione il ΔH_C dell'aria piuttosto che il $\Delta H_{c,ox}$. Il ΔH_C , dell'aria è di solito ritenuto $3,03 \pm 2\% \text{ kJg}^{-1}$ in meno del valore che presenta il $\Delta H_{c,ox}$. Questo scarto di 3 kJg^{-1} è abbastanza buono per fare comunque delle stime.

2.7 Curve incendio

Negli ultimi anni sono stati eseguiti molti studi internazionali per capire l'evoluzione dell'incendio all'interno dei tunnel (Promat.it)⁶⁹. Le ricerche sono state condotte sia su scala reale, all'interno di gallerie in disuso, sia in laboratorio. I risultati acquisiti hanno permesso di formulare alcune curve temperatura/tempo rappresentative di questo particolare fenomeno. Sebbene gli studi siano ancora in corso, appare ormai chiaro che le temperature registrate durante un incendio all'interno del tunnel sono notevolmente più alte rispetto a quelle di uno stesso carico di incendio in uno all'aria aperta (o all'interno di un edificio dotato di aperture verso l'esterno o muri capaci di disperdere calore). La curva utilizzata in Italia è **RWS – UNI 11076**. Tale curva è sicuramente la più rappresentativa fra quelle proposte a livello continentale e quella utilizzata da anni nei paesi più evoluti nella lotta agli incendi nelle gallerie.

Le diverse curve di incendio esistenti sono:

- Curva ISO 834 (cellulosica);
- Curva da idrocarburi;
- HCM, curva da idrocarburi modificata;
- RWS - Curva UNI 11076;
- Curva RABT ZTV.

Nel grafico sottostante sono riportati tutti i diversi comportamenti delle curve di incendio:

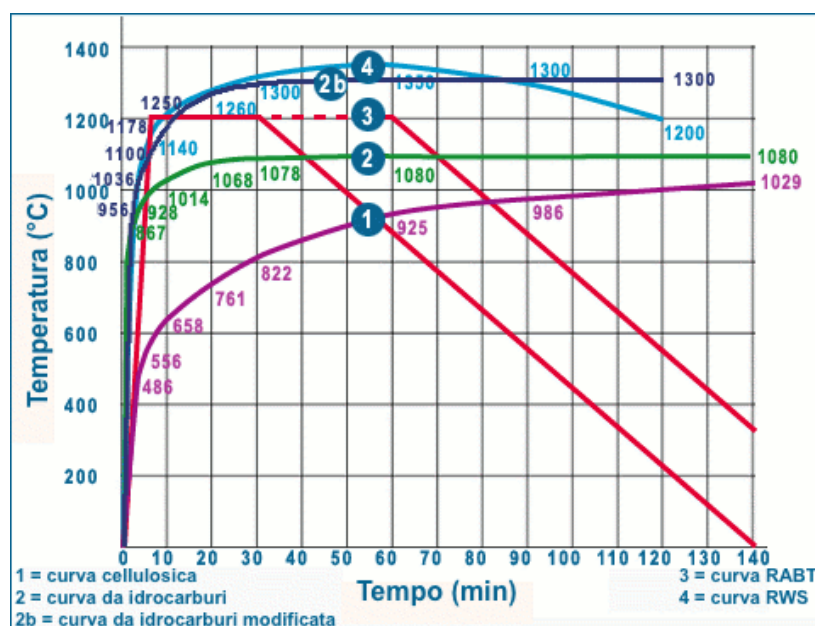


Figura 102 - Diversi andamenti delle curve incendio

2.7.1 Curva ISO 834 (cellulosica)

Questa curva è universalmente utilizzata per gli incendi negli edifici civili (scuole, uffici, ospedali, alberghi, ecc.) (Promat.it)⁶⁹. Tutti gli standard internazionali utilizzano questo programma termico oppure curve molto simili (come ad esempio in Italia dove si utilizza la curva prevista dalla circolare 91 del 14 settembre 1961).

Questa curva simula un normale incendio da materiale cellulosico in ambiente con ventilazione sufficiente alla corretta combustione del comburente (e del combustibile) presente. E' opinione comune che la ISO 834 sia poco rappresentativa di un reale incendio, che ha un andamento completamente diverso, ma il suo utilizzo può dare indicazioni accettabili circa il comportamento dei materiali in situazione successive al flash over. E' altrettanto evidente che la ISO 834 è del tutto inadatta per verificare il comportamento strutturale all'interno dei tunnel.

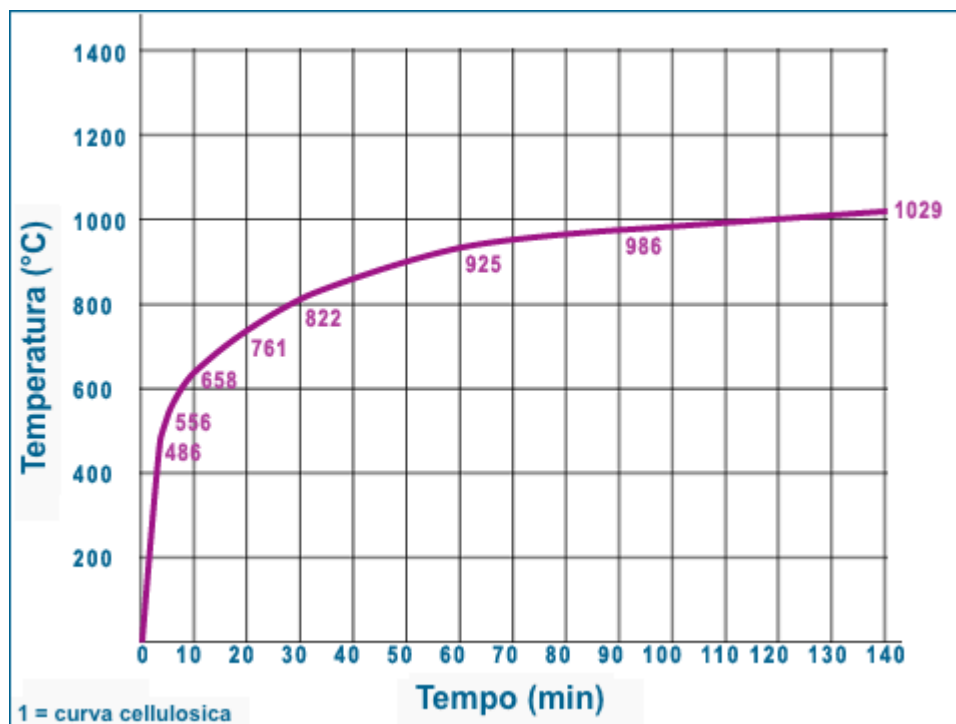


Figura 103 - Curva ISO 834 (cellulosica)