



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

ESPLOSIONI



Docente: ing. Mauro Marchini

mgm@mauromarchini.com



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.



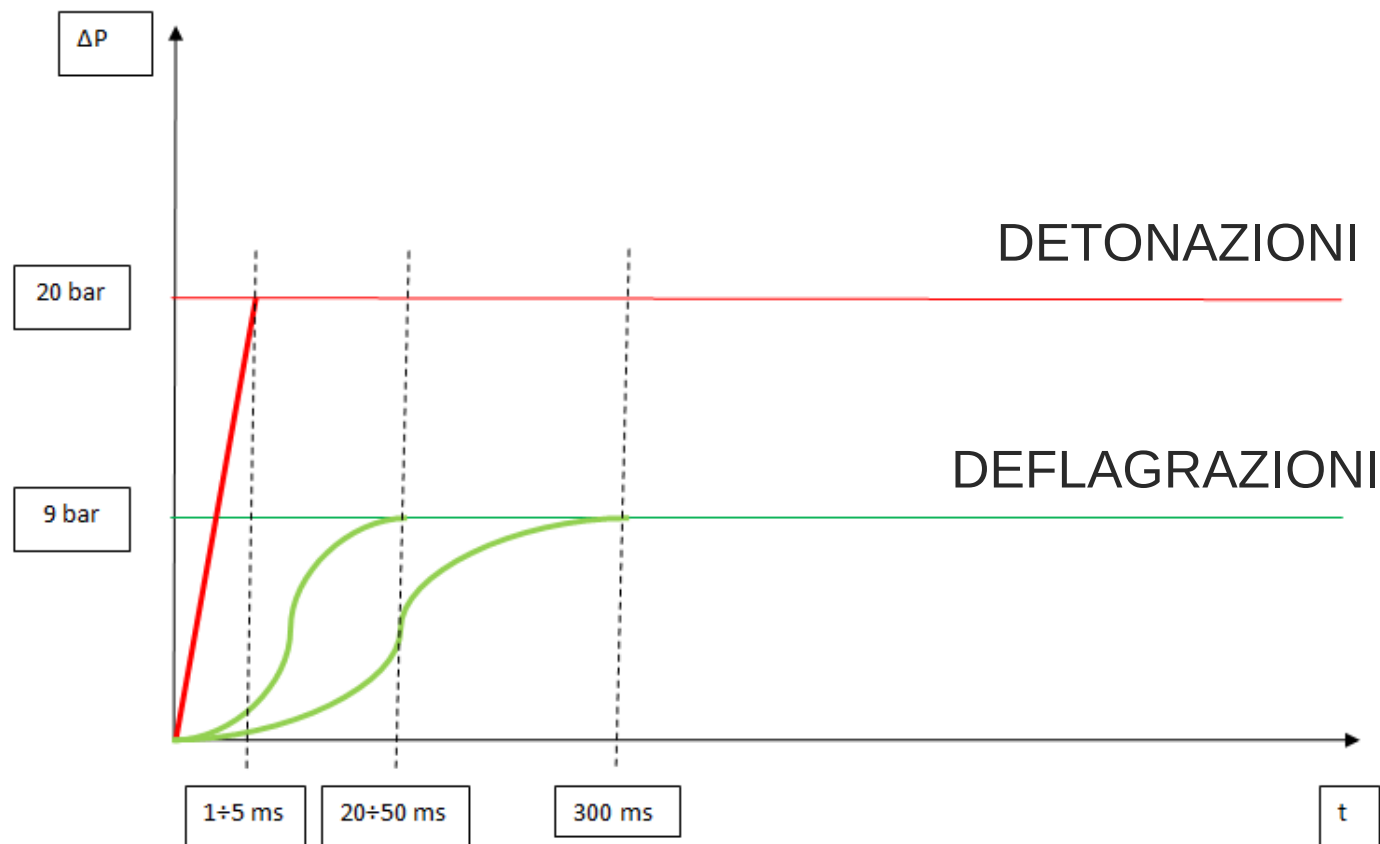
Esplosioni

Le **detonazioni** si esauriscono in alcuni millisecondi ($1 \text{ ms} \div 5 \text{ ms}$) mentre le **deflagrazioni** si estrinsecano in tempi di alcune decine di millisecondi ($20 \text{ ms} \div 50 \text{ ms}$) 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.**
 - ✓ **Confinate**
 - ✓ **Confinate 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".

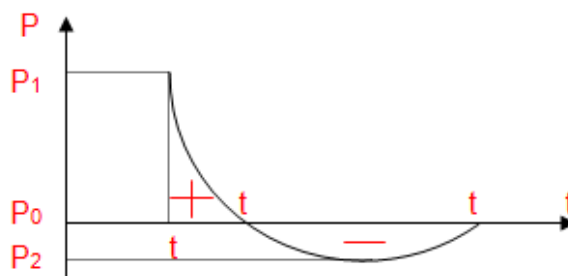
Nei confronti delle persone esposte gli effetti si estrinsecano, in generale, in ustioni generalizzate, di gravità inversamente proporzionale alla protezione realizzata dagli abiti ed alla distanza dal centro di fuoco.

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

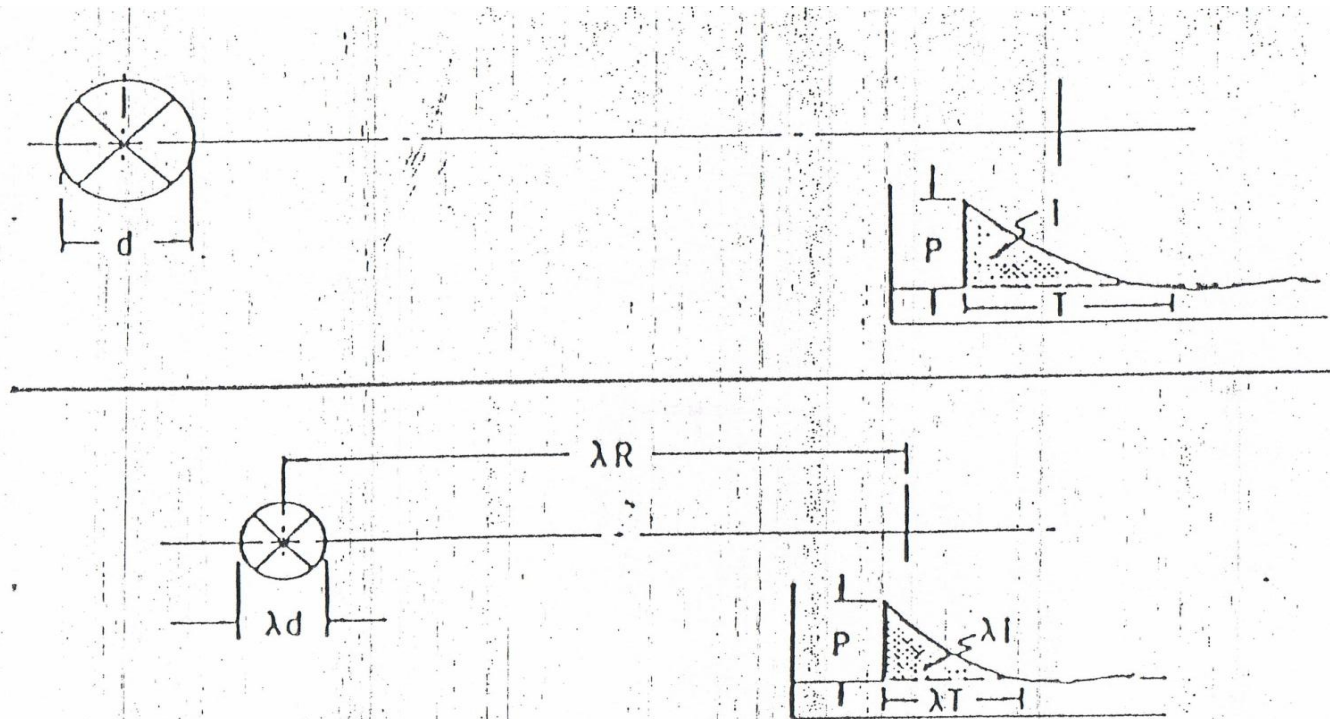


Figure 2-2. Hopkinson-Cranz Blast Wave Scaling



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

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

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

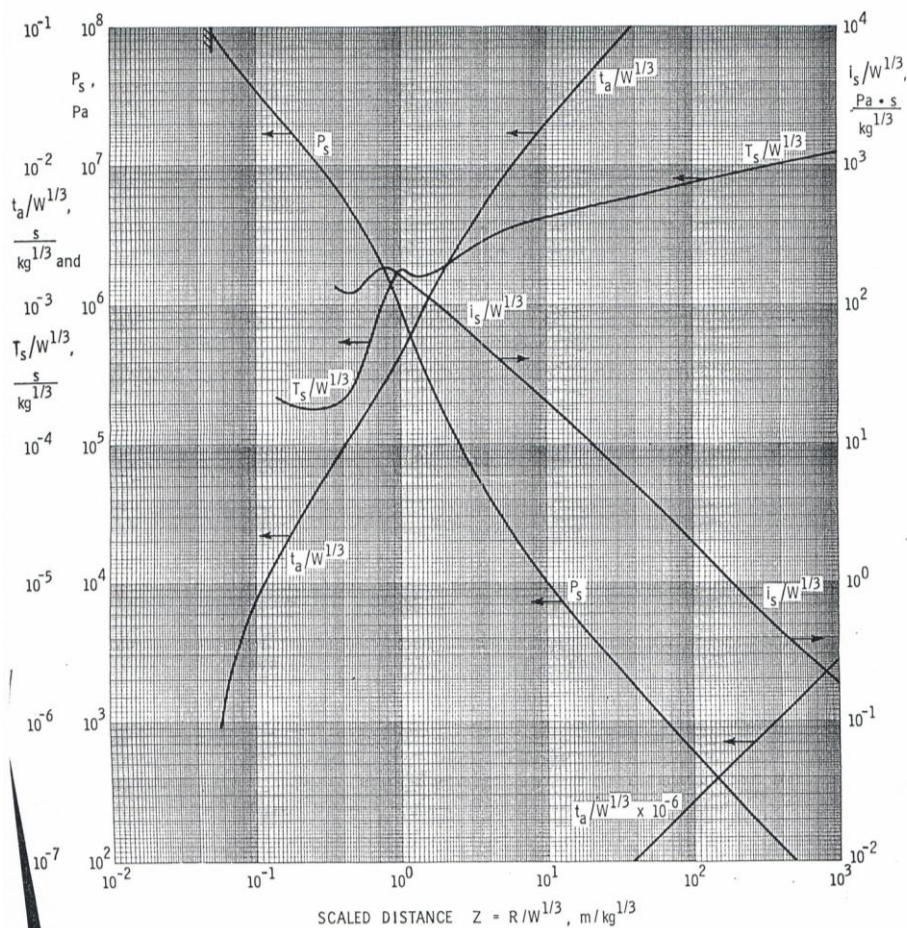


Figure 2-45. Side-On Blast Parameters for TNT

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

A13															
	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	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							W	R	P	P_r	Prob.tà morte				
35							kg	m	Pa						
36							0.2	1	216176	7.78	100%				
37							0.2	2	85909	1.40	1%				
38							0.2	3	33082	-5.19	0%				
39							0.2	4	19128	-8.97	0%				
40							0.2	5	13593	-11.34	0%				
41															
42							0.5	1	2470588	24.61	100%				
43							0.5	2	1575000	21.50	100%				
44							0.5	3	763636	16.50	100%				
45							0.5	4	164474	5.89	81%				
46							0.5	5	111111	3.18	3%				

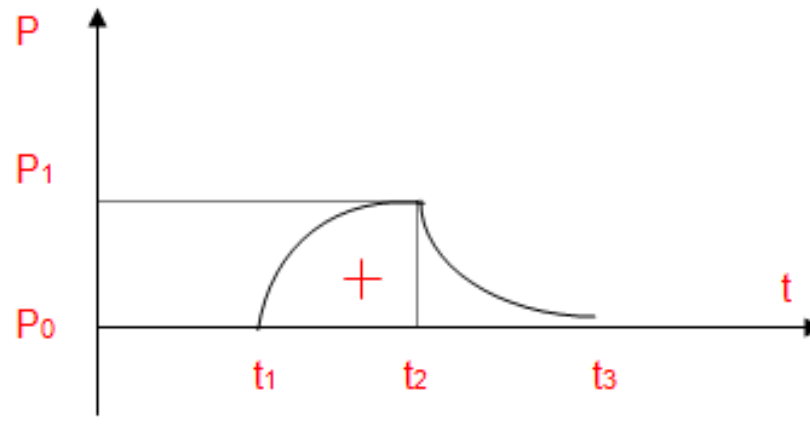
Esplosioni

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.

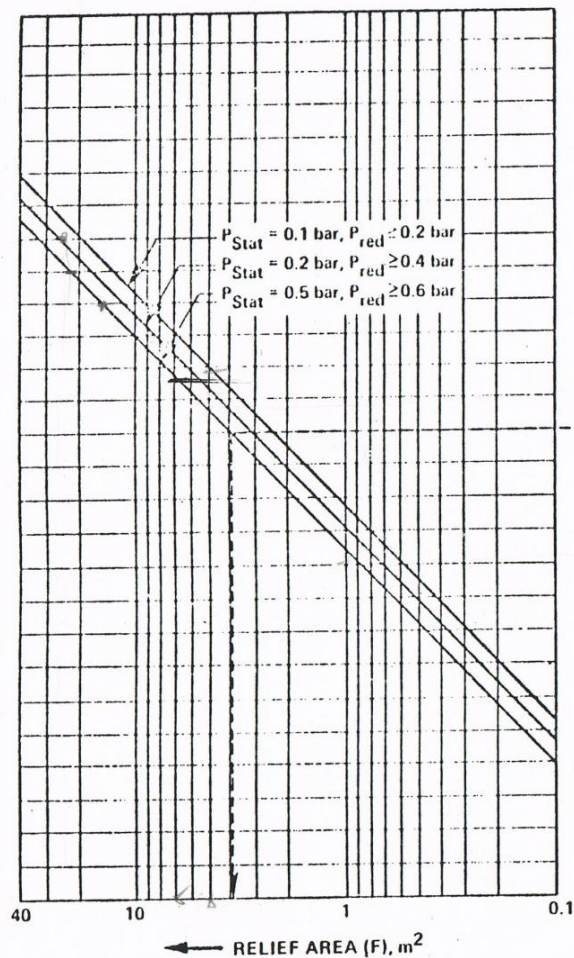
Le esplosioni di atmosfere infiammabili di gas, vapori e polveri sono di norma delle *deflagrazioni* (velocità del fronte di fiamma pari a decine di metri al secondo).

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

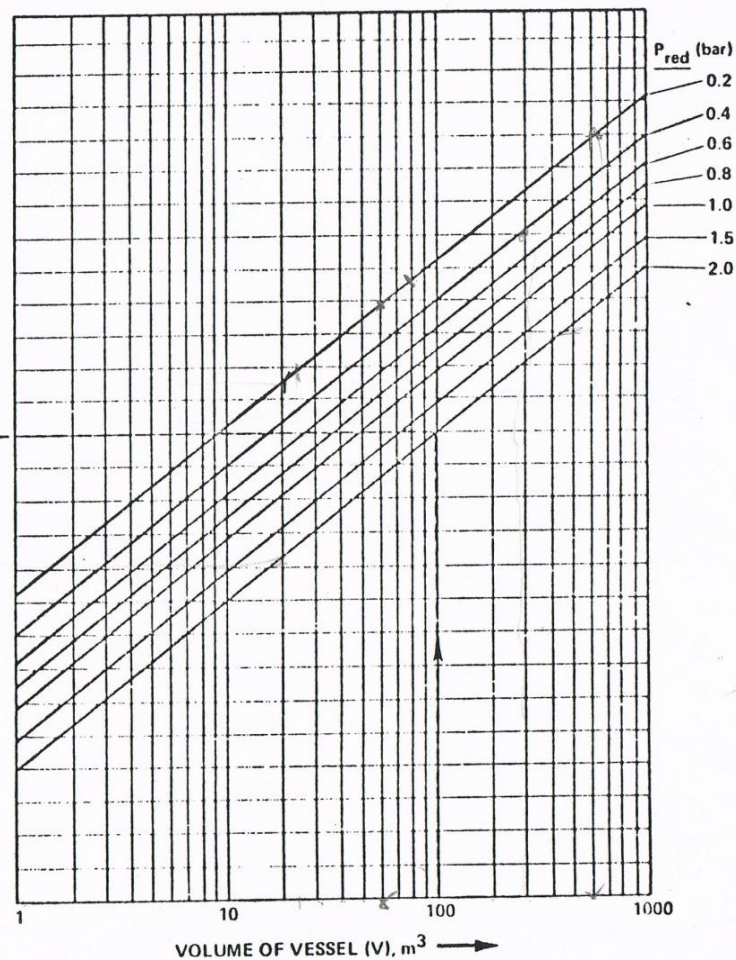


Esplosioni

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 indicated, all data are based on tests conducted under the following conditions: 1.0 bar static pressure, 1.0 bar test pressure, 1.0 bar design pressure, 1.0 bar maximum allowable working pressure, 1.0 bar test pressure, 1.0 bar design pressure, 1.0 bar maximum allowable working pressure.

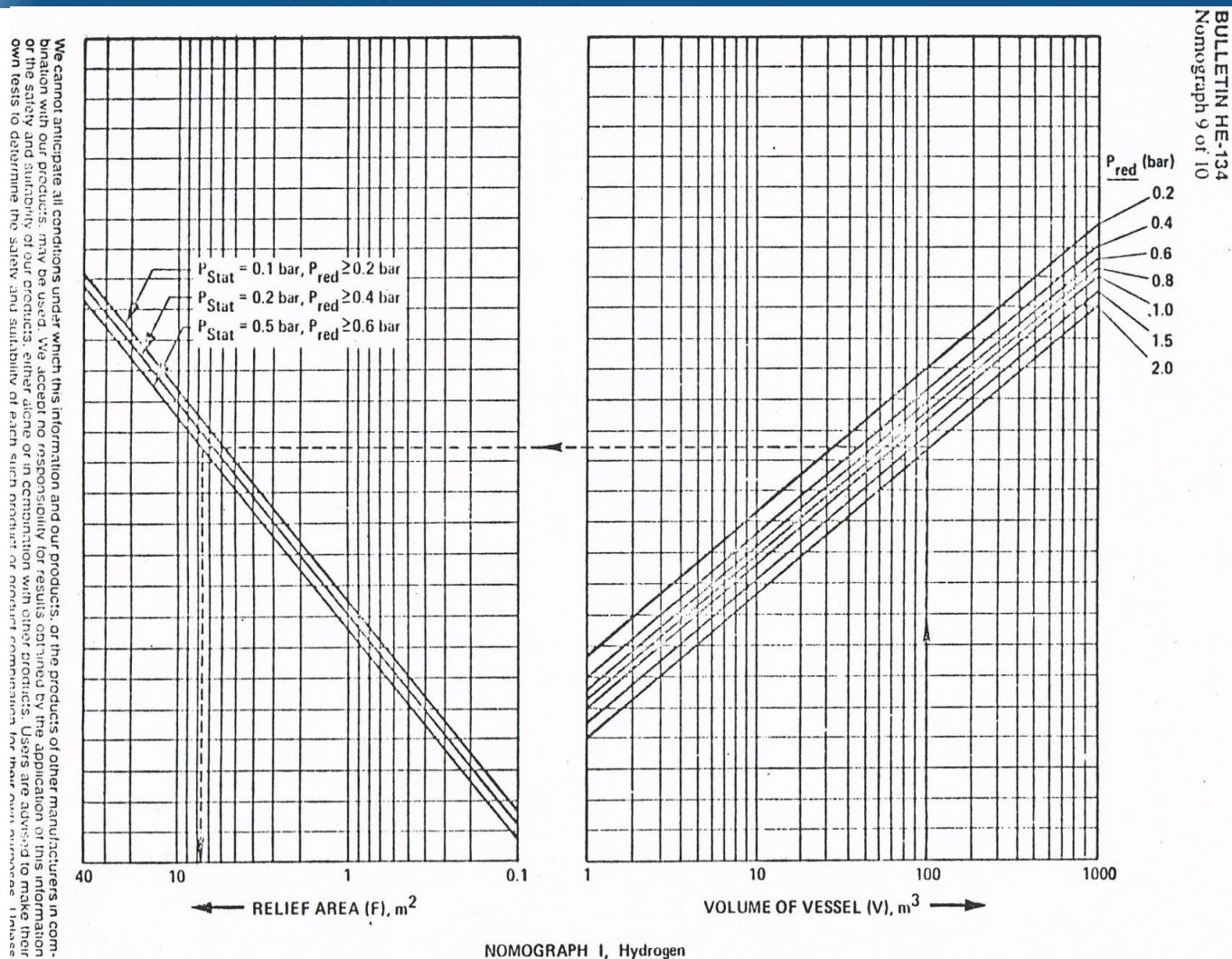


NOMOGRAPH H, Methane

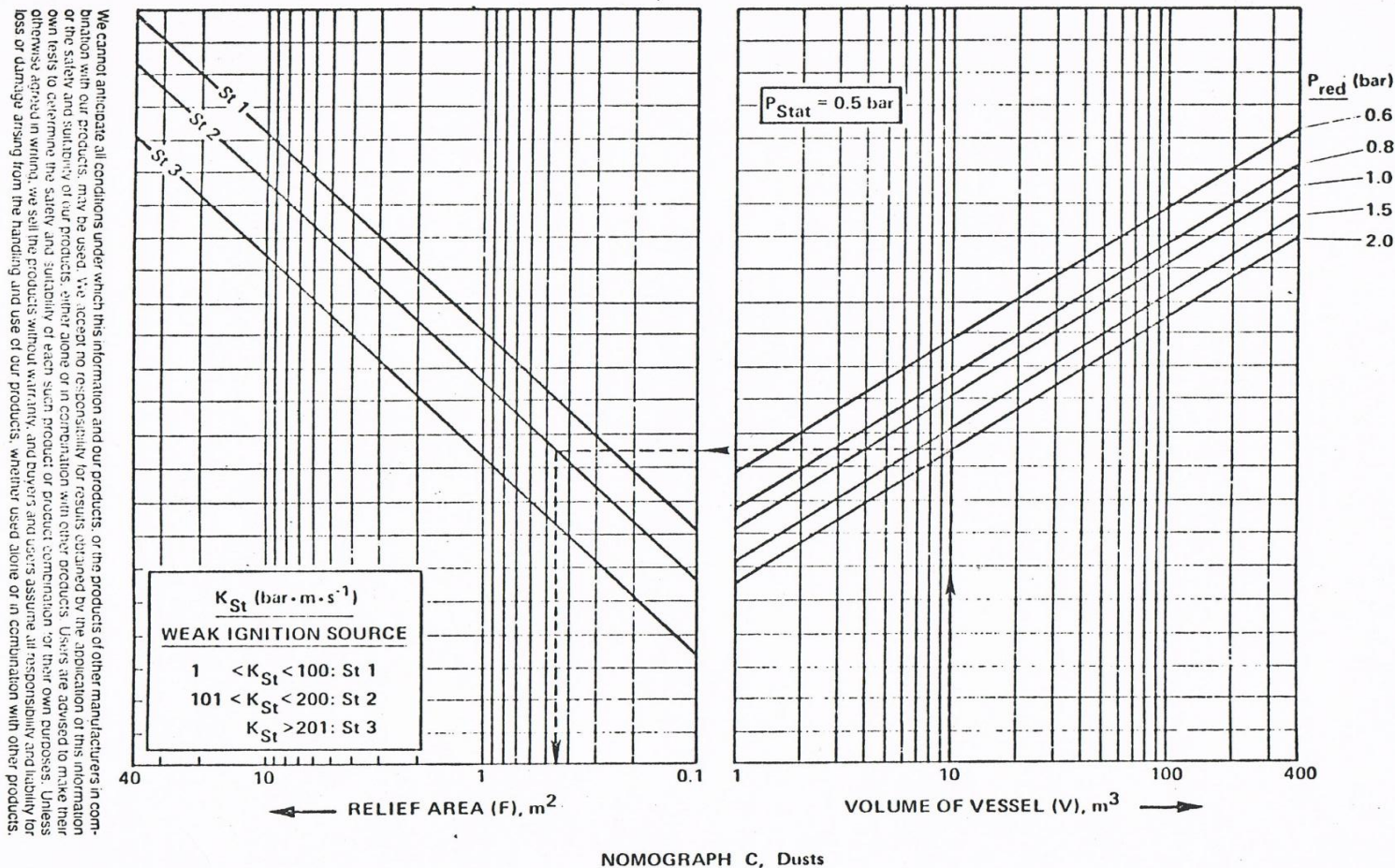


BULLETIN HE-133
Nomograph 8 of 10

Esplosioni



Esplosioni

 BULLETIN HE-128
 Nomograph 3 of 10




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 combustibili 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 esplodibilità;
- 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

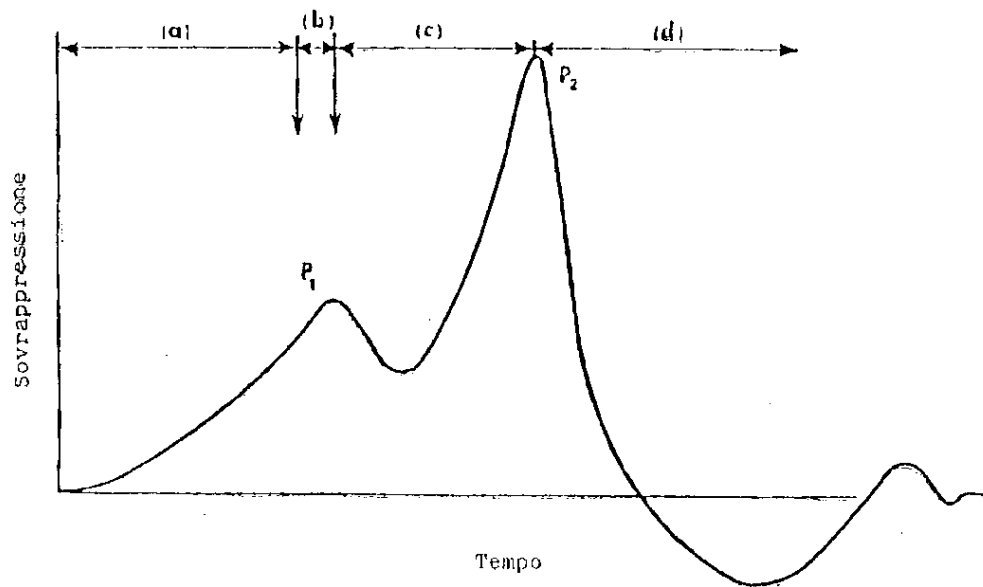
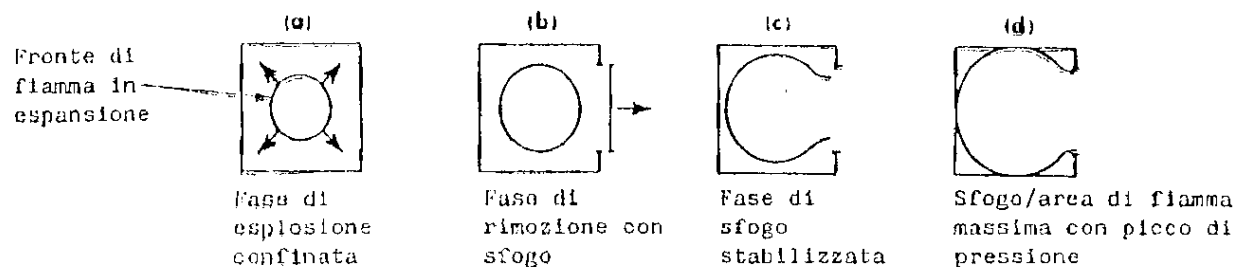


Esplosioni

Nelle esplosioni confinate a carattere deflagratorio 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



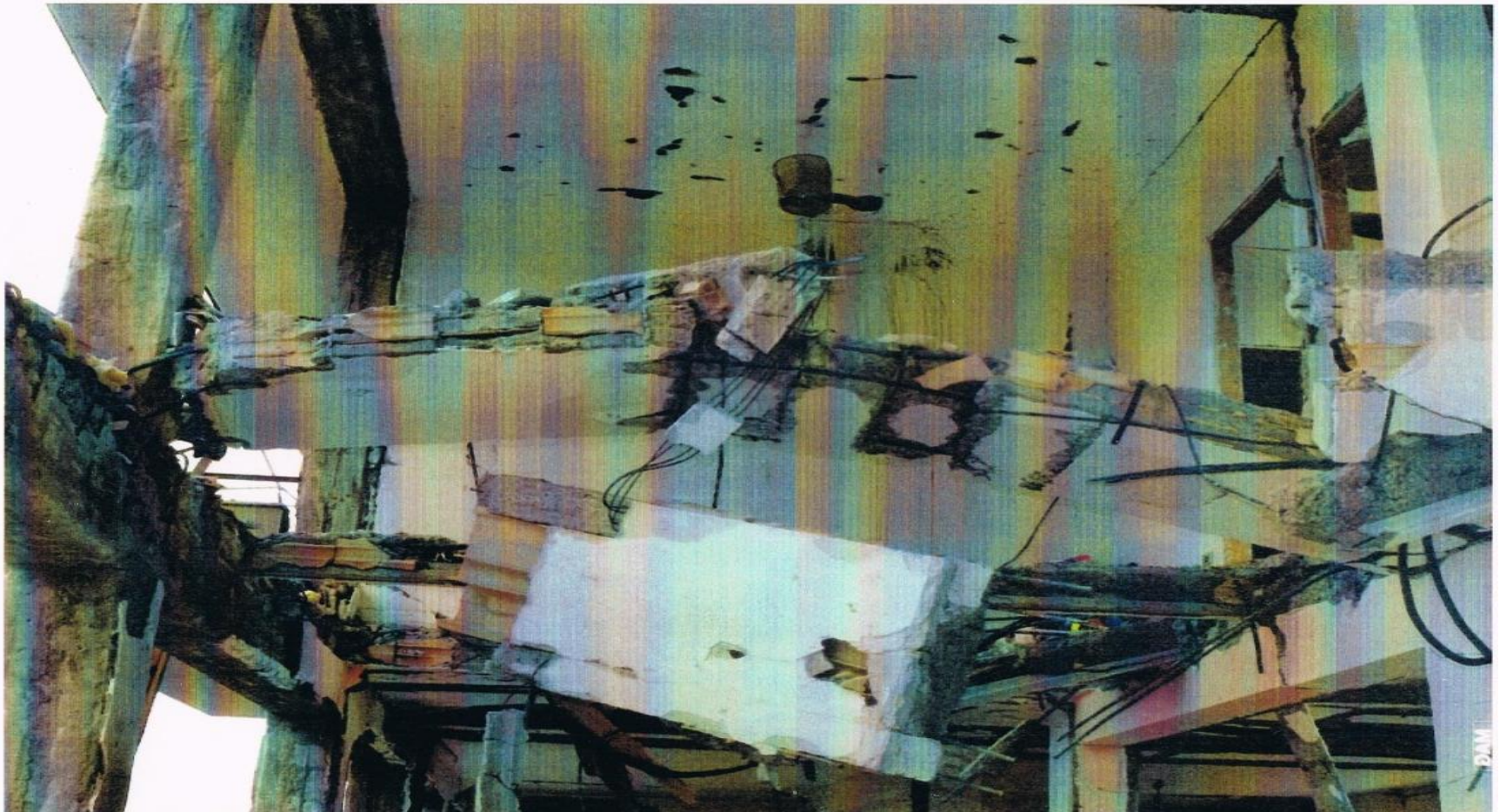
Esplosioni



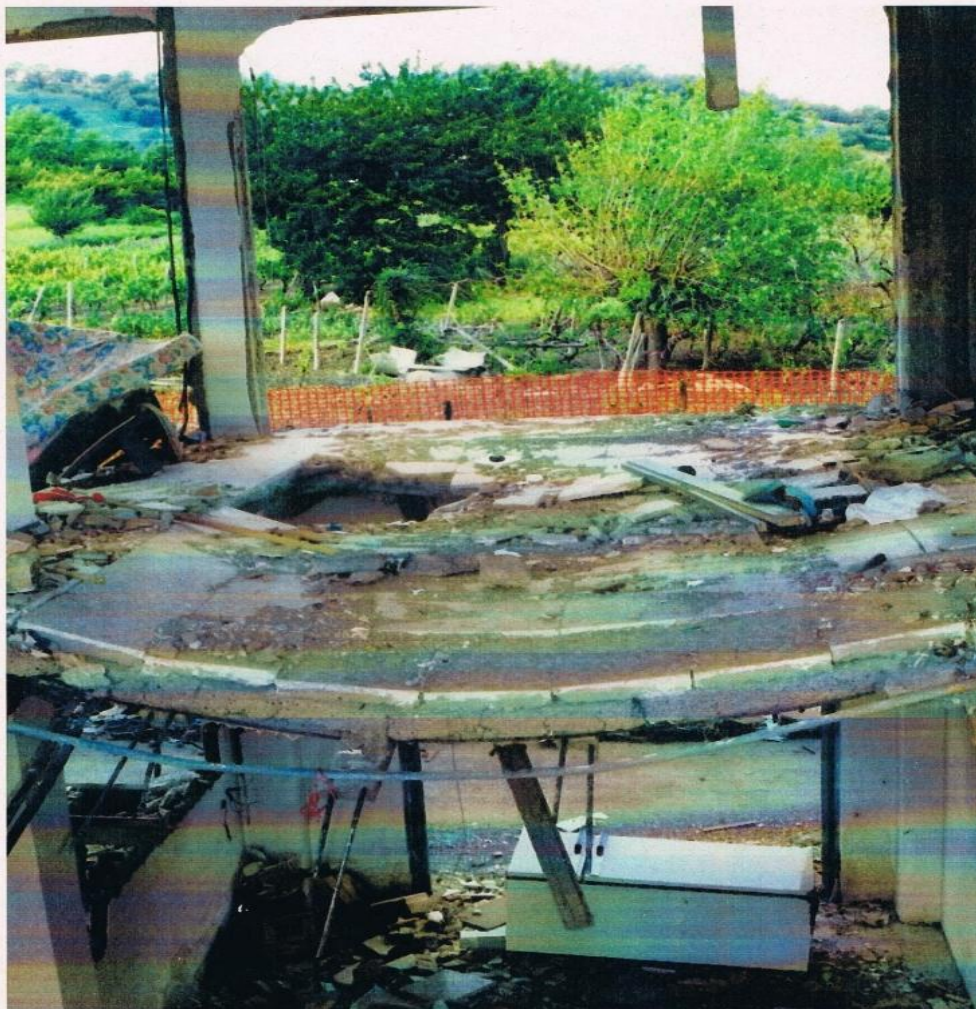
Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



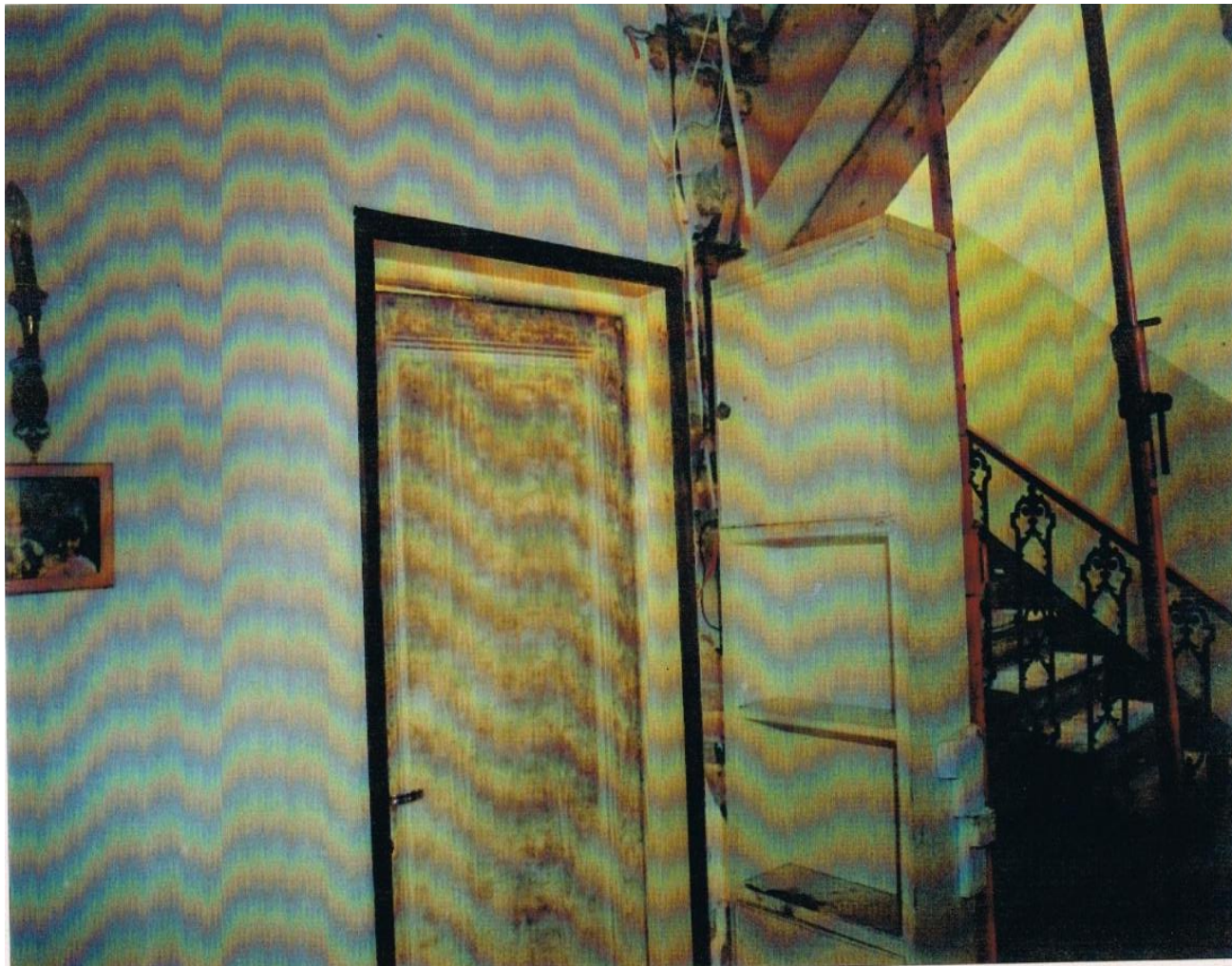
Esplosioni



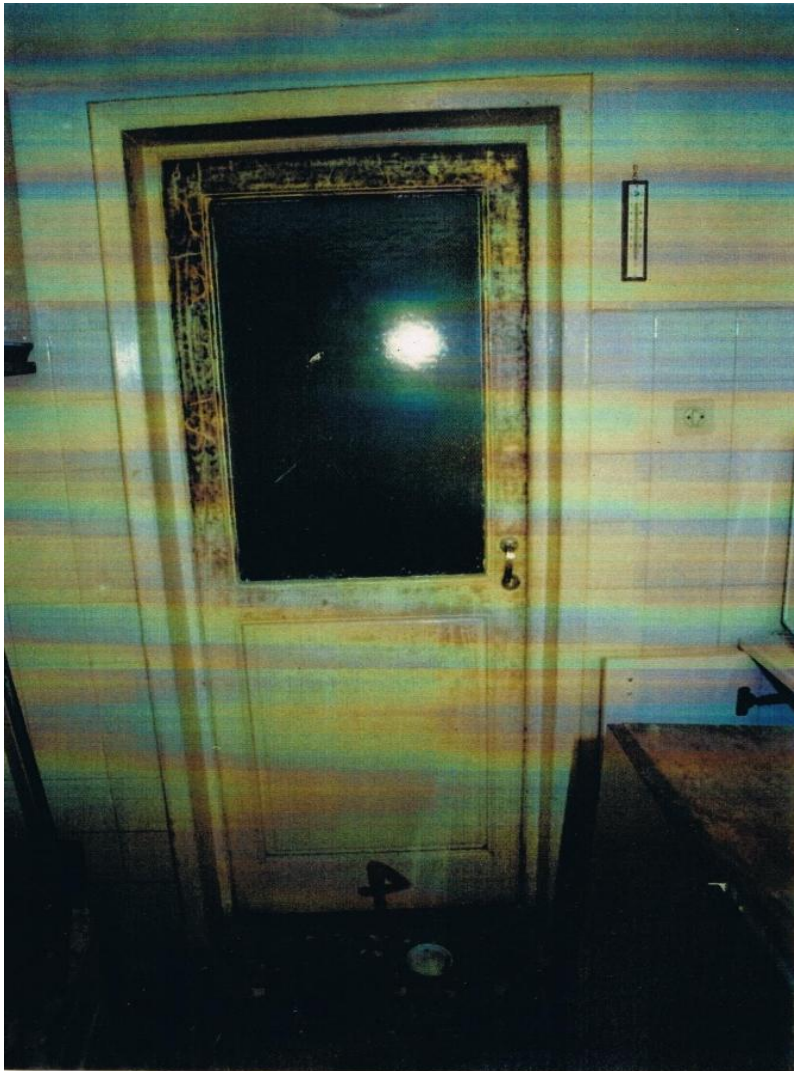
Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni



Esplosioni

