

MODELLO INTERPRETATIVO DELLE ESPLOSIONI APPROCCIO ENERGETICO.

Ing. A. Fidelibus, ATECOS srl



L'approccio energetico allo studio delle esplosioni consente di creare modelli interpretativi densi di significato. Il presente articolo riporta una sintesi di considerazioni tratte in parte dalla letteratura tecnica, in parte da un'elaborazione originale dello scrivente.

Si supponga di essere in presenza di una miscela esplosiva di volume V_m e di innescare la combustione in un punto qualunque.

Negli istanti immediatamente successivi all'innescò, i gas combusti si espandono assumendo una forma sferica regolare (moto laminare). Man mano che la combustione progredisce, il fronte di fiamma diventa sempre più irregolare e ciò aumenta la superficie della fiamma rispetto alla sfera regolare, accelerando la combustione della miscela (fig. 1). La velocità v_f del fronte di fiamma, inoltre, dipende dall'espansione di volume dei gas combusti sicchè nella letteratura tecnica si usa definire:

$$v_f = v_u + v_g \quad (1)$$

essendo:

v_u = velocità fondamentale per combustione di tipo laminare

v_g = velocità dei gas combusti per effetto dell'espansione di volume

Se si immagina di individuare una sfera che abbia un volume equivalente a quello dei gas combusti, il raggio r_g di tale sfera risulta legato alla velocità di fiamma dalla relazione:

$$r_g = v_f t \quad (2)$$

Per combustioni piane monodimensionali tra i valori di E , v_u , e v_f vale la relazione:

$$v_f = v_u E \quad (3)$$

Alcuni autori (Silvestrini, Genova, Simonetti) suggeriscono di utilizzare il valore di v_f quale minimo per calcolare le aree di vent.

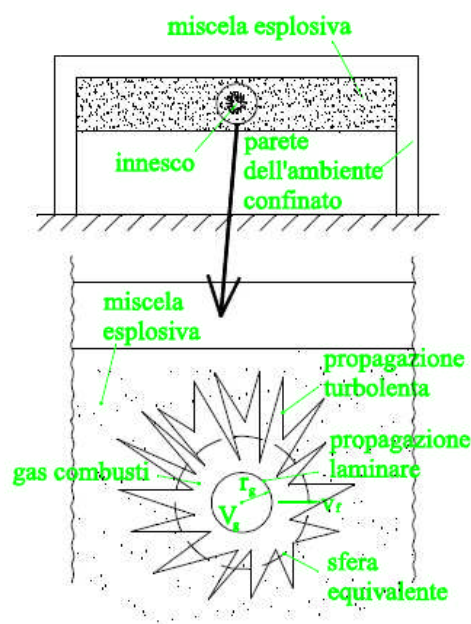


Fig. 1: Rappresentazione schematica della propagazione del fronte di fiamma

Man mano che il quantitativo di miscela esplosiva reagisce, la sovrappressione dei gas combusti tende a dissiparsi; l'energia liberata dalla combustione, tuttavia, è molto superiore a quella dissipata, e dunque la sovrappressione aumenta. All'istante t_1 (fig. 2) esaurito tutto il combustibile e venendo a mancare l'apporto di energia, la sovrappressione inizia a diminuire. La fase ascendente della sovrappressione e quella discendente, ma sempre in campo positivo, sono comunemente note come fase positiva. La diminuzione di sovrappressione continua anche oltre il raggiungimento della pressione atmosferica fino a creare una depressione (fase negativa); tale depressione manifesta un picco il cui valore assoluto è molto ridotto rispetto al picco positivo. In definitiva, l'andamento qualitativo della sovrappressione risulta come indicato in figura 2.

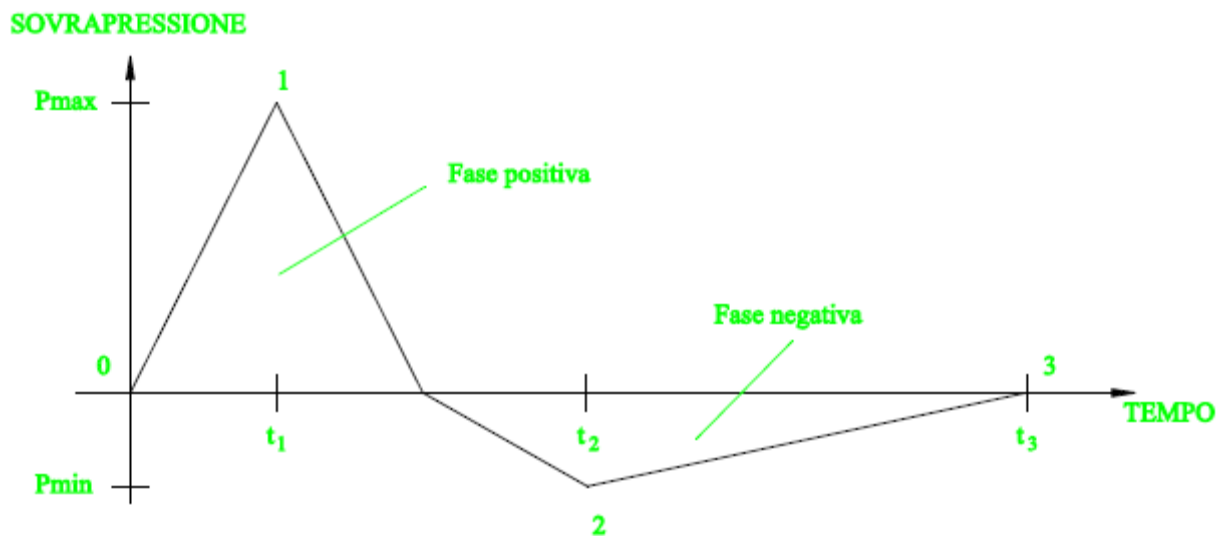


Fig. 2: Diagramma di sovrappressione generato dall'esplosione

La miscela esplosiva di volume V_m bruciando genera gas di volume V_g tale che:

$$V_g = E V_m + V_m \quad (4)$$

dove:

$E = \rho_m / \rho_g$ è il fattore di espansione della miscela.

ρ_m = densità della miscela esplosiva prima della combustione

ρ_g = densità della miscela esplosiva dopo la combustione.

Quando la reazione è completa il livello energetico dei fumi è pari alla somma dell'energia iniziale della miscela e di quella rilasciata dall'esplosione; in termini matematici ciò si traduce nella relazione:

$$V_g p_g = V_m p_o + \Delta \varepsilon \quad (5)$$

essendo:

p_g = pressione dei gas combusti raggiunta nel volume V_g

p_o = pressione atmosferica

$\Delta \varepsilon$ = quantità di energia liberata dalla combustione del volume di miscela V_m

Sostituendo la (4) nel primo termine della (5) si ottiene:

$$V_g p_g = (E V_m + V_m) p_g \quad (6)$$

Per individuare l'energia rilasciata dalla reazione chimica delle sostanze si ipotizzi di poter utilizzare la relazione:

$$\Delta\varepsilon = e V_m \quad (7)$$

in cui "e" rappresenta la densità di energia ed esprime la quantità di energia rilasciata da un volume unitario di miscela. Il contributo che ogni frazione di miscela libera istante per istante nella reazione chimica può variare a seconda delle condizioni dell'ambiente circostante (presenza o meno di ostacoli, temperature, pressione ecc.) nonché in relazione alle condizioni istantanee in cui si viene a trovare la frazione di miscela esplosiva. In particolare, durante la stessa esplosione la diversa densità dell'aria che circonda i gas combustibili può, a seconda dei casi, favorire oppure ostacolare la diffusione della sovrappressione. In termini analitici ciò si esprime con la formula:

$$\Delta\varepsilon = \int_0^{t_1} \frac{d}{dt} [e(t) V_m(t)] dt \quad (8)$$

Sono in corso di programmazione esperimenti per verificare possibili espressioni di tale funzione. In linea generale $e(t)$ è una funzione che dipende dai calori specifici a pressione ed a volume costante secondo una variabilità legata all'istante in considerazione. Si può ad esempio ipotizzare una relazione del tipo:

$$e(t) = \gamma_1 c_p f_1(t_3 - t) + \gamma_2 c_v f_2(t) \quad (9)$$

Sostituendo la (6) e la (7) nella (5) si ottiene:

$$(E V_m + V_m) p_g = V_m p_o + e V_m \quad (10)$$

Eliminando V_m dalla precedente relazione si ottiene:

$$(E + 1) p_g = p_o + e \quad (11)$$

e dunque:

$$p_g = \frac{p_o + e}{(E + 1)} \quad (12)$$

I termini della (12) possono essere interpretati come di seguito riportato.

Il termine $p_o / (E+1)$ rappresenta la depressione dei gas che, a seguito delle trasformazioni chimiche dovute all'esplosione, occupano il volume $E V_m + V_m$. In altre parole, si considera lo stato dei gas combustibili come se l'energia $\Delta\varepsilon$ rilasciata dall'esplosione fosse totalmente dissipata nell'ambiente circostante; in alternativa si possono considerare $p_o / (E+1)$ e V_g come funzioni dello stato di un gas che subisce una trasformazione adiabatica del volume iniziale da V_m a V_g con una corrispondente riduzione della pressione da p_o a $p_o / (E+1)$.

Il termine $e/(E+1)$ rappresenta invece l'incremento di pressione dovuto all'apporto di energia fornito dalle trasformazioni chimiche dell'esplosione.

La (11) può anche essere riscritta come:

$$e = (E + 1)p_g - p_o \quad (13)$$

Si osservi che tale formulazione non dipende dal tipo di sostanza utilizzata: il rilascio di energia può provenire indifferentemente da una miscela di gas come di polveri o di altra sostanza esplosiva, ed ha quindi un valore generale.

Le equazioni (12) e (13), inoltre, mettono in luce altri aspetti: a) la sovrappressione massima raggiunta dai gas combustibili non dipende dalla quantità di miscela prodotta; b) la pressione rappresenta il flusso di energia che viene scambiata attraverso la superficie di frontiera del volume di gas combustibili e dunque ha le dimensioni di una energia per unità di volume; c) la pressione finale dipende dall'energia rilasciata dalla sostanza esplosa e dal fattore di espansione della miscela esplosiva.

Una significativa forma di lettura di quanto sopra riportato può essere ottenuta trasferendo le informazioni su un grafico pressione-volume, adimensionalizzando la pressione rispetto a p_0 ed il volume rispetto a V_m .

Lo stato originario della miscela esplosiva di gas sia rappresentata dal punto 0 di coordinate p_0 e V_m appartenente alla curva a. L'esplosione porterà ad uno stato finale 1 caratterizzato dai valori p_g e V_g che appartengono alla curva b, cui si giunge mediante un percorso che per semplicità si ipotizza lineare. Nel compiere questo percorso il sistema della miscela esplosiva ha ricevuto l'energia " eV_m " e pertanto lo stato 1 è caratterizzato da un incremento di energia ΔE . Se l'ambiente esterno è chiuso ed isolato, non si ha alcuna successiva trasformazione, cioè permane indefinitamente lo stato caratterizzato dai valori p_g e V_g . Se invece l'ambiente consente la dissipazione dell'energia accumulata. Si può ipotizzare che ciò avvenga secondo il percorso $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ di fig. 3. Nel tratto $1 \rightarrow 2$ il volume dei gas combusti V_g si riporta sulla curva "a" ma in condizioni di depressione rispetto alle condizioni iniziali (punto 2). Successivamente (tratto $2 \rightarrow 3$), l'equilibrio dei gas combusti con l'ambiente circostante viene ripristinato senza ulteriori scambi di energia, raggiungendo la pressione p_0 in corrispondenza del volume V_m .

Si noti che l'area $0 - 1 - 2 - 3$ è proporzionale all'energia dissipata.

Si osservi, inoltre, che per semplicità nelle considerazioni sopra riportate si è ipotizzato che il volume della miscela incombusta e quello dei gas di combustione alla pressione iniziale abbiano lo stesso volume.

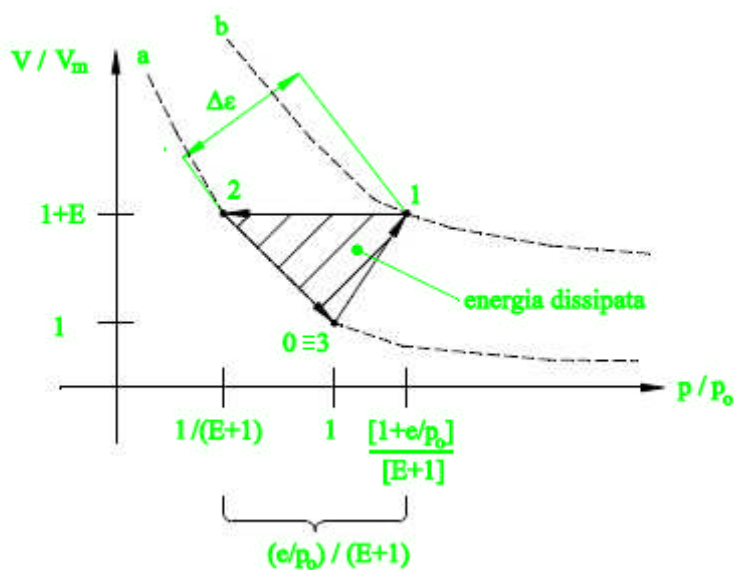


Fig. 3: Rappresentazione sul piano P-V delle trasformazioni generate da una generica esplosione

Alla luce di questa interpretazione è possibile attribuire ai punti significativi del grafico di fig. 3 una corrispondenza con i punti significativi del diagramma qualitativo pressione-tempo, riportato in fig. 2.

CONCLUSIONI

L'approccio consente di legare in maniera diretta le caratteristiche di esplosività di qualunque sostanza con la sovrappressione massima teorica generata in ambienti confinati e semiconfinati. La possibilità di tracciare l'andamento nel tempo della sovrappressione può costituire un valido contributo allo studio degli effetti delle esplosioni sulle strutture.

Infine, l'interpretazione proposta sembra promettente ai fini di una possibile spiegazione di carattere generale del significato del parametro K_{st} che caratterizza la reattività delle polveri definito secondo la relazione:

$$K_{st} = \left[\frac{dP(t)}{dt} \right]_{\max} V^{1/3} \quad (14)$$