

ANALISI DEI DANNEGGIAMENTI CAUSATI DA ESPLOSIONI IN EDIFICI

A. Fidelibus, U. Riccobono*, A. Robotto**

SHIBE Shield Bunkering Engineering – Via Asunción n° 1, 10134 Torino – info@shibe.it

*Comandante Provinciale del Corpo Nazionale Vigili del Fuoco,

C.so Regina Margherita n° 330, 10143 Torino – ugo.riccobono@libero.it

**ARPA Piemonte, Unità Operativa Autonoma di Coordinamento Rischio Tecnologico,
Via Principessa Clotilde n° 1, 10144 Torino – ucrt@arpa.piemonte.it

SOMMARIO

Con un breve excursus sulla fisica delle esplosioni di gas, vengono preliminarmente messi in luce gli aspetti di maggiore rilevanza nelle analisi di stabilità di edifici (civili o sede di attività lavorative) a fronte di esplosioni confinate. In particolare si esamina come determinare l'entità della massima sovrappressione. Segue un'analisi parametrica per valutare come tale sovrappressione risulti alterata dalla introduzione di setti di compartimentazione e da ciò si ricavano anche indicazioni sui requisiti che tale setto deve possedere affinché risulti efficace. L'articolo, infine, propone l'adozione di un metodo di verifica della resistenza delle strutture che ha validità di carattere generale: tale metodo, riconoscendo la natura impulsiva del fenomeno, prevede che si debbano individuare le caratteristiche dinamiche dell'edificio focalizzando l'attenzione sia sul comportamento globale (edificio nel suo complesso) sia su quello dei vari sottosistemi meccanici (serramenti, pareti, solai ecc). In specifico i sottosistemi meccanici vanno individuati esaminando i vincoli interni. Tali caratteristiche vengono quindi confrontate con le evidenze dell'analisi delle azioni che si occupa soprattutto di determinare l'entità della sovrappressione e l'impulso generato dalla fase positiva.

2. INTRODUZIONE

Le esplosioni di gas in ambiente confinato (o più propriamente semiconfinato) sono governate dal processo di combustione della miscela combustibile-aria, che può manifestarsi a seguito di un innesco fortuito.

L'articolo muove dall'ipotesi che tutte le misure previste (interventi sui processi produttivi o sui dispositivi di sicurezza) siano state adottate e che, nonostante ciò, esista un'elevata probabilità residuale del rischio di esplosione. Si rende opportuna, quindi, l'adozione di ulteriori misure volte a mitigare eventuali danni.

3. RIFERIMENTI TEORICI

Si supponga che in un ambiente confinato di volume V si verifichi un rilascio di sostanza infiammabile che, combinandosi con l'aria, dia luogo ad una quantità "m" di miscela combustibile e che in caso di esplosione i punti deboli della struttura, quali porte e finestre, rompendosi diventino superfici di sfogo. La sovrappressione generata è regolata dall'aumento di volume dei gas combusti. Inizialmente freddi, infatti, i reagenti (gas e aria) occupano un volume $V_0(m)$; a seguito della combustione, si formano prodotti ad alta temperatura, quindi meno densi rispetto allo stato che li caratterizzava in condizioni indisturbate. Se tale combustione dovesse avvenire in un locale teorico in cui il volume potesse aumentare in misura pari alla variazione di volume dei gas combusti, la pressione non subirebbe variazioni significative. Nella realtà, al contrario, essendo impedita la variazione di volume, si ha un aumento di pressione proporzionale al lavoro che dovrebbe essere compiuto per riportare il volume ipoteticamente dilatato alle dimensioni originarie. La legge di Boyle sintetizza questo concetto nella formula:

$$\Delta P \quad V = P_0 \Delta V \quad (1)$$

che può essere scritta nella forma:

$$\Delta P = P_0 \Delta V / V \quad (2)$$

in cui:

P_0 rappresenta la pressione atmosferica;

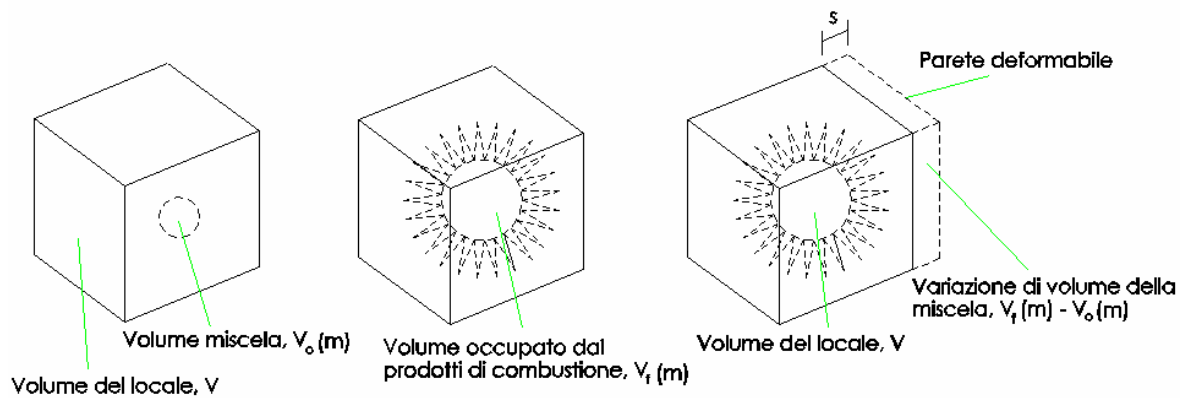


Figura 1. Rappresentazione grafica dei volumi

ΔV rappresenta la variazione di volume dovuta alla combustione;
 V rappresenta il volume originario all'interno del quale avviene l'esplosione.

4. ANALISI PARAMETRICA

Si ponga per comodità:

$$m = m_1 + m_2;$$

con

$$m_1 = \gamma_1 m; \quad m_2 = \gamma_2 m \quad (3)$$

dove m_1 ed m_2 rappresentano la quantità di miscela infiammabile dispersa nei volumi V_1 e V_2 , indipendentemente dal fatto che tali volumi siano stati fisicamente divisi.

Nel caso in cui la dispersione di sostanza combustibile avvenga in un unico locale di volume V dotato di superfici di sfogo la sovrappressione massima in caso di esplosione sarà:

$$\Delta P_{max} = P_o \Delta V / V - \Delta P_{vent} \quad (4)$$

dove ΔP_{vent} rappresenta la sovrappressione dissipata dalle superfici di sfogo.

Supponendo di suddividere il locale con una parete di compartimentazione che divida il locale unico in due ambienti (fig. 2) di volume V_1 e V_2 tali che:

$$V_1 = \gamma_1 V \quad (5)$$

$$V_2 = \gamma_2 V \quad (6)$$

ed ipotizzando che l'innesco avvenga nell'ambiente 1, sarà:

$$\Delta P_1 = P_o \Delta V (m_1) / V_1 - \gamma_1 \Delta P_{vent} \quad (7)$$

ammettendo che anche le superfici di sfogo siano proporzionali ai coefficienti γ_1 e γ_2 , come può essere nel caso di finestre uniformemente distribuite nei locali.

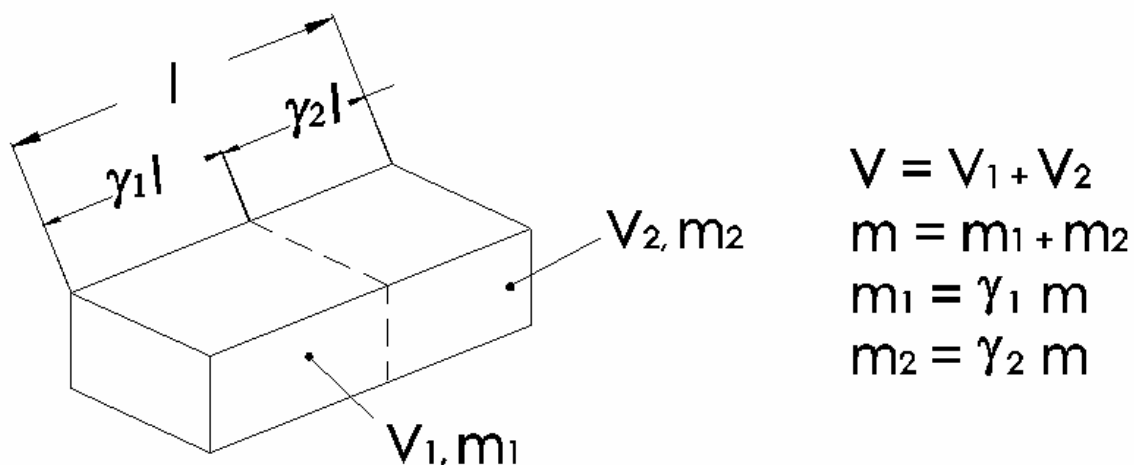


Figura 2. Rappresentazione geometrica della compartimentazione

Sostituendo la (5) nella (7) e nell'ipotesi che si possa porre:

$$\Delta V (m_1) \cong \gamma_1 \Delta V \quad (8)$$

si ricava

$$\Delta P_1 = P_o \Delta V/V - \gamma_1 \Delta P_{vent} \quad (9)$$

Le equazioni (9) e (4) consentono di determinare la differenza

$$\Delta P_1 - \Delta P_{max} = \Delta P_{vent} (1 - \gamma_1) = \gamma_2 \Delta P_{vent} \quad (10)$$

Come si può osservare, la sovrappressione massima nel locale compartimentato sarà appena superiore alla massima sovrappressione che si avrebbe nel locale unico e la differenza è rappresentata dalla quota di sovrappressione che non può essere dispersa dalle superfici di sfogo del locale 2.

Ipotizziamo che a questo punto il divisorio ceda e l'esplosione si propaghi anche al compartimento 2: una quota modesta di energia viene dissipata nei meccanismi che si manifestano per vincere la resistenza meccanica. A questo punto, però, i gas prodotti dall'esplosione nell'ambiente 1 occupano un volume maggiore, pari al volume originario V; quindi la sovrappressione si ridurrà al valore $\Delta P_{1, ridotto}$ dato da:

$$\Delta P_{1, ridotto} = \Delta P_1^* V_1/V = \gamma_1 \Delta P_1^* \quad (11)$$

in considerazione dell'equazione (5) e dove ΔP_1^* è data da:

$$\Delta P_1^* = \Delta P_1 - \Delta P_d \quad (12)$$

in cui ΔP_d rappresenta la caduta di pressione dovuta ai fenomeni dissipativi.

Sostituendo la (12) nella (11) si ottiene:

$$\Delta P_{1, ridotto} = \gamma_1 (\Delta P_1 - \Delta P_d)$$

da cui, sostituendo l'espressione di ΔP_1 ricavata dall'equazione (10), si giunge alla relazione

$$\Delta P_{1, ridotto} = \gamma_1 (\Delta P_{max} + \gamma_2 \Delta P_{vent} - \Delta P_d)$$

ed infine:

$$\Delta P_{1, ridotto} = \gamma_1 \Delta P_{max} + \gamma_1 \gamma_2 \Delta P_{vent} - \gamma_1 \Delta P_d \quad (13)$$

A questo punto si può pensare che la miscela m_2 contenuta nel volume V_2 esploda a sua volta, contribuendo alla sovrappressione massima nel volume V con una quota ΔP_2 data da:

$$\Delta P_2 = P_o \Delta V(m_2)/V = P_o \gamma_2 \Delta V/V \quad (14)$$

Ricavando $P_o \Delta V/V$ dall'equazione (4) si ottiene

$$\Delta P_{f, 2} = \Delta P_2 - \Delta P_{vent} = \gamma_2 (\Delta P_{max} + \Delta P_{vent}) - \Delta P_{vent} \quad (15)$$

Considerando che nell'istante in cui si raggiunge la massima sovrappressione generata dall'esplosione della miscela m_2 la fase positiva dell'esplosione nell'ambiente 1 si è sviluppata in parte, il contributo alla sovrappressione finale dovuto all'esplosione nell'ambiente 1 sarà dato dalla sovrappressione $\Delta P_{1, ridotto}$ affetta da un coefficiente riduttivo "a" e quindi

$$\Delta P_{f, 1} = a \Delta P_{1, ridotto} = a \gamma_1 \Delta P_{max} + a \gamma_1 \gamma_2 \Delta P_{vent} - a \gamma_1 \Delta P_d \quad (16)$$

In conclusione, la sovrappressione finale nell'ambiente V sarà data dall'espressione:

$$\Delta P_f = \Delta P_{f, 1} + \Delta P_{f, 2} \quad (17)$$

Supponendo che ΔP_{vent} in condizioni di sovrappressione ΔP_f sia circa pari alla quota di sovrappressione dissipata dalle superfici di sfogo in corrispondenza del valore ΔP_{max} e sostituendo la (15) e (16) nella (17) si ricava:

$$\Delta P_f = a \gamma_1 \Delta P_{max} + a \gamma_1 \gamma_2 \Delta P_{vent} - a \gamma_1 \Delta P_d + \gamma_2 \Delta P_{max} + \gamma_2 \Delta P_{vent} - \Delta P_{vent} \quad (18)$$

da cui:

$$\Delta P_f = (a \gamma_1 + \gamma_2) \Delta P_{max} - (1 - \gamma_2 - a \gamma_1 \gamma_2) \Delta P_{vent} - a \gamma_1 \Delta P_d \quad (19)$$

Trascurando il termine "a $\gamma_1 \gamma_2 \Delta P_{vent}$ " e ricordando che $\gamma_1 = 1 - \gamma_2$, risulta:

$$\Delta P_f = (a \gamma_1 + \gamma_2) \Delta P_{max} - \gamma_1 \Delta P_{vent} - a \gamma_1 \Delta P_d \quad (20)$$

da cui:

$$\Delta P_f = (a \gamma_1 + \gamma_2) \Delta P_{max} - \gamma_1 (\Delta P_{vent} + a \Delta P_d) \quad (21)$$

E' evidente, quindi, che quanto più a lungo il divisorio riuscirà a resistere prima di lasciare propagare l'esplosione nel secondo ambiente tanto più il coefficiente "a" tenderà a zero e quindi il valore di ΔP_f tenderà a $\Delta P_{f, 2}$ (equazione 15). Parimenti realizzando divisori adeguatamente dissipativi aumenterebbe ΔP_d e $\Delta P_{1, ridotto}$ (equazione 13) tenderebbe a zero, rendendo trascurabile nell'equazione (17) il termine $\Delta P_{f, 1}$.

In figura 3 è riportato il diagramma delle sovrappressioni in funzione del tempo ricostruito sulla base delle considerazioni precedentemente riportate.

DIAGRAMMA DELLA SOVRAPRESSIONE REGISTRATA NELL'AMBIENTE 1

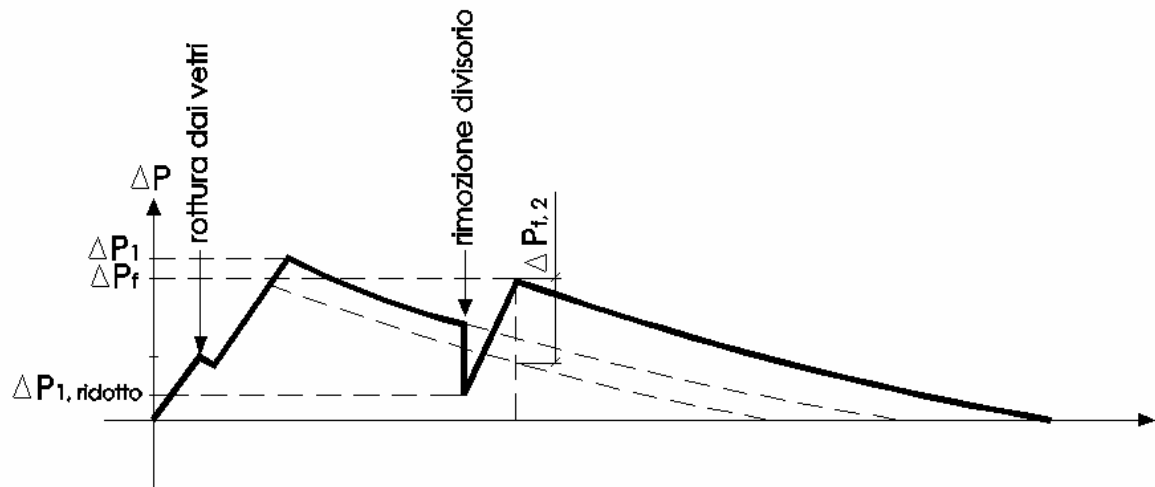


Figura 3

5. VERIFICHE DI RESISTENZA

Per analizzare le resistenza di un edificio in cui avvenga un'esplosione di cui sia nota la sovrappressione è opportuno in primo luogo individuare i sottosistemi meccanici in cui si può scomporre l'edificio stesso. I sottosistemi meccanici possono essere individuati analizzando i vincoli di ciascuna parte con le altre: normalmente si possono considerare sottosistemi meccanici i serramenti, i tamponamenti esterni (specie se realizzati in muratura o in pannelli prefabbricati ed inseriti in una struttura portante in acciaio o cemento armato), i solai stessi (particolarmente quando siano realizzati in cemento armato o in voltini di muratura su travetti di acciaio e siano inseriti in un edificio in muratura portante). Per ogni sottosistema meccanico si possono individuare delle forze statiche equivalenti che dipendono; dall'impulso dell'esplosione, dalle loro caratteristiche dinamiche, dal materiale di cui si compone il sottosistema meccanico, dalla sua duttilità e dalla sua capacità di dissipazione energetica. Non è il caso di dilungarsi in questa sede sul tema in quanto molto materiale è disponibile in letteratura. Piace tuttavia sottolineare che la rapidità di applicazione del carico consente di fare affidamento su valori di resistenza più elevati di quelli che si devono considerare in campo statico.

In generale si può affermare che poiché l'esplosione genera spinte di natura idrostatica, gli elementi che più facilmente vanno in crisi sono proprio quelli verticali in quanto normalmente non sono dimensionati per sollecitazioni orizzontali significative. Anche nel caso in cui l'edificio ricada in zona sismica si possono verificare criticità su tali elementi poiché le verifiche vengono condotte imponendo delle oscillazioni sulle fondazioni e non carichi di superficie.

A fronte della sollecitazione dovuta all'esplosione lo sforzo normale di compressione produce un effetto stabilizzante. Ciò è particolarmente vero negli edifici in muratura che hanno scarsa resistenza a taglio: in questo caso la verifica dei maschi murari immediatamente al di sotto del tetto è la più impegnativa e spesso ne deriva la necessità di una adeguata cerchiatura della sommità (Figura 4).

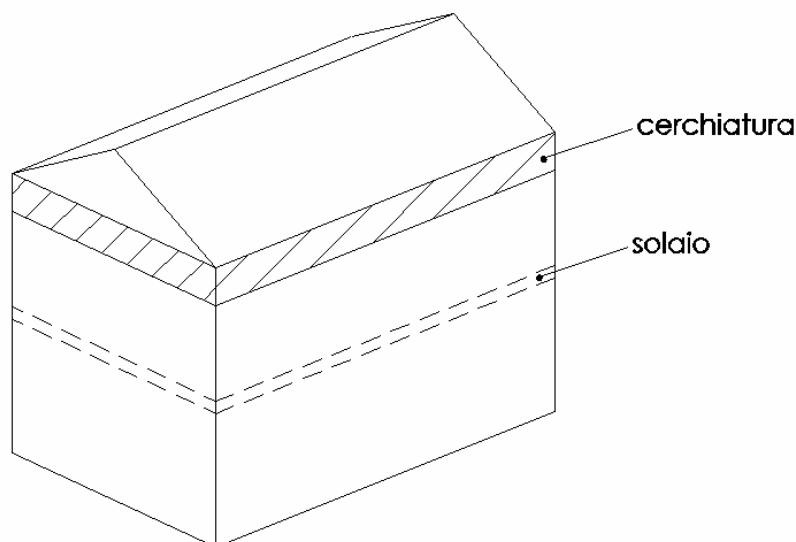


Figura. 4

6. CONCLUSIONI

La compartimentazione di un locale in cui è attesa un'esplosione influenza in maniera modesta l'entità della sovrappressione di picco nel locale in cui si è avuto l'innesco. L'effetto importante dal punto di vista della sicurezza, tuttavia, è quello di disaccoppiare le fasi positive dei due compartimenti col risultato di ottenere la sovrappressione massima in uno solo dei due locali, mitigando i danni nell'altro.

Questo risultato è possibile a condizione che il divisorio possieda determinati requisiti.

Le considerazioni che precedono si possono applicare al caso delle attività produttive come a quello di edifici di civile abitazione.

Nel caso delle attività produttive se ne potrà tenere conto nella redazione del piano di emergenza prevedendo un'adeguata compartimentazione dell'edificio.

Nel caso di edifici di civile abitazione con cucine a gas metano o gpl, si può ritenere che, ove si riesca a conferire caratteristiche adeguate al locale in cui ci si aspetta che avvenga l'innesco, sia poi più facile controllare i danni nei locali adiacenti. Per un edificio in muratura, ad esempio, la localizzazione preferibile della cucina è ai piani più bassi, in quanto qui è maggiore la resistenza dei muri perimetrali a causa dell'effetto stabilizzante del carico verticale.

7. ELENCO DEI SIMBOLI

a = fattore di riduzione della sovrappressione

m = quantità di miscela

P = pressione dell'ambiente

V = volume dell'ambiente

Δ = variazione finita del parametro che segue

γ = fattore di parzializzazione della quantità totale di miscela

7.1 Pedice

o = stato dei gas prima dell'esplosione

f = stato dei gas dopo l'esplosione

1,2 = identificatori degli ambienti compartimentati

vent = superfici di sfogo

max = valore massimo

d = parametro riferito ai fenomeni dissipativi