



«Scienza e Tecnica della Prevenzione Incendi»  
A.A. 2013 - 2014

## GLI INCENDI



**Docente: ing. Mauro Marchini**

[mgm@mauromarchini.com](mailto:mgm@mauromarchini.com)



# Gli eventi: gli incendi

L'incendio è una combustione caratterizzata da una emissione di calore accompagnata da fumo e da fiamma che si sviluppa senza controllo nello intero spazio a disposizione ed in modo relativamente rapido.

In relazione al **quantitativo** ed alle **caratteristiche chimico-fisiche** delle sostanze combustibili che partecipano alla combustione, alla **energia di innesco** ed alle **caratteristiche geometriche del contenitore** e soprattutto alla sua **ventilazione**.

Al riguardo gli incendi possono essere classificati come:

- ✓ **Incendi controllati dalla ventilazione;**
- ✓ **Incendi controllati dal combustibile.**

Gli incendi possono assumere andamenti e produrre conseguenze affatto differenti, tuttavia è possibile rappresentare schematicamente l'andamento dei fenomeni, potendosi in ogni caso individuare comportamenti equivalenti.



# Gli eventi: gli incendi

**Per un incendio di sostanze combustibili solide in luogo chiuso, di natura accidentale, di norma possono individuarsi le seguenti fasi:**

- **una fase iniziale o di “ignizione”;**
- **una fase di sviluppo e di auto-accelerazione della reazione di combustione che generalmente si manifesta con la comparsa delle prime fiamme (flaming: accensione dei gas di pirolisi) circoscritte al primo focolaio (innesco), la emissione di gas e vapori ad alta temperatura che si diffondono verso i volumi disponibili;**
- **la propagazione dell'originario focolaio alle sostanze combustibili più vicine per irraggiamento e/o coinvolgimento diretto, la cui velocità è correlata alla potenza (Rateo di rilascio del calore HRR) dell'innesco;**
- **una crescente produzione di gas e vapori di combustione e di fumo che vanno a stratificarsi dall'alto verso il basso del volume disponibile aumentando, attraverso scambi convettivi, la temperatura di tutte le sostanze combustibili presenti che subiscono in tal modo un processo di pirolisi;**
- **una fase centrale nella quale in genere si identifica l'incendio propriamente detto;**
- **Il momento di passaggio dalle prime fasi sopra descritte a quella identificata con l'incendio vero e proprio viene comunemente individuato come punto di “flashover”;**
- **una fase finale di estinzione o di soppressione.**



# Gli eventi: gli incendi

## FASI DI UN INCENDIO

- **INNESCO**
- **INCUBAZIONE (SMOLDERING)**
- **PIROLISI**
- **FLASHOVER**
- **REGIME**
- **ESAURIMENTO (SPONTANEO, REPRESSIONE)**

## PRINCIPALI CARATTERISTICHE DI UN INCENDIO

- **TIPO DI REAZIONE**
- **VELOCITA' DI BRUCIAMENTO**
- **RATEO DI RILASCIO DEL CALORE (HRR o RHR)**
- **PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE**



# Gli eventi: gli incendi

A parità di condizioni al contorno, sono il **carico di incendio** ed il **rateo di rilascio del calore (heat rate release, HRR)**, i parametri che caratterizzano la dinamica degli incendi nella fase di post-flashover, mentre nella fase iniziale di pre-flashover sono la **energia di innesco** e la **ventilazione** quelle che giocano un ruolo determinante nella dinamica dell'originario focolaio d'incendio.

Gli inneschi di modesta energia vengono classificati come inneschi **"deboli"** (in genere assimilabili a guasti di natura elettrica) mentre quelli che possono contare su di una rilevante energia si definiscono inneschi **"forti"**.

Le corrispondenti dinamiche degli incendi che seguono nei due casi prospettati sono rispettivamente **"lente o medie"** o **"veloci o ultraveloci"**.



# Gli eventi: gli incendi

La velocità iniziale di crescita degli incendi di sostanze solide può essere rappresentato con una relazione quadratica:

$$HRR = \alpha \cdot t^2$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di crescita che si misura in [kW/s<sup>2</sup>].

In sede internazionale (N.F.P.A.), in relazione alla velocità di bruciamento massiva, che si esprime in [kg/m<sup>2</sup>x s], sono state introdotte quattro curve di sviluppo convenzionalmente definite di incendio **lento, medio, veloce, ultraveloce** alle quali corrispondono altrettanti valori del coefficiente  $\alpha$  e del tempo  $t_g$  necessario per raggiungere la soglia di 1 MW di potenza:

$$\alpha_{lento} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{600^2} = 0.00277777 \quad [kJ/s^3] \quad \alpha_{medio} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{300^2} = 0.0111111 \quad [kJ/s^3]$$

$$\alpha_{veloce} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{150^2} = 0.0444444 \quad [kJ/s^3] \quad \alpha_{ultraveloce} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{75^2} = 0.177777 \quad [kJ/s^3]$$



## Le curve nominali d'incendio

1. Ai fini della definizione delle soluzioni conformi di resistenza al fuoco, le classi di resistenza al fuoco sono di norma riferite all'incendio convenzionale rappresentato dalla curva nominale standard seguente:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

dove:

$$\theta_g \quad \text{è la temperatura media dei gas di combustione} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t \quad \text{è il tempo} \quad [\text{minuti}]$$

2. Nel caso di incendi di quantità rilevanti di idrocarburi o altre sostanze con equivalente velocità di rilascio termico, ed esclusivamente per la determinazione della capacità portante delle strutture, la curva di incendio nominale standard deve essere sostituita con la curva nominale degli idrocarburi seguente:

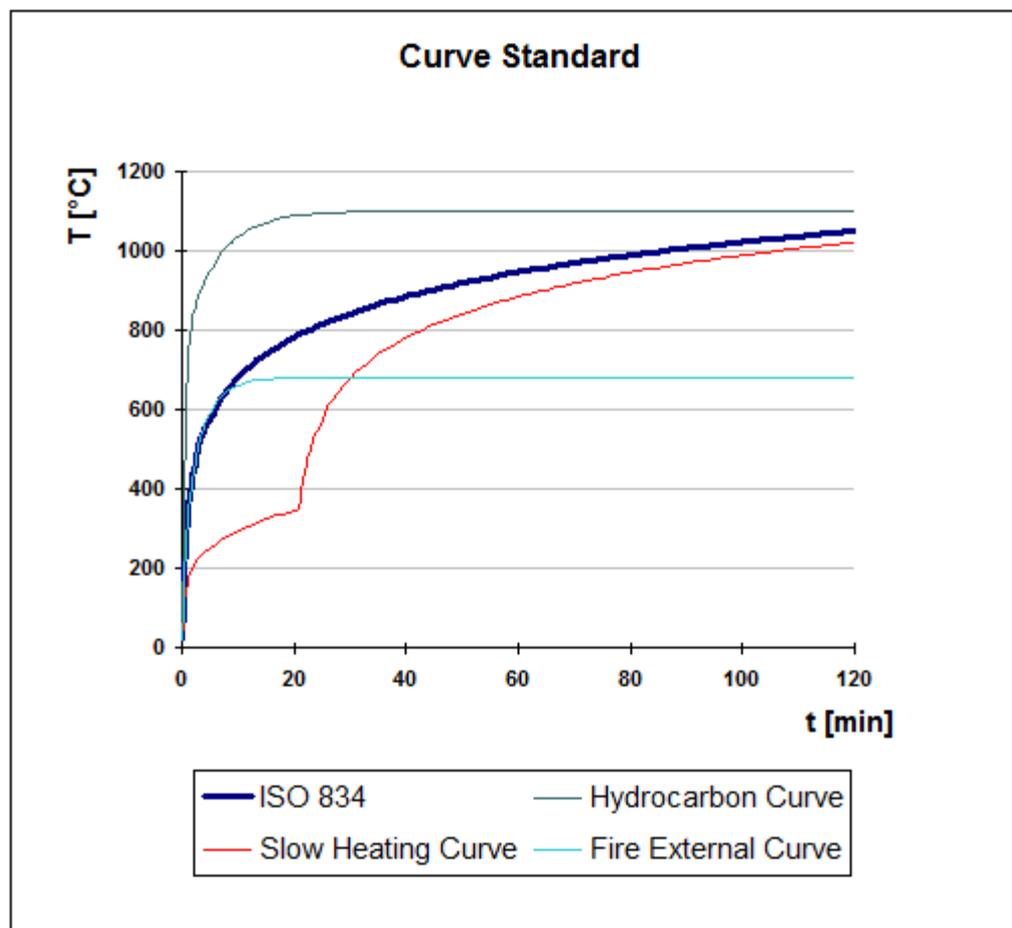
$$\theta_g = 1080 (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

3. Nel caso di incendi sviluppatisi all'interno del compartimento, ma che coinvolgono strutture poste all'esterno, per queste ultime la curva di incendio nominale standard può essere sostituita con la curva nominale esterna seguente:

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

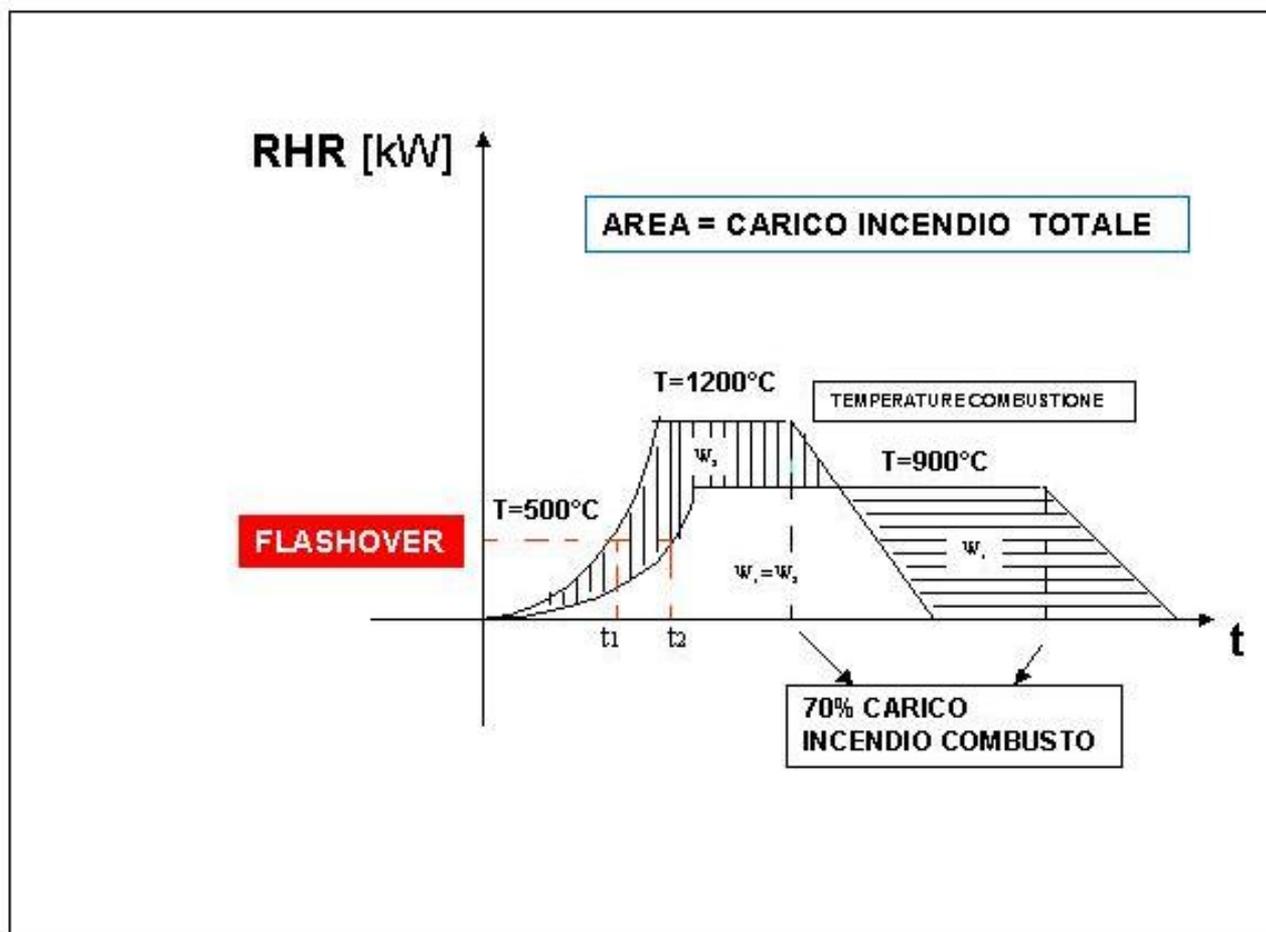


## Le curve caratteristiche degli incendi





# Gli eventi: gli incendi ed il rateo di rilascio di calore (RHR o HRR)





# II FLASHOVER

**E' una sorta di punto di non ritorno oltre il quale l'incendio procede in maniera virulenta, a causa della simultanea autoaccensione di tutti i gas e vapori di pirolisi provenienti dai materiali combustibili presenti, fino a coinvolgere tutto il volume interessato.**

**Il flashover si realizza quando il primitivo focolaio (innesco), coinvolgendo i materiali combustibili più prossimi, raggiunge un valore minimo del rilascio di calore (H.R.R.F.) che dipende prevalentemente dalle caratteristiche geometriche e termiche del *contenitore* e soprattutto dalla sua ventilazione. Detto valore minimo può essere calcolato con i metodi di BRABAUSKAS e di THOMAS.**



# La potenza di flashover $RHR_F$ (secondo THOMAS)

$$RHR_F = 7.8 \cdot A^*_T + 378 \cdot A_{Veq} \cdot h_{Veq}^{0.5}$$

dove:

$A^*_T$  è la differenza tra la superficie totale del comparto  $A_T$  e l'area  $A_{Veq}$  = 4127.91 sqm

$A_T$  = 4160

$$A_{Veq} = W_{Veq} \cdot h_{Veq} \quad 32.09 \quad \text{sqm}$$

$$W_{Veq} = \frac{\sum_i W_{Vi} \cdot h_{Vi}^{1.5}}{h_{Veq}^{1.5}} \quad 27.24 \quad \text{sqm}$$

essendo

$h_{Vi}$  e  $W_{Vi}$  le dimensioni reali delle aperture realmente presenti

$h_{Veq}$  differenza tra altezza punto più alto e più basso tra tutte le aperture = 1.2

$A^*_T$ [m <sup>2</sup> ]	$h_{Veq}$ [m]	$W_{Veq}$ [m]	$A_{Veq}$ [m <sup>2</sup> ]	$RHR_F$ [kW]
4127.9	1.2	27.24	32.09	45485



# La potenza di flashover $RHR_F$ (secondo BABRAUSKAS)

$$RHR_F = 750 \cdot A_{Veq} \cdot h_{Veq}^{0.5}$$

dove:

$$A_{Veq} = W_{Veq} \cdot h_{Veq} \quad 32.58$$

$$W_{Veq} = \frac{\sum_i w_{Vi} \cdot h_{Vi}^{1.5}}{h_{Veq}^{1.5}} \quad 27.15$$

essendo

$h_{Vi}$  e  $W_{Vi}$  le dimensioni reali delle aperture realmente presenti

$h_{Veq}$  differenza tra altezza punto più alto e più basso tra tutte le aperture = **2.4**

$h_{Veq}$ [m]	$W_{Veq}$ [m]	$A_{Veq}$ [m <sup>2</sup> ]	$RHR_F$ [kW]
2.4	32.58	27.15	31545



# QUANTITATIVO MATERIALE COMBUSTO AL FLASHOVER

$$Q_F (t=t_f) = 0.333 \cdot \frac{\alpha}{H} \cdot t_F^3 =$$

923  
461 [kg]  
230  
115

dove:

**α =** 0.00277 lento  
0.01111 medio [kJ/s<sup>3</sup>]  
0.04444 veloce  
0.17777 ultraveloce

**H =** 17000 [kJ/kg]

$$t_F = \sqrt{\frac{RHR_F}{\alpha}} =$$

2715  
1356 [s]  
678  
339

essendo:

**RHR<sub>F</sub> =** 20416 kW



# ALGORITMI : ALTEZZA DELLE FIAMME

$H = 42 \cdot d \cdot \left( \frac{m_u}{\delta_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61}$	<b>15.8</b>	m
dove:		
$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_p}{\pi}}$	<b>5.05</b>	m
d è il diametro equivalente della pozza		
Ap è l'area della pozza	<b>20</b>	mq
$m_u = Y_{max} \cdot \delta_l =$	<b>0.1199</b>	kg/s*mq
$\delta_l$ è il peso specifico del liquido	<b>899</b>	kg/mc
mu è la velocità di bruciamento specifica		
Ymax è la velocità di diminuzione verticale liquido		
$Y_{max} = 10^{-3} \left( \frac{H_c}{H_v + C_p \cdot \Delta T} \right) \cdot \frac{1}{\delta_l}$	<b>0.000133339</b>	m/s
Cp calore specifico gasolio	<b>1.87</b>	kJ/kgx°C
Temp. Eb. Gasolio	<b>235.00</b>	°C
Temp. Ambiente	<b>20.00</b>	°C
$\Delta$	<b>215.00</b>	°C
Hc è il calore di combustione	<b>45000000</b>	J/kg
Hv è il calore latente di vaporizzazione	<b>375000</b>	J/kg
densità dell'aria	<b>1.2</b>	kg/mc



# ALGORITMI: ALCUNE GRANDEZZE

## QUANTITA' SPECIFICA MISCELA COMBUSTA

$$m_u = y_{max} \cdot \delta_{liq.} \quad 0.05677 \text{ [kg/sxm2]}$$

dove:

<b>m<sub>u</sub></b> =	quantità specifica liquido combusto	[kg/sxm2]	
<b>y<sub>max</sub></b> =	velocità verticale diminuzione spessore liquido formante pozza		<b>0.00007</b> [m/s]
<b>δ<sub>liq.</sub></b> =	densità della miscela	<b>811</b>	[kg/m3]

## QUANTITA' DI CALORE GENERATA NELL'UNITA' DI TEMPO (POTENZA)

$$W^* = m_u \cdot A_p \cdot H_c \quad 51093 \text{ [kW]}$$

dove:

<b>A<sub>p</sub></b> =	Area della pozza	[m2]	20
<b>H<sub>c</sub></b> =	Calore di combustione	[kJ/kg]	45000

## DURATA COMBUSTIONE MISCELA SVERSATA IN POZZA

Quantitativo miscela =	41.77 kg
Durata combustione =	37 sec.



## CODICI DI CALCOLO

Per lo studio degli incendi di progetto sono disponibili anche modelli più complessi di simulazione fluidodinamica computazionale (CFD), detti *modelli di campo*.

Nelle valutazioni eseguite con i *modelli di campo* il volume considerato viene diviso in un elevato numero di volumi elementari (celle), all'interno di ciascuno dei quali il programma calcola la variazione delle grandezza di interesse con l'utilizzo delle equazioni che regolano il moto dei fluidi nel rispetto dei principi di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, tenendo conto delle variazioni che si hanno nei volumi limitrofi.

Tra i modelli più in uso per la caratterizzazione degli *incendi reali* si ricordano:

### **Modelli a zone**

CFAST (NIST)

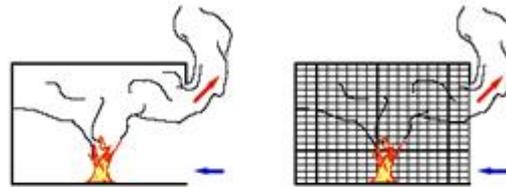
BRANZFIRE (Università New Zeland)

OZONE (Università di Liegi)

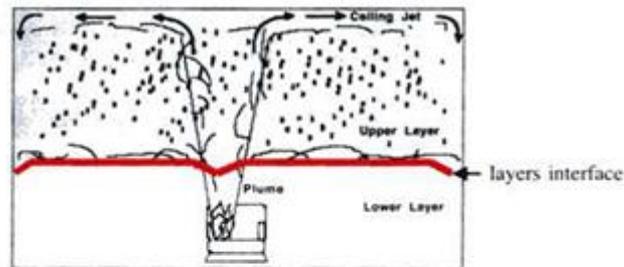
### **Modelli di campo (fluidodinamici)**

FDS (NIST)

# CODICI DI CALCOLO



**NIST**  
National Institute of Standards and Technology  
Technology Administration, U.S. Department of Commerce





## CODICI DI CALCOLO

Con l'uso di tali modelli è possibile effettuare stime attendibili di:

- variazione nel tempo dell'altezza dal pavimento dello strato caldo di fumo e gas di combustione;
- tempo previsto di rilevazione dell'incendio e di attivazione degli impianti di spegnimento;
- quantità di fumo producibile in un determinato ambiente, nonché di quella che fuoriesce dalle aperture;
- visibilità di pannelli di segnalazione illuminati presenti nelle vie di esodo in presenza di fumo e gas di combustione;
- temperatura e pressione del fumo e gas di combustione;
- valore massimo della potenza termica rilasciata in grado di produrre il flashover in un determinato locale;
- flusso termico sulle pareti di un locale o su di un oggetto (target) in esso presente;
- possibile ignizione di una sostanza combustibile che si trova all'interno di un ambiente nel quale si è sviluppato un incendio;
- concentrazione attesa di monossido di carbonio (CO) e di altre sostanze tossiche e nocive (HCN, HCl, etc.) che si liberano dall'incendio;
- distanza di sicurezza tra i vari materiali combustibili allo scopo di evitare la propagazione dell'incendio;
- tempo impiegato da una persona per raggiungere un luogo sicuro;
- tempo massimo oltre il quale una persona diventa inabile (incapacitazione) quando è soggetta all'azione dei prodotti della combustione e/o al calore;
- tempo disponibile per l'evacuazione delle persone da un locale.

L'uso di detti modelli richiede una mirata raccolta di dati (ricognizione) che deve essere fatta: per ogni locale, per ogni comparto, per ogni piano, per ogni edificio.



## CODICI DI CALCOLO



a room fire simulator

# BRANZFIRE

Version 2011.2

for Microsoft Windows

Copyright 2008

BRANZ Ltd - wholly owned by the Building  
Research Association of New Zealand  
Incorporated

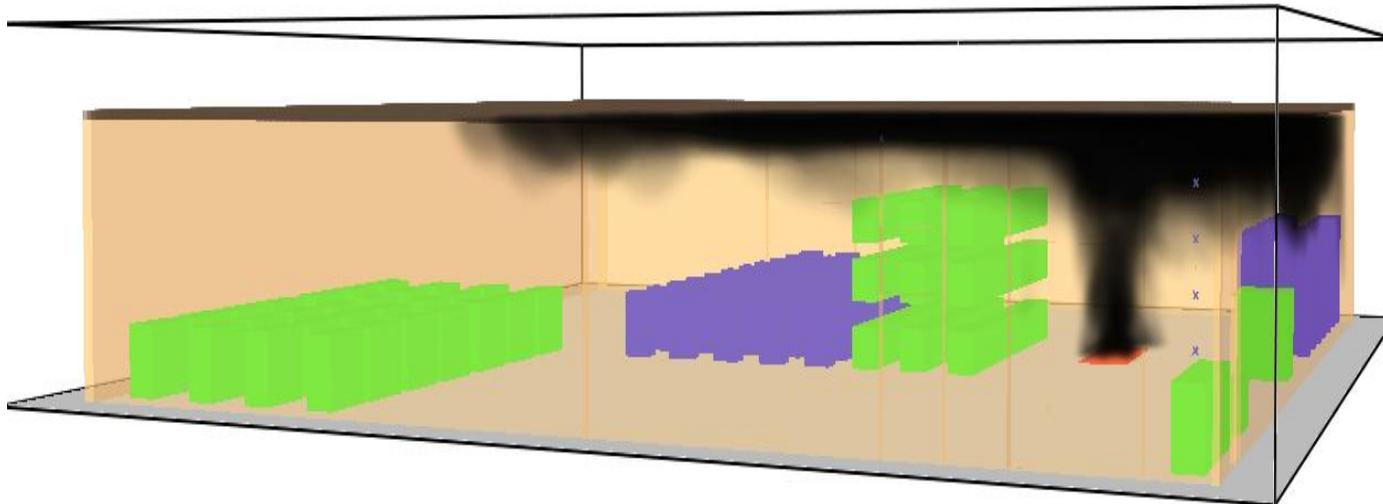


## CODICI DI CALCOLO

Show Multiple Graphs	
Layer Height	
Gas Temperatures	▶
Heat Release Rate	
Mass Loss Rate	
Mass Loss Total	
Plume Flow	
Wall Convection Flow	▶
Vent Flow	▶
Species Concentrations	▶
FED	▶
Visibility	
Vent Fires	
Radiation	▶
Detector/Sprinkler Temp	
Surface Temperatures	▶
Pressure	
SPR	
GER	
Glass Temperatures	

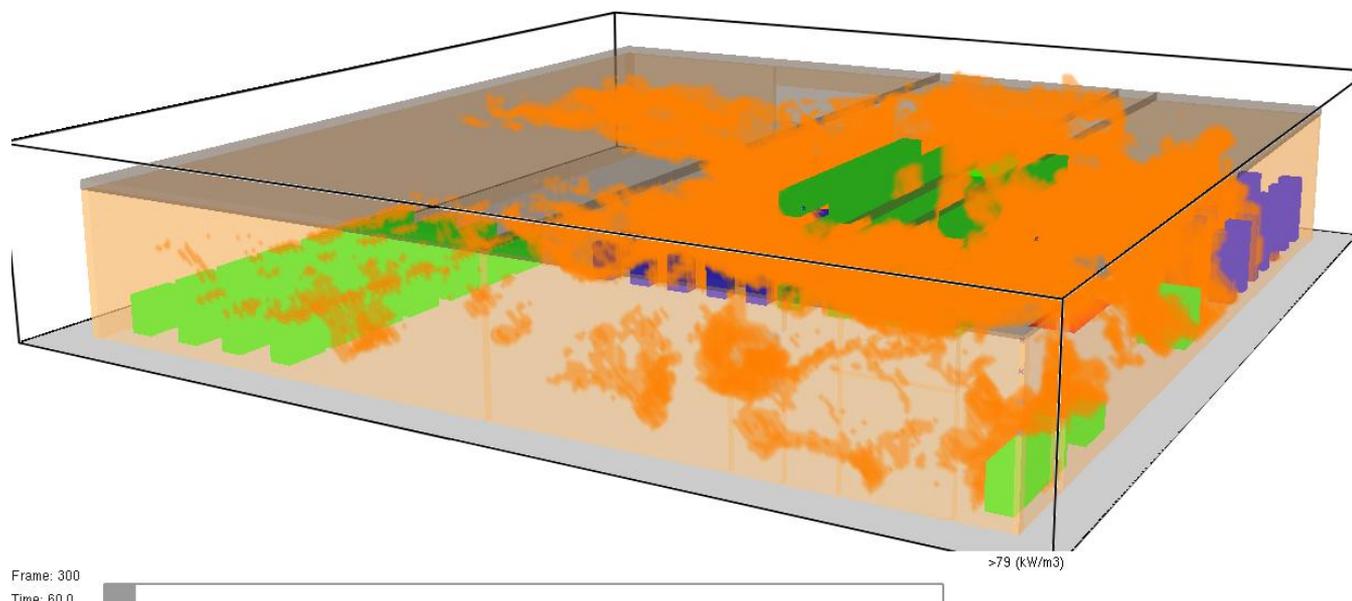
# Gli incendi: i codici di simulazione

Immagine delle prime fasi di un incendio secondo codice FDS



# Gli incendi: i codici di simulazione

## Immagine di un flashover secondo codice FDS



## VARI TIPI DI INCENDI



## VARI TIPI DI INCENDI



## INCENDIO LA FENICE - VENEZIA





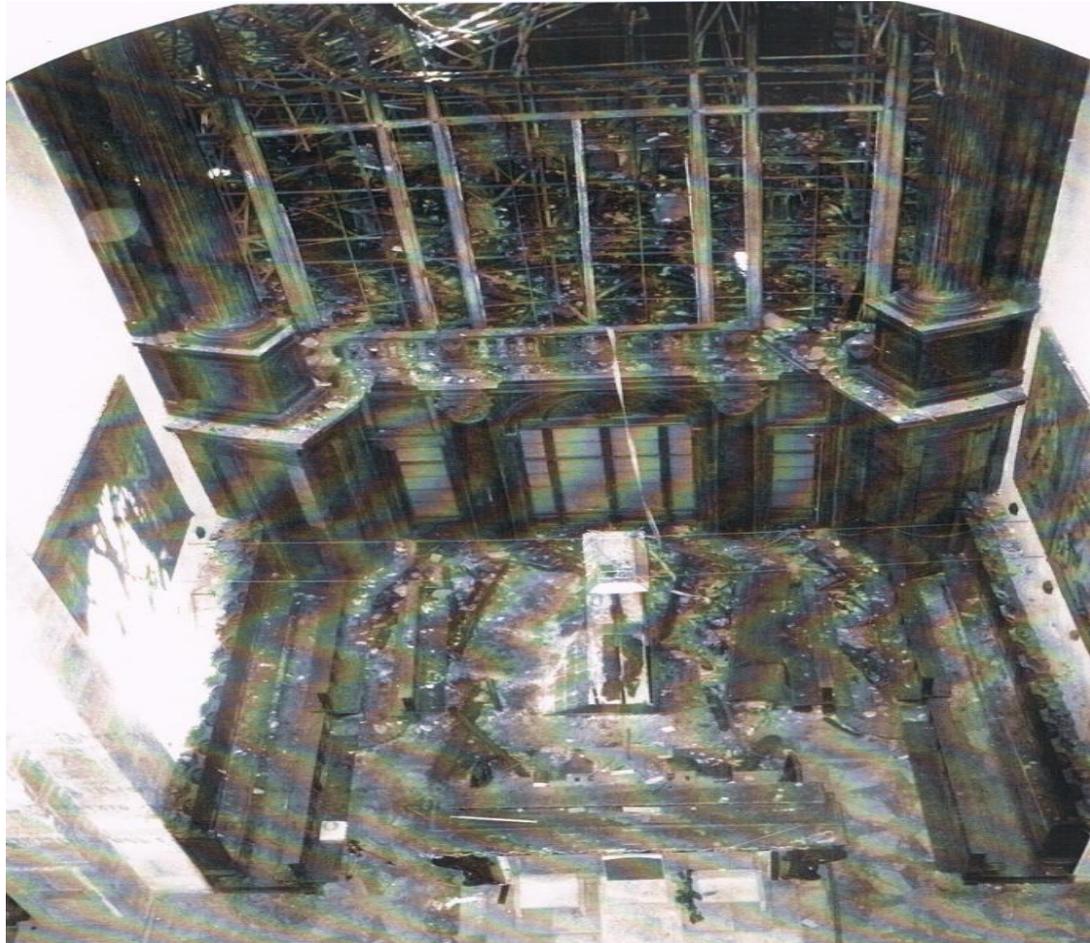
## INCENDIO LA FENICE - VENEZIA



## INCENDIO CAPPELLA DEL GUARINI - TORINO



## INCENDIO CAPPELLA DEL GUARINI - TORINO



## INCENDIO CAPPELLA DEL GUARINI - TORINO



