



«Scienza e Tecnica della Prevenzione Incendi»

A.A. 2014 - 2015

GLI EVENTI

- INCENDI
- ESPLOSIONI
- ALTRI EVENTI



Docente: ing. Mauro Marchini

mgm@mauromarchini.com



La combustione

- **Si definisce combustione una reazione chimica tra un combustibile ed un comburente con sviluppo di calore, attivata da una energia di innesco.**
- **In particolare 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.**



I prodromi della combustione: la pirolisi, l'evaporazione

PIROLISI

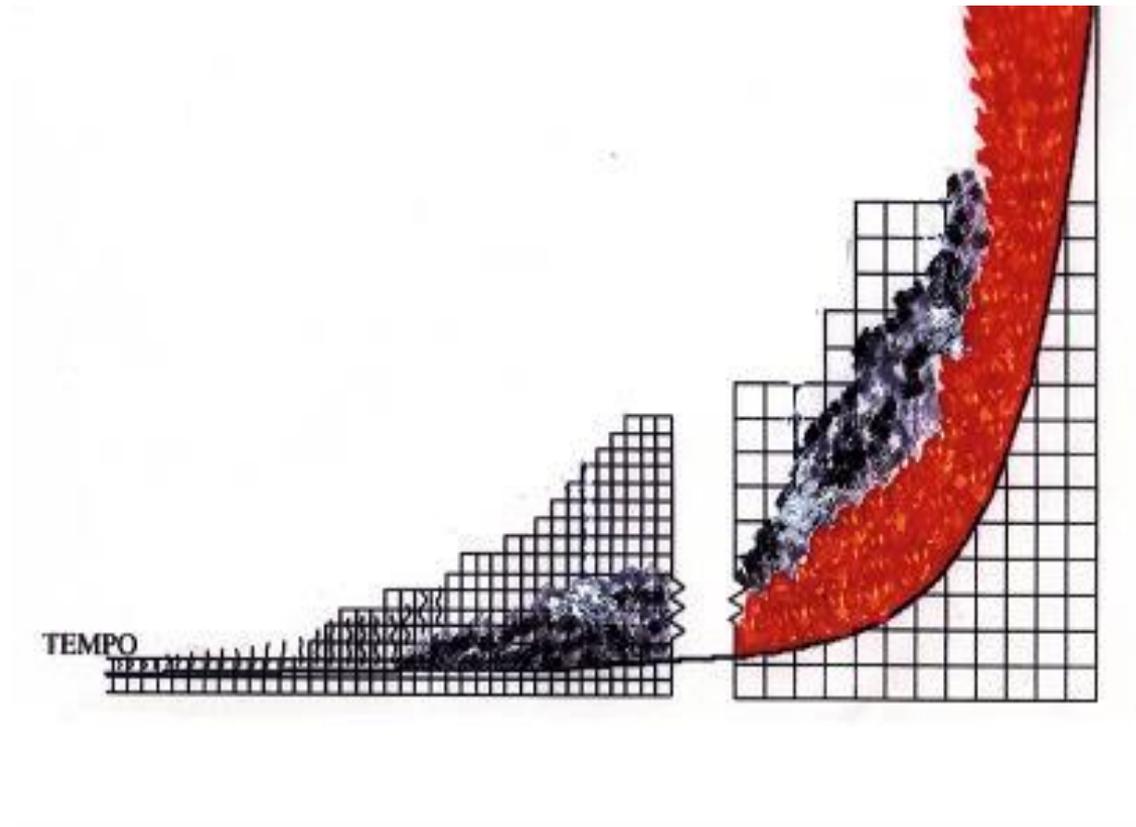
Quando un combustibile **solido** è investito da un flusso di calore subisce un processo fisico di decomposizione e di gassificazione prodromico alla successiva fase di ossidazione (combustione).

EVAPORAZIONE

Quando un combustibile **liquido** è investito da un flusso di calore subisce il processo fisico di passaggio allo stato di vapore prodromico alla successiva fase di ossidazione (combustione).

L'evaporazione è grandemente favorita dalla ventilazione.

Gli eventi: le fasi iniziali di un combustione





Gli eventi: la combustione

LO SMOLDERING

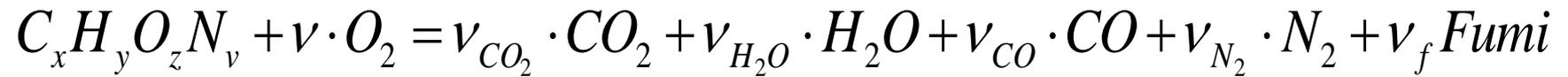
È l'ossidazione superficiale di un combustibile solido, una forma di combustione lenta, in assenza di fiamma.

Lo smoldering costituisce un serio pericolo d'incendio per due ragioni:

- Produce un quantitativo di sostanze tossiche (CO e CO₂) e di fumo superiore a quello che si sarebbe avuto nella combustione in presenza di fiamma;
- Prepara la strada per la combustione in presenza di fiamma anche in presenza di sorgenti di calore deboli che altrimenti non sarebbero state capaci di attivarla direttamente.

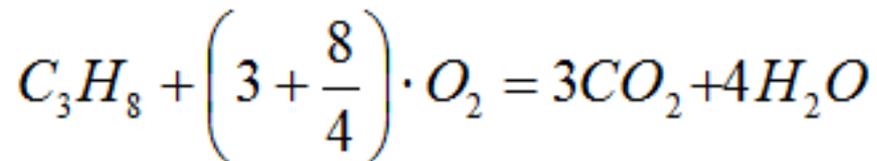
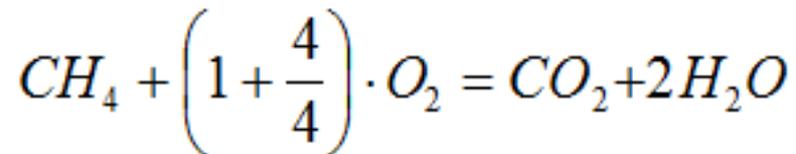
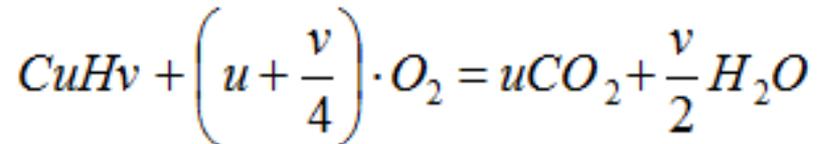


La combustione stechiometrica

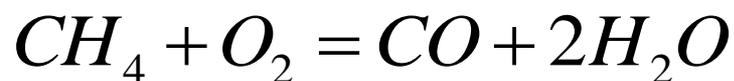




La combustione stechiometrica degli idrocarburi



POTERE COMBURIVORO



COMBUSTIONE INCOMPLETA



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

- PIROLISI
- INCUBAZIONE (SMOLDERING)
- INNESCO
- 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 α è il coefficiente di crescita che si misura in $[kW/s^2]$.

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

$$\alpha_{lento} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{600^2} = 0.00277777 \quad [kJ/s^3] \quad \alpha_{medio} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{300^2} = 0.01111111 \quad [kJ/s^3]$$

$$\alpha_{veloce} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{150^2} = 0.04444444 \quad [kJ/s^3] \quad \alpha_{ultraveloce} = \frac{1000}{t_g^2} = \frac{1000}{75^2} = 0.177777 \quad [kJ/s^3]$$



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:

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

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

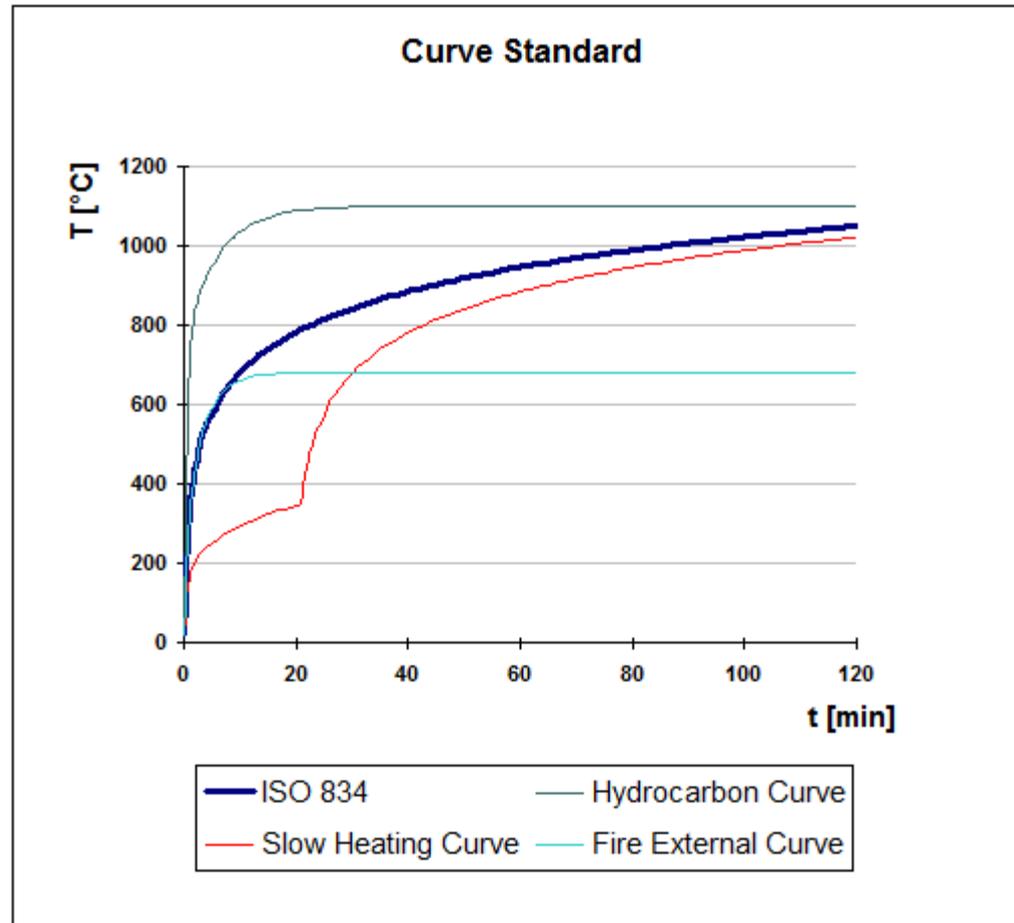
2. Nel caso di incendi di quantità rilevanti di idrocarburi o altre sostanze con equivalente velocità di rilascio termico, ed esclusivamente per la determinazione della capacità portante delle strutture, la curva di incendio nominale standard deve essere sostituita con la curva nominale degli idrocarburi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

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

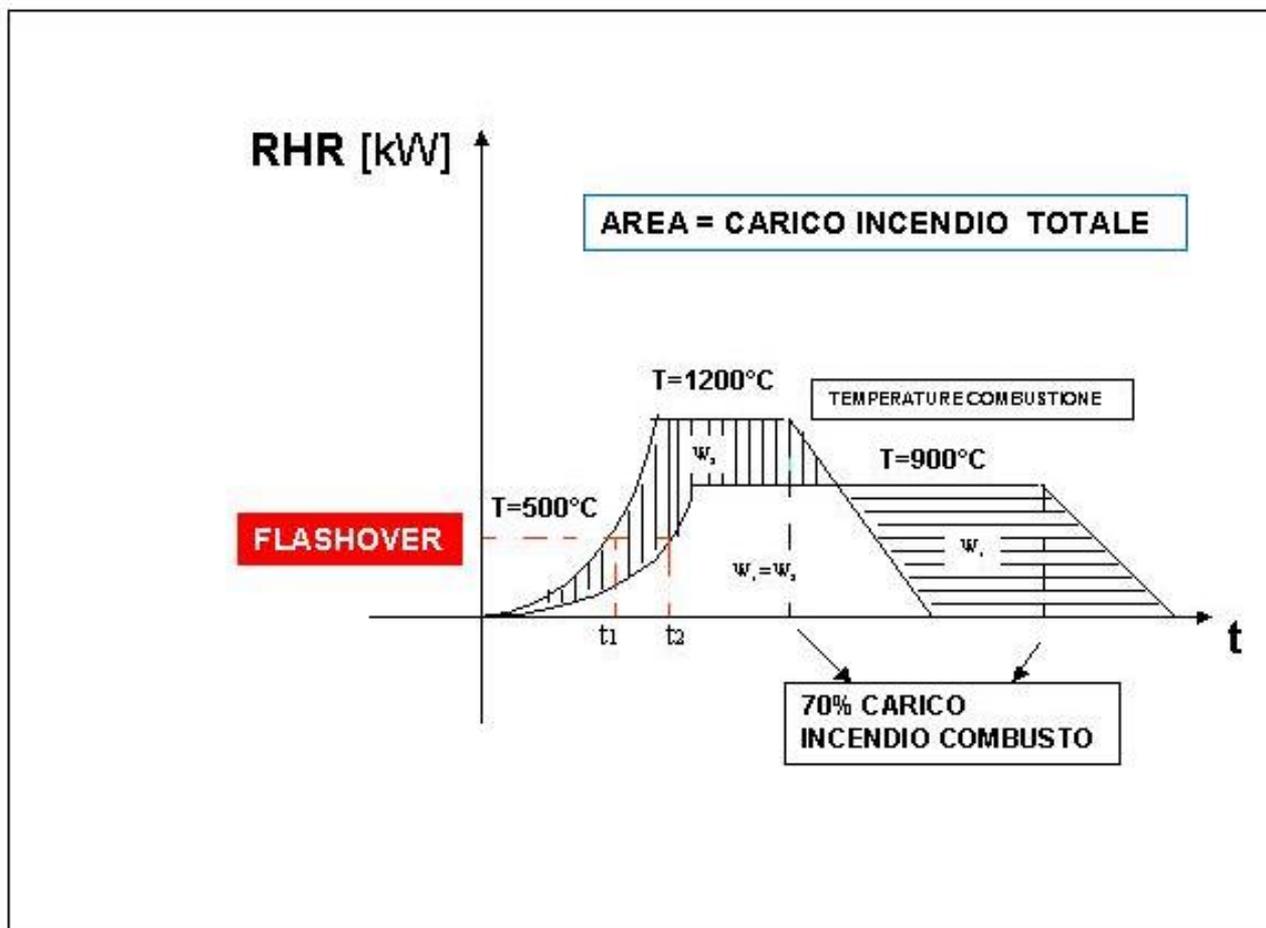
3. Nel caso di incendi sviluppatisi all'interno del compartimento, ma che coinvolgono strutture poste all'esterno, per queste ultime la curva di incendio nominale standard può essere sostituita con la curva nominale esterna seguente:

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

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 ²]	h_{Veq} [m]	W_{Veq} [m]	A_{Veq} [m ²]	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 ²]	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/s³]
0.04444 veloce
0.17777 ultraveloce

H = 17000 [kJ/kg]

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

2715
1356 [s]
678
339

essendo:

RHR_F = 20416 kW



ALGORITMI : ALTEZZA DELLE FIAMME

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



ALGORITMI: ALCUNE GRANDEZZE

QUANTITA' SPECIFICA MISCELA COMBUSTA

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

dove:

m_u =	quantità specifica liquido combusto	[kg/sxm2]	
y_{max} =	velocità verticale diminuzione spessore liquido formante pozza		0.00007 [m/s]
δ_{liq.} =	densità della miscela	811 [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:

A_p =	Area della pozza	[m2]	20
H_c =	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)

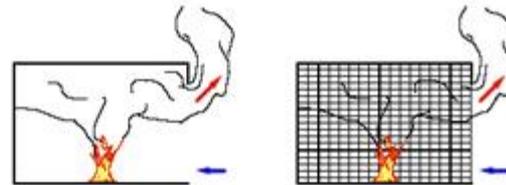
BRANZFIRE (Università New Zeland)

OZONE (Università di Liegi)

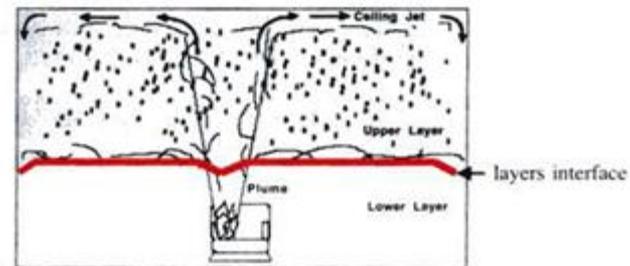
Modelli di campo (fluidodinamici)

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

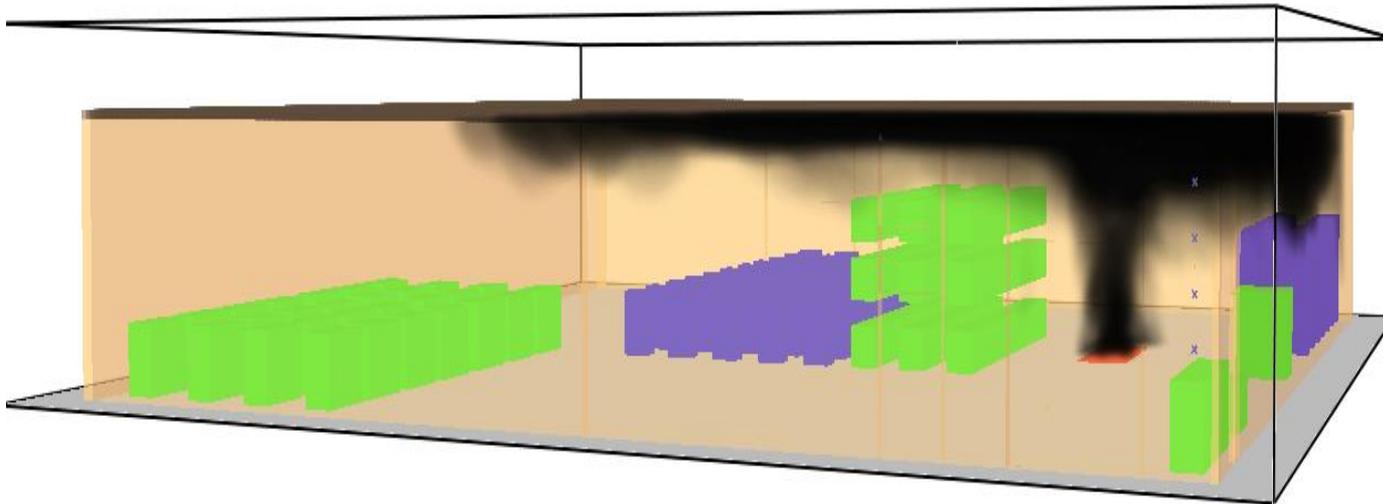


CODICI DI CALCOLO

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	

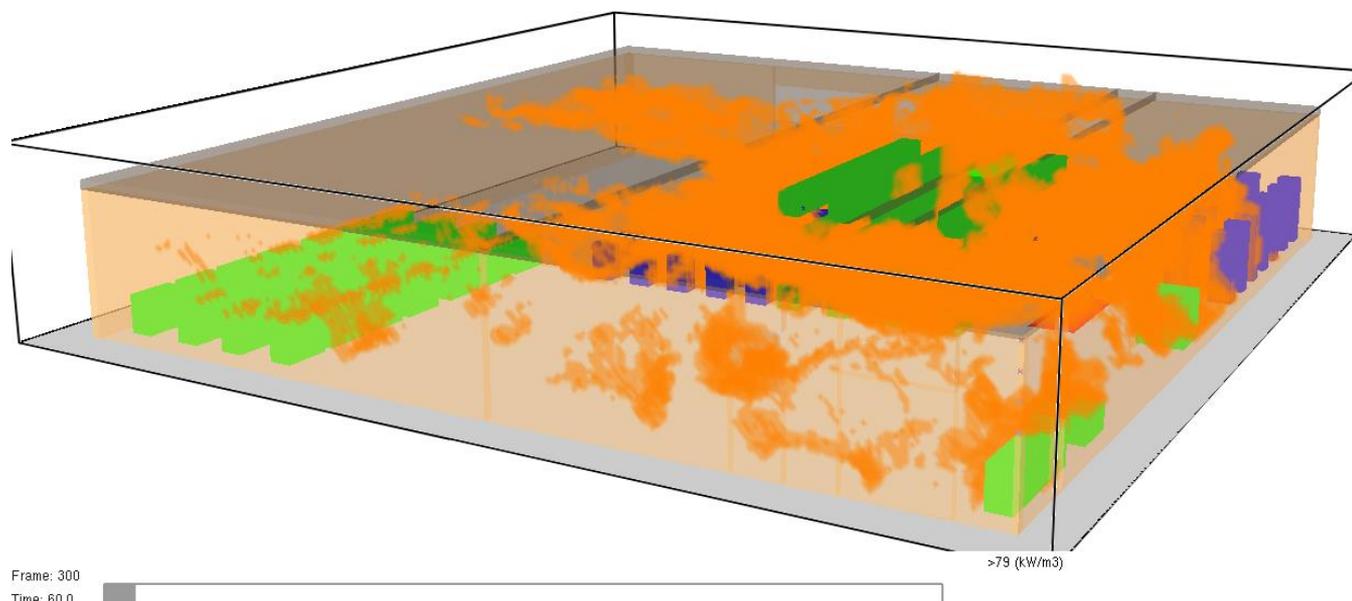
Gli incendi: i codici di simulazione

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







Esplosioni

- **Cosa e' una esplosione**
- **La natura di una esplosione**
- **Le esplosioni chimico-fisiche**
- **Le esplosioni fisiche (gli scoppi)**
- **I principali parametri di una esplosione**
- **Come si riconosce e si caratterizza una esplosione**
- **Le esplosioni di esplosivi solidi**
- **Le atmosfere esplosive**
- **La violenza di una esplosione**



Esplosioni

Si definisce in via generale esplosione un rilascio di energia, in un tempo molto breve capace di generare onde di pressione e di calore che si propagano nello spazio circostante.

Le esplosioni sono caratterizzate dalla rapidità (*potenza*) con la quale avviene il rilascio di energia (meccanica e termica) che ad esse si accompagna.

Le sostanze che possono dar luogo ad esplosioni sono:

- **Esplosivi solidi propriamente detti**
- **Gas combustibili**
- **Vapori infiammabili**
- **Polveri**



Esplosioni

Le esplosioni dovute a sostanze esplosive solide propriamente dette, cioè a quelle sostanze che nella loro composizione molecolare contengono sia il combustibile che il comburente, sono caratterizzate da una elevata velocità di reazione talché esse vengono definite con lo specifico termine di **detonazioni**.

Con le polveri combustibili, i gas ed i vapori infiammabili della famiglia degli idrocarburi si hanno di norma **deflagrazioni**, che soltanto in casi particolarissimi, si approssimano alle detonazioni, ma comunque mai in luoghi aperti.



Esplosioni

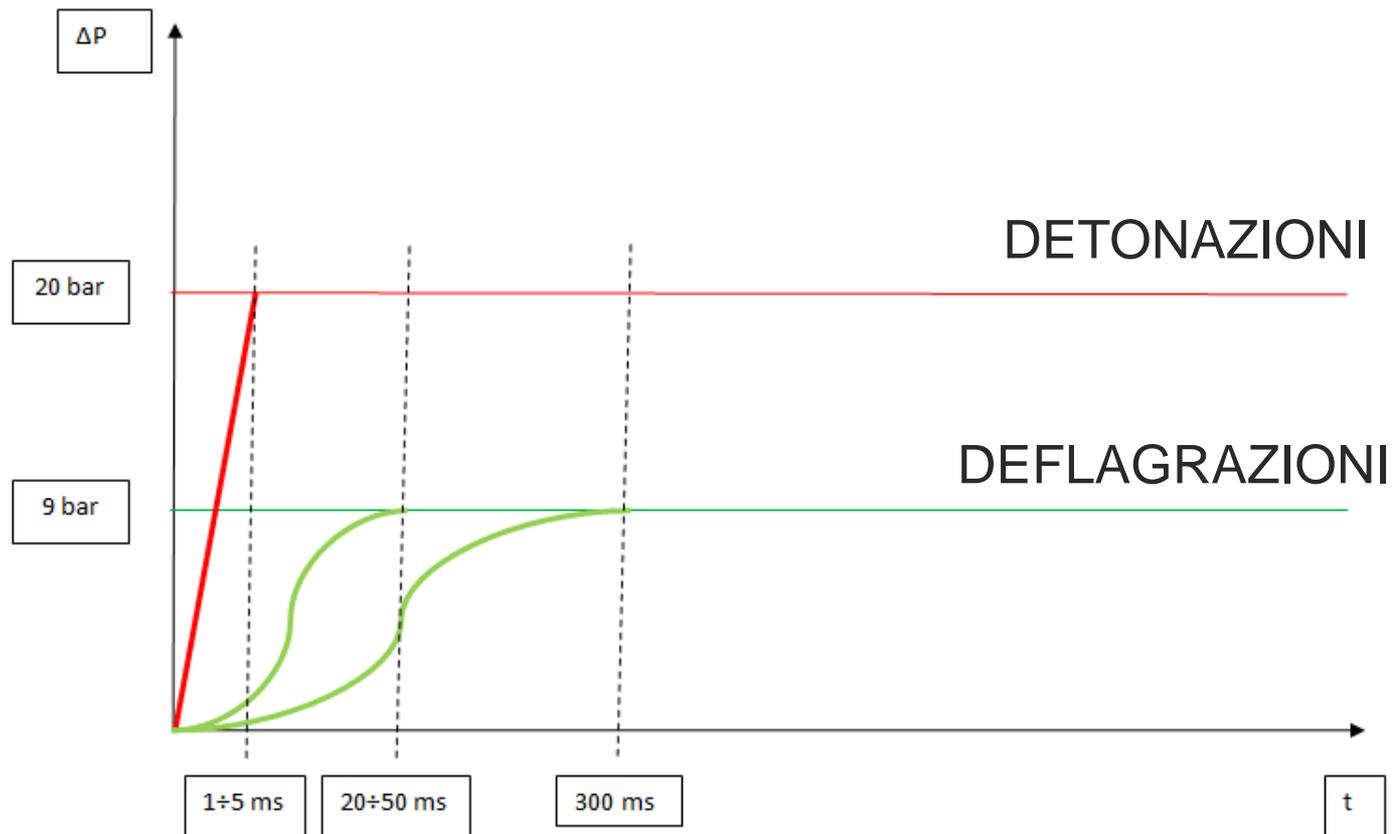
Le **detonazioni** si esauriscono in alcuni millisecondi (1 ms ÷ 5 ms) mentre le **deflagrazioni** si estrinsecano in tempi di alcune decine di millisecondi (20 ms ÷ 50 ms) fino a 300 ms.

In buona sostanza ciò che caratterizza una detonazione da una deflagrazione è la rapidità (*potenza*) con la quale avviene il rilascio di energia (meccanica e termica) che ad esse si accompagna.

A parità di energia con i due distinti fenomeni chimico-fisici si hanno "*violenze*" e quindi conseguenze (effetti distruttivi) affatto diverse, di più rilevante magnitudo con le detonazioni.



Esplosioni





Esplosioni

Riassumendo: una esplosione è un
RILASCIO DI ENERGIA in un tempo brevissimo sotto forma

- ✓ **MECCANICA**
 - SOVRAPPRESSIONE
 - IMPULSO
 - ONDA RIFLESSA
 - ONDA RIFRATTA
 - LANCIO DI PROIETTI
- ✓ **TERMICA**
 - IRRAGGIAMENTO

talché la sua

POTENZA (energia/tempo)
è relevantissima.



Esplosioni

- **REAZIONE CHIMICO-FISICA (esplosione vera e propria)**
 - ✓ Reazione di combustione rapidissima
- **REAZIONE FISICA (scoppio)**
 - ✓ Modifica rapidissima di parametri fisici $[p(T),v]$



Esplosioni e scoppi: glossario

- **Flash (evaporazione)**
- **Flash-fire**
- **Fire ball**
- **B.L.E.V.E.**
- **U.V.C.E. – U.D.C.E.**
- **C.V.C.E. – C.D.C.E.**
 - ✓ **Confinante**
 - ✓ **Confinante con sfoghi (vent)**
- **R.P.T. (Rapid Phase transition)**
- **R.O. (Roll Over)**
- **R.A.R. (Run Away Reaction)**



Le esplosioni chimico-fisiche

Le esplosioni chimico-fisiche si distinguono:

- Secondo le sostanze reagenti
 - ✓ **Esplosivi solidi**
 - High EXPLOSIVES
 - Artifici pirotecnici
 - ✓ **Atmosfere esplosive**
 - Miscele gas/aria
 - Miscele vapori/aria
 - Miscele polveri/aria
- Secondo la velocità di reazione
 - ✓ **Detonazioni**
 - ✓ **Deflagrazioni**
- Secondo il luogo
 - ✓ **All'aperto (non confinate - U.V.C.E.)**
 - ✓ **Al chiuso (confinato - C.V.C.E.)**



Esplosivi solidi

- **Geometria e peso della carica**
- **Posizionamento della carica**
- **Presenza di un cratere**
- **Presenza di tormento meccanico materiali metallici**
- **Frammentazione minuta materiali fragili**
- **Lancio di numerosi proietti**
- **Cedimento non selettivo di strutture anche di rilevante resistenza**
- **Distanze di danno elevate**



Come si riconosce e si caratterizza una esplosione

- **Combustibile: gas, vapori, polveri ?**
- **Di che tipo di esplosione si è trattato ?**
 - ✓ **E' stata una UVCE ?**
 - ✓ **E' stata una CVCE ?**
 - Erano presenti sfoghi (vents) ?
- **Quale è stato il teatro della esplosione?**
- **Quali le conseguenze ?**
- **Di quale combustibile si è trattato ?**
- **Quale è stata la sorgente del rilascio ?**
- **Quale è la sua posizione ?**
- **Quale è stata la sua portata ?**
- **Quale è stato il quantitativo rilasciato ?**
- **Quale è stata la sua concentrazione ?**
- **Quale è stato l'innesco ?**
- **Quale è stato il bilancio energetico ?**



I parametri che caratterizzano la violenza di una esplosione

- Pressione max.
- Impulso
- Gradiente di pressione dp/dt
- Grado di riempimento
- Concentrazione
- Geometria del contenitore
- Volume (Legge cubica $\frac{dp}{dt} = \frac{K_G}{\sqrt[3]{V}}$)
- Turbolenza (ostacoli)
- Energia di innesco



Esplosioni

I PARAMETRI CHE CARATTERIZZANO UNA ESPLOSIONE

- **Massima pressione raggiunta (P_{max})**
- **Gradiente di pressione (dp/dt)**
- **Energia di innesco (valore, posizione)**
- **Concentrazione (gas, vapore, polvere)**
- **Volume contenitore (Cubic law)**
- **Costante dei gas o vapori (K_G)**
- **Classe delle polveri – costante delle polveri (K_{st})**



Esplosioni

Infatti le miscele di gas, di vapori infiammabili e di polveri in aria, in determinate condizioni di concentrazione, possono dar luogo a deflagrazioni.

Anche nelle deflagrazioni, a parità di contenuto energetico (quantitativo di sostanza suscettibile di dar luogo ad una esplosione), possono aversi velocità di reazione affatto diverse e quindi "violenze", cioè tipologia degli effetti distruttivi, altrettanto diverse.

Gli effetti attesi sull'ambiente circostante sono: abbattimento meccanico delle strutture, stress termici su superfici combustibili solide ed incendio di quelle "facilmente accendibili".

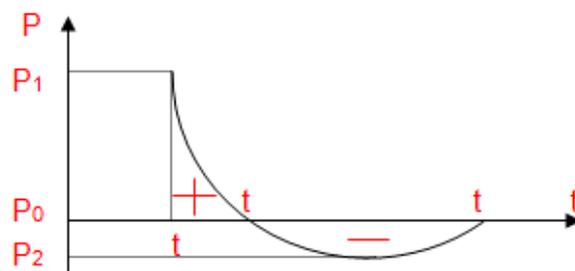
Nei confronti delle persone esposte gli effetti si estrinsecano, in generale, in ustioni generalizzate, di gravità inversamente proporzionale alla protezione realizzata dagli abiti ed alla distanza dal centro di fuoco.

Esplosioni

Esplosioni di esplosivi solidi

Le esplosioni di esplosivi solidi si caratterizzano come *detonazioni* (velocità del fronte di fiamma pari a migliaia di metri al secondo), talché l'onda termica si propaga pressoché alla stessa velocità supersonica dell'onda di pressione. Alla rapidità del fenomeno che si esaurisce in alcuni millisecondi è connesso un gradiente di pressione (dp/dt) molto elevato, ma anche una sovrappressione massima particolarmente elevata.

In una esplosione *ideale* (carica puntiforme) l'andamento qualitativo della sovrappressione generata può essere rappresentata graficamente nel modo seguente:



Al tempo t_1 in un punto dello spazio che si trova alla pressione P_0 , per effetto della esplosione si ha un innalzamento istantaneo della pressione che raggiunge il valore di picco P_1

Da questo valore di picco la pressione scende raggiungendo al tempo t_2 la pressione iniziale P_0 , continua a decrescere fino ad un valore P_2 negativo, per risalire al valore iniziale P_0 al tempo t_3 .



Esplosioni

Si hanno pertanto due diverse fasi, una di sovrappressione ed una di depressione.

L'area della fase positiva rappresenta l'impulso positivo I_+ della esplosione; esso è dato dalla relazione:

$$I_+ = \int_{t_1}^{t_2} [p(t) - p_0] \times dt$$

mentre l'impulso negativo è dato dalla relazione:

$$I_- = \int_{t_2}^{t_3} [p_0 - p(t)] \times dt$$



Esplosioni

Prove sperimentali hanno dimostrato che esiste una proporzionalità di scala tra le dimensioni di una carica esplosiva (e quindi del suo peso) e la distanza di esplosione.

Infatti si abbiano due cariche esplosive sferiche rispettivamente di diametro $D1$ e $D2$ il cui rapporto sia eguale a k .

Alla distanze R e kR le principali caratteristiche dell'onda d'urto (picco di pressione, impulso positivo, durata della fase positiva, andamento della pressione nel tempo, etc.), sono proporzionali allo stesso fattore di scala k .

Conseguentemente è stato possibile usare le dimensioni di una carica come parametro scalare di una esplosione.

Poiché in genere è più comodo fare riferimento al peso W della carica, la sua radice cubica ($\sqrt[3]{W}$) viene usata come parametro scalare essendo detta grandezza proporzionale alle dimensioni della carica supposta sferica.

Questa metodologia comunemente usata nella caratterizzazione delle esplosioni è detta legge scalare di Hopkinson (1915).

Esplosioni

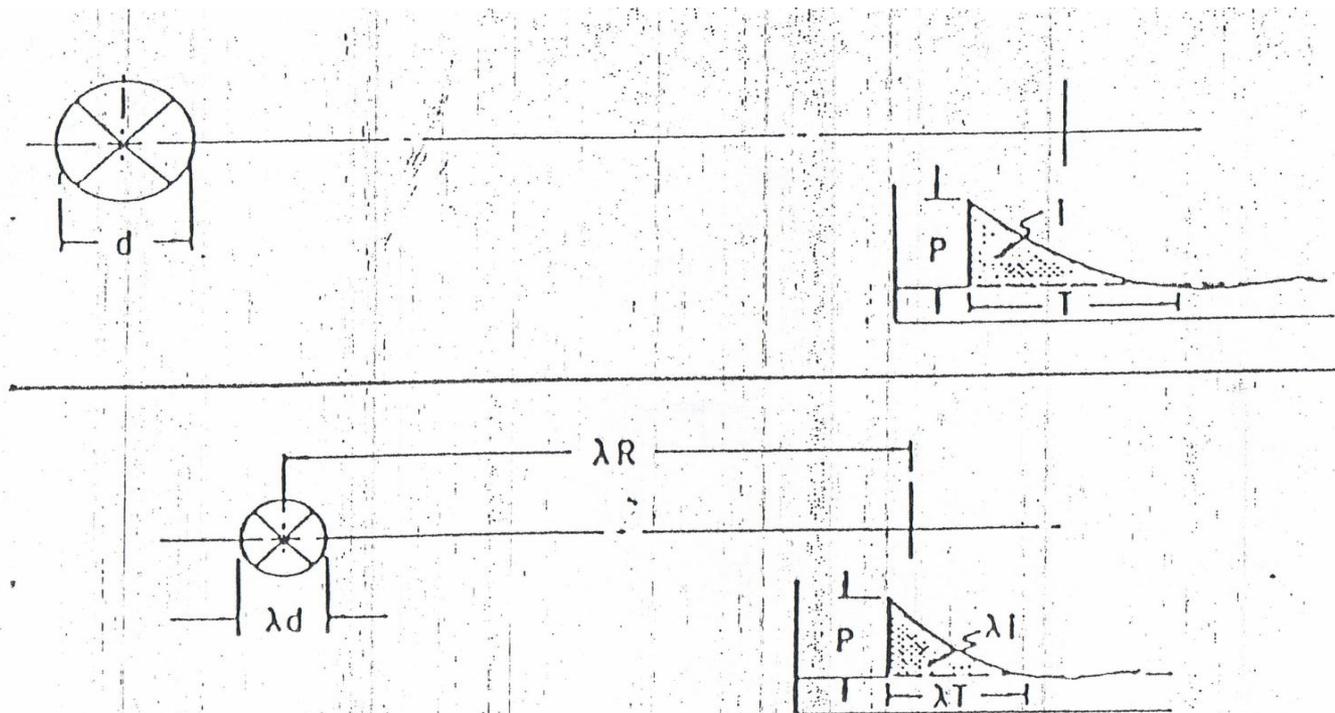


Figure 2-2. Hopkinson-Cranz Blast Wave Scaling



Esplosioni

Per calcolare la sovrappressione massima generata da una esplosione si fa di norma riferimento al metodo del tritolo (TNT) equivalente, ricordando che il quantitativo in peso di TNT equivalente è legato al corrispondente quantitativo in peso di propano dalla seguente relazione

$$W_{\text{propano}} = \frac{W_{\text{TNT}} \cdot H_{\text{TNT}}}{\eta \cdot H_{\text{propano}}} \quad [kg]$$

dove

- W_{TNT} : è il quantitativo in kg di tritolo equivalente
- W_{propano} : è il quantitativo di gas combustibile
- H_{propano} : è l'energia sviluppata dalla combustione in aria di 1 kg di propano che vale 46,3 MJ/kg
- H_{TNT} : è l'energia sviluppata dalla combustione di 1 kg di tritolo (TNT), pari a 4.6 MJ/kg
- η : è il rendimento dell'esplosione che in letteratura (Yellow Book del TNO) può assumersi in un intervallo di valori da 0.05 a 0.10



Energia della esplosione e quantitativo delle sostanze che hanno partecipato alla reazione.

La magnitudo di una esplosione è legata alle modalità del rilascio di *energia* messa in gioco dalla natura e dal quantitativo delle sostanze suscettibili di esplodere. Per stimare l'energia messa in gioco da una esplosione si può fare utile riferimento alle cosiddette *distanze di danno* comparate con quelle del tritolo, detto appunto TNT equivalente. Dalla curva base del TNT si ricava la cosiddetta *distanza normalizzata* (d_N).

Il normogramma del BAKER

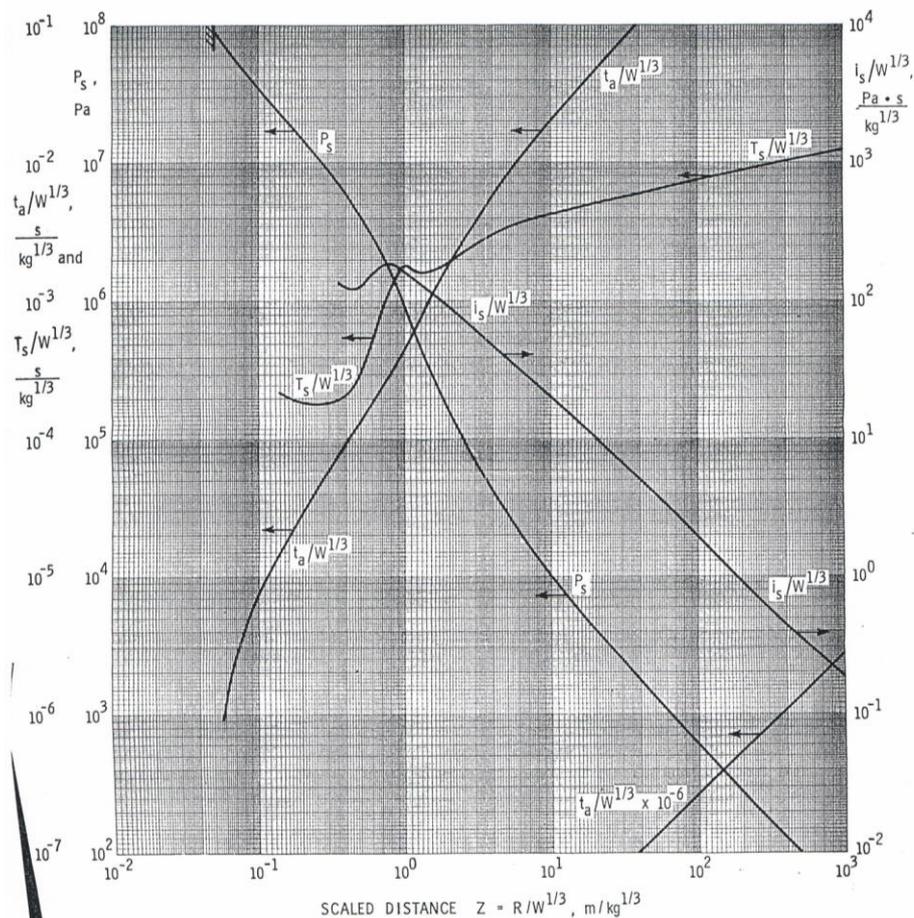


Figure 2-45. Side-On Blast Parameters for TNT

La distanza normalizzata Z è legata alla distanza effettiva (R) dall'epicentro dell'esplosione ed alla massa (m) di TNT equivalente dalla relazione:

$$Z = R \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{W}}$$



Esplosioni

In buona sostanza la legge in questione afferma che, a distanze proporzionalmente scalari, quando due cariche esplosive di pari natura, di differenti dimensioni ma nello stesso rapporto di scala delle distanze, esplodono nello stesso ambiente, si producono onde d'urto tra loro paragonabili.

Si usa pertanto il parametro dimensionale Z denominato "distanza scalare" (distanza normalizzata) dato dalla relazione:

$$Z = R \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{W}}$$



Esplosioni

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O																																																												
13																																																																											
14	R	W	$\sqrt[3]{W}$	Z	P_0	$\sqrt{P_0}$	P_s	Q	P	P	\bar{P}	I_s	m	$\sqrt[3]{m}$	\bar{I}_s																																																												
15	m	kg	kg	m/kg^(1/3)	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	mbar	Pa*s	kg	kg	Pa^(1/2)*s/kg^(1/3)																																																													
16	1	0.2	0.58	2	100000	316	150000	66176	216176	2162	2	9	45	3.6	0.0247																																																												
17	2	0.2	0.58	3	100000	316	70000	15909	85909	859	1	4	45	3.6	0.0115																																																												
18	3	0.2	0.58	5	100000	316	30000	3082	33082	331	0	2	45	3.6	0.0049																																																												
19	4	0.2	0.58	7	100000	316	18000	1128	19128	191	0	1	45	3.6	0.0030																																																												
20	5	0.2	0.58	9	100000	316	13000	593	13593	136	0	1	45	3.6	0.0021																																																												
21	20	0.2	0.58	34	100000	316	2000	14	2014	20	0	0	45	3.6	0.0003																																																												
22																																																																											
23	1	0.5	0.79	1	100000	316	1000000	1470588	2470588	10000	10	79	45	3.6	0.2231																																																												
24	2	0.5	0.79	3	100000	316	700000	875000	1575000	7000	7	56	45	3.6	0.1562																																																												
25	3	0.5	0.79	4	100000	316	400000	363636	763636	4000	4	32	45	3.6	0.0893																																																												
26	4	0.5	0.79	5	100000	316	250000	164474	414474	2500	3	20	45	3.6	0.0558																																																												
27	5	0.5	0.79	6	100000	316	200000	111111	311111	2000	2	16	45	3.6	0.0446																																																												
28	20	0.5	0.79	25	100000	316	2500	22	2522	25	0	2	45	3.6	0.0056																																																												
29	Nota: i vetri rotti sono stati assunti alla distanza di 20 metri. Il risultato di una pressione di 20/25 mbar risulta coerente																																																																										
30																																																																											
31	$Pr = -77,1 + 6,91 \cdot \ln(P)$		Indice probit per morte da impatto																																																																								
32																																																																											
33																																																																											
34	<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th>W</th> <th>R</th> <th>P</th> <th>P_r</th> <th>Prob.tà</th> </tr> <tr> <th>kg</th> <th>m</th> <th>Pa</th> <th></th> <th>morte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.2</td><td>1</td><td>216176</td><td>7.78</td><td>100%</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>2</td><td>85909</td><td>1.40</td><td>1%</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>3</td><td>33082</td><td>-5.19</td><td>0%</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>4</td><td>19128</td><td>-8.97</td><td>0%</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>5</td><td>13593</td><td>-11.34</td><td>0%</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>1</td><td>2470588</td><td>24.61</td><td>100%</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>2</td><td>1575000</td><td>21.50</td><td>100%</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>3</td><td>763636</td><td>16.50</td><td>100%</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>4</td><td>164474</td><td>5.89</td><td>81%</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>5</td><td>111111</td><td>3.18</td><td>3%</td></tr> </tbody> </table>															W	R	P	P_r	Prob.tà	kg	m	Pa		morte	0.2	1	216176	7.78	100%	0.2	2	85909	1.40	1%	0.2	3	33082	-5.19	0%	0.2	4	19128	-8.97	0%	0.2	5	13593	-11.34	0%	0.5	1	2470588	24.61	100%	0.5	2	1575000	21.50	100%	0.5	3	763636	16.50	100%	0.5	4	164474	5.89	81%	0.5	5	111111	3.18	3%
W	R	P	P_r	Prob.tà																																																																							
kg	m	Pa		morte																																																																							
0.2	1	216176	7.78	100%																																																																							
0.2	2	85909	1.40	1%																																																																							
0.2	3	33082	-5.19	0%																																																																							
0.2	4	19128	-8.97	0%																																																																							
0.2	5	13593	-11.34	0%																																																																							
0.5	1	2470588	24.61	100%																																																																							
0.5	2	1575000	21.50	100%																																																																							
0.5	3	763636	16.50	100%																																																																							
0.5	4	164474	5.89	81%																																																																							
0.5	5	111111	3.18	3%																																																																							
35																																																																											
36																																																																											
37																																																																											
38																																																																											
39																																																																											
40																																																																											
41																																																																											
42																																																																											
43																																																																											
44																																																																											
45																																																																											
46																																																																											



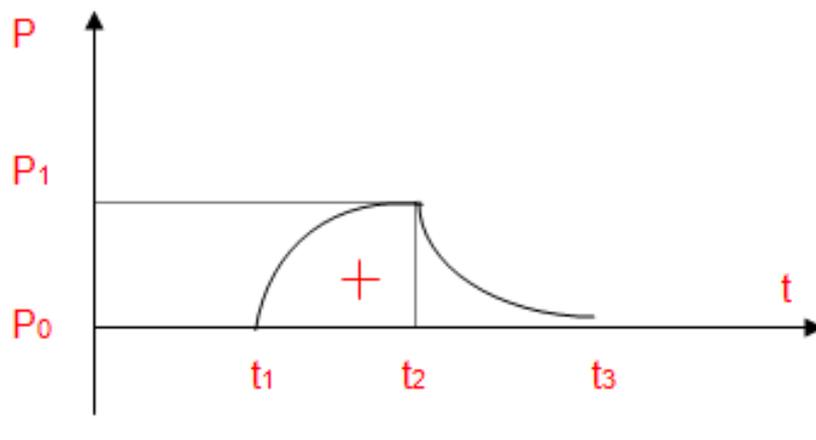
Esplosioni

Esplosioni di nubi di polveri, vapori e gas

Anche le nubi di polveri, vapori e gas infiammabili miscelate con l'aria, quando la loro concentrazione è compresa nel cosiddetto *campo di esplodibilità*, possono dar luogo ad esplosioni.

Le esplosioni di atmosfere infiammabili di gas, vapori e polveri sono di norma delle *deflagrazioni* (velocità del fronte di fiamma pari a decine di metri al secondo).

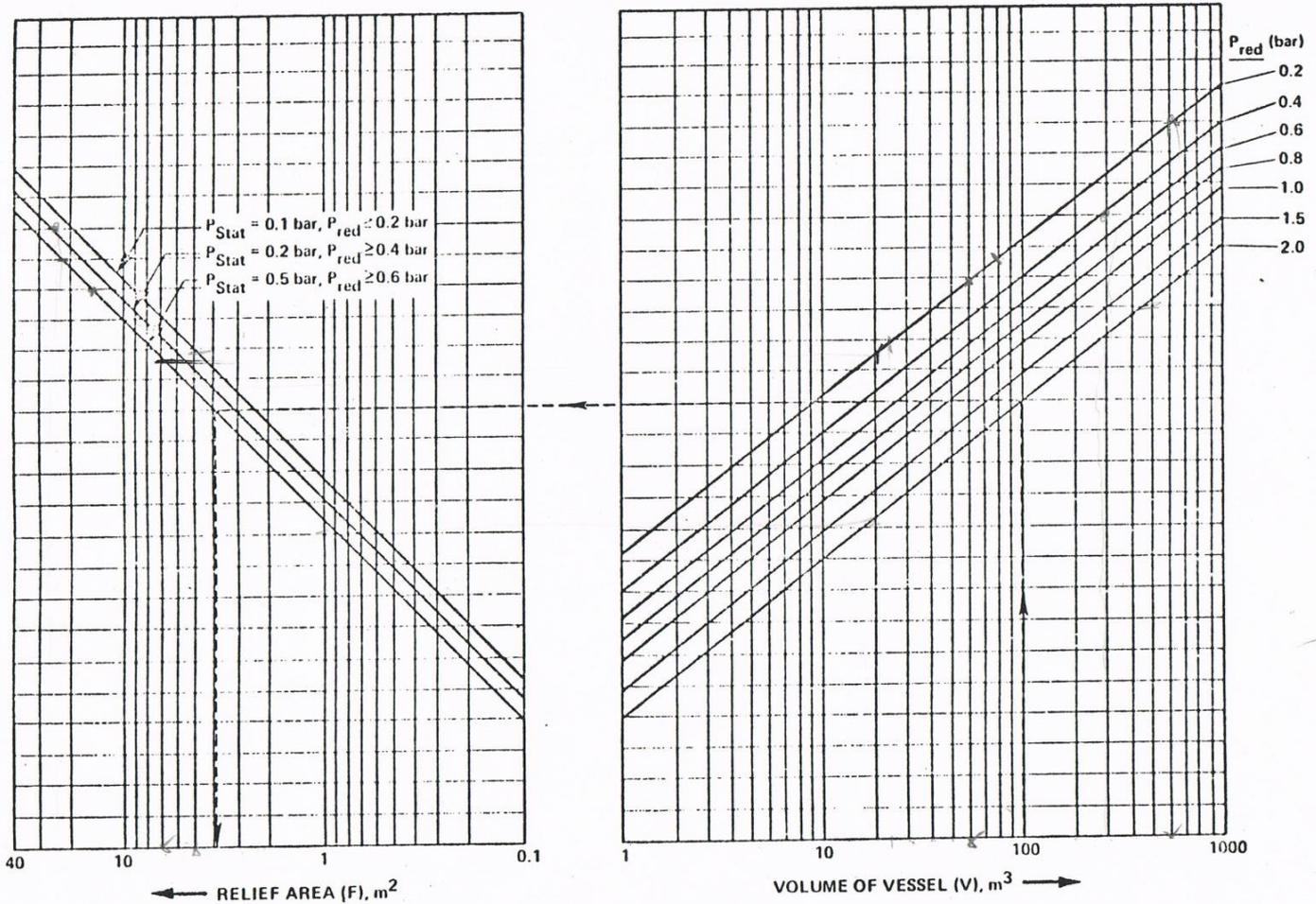
Nelle deflagrazioni l'andamento della sovrappressione (fase positiva) è il seguente:





Esplosioni

BULLETIN HE-133
Nomograph 8 of 10



NOMOGRAPH H, Methane

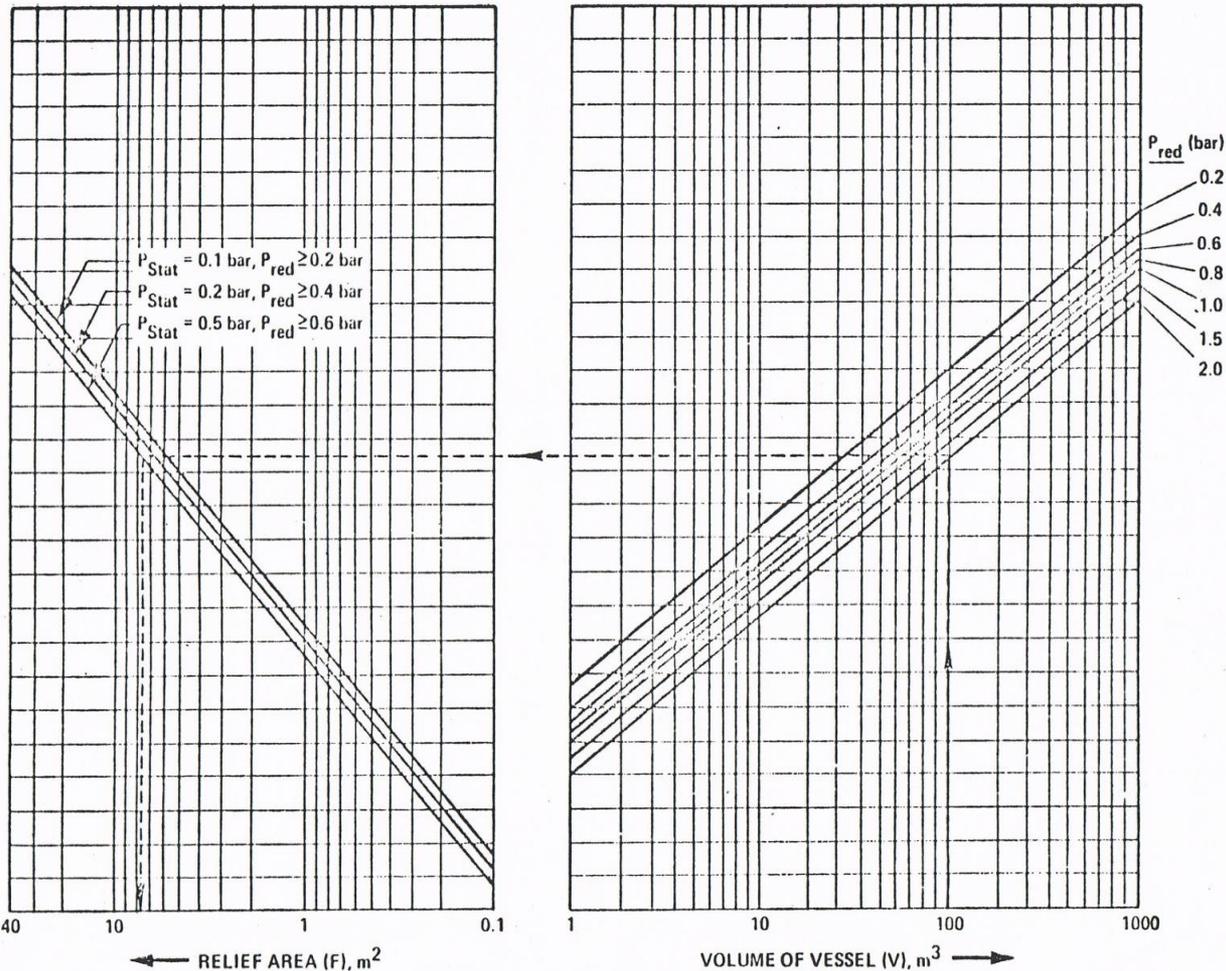
We cannot anticipate all conditions under which this information and our products, or the products of other manufacturers in combination with our products, may be used. We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety and suitability of our products, either alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each such product or product combination for their own purposes. Unless otherwise provided in writing, we shall not be responsible for any injury, loss, damage, or expense resulting from the use of this information.



Esplosioni

BULLETTIN HE-134
Nomograph 9 of 10

We cannot anticipate all conditions under which this information and our products, or the products of other manufacturers in combination with our products, may be used. We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety and suitability of our products, either alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each such product or product combination for their own purposes. Please

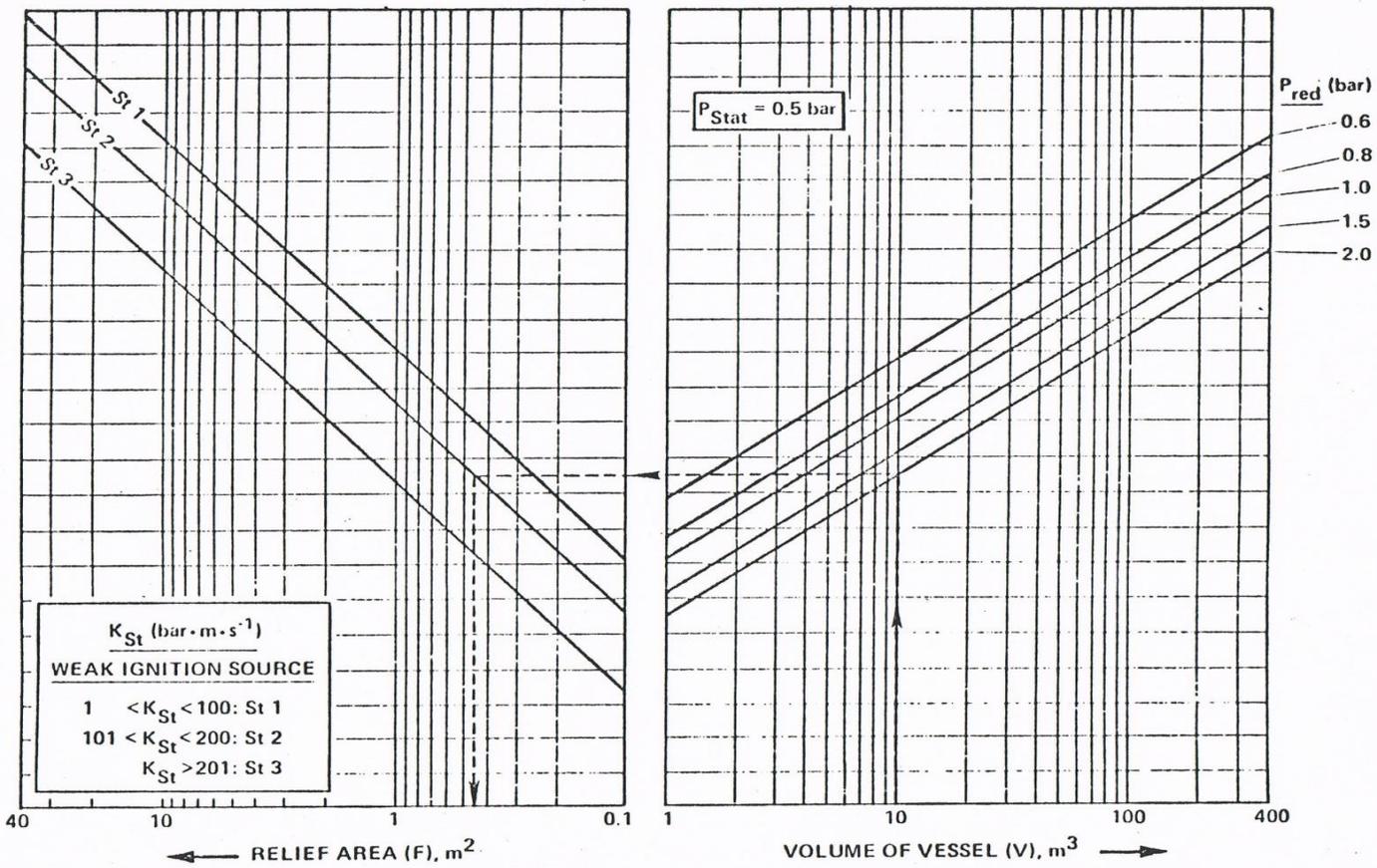


NOMOGRAPH I, Hydrogen



Esplosioni

BULLETIN HE-128
Nomograph 3 of 10



NOMOGRAPH C, Dusts

We cannot anticipate all conditions under which this information and our products, or the products of other manufacturers in combination with our products, may be used. We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety and suitability of our products, either alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each such product, or product combination, for their own purposes. Unless otherwise agreed in writing, we sell the products without warranty, and buyers and users assume all responsibility and liability for loss or damage arising from the handling and use of our products, whether used alone or in combination with other products.



Esplosioni

Le deflagrazioni di vapori quando avvengono all'interno di un volume chiuso vengono dette **esplosioni confinate**.

In ragione delle caratteristiche del luogo dove avvengono tali fenomeni le esplosioni possono suddividersi in tre diverse categorie:

- *Esplosioni confinate (CVCE – Confined Vapour Cloud Explosion)*
- *Esplosioni parzialmente confinate (CVCE – Confined Vapour Cloud Explosion with VENT)*
- *Esplosioni non confinate (UVCE - Unconfined Vapour Cloud Explosion)*

Esse si distinguono, infatti, in relazione alle condizioni oggettive del “**contenitore**” nel quale hanno luogo.



Esplosioni

La pressione internamente generata è determinata dall'equilibrio tra la produzione dei gas combusti e la fuoriuscita dei gas attraverso l'apertura di sfogo.

Infatti se il contenitore è dotato di *vents* (vani privi di serramenti, superfici di minor resistenza quali le finestre vetrate presenti sulle pareti di chiusura d'ambito esterno) la pressione al suo interno aumenta in modo *relativamente* lento e soprattutto non raggiunge picchi di sovrappressione rilevanti.



Esplosioni

Il gradiente di pressione con cui la pressione massima viene raggiunta (dp/dt) e la pressione massima raggiunta nella esplosione (P_{max}) sono influenzati da alcuni parametri fisici tra cui i più importanti sono:

- la geometria del contenitore;
- il grado di riempimento da parte della miscela infiammabile;
- la concentrazione della miscela infiammabile; le esplosioni più severe si hanno con concentrazioni stechiometriche che corrispondono a valori intermedi del range di esplosibilità;
- la turbolenza della nube infiammabile;
- l'energia di innesco

Il gradiente di pressione, parametro più significativo per la caratterizzazione della violenza di una esplosione è dato dalla cosiddetta *legge cubica*:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K_G}{\sqrt[3]{V}}$$

essendo

K_G la costante del gas o della polvere

V il volume del contenitore della deflagrazione

Dalla quale si evince che più piccolo è il volume all'interno del quale avviene l'esplosione, più violenta sarà il fenomeno e più severe saranno le conseguenze.



Esplosioni

Gli effetti meccanici, ma anche quelli termici, sono connessi con la rapidità del fenomeno, cioè a dire in relazione alla velocità di propagazione della combustione all'interno delle nubi infiammabili.

Quando l'atmosfera esplosiva si forma ed esplode in un volume chiuso il fenomeno viene definito "*esplosione confinata*";

Al riguardo occorre distinguere le dimensioni del volume del "contenitore" della nube esplosiva e soprattutto quali siano le superfici libere di aerazione e/o superfici di minor resistenza, comunemente dette "sfoghi" o "vent".



Esplosioni

In una esplosione confinata, la pressione è generata all'interno dell'ambiente chiuso come conseguenza del processo di combustione.

Inizialmente i reagenti freddi, gas ed aria, bruciano dando origine ai prodotti di combustione ad alta temperatura.

Se l'espansione del volume dei prodotti di combustione molto caldi, e perciò meno densi, è limitata dal confinamento la pressione salirà.



Esplosioni

Una esplosione di nubi di idrocarburi completamente confinata in un volume capace di resistere ad elevate pressioni (ad esempio una sfera di acciaio per prove sperimentali) potrebbe generare una pressione fino a circa 9 bar.

Questa pressione è di molto superiore a quella che qualsivoglia edificio è in grado di sopportare.



Esplosioni

Infatti stante o meno la presenza di sfoghi ad un certo momento una sezione più debole della struttura di confinamento cederà comunque ad una pressione notevolmente più bassa, e permetterà ai gas di avere sfogo al di fuori dell'ambiente chiuso.

Questo attenua il carico di pressione sulla parte restante della struttura.

La natura, le dimensioni e la ubicazione degli sfoghi assumono una rilevanza determinante nella economia del fenomeno, mitigandone gli effetti.

Qualora l'atmosfera esplosiva fosse stata presente anche nel vespaio, potrebbe essere stato questo il motivo della violenza di esplosione registrata per il caso in esame



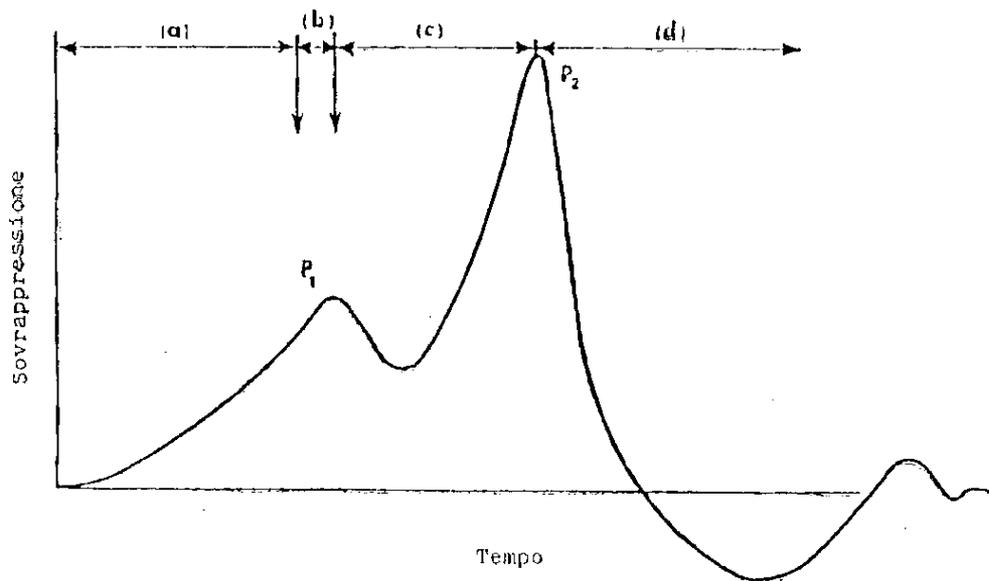
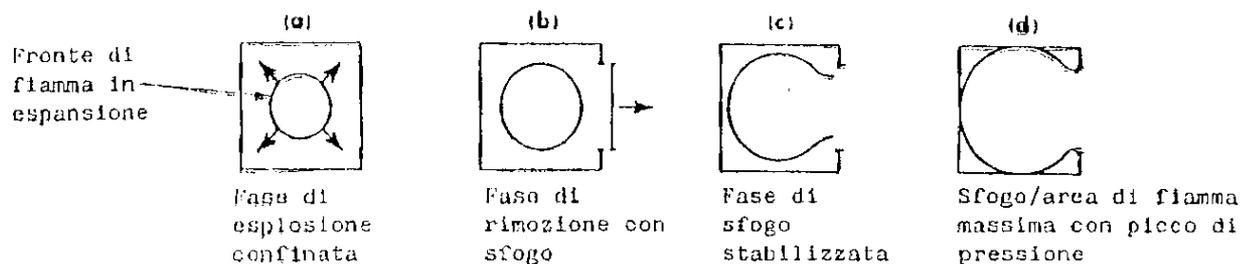
Esplosioni

Nelle esplosioni confinate a carattere deflagatorio la pressione all'interno del contenitore aumenta progressivamente (ancorché con un fenomeno ad impulso) provocando dapprima il cedimento degli “sfoghi” se presenti o altrimenti delle parti più deboli, di minor resistenza meccanica.

In alcuni casi, quando la gli sfoghi sono insufficienti o addirittura inesistenti l'aumento di pressione anziché essere caratterizzato da due diversi picchi si ha un unico e più severo picco (ad elevato gradiente di pressione) fino al raggiungimento della rottura delle parti di minor resistenza.



Andamento della pressione in una esplosione confinata con sfoghi





Esplosioni

Le atmosfere esplosive oltre che da gas combustibili possono essere costituite anche da vapori infiammabili. Al riguardo si deve sottolineare che essendo un vapore un aeriforme simile ad un gas, ma con la sostanziale differenza che il vapore può essere presente in tanto in quanto è presente la sua "fase" liquida (ad esempio uno spandimento di benzina), ad una deflagrazione di una miscela vapori-aria, a causa della presenza della fase liquida, dalla quale hanno origine i vapori, fa seguito di norma un incendio che si sviluppa istantaneamente con estrema violenza, coinvolgendo rapidamente tutte le sostanze combustibili solide presenti, anche quelle "difficilmente accendibili".



Esplosioni

Le conseguenze di una esplosione correlate al valore dell'impulso positivo sono caratterizzate in modo prevalente dal gradiente di pressione (**dp/dt**) che a sua volta dipende dai seguenti fattori:

- caratteristiche del contenitore;
- concentrazione della miscela infiammabile;
- turbolenza della nube infiammabile;
- energia di innesco



Esplosioni

Infatti la violenza di una esplosione è in buona sostanza legata alla *potenza*, cioè alla rapidità con cui l'*energia* disponibile viene rilasciata.

Le grandezze che caratterizzano una esplosione sono:
il valore di picco positivo della sovrappressione (P_{max})
il gradiente di pressione con cui la pressione di picco viene raggiunta (dp/dt)

In definitiva sono i due fattori che caratterizzano l'impulso positivo della esplosione ($I_p = (P \times t)$) che si misura in $[Pa \times s]$



Esplosioni

Il *volume del contenitore* di una esplosione confinata interviene sulla violenza di esplosione agendo sul gradiente di pressione secondo la cosiddetta legge “cubica” rappresentata dalla relazione:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K_G}{\sqrt[3]{V}} \quad \text{oppure} \quad \frac{dp}{dt} = \frac{K_{ST}}{\sqrt[3]{V}}$$

- dove è il gradiente di pressione,
- K_G è la costante del gas o vapori,
- K_{ST} è la costante delle polveri
- V è il volume del contenitore di esplosione.



La turbolenza della nube infiammabile

La turbolenza di una miscela infiammabile caratterizza significativamente il gradiente di pressione e quindi in buona sostanza la violenza di una esplosione.

Infatti l'esistenza della turbolenza della miscela o la sua creazione per via della stessa esplosione aumenta la velocità del fronte di fiamma che tende a ricongiungersi con il fronte di pressione approssimandosi in tal modo al fenomeno della detonazione, fenomeno nel quale il fronte di fiamma e quello di pressione viaggiano pressoché di conserva.

Fenomeni assimilabili si possono verificare quando il fronte di fiamma si propaga tra volumi intercomunicanti, all'interno di una stessa unità abitativa, volumi nei quali deve essere comunque presente una miscela infiammabile.



L'energia di innesco

La minima energia di innesco di una nube esplosiva di gas metano si misura in mJ (millijoule).

Si tratta di una energia che qualsivoglia interruttore elettrico domestico nel suo normale funzionamento, di apertura e chiusura di un circuito, può sviluppare.

Si deve anche segnalare che di simili inneschi a basso contenuto energetico non rimane traccia alcuna.

A caratterizzare la violenza di una esplosione contribuisce anche la posizione relativa dell'innesco rispetto alla geometria della nube e la posizione di questa rispetto alla articolazione planovolumetrica del suo "contenitore".



Esplosioni

TABLE 5.1
EXPLOSION OVERPRESSURE DAMAGE ESTIMATES

psig	Pa	mbar
0.03	210.92	2.11
0.04	281.22	2.81
0.10	703.06	7.03
0.15	1054.59	10.55
0.30	2109.18	21.09
0.40	2812.24	28.12
0.5	3515.30	35.15
0.70	4921.42	49.21
1.00	7030.60	70.31
1.30	9139.78	91.40
2.00	14061.20	140.61
3.00	21091.80	210.92
4.00	28122.40	281.22
5.00	35153.00	351.53
7.00	49214.20	492.14
8.00	56244.80	562.45
9.00	63275.40	632.75
10.00	70306.00	703.06
15.00	105459.00	1054.59

Overpressure* (psig)	Expected Damage
0.03	Occasional breaking of large windows already under stress.
0.04	Loud noise (143 dB); sonic boom glass failure.
0.10	Breakage of small windows under strain.
0.15	Typical pressure for glass failure.
0.30	Some damage to house ceilings; 10% window glass breakage.
0.40	Limited minor structural damage.
0.50-1.0	Windows usually shattered; some window frame damage.
0.7	Minor damage to house structures.
1.0	Partial demolition of houses; made uninhabitable.
1.0-2.0	Corrugated metal panels fail and buckle. Housing wood panels blown in.
1.0-8.0	Range for slight to serious injuries due to skin lacerations from flying glass and other missiles.
1.3	Steel frame of clad building slightly distorted.
2.0	Partial collapse of walls and roofs of houses.
2.0-3.0	Non-reinforced concrete or cinder block walls shattered.
2.3	Lower limit of serious structural damage.
2.4-12.2	Range for 1-90% eardrum rupture among exposed populations.
2.5	50% destruction of home brickwork.
3.0	Steel frame building distorted and pulled away from foundation.
3.0-4.0	Frameless steel panel building ruined.
4.0	Cladding of light industrial buildings ruptured.
5.0	Wooded utility poles snapped.
5.0-7.0	Nearly complete destruction of houses.
7.0	Loaded train cars overturned.
7.0-8.0	8-12 in. thick non-reinforced brick fail by shearing of flexure.
9.0	Loaded train box cars demolished.
10.0	Probable total building destruction.
14.5-29.0	Range for 1-99% fatalities among exposed populations due to direct blast effects.

*These are the peak pressures formed in excess of normal atmospheric pressure by blast and shock waves.



Esplosioni

PROCEDURA PER UNA INDAGINE: INTERROGATIVI CUI DARE UNA RISPOSTA

DI CHE TIPO DI ESPLOSIONE SI E' TRATTATO ?

QUALE E' STATO IL "TEATRO" DELL'ESPLOSIONE ?

QUALI LE CONSEGUENZE ?

E' STATA UNA ESPLOSIONE DA GAS ?

DI QUALE GAS SI E' TRATTATO ?

QUALE E' STATA LA SUA "SORGENTE" ?

DI QUALE TIPO DI RILASCIO SI E' TRATTATO ?

QUALE E' STATA LA SUA PORTATA ?

QUALE IL QUANTITATIVO DI GAS RILASCIATO ?

QUALE LA SUA "CONCENTRAZIONE" NEL VOLUME DI ESPLOSIONE ?

QUALE E' STATO L'INNESCO ?

QUALE E' STATO IL BILANCIO ENERGETICO DELLA ESPLOSIONE ?

Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



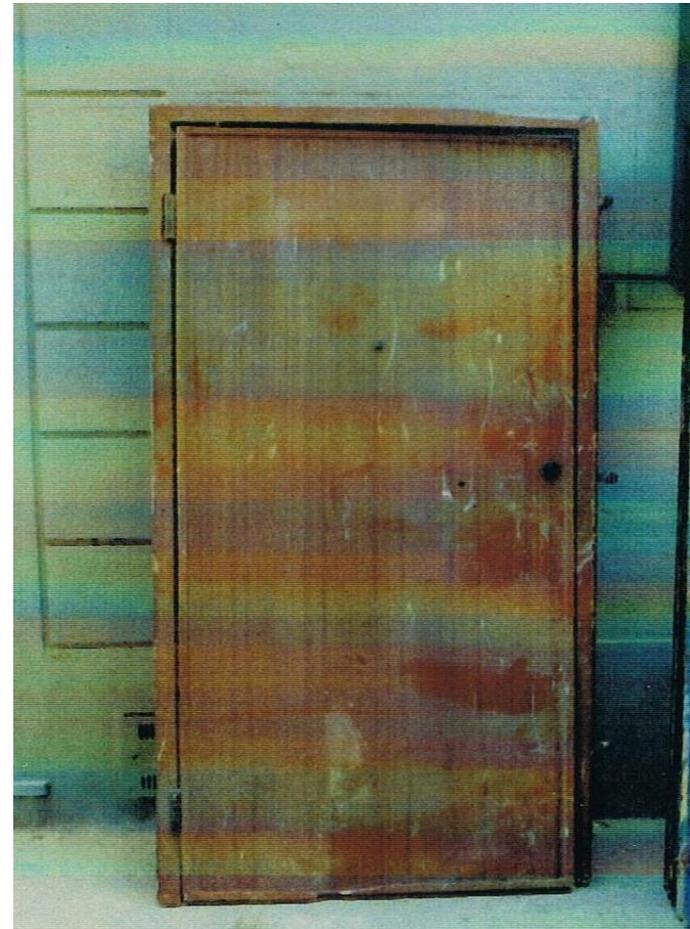
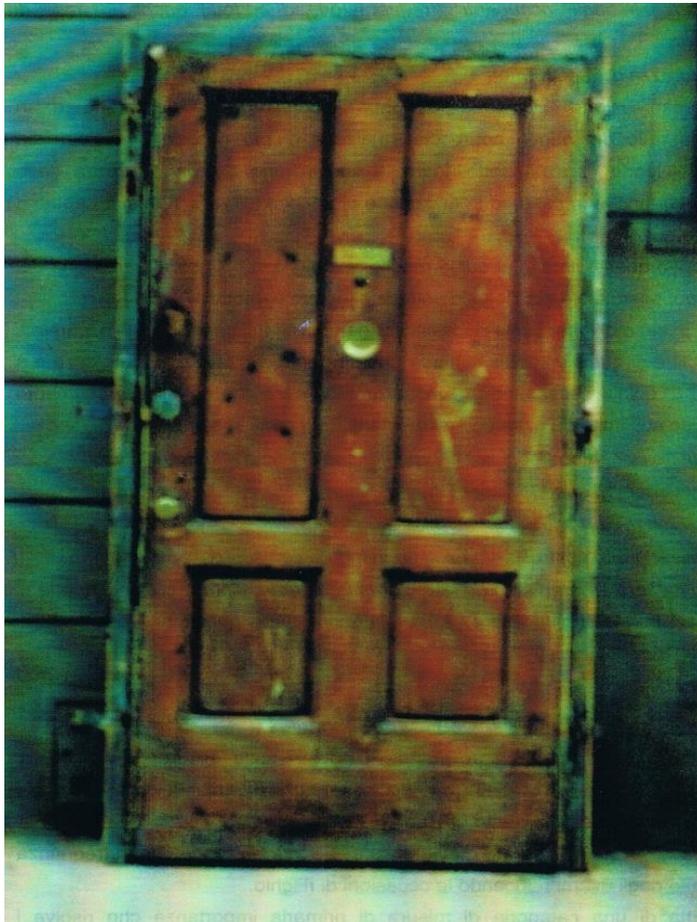
Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni





Gli altri eventi

- **I rilasci**
- **Gli scoppi**
- **II BLEVE**
- **Il flashfire**
- **Il fireball**



Le esplosioni fisiche (scoppi)

- **BURST VESSEL:** scoppio di un recipiente in pressione
- **B.L.E.V.E. (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)** esplosione di un vapore che si espande da un liquido che bolle
- **R.P.T. (Rapid Phase Transition)** rapido cambiamento di fase
- **ROLL OVER (R.O.)**
- **R.A.R. (Run Away Reaction)**
- **ROTTURA FRAGILE**



Gli altri eventi

Scoppi

A differenza di una esplosione che in buona sostanza è una rapida reazione chimica di combustione, si intende per **“scoppio”** un fenomeno soltanto **fisico** di rilascio istantaneo di energia meccanica di sovrappressione e di lancio di proietti, in conseguenza della rottura improvvisa del contenitore in pressione.

Inoltre se all'interno del contenitore vi è ad esempio un gas liquefatto o criogenico allo scoppio fa seguito un rilascio di gas che una volta liberatosi del proprio contenitore riassume, evaporando in tempi brevi (flash), il suo stato di aeriforme per poi diffondersi, secondo le modalità di diffusione proprie dei gas pesanti, nell'ambiente circostante.

Alla istantanea evaporazione, nota nel gergo tecnico come **“rapida transizione di fase”** (*Rapid Phase Transition - RPT*), sono collegati aumenti di pressione che se avvengono in ambiente confinato possono dar luogo ad effetti meccanici con conseguenze sulla stabilità delle strutture di minor resistenza.

In buona sostanza, il fenomeno fin qui descritto si definisce uno **“scoppio”** di un “contenitore in pressione” per via del cedimento del suo involucro esterno.



Gli altri eventi

Ma se all'interno del contenitore vi è ad esempio un gas di petrolio liquefatto (Liquified Petroleum Gas - LPG) allo scoppio fa seguito un rilascio di gas combustibile che una volta liberatosi del proprio contenitore dà luogo ad ulteriori fenomeni, stavolta chimico-fisici.

Infatti se durante la diffusione, la miscela gas/aria che, nel suo espandersi, certamente assume valori interni al cosiddetto campo di infiammabilità, risultando esplosiva, qualora trovi un innesco, si verificano ulteriori rilasci energetici capaci di esiti ancora più gravi.

Le ragionevoli cause che possono condurre ad uno scoppio possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- azione esterna
- rottura fragile
- aumento di pressione interna (B.L.E.V.E.)



Esaminiamole singolarmente.

Per **azione esterna** si deve intendere una azione meccanica dovuta ad un urto o ad una caduta.

Per **rottura fragile** di un materiale metallico si intende il cedimento che avviene istantaneamente, senza deformazione plastica, in modo analogo a quanto avviene nei materiali comunemente noti come fragili (vetro, porcellana, etc.).

Nei materiali metallici questo tipo di frattura è da considerarsi una eccezione che però deve essere temuta perché si manifesta senza segni premonitori. Il cedimento fragile dei materiali metallici è di norma legato alla esistenza ed alla propagazione di una microlesione passante o non passante (cricca) ed è grandemente influenzato dalla temperatura.

Infatti al decrescere della temperatura la *tenacità* di un materiale metallico degenera bruscamente in *fragilità* e la cricca assume il ruolo di punto di invito alla rottura avendosi in quel punto una forte concentrazione delle tensioni.



Gli altri eventi

L'ipotesi dello scoppio per **aumento di pressione interna** appartiene alla casistica più usuale e frequente riguardante i contenitori gas combustibili liquefatti sotto pressione o compressi.

Infatti è noto che a volume costante aumentando la temperatura, la tensione del vapore (pressione) aumenta, cosicché ogniqualvolta un siffatto contenitore viene investito da un apporto calorico (ad es. coinvolgimento in un incendio) lo scoppio deve essere considerato un evento atteso cioè a dire con probabilità di accadimento prossima alla certezza.

Il fenomeno fisico in questione va comunemente sotto l'acronimo di **B.L.E.V.E.** (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) è in effetti un fenomeno fisico cioè a dire uno scoppio che si realizza a seguito di una rapida depressurizzazione di un recipiente in pressione contenente un liquido ad una temperatura sufficientemente superiore a quella di ebollizione, a pressione atmosferica.

Infatti all'aumentare della temperatura della parete esterna del serbatoio, si produce il flash della sostanza contenuta ed un indebolimento della parete del recipiente: il risultato finale è il cedimento della struttura e la liberazione di grossi quantitativi di energia verso l'esterno.

Il termine BLEVE, coniato negli USA è ormai entrato nella terminologia tecnica internazionale per definire la rottura catastrofica di un serbatoio (vessel) contenente un gas liquefatto.

Gli altri eventi

Una esplosione BLEVE si verifica nelle seguenti condizioni:

- liquido surriscaldato;
- brusca riduzione della pressione a seguito della rottura improvvisa del serbatoio;
- condizioni di temperatura e pressione tali da dar luogo al fenomeno di rapida vaporizzazione (flash).



Viste di un poolfire di propano con engulfment del serbatoio e successivi BLEVE e FIREBALL



Si consideri che la quota parte di energia disponibile per la produzione dell'onda d'urto (sovrapressione ad impulso) è pari al 40 % della energia totale rilasciata dal gas durante l'esplosione.

Per la caratterizzazione delle principali grandezze connesse ad un BLEVE sono disponibili molti metodi e modelli di calcolo.

Il metodo del TNT equivalente (tritolo equivalente) si basa sulla equivalenza tra l'energia rilasciata da un gas che si espande dalla pressione iniziale a quella ambiente e l'energia di una massa equivalente di tritolo.

Al riguardo esistono due approcci.

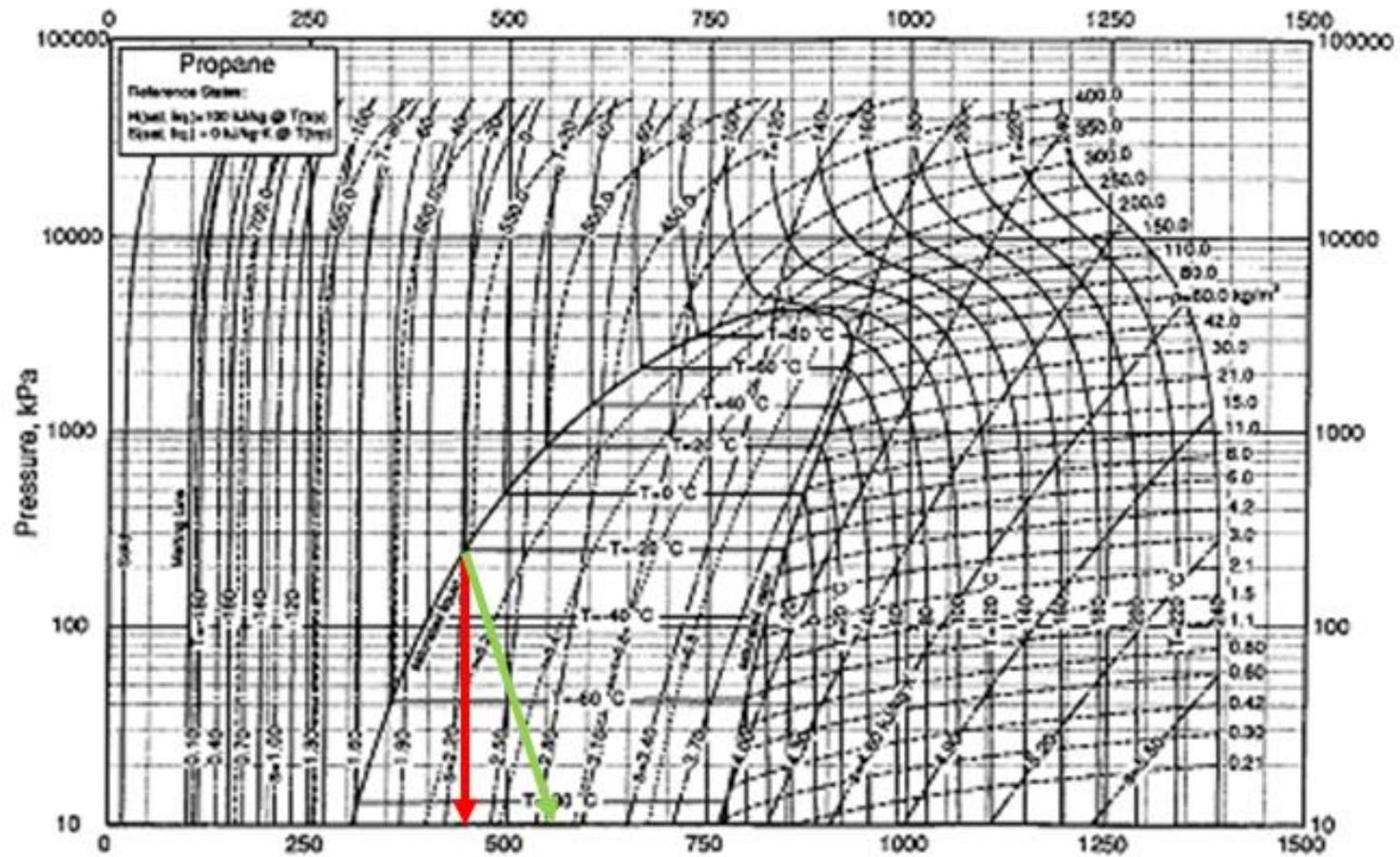
Un primo più conservativo ai fini della sicurezza in fase predittiva delle conseguenze è quella che considera la variazione di energia interna del gas avvenga in modo isoentropico (entropia costante).



Gli altri eventi

Un secondo approccio più recente, meno conservativo in termini di sicurezza, ma più realistico è quello che considera la trasformazione ad entropia crescente, come di fatto avviene in tutti i fenomeni reali (è noto infatti che il mondo è un sistema ad entropia crescente).

Gli altri eventi





Gli altri eventi

L'utilizzo di entrambi i metodi evidenzia che la magnitudo della esplosione, è più grande quando si ipotizza che lo scoppio si verifica quando il serbatoio è pieno e che al diminuire del quantitativo di gas in fase liquida diminuisce in ogni caso tale magnitudo.

Calcolato il quantitativo di TNT equivalente, mediante i normogrammi del TNO e del Baker si può ricavare la sovrappressione alle distanze in esame attraverso la relazione:

$$Z = \frac{d}{\sqrt[3]{M_{TNT}}}$$

dove:

Z = distanza normalizzata

d = distanza effettiva dal centro di esplosione

M_{TNT} = quantitativo di TNT equivalente

Dalla energia rilasciata sotto forma di onda d'urto viene calcolata l'energia conferita ai frammenti.



Gli altri eventi

Dalle condizioni nelle quali avviene la rottura, nota la frazione di evaporato (flash) a pressione atmosferica, si determina:

- l'energia associata alla espansione;

Dalle condizioni al momento del collasso si stabilisce la ripartizione della energia tra:

- energia rilasciata sotto forma di onde d'urto (max 30-40%)
- energia conferita (come energia cinetica) ai frammenti

I danni derivanti da un BLEVE sono dovuti (in ordine di importanza):

- produzione di un onda d'urto;
- proiezione di frammenti;
- formazione di un fireball se il liquido rilasciato è infiammabile.

Il rilascio istantaneo di una sostanza infiammabile, con temperatura di ebollizione inferiore alla temperatura ambiente, comporta un fenomeno di rapida vaporizzazione (flash).

Nel caso in cui la nube di vapori infiammabili formatasi dopo il rilascio venga immediatamente innescata si ha il fenomeno del **fireball** o sfera di fuoco.

Per fireball si intende una combustione turbolenta a seguito di innesco durante la fase di espansione della nube (vapore + goccioline) prodotta dalla evaporazione a flash.

La rapida combustione dei vapori e la conseguente riduzione della densità della nube provoca l'ascensione dei gas con la formazione di un volume di fuoco a forma di fungo che termina appunto con la sfera di fuoco.

All'aperto, la breve durata del fireball (pochi secondi in funzione del quantitativo di gas coinvolto), malgrado l'intensa radiazione termica che si sviluppa, comporta minori danni per le sostanze combustibili bersaglio, in quanto esse necessitano in genere tempi più lunghi per autoincendiarsi, mentre per l'uomo il fireball può causare ustioni molto gravi ed anche il decesso.



Gli altri eventi

La stima della radiazione termica sui bersagli richiede il calcolo delle seguenti grandezze:

- la superficie totale del fireball, funzione della massa del combustibile;
- l'energia irraggiata;
- la posizione del bersaglio;
- la durata del fenomeno;
- la trasmissività atmosferica.

Per poter stimare il calore irraggiato esternamente da un fireball, occorre determinare:

- dimensioni del fireball (diametro Φ e altezza H);
- durata del fenomeno (T);
- calore sviluppato.

Per risolvere questo tipo di problema esistono due approcci: il primo, più semplice, che consiste nel "congelare" il fenomeno al suo valore massimo, il secondo, decisamente più complesso, consiste nel seguire il fenomeno durante l'evolversi.

Mentre per il secondo metodo è necessario l'ausilio di complicati metodi numerici, per il primo sono disponibili in letteratura numerosi algoritmi di altrettanti autori.

- Roberts
- Fay-Lewis
- Hasegawa
- Moorhouse
- TNO



Gli altri eventi

Quando un incendio viene attivato mediante la **immediata** accensione dei vapori provenienti da spandimento (**flash**) volontario di un liquido infiammabile (accelerante di fiamma), le prime due fasi dell'incendio coincidono talché esso ha inizio con una **flashfire** la cui intensità dipende dalla natura del liquido (tensione del vapore, etc.) e dal suo quantitativo.

Ciò attiva anche l'evaporazione del combustibile ancora in fase liquida talché al **flashfire** fa seguito un altro e più duraturo fenomeno che va sotto il nome di **poolfire**.

Se tra lo spandimento del liquido infiammabile e l'accensione dei vapori provenienti dalla pozza (pool) intercorre un lasso di tempo sufficiente a formare una nube di vapori/aria nel campo di esplosibilità, possono aversi delle deflagrazioni che nei loro effetti poco si discostano dalle esplosioni vere e proprie dovute ad ordigni esplosivi (detonazioni).



Flashfire

A seguito di uno spandimento di liquido infiammabile ad elevata tensione del vapore (come ad esempio la benzina), anche a temperature non elevate si ha il fenomeno della evaporazione (flash), con produzione di vapori inizialmente al di sopra della fase liquida che, se accesi **prima** che gli stessi abbiano il tempo di formare con l'aria una *nube* di più grandi dimensioni nel campo di esplosibilità, danno luogo ad una *vampata* che va sotto il nome di **flashfire**.

Il *flashfire* è caratterizzato da un rilascio di energia prevalentemente termica e da un modesto rilascio di energia meccanica ed in genere presuppone una immediatezza tra l'evaporazione (flash) e l'innesco.



Gli altri eventi

Poolfire

In presenza di uno spandimento di liquido infiammabile anche a temperature non elevate si ha il fenomeno della evaporazione (flash), con produzione di vapori inizialmente al di sopra della fase liquida che, una volta accesi, sostengono la combustione fino all'esaurimento della fase liquida sottostante.

Il *poolfire* è caratterizzato da un rilascio di energia esclusivamente termica.



CONCENTRAZIONE

$$\%C = 100 \cdot \frac{Q_g}{Q_a + Q_g} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{Q_g + Q_a}{V^*} \cdot t \right)} \right]$$

dove:

- $\%C$ = concentrazione in volume
- Q_g = portata del gas in m^3/h
- Q_a = ricambio orario aria in m^3/h
- V^* = volume effettivamente occupato dalla miscela gas/aria in m^3 (volume compreso tra l'intradosso del soffitto ed un piano orizzontale ideale a quota della sorgente del rilascio)
- t = tempo in ore



I RILASCI: PORTATA EVAPORANTE DA POZZA

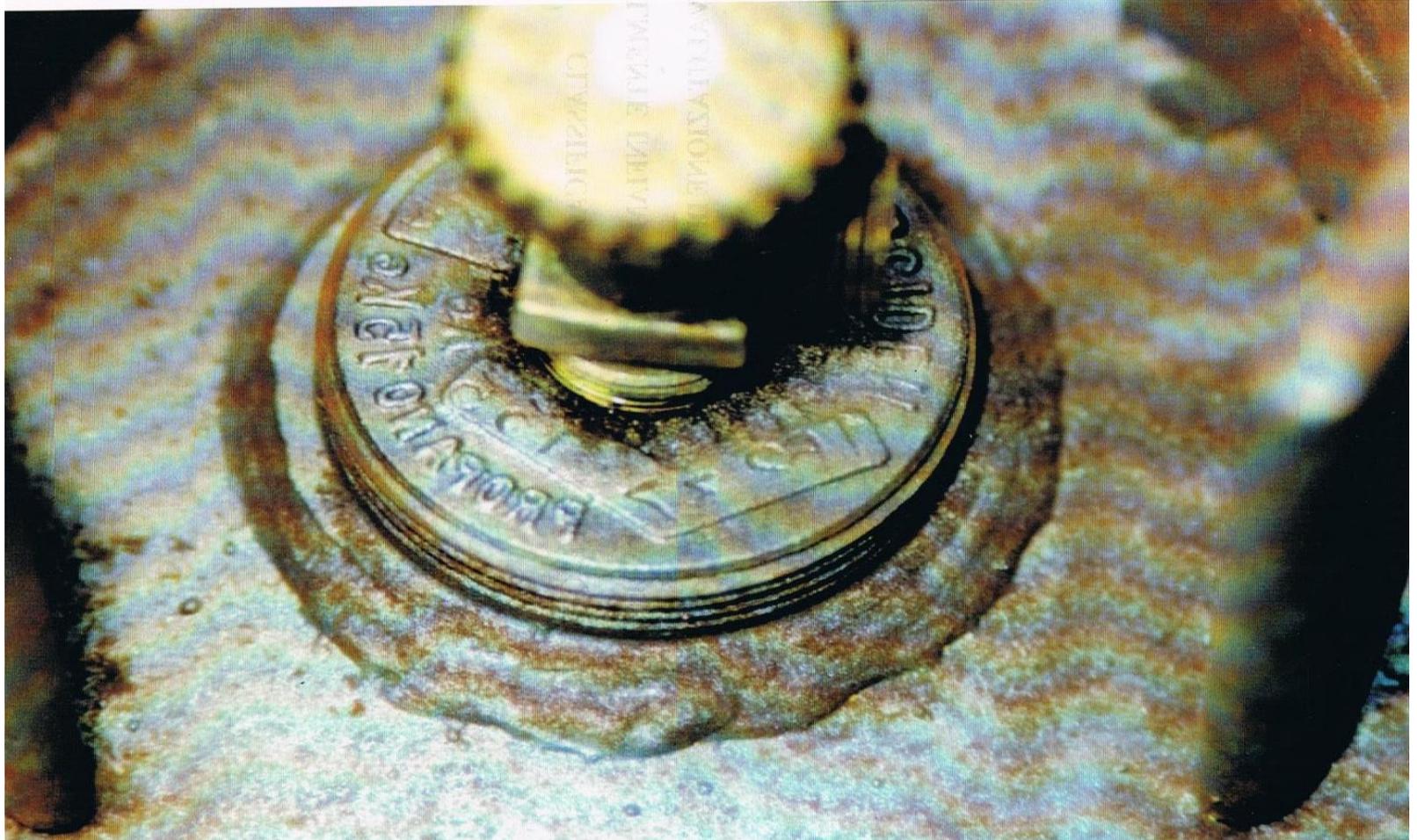
		$Q_v = \dot{Q} \cdot A_p$		$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	
essendo					
		$\dot{Q} = K_m \cdot P_{v(Tps)} \cdot \frac{M}{R \cdot T_{ps}}$		$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$	
		$A_p = \text{area} \cdot \text{pozza}$		$\left[\text{m}^2 \right]$	
e dove					
		$K_m = C_{m\&m} \times U_w^{0,78} \times (2 \times R_{\text{pool}})^{-0,11} \times S_c^{-0,67}$		m/s	
essendo					
Costante	$C_{m\&m}$	0.004786	$\text{m}^{0,33} / \text{s}^{0,22}$		
Numero di Schmidt	S_c	0.8	[-]		
Velocità aria	U_w	0.005	[m/s]		
Diametro pozza eq.	d_{eq}	1.129	[m]		
Superficie pozza	A_p	1.00	[mq]		$d_{eq} = \sqrt{\frac{4 \times A_p}{\pi}}$
Peso molecolare	M	0.1595	kg/mole		
Pressione ambiente	P_t	101315	[Pa]		
Costante dei gas	R	8.315	J/molexK		
Temperatura pozza	T_{ps}	283	[°K]		
Tensione vapore	$P_w(Tps)$	16000	[Pa]		Rault
Coeff. evaporazione	K_m	0.000088	[m/s]		
Portata evaporante	Q'	0.00009540	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$	0.343	kg/h



RILASCIO PROPANO IN FASE GAS

RILASCIO PROPANO FASE GAS						
(da regolatore di pressione, bombola diritta)						
Dati per il calcolo						
A ₀ =	5.02E-05	m ²		D =	0.008 m	
CD =	0.61					
P ₀ =	100030	Pa	$\frac{P_a}{P_0} =$	0.9997		
P _a =	100000	Pa				
T =	288	°K				
M =	50					
R =	8315					
γ =	1.13					
ρ ₀ =	2.2	kg/m ³	$\frac{P_a}{P_0} \geq \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$	0.9709 > 0.9390	(rilascio subcritico)	
	$\frac{2}{\gamma} =$	1.7699	$\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} =$	16.3846	$\frac{\gamma - 1}{\lambda} =$	0.1150
	$\frac{2}{\gamma - 1} =$	8.6923	$\frac{2}{\gamma + 1} =$	0.9390	$\frac{\gamma + 1}{2} =$	1.065
$q_s = C_d \cdot A_0 \cdot \psi_0 \cdot \sqrt{\rho_0 \cdot P_0 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$			0.0002646 Kg/s			
dove per rilascio in condizioni subcritiche ψ vale						
$\psi_0 = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]}$			0.0290			
	Q	=	1.0	Kg/h		
v	$\frac{Q \cdot R \cdot T}{M \cdot P}$	=	0.5	m ³ /h		

Gli altri eventi





Gli altri eventi



Gli altri eventi



Gli altri eventi

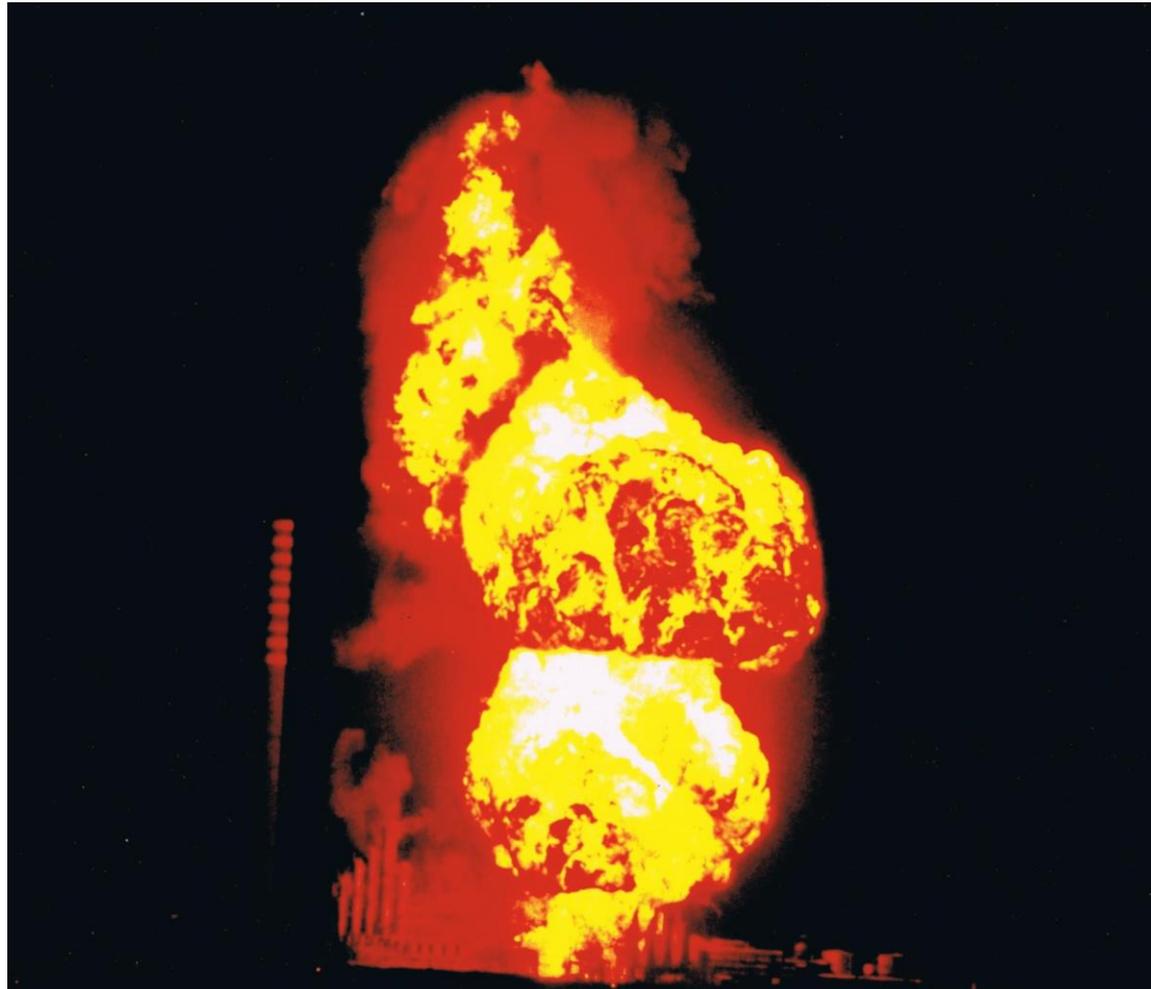


Gli altri eventi

FIRE BALL



Eventi: FIREBALL





Eventi: FIREBALL

Irraggiamento da Fireball - Modello a sorgente puntiforme

$$Q = \tau \cdot E \cdot F$$

20 kW/m²

dove:

$$F = \frac{D^2}{4 \cdot d^2}$$

fattore di vista (recettore a terra)

0.0625

$$E = \frac{\eta \cdot m \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t}$$

potere emissivo fiamma

0.474 MJ/s*m¹

$\tau =$ **trasmissività atmosferica**

0.675

essendo:

$\eta =$ **la frazione di Q che viene irradiata**

0.4

d = distanza dal recettore

100 m

m = massa che partecipa al fireball (propano)

1000 kg

H_c = calore di combustione (propano)

46.49 MJ/kg

D = diametro palla di fuoco

50 m

t = durata palla di fuoco

5 s

La condensazione

