

La resistenza degli edifici alle esplosioni.

Antonio Fidelibus® – ATECOS s.r.l. – Torino.



L'analisi dei danni derivanti da un'ipotetica esplosione in un edificio consente di ricavare indicazioni utili per incrementarne la sicurezza, tanto per problematiche di Safety come di Security.

Conoscendo le criticità strutturali, infatti, si possono definire strategie di protezione passiva (blast design) volte a garantire il mantenimento di determinati livelli di servizio anche a fronte di specifici eventi incidentali. Recenti soluzioni tecnologiche, peraltro, consentono di realizzare a costi contenuti protezioni passive molto dissipative, capaci di filtrare l'azione dell'esplosione e conseguentemente di semplificare le misure di mitigazione degli effetti. L'integrazione delle informazioni relative alla protezione passiva e di quelle relative alla protezione attiva, infine, consente di ottimizzare i costi degli eventuali interventi di adeguamento e di massimizzare l'efficienza di entrambi. In questo articolo si analizzano in particolare gli aspetti di protezione passiva relativi alla Security.

La verifica degli effetti di un'esplosione su un edificio richiede almeno tre livelli di indagine:

- 1) Quantificazione dell'energia liberata dall'esplosivo e caratterizzazione dell'esplosione attraverso parametri fisici come i tempi di detonazione
- 2) Analisi del comportamento meccanico del mezzo di trasporto dell'energia liberata dall'esplosione
- 3) modalità e capacità di assorbimento dell'energia da parte delle strutture portanti.

1) Caratterizzazione energetica

In merito al contenuto di energia degli esplosivi, esistono studi che forniscono valori molto precisi in funzione della massa di esplosivo impiegata; l'energia specifica del

TNT, ad esempio, si aggira intorno ai 2MJ/kg [1]. Tale energia, viene sprigionata in tempi che dipendono dalla velocità di detonazione (normalmente variabile in un range tra i 1.500 ed i 9.000 m/s), e che sono molto brevi.

La combinazione di energie elevate e piccoli tempi di rilascio comportano variazioni di pressione (dp/dt) molto repentine e potenze veramente impressionanti, dell'ordine di qualche decina di MW per candelotto.

Se si schematizza il fenomeno fisico dell'esplosione in due fasi (fig.1):

- 1) detonazione del candelotto
- 2) propagazione dell'onda d'urto

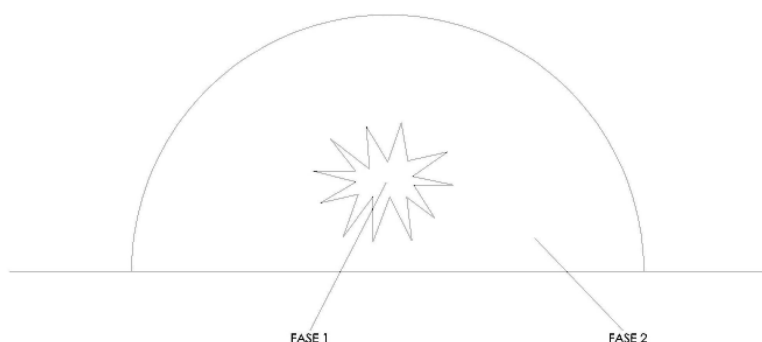


Fig. 1: Schematizzazione delle fasi di un'esplosione

si può dire che il rilascio di energia avviene solo nella fase 1. Il comportamento dell'aria nella fase 2, quindi, può essere studiato attraverso la tipica equazione di stato:

$$pV = nRT = E = cost$$

dove E è l'energia liberata dall'esplosione, V è il volume di aria al cui interno si è diffusa la perturbazione e p è la sovrappressione media del volume V .

E' evidente che l'introduzione nel volume V di tale energia comporta un aumento della temperatura fino al valore T . È altresì evidente che la natura impulsiva del fenomeno comporta la necessità di un'analisi del transitorio.

A questi concetti si possono ricondurre le formulazioni di alcuni criteri di sicurezza come ad esempio quello di seguito riportato.

Supponendo di schematizzare il volume di aria perturbata come una semisfera di raggio r si avrà:

$$(1) \quad p = \frac{E}{V} = \frac{m_E}{\frac{2}{3}\pi r^3} E_S = \frac{K m_E}{r^3}$$

in cui:

$$- K = \frac{3 E_S}{2 \pi}$$

- m_E rappresenta la massa di esplosivo

- E_S rappresenta l'energia specifica del tipo di esplosivo impiegato.

L'equazione (1) è una possibile formulazione della cosiddetta "legge cubica" che governa le esplosioni.

Se si stabilisce un valore di sovrappressione limite p_{lim} che per ragioni di sicurezza non deve essere superato, dalla precedente relazione si può ottenere un'espressione della distanza di sicurezza che avrà la seguente forma:

$$(2) \quad r_{lim} = \sqrt[3]{\frac{K m_E}{p_{lim}}} = k^* \sqrt[3]{m_E}$$

A questa formulazione si rifanno ad esempio le norme tedesche, che per k^* utilizzano un valore da 1.5 a 20 se m_E è espresso in kg [1].

2) Mezzo di trasporto dell'energia

Un'esplosione genera una sovrappressione che viaggia nell'aria attraverso cicli di compressione (fase positiva) e depressione (fase negativa). Questa quantità finita di energia si disperde in volumi sempre più ampi, dando luogo a sovrappressioni medie decrescenti con l'aumentare della distanza raggiunta dalla perturbazione (equazione 1) fino a che, abbastanza lontano, resta unicamente una perturbazione di tipo acustico. Sotto questo profilo il comportamento meccanico dell'aria può essere schematizzato come un treno di molle disposte radialmente rispetto al candelotto: così come in una serie di molle, infatti, un impulso genera un'onda di compressione e depressione che si muove lungo l'asse delle molle stesse senza spostamento di massa, in quanto si osserva la compressione della molla che segue ed il richiamo da parte di quella che precede.

Ciò che danneggia una struttura che dovesse trovarsi sul percorso dell'onda d'urto, in sintesi, è la differenza di pressione sui due lati di una superficie. In alcuni casi, infatti, sono stati trovati vetri intatti all'interno di abitazioni devastate.

A tale proposito sono inoltre da considerare la riflessione dell'onda d'urto ed il trascinarsi aerodinamico generato dal vento dovuto all'esplosione.

La riflessione è quel fenomeno per cui quando l'onda d'urto arriva in prossimità di un oggetto, viene riflessa elasticamente dall'oggetto investito e ritorna in direzione opposta a quella di provenienza. L'onda riflessa, urtando contro una successiva onda in fase positiva in arrivo, crea un incremento locale della sovrappressione. L'entità di tale incremento può essere anche di diverse volte la sovrappressione in campo aperto.

Il vento, invece, è il moto della massa d'aria prossima all'esplosione spinta dall'espansione volumica dei gas combustibili; questo vortice arriva in ritardo rispetto

all'onda di sovrappressione e colpisce una struttura già danneggiata dall'impatto con l'onda d'urto.

La sovrappressione p applicata sulle superfici del target esposte all'onda d'urto, dunque, varia in maniera molto sensibile nel tempo e nello spazio. Un'analisi corretta degli effetti di un'esplosione non può prescindere da una valutazione istante per istante e punto per punto dei carichi agenti.

3) Effetto dell'esplosione sugli edifici

Se si considera un oggetto posto sulla traiettoria dell'onda d'urto che oppone alla stessa una superficie frontale A_f , la quantità di energia che impatta con l'oggetto è pari al flusso dell'energia di volume che attraversa la superficie A_f . In sintesi, l'impatto chiama in causa in primo luogo una risposta di tipo superficiale, in particolare per quegli elementi che nell'edilizia tradizionale non hanno una funzione strutturale (tamponamenti, finestre e porte). A seconda dei casi l'energia può essere concentrata su superfici ridotte se l'esplosivo è applicato direttamente sull'oggetto da demolire (ad esempio i pilastri) oppure interessare superfici più ampie (esplosivi collocati a distanza dagli edifici). In questo secondo caso i quantitativi necessari per creare danni devono essere molto più rilevanti, proprio in virtù della legge cubica citata in precedenza che porta ad un rapido abbattimento della sovrappressione. È per questo che una misura molto efficace per la security di un edificio consiste nel mantenere i veicoli a debita distanza.

Normalmente se le superfici investite dall'onda d'urto sono idonee ad assorbire l'impatto, la massa complessiva di un edificio è sufficiente ad attenuare per inerzia gran parte dell'effetto di un'esplosione.

Ciò premesso, ogni struttura portante ha un proprio caratteristico comportamento meccanico in quanto ad una specifica sollecitazione consegue una certa deformazione. La quantità di energia che può essere assorbita dalla struttura è misurabile come l'area sottesa dal diagramma sforzi-deformazioni. Pertanto, riferendosi ad una stessa quantità di energia di impatto e volendo schematizzare, si possono distinguere due tipologie di strutture: una prevalentemente elastica ed una prevalentemente dissipativa (fig. 2). La prima è caratterizzata da un diagramma sforzi-deformazioni più verticale: la struttura è molto robusta e manifesta piccole deformazioni ma grandi resistenze. La seconda ha un diagramma più orizzontale, con resistenze basse e grandi deformazioni; è quindi una struttura leggera e duttile e le riserve di duttilità vengono sfruttate per assorbire energia.

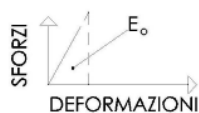
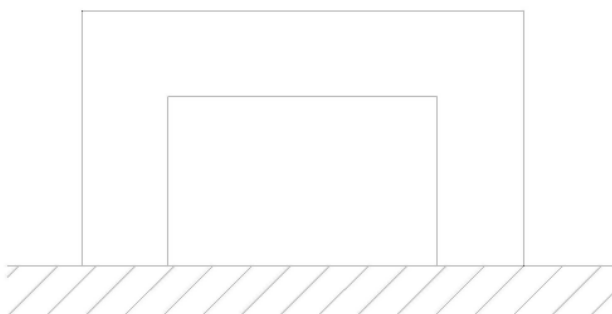


Fig. 2



4) Considerazioni progettuali

Le considerazioni di natura progettuale che si possono trarre dalle valutazioni precedentemente condotte sono di seguito sinteticamente esposte.

- a) L'assorbimento di potenze elevate impone a monte una scelta tra strutture di tipo elastico e strutture dissipative. Nel primo caso il risultato sarà un

manufatto molto robusto con un notevole impiego di materiali, grande peso e grandi volumi e quindi di grande impatto economico. Tale tipologia si addice di più alle applicazioni militari in quanto è possibile che il manufatto mantenga una sua funzionalità anche dopo ripetuti attacchi. Nel secondo caso la struttura è molto più esile, i materiali sono destinati alla plasticizzazione secondo una strategia predefinita che sfrutta al massimo le risorse dei materiali e trova invece applicazione negli usi civili per i costi e gli ingombri ridotti. Le strutture civili, quindi, possono essere protette efficacemente con ingombri contenuti a condizione di introdurre numerosi punti di dissipazione energetica. Recenti tecnologie consentono di rivestire le superfici con pannelli a deformabilità programmata di ridotto impatto economico, capaci, peraltro, di filtrare l'azione delle esplosioni secondo una legge prestabilita.

- b) La progettazione di strutture resistenti all'esplosione (blast design) non può essere condotta con i normali metodi di calcolo statici; è piuttosto indicata una particolare branca dei metodi dinamici. La rapida variazione delle azioni e sollecitazioni nel tempo e nello spazio, nonché l'influenza delle forze di inerzia hanno effetti molto significativi. Inoltre per sollecitazioni di così breve durata le elevate velocità di deformazione fanno sì che i materiali manifestino una sensibile alterazione della resistenza meccanica ed i modi di rottura non corrispondono a quelli convenzionali nell'edilizia ordinaria.
- c) Un'altra importante considerazione è che l'energia può essere dissipata attraverso sfoghi dell'aria opportunamente dimensionati che permettono di limitare l'entità della sovrappressione di picco e (teoricamente) incidere

anche sulla durata della fase positiva. In altre parole attraverso i venting si può disperdere una quota importante dell'energia che altrimenti resterebbe accumulata all'interno dell'edificio ed andrebbe ad aumentare sovrappressione e temperatura.

- d) L'ultima considerazione è che una conoscenza dettagliata dei punti deboli della struttura fornisce elementi utili per definire una strategia di sorveglianza delle "zone calde" che allo stesso tempo risulta efficace per gli obiettivi desiderati ed ottimizza i costi di protezione degli edifici.