

SULLA SICUREZZA DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO ESPOSTE AD AZIONE DA ESPLOSIONE

Maurizio Acito

Facoltà di Architettura Civile - Politecnico di Milano

SOMMARIO

In questo lavoro viene discusso il problema della valutazione della sicurezza di strutture in calcestruzzo armato, esposte alle azioni eccezionali delle esplosioni. Negli ultimi anni, a seguito dei numerosi eventi terroristici, tale problema ha assunto un rilievo drammatico, mettendo in evidenza la necessità di valutare se le risorse di resistenza di una struttura esposta ad esplosione, risultino adeguate a far fronte a tali azioni eccezionali. Questa problematica tocca la sicurezza strutturale con riflessi significativi sui costi. e, quindi, non può essere disattesa nell'ottica della sostenibilità di opere e interventi volti al contenimento del rischio connesso alle esplosioni. Nello studio si evidenziano, a partire dal quadro tecnico-normativo nazionale e internazionale, gli aspetti di base connessi ad un progetto avanzato, in presenza di strutture esposte ad esplosioni. In particolare, con riferimento alla valutazione della sicurezza in relazione alla definizione delle azioni da esplosione, dei modelli di comportamento dei materiali e dei meccanismi resistenti in regime dinamico di strutture in calcestruzzo armato.

SUMMARY

In this work the reliability of reinforced concrete beam evaluation under blast loads, is considered. Recent terrorist threats to building have demonstrated the need to evaluate the blast vulnerability of the constructions.

This study summarizes of the fundamental loads aspects in the design of building under blast.

In particular, the blast loads definition, the constitutive law model of dynamic material behaviour (concrete and steel strain-rate-dependent) in the reliability reinforced concrete structure, are considered. The paper presents results from a non linear dynamic numerical analysis of the reliability of reinforced concrete beam under blast loading.

1. INTRODUZIONE

Nel progetto degli edifici, la necessità di considerare gli eventi eccezionali come un'esplosione, si è evidenziata in modo palese, ormai da molti anni, quando, a seguito di una fuga di gas e della conseguente esplosione, avvenuta al 18° piano dell'edificio di 22 piani di Ronan Point (Fig. 1 a)¹, si è determinato il collasso di una porzione di edificio. La enorme sproporzione fra la causa del collasso ed i danni in termini di vite umane e materiali, ha drammaticamente evidenziata la necessità di controllare tali eventi, con una progettazione che tenga conto di tali azioni accidentali. Così, per prime, le British Standards, nel 1970 introducono delle raccomandazioni che orientano la progettazione nella direzione di considerare, nel progetto strutturale, l'instaurarsi di meccanismi progressivi di collasso, in presenza di azioni da esplosioni. In seguito, un notevole numero di paesi europei, il Canada e gli USA introducono, attraverso delle prescrizioni delle normative tecniche, la necessità di analisi di collasso progressivo nel progetto strutturale in presenza di esplosioni.²

Tale esigenza è stata poi considerata nello sviluppo degli Eurocodici, dove si è introdotta la necessità di considerare le

azioni da esplosioni (EN 1991-1-7 [01]), anche se sole di tipo interne, e non dovute ad esplosivi veri e propri.

Di recente, nel 2005, con la Normativa Tecnica per le Costruzioni (NTC '05), e poi con la NTC del 2008 [02], anche in Italia, è stata formalmente introdotta, la necessità di considerare tali azioni, secondo un approccio che sostanzialmente ripropone l'approccio dell'EN 1991-1-7. Così, per la prima volta, nella normativa tecnica italiana, vengono fissati i principi con i quali deve essere considerata l'azione di tipo accidentale da esplosione, anche se limitatamente a quelle dovute a sostanze infiammabili (esplosioni a basso contenuto energetico).³ Tale nuovo indirizzo normativo pone, in modo chiaro, l'attenzione sugli aspetti fondamentali che informano la misura della sicurezza, quali l'individuazione di plausibili scenari di azioni di esplosione e di plausibili modelli di calcolo per la valutazione delle conseguenti sollecitazioni, nonché l'individuazione di adeguati modelli resistenti, in relazione al comportamento dei materiali, in regime dinamico da esplosione. A tale scopo, in coerenza con l'EN 1991-1-7, la NTC 08, in relazione allo scenario dell'azioni da esplosioni, per le costruzioni fa la seguente classificazione:

- costruzioni di categoria 1, se sono attese conseguenze negative limitate (corrispondente alla classe CC1 di EN 1991-1-7);

¹ Dove si verificò che il crollo di alcune pareti prefabbricate di un appartamento, determinarono il collasso dell'intera facciata dell'edificio (1968).

² Ad esempio, le (ANSI) Standard A58.1-1982, raccomandano di individuare vie alternative che consentano alle strutture, in presenza di collassi locali per esplosione, di trovare percorsi tali di evitare il collasso della struttura.

³ Infatti, per la NTC, nel progetto non devono essere prese in esame le azioni derivanti da esplosioni esterne, azioni belliche e sabotaggio, salvo che ciò non risulti indispensabile per particolari costruzioni e scenari di progetto richiesti dal committente o individuati dal progettista.

- costruzioni di categoria 2 se sono attese conseguenze negative di entità media (corrispondente alla classe CC2 di EN 1991-1-7);
- costruzioni di categoria 3 se sono attese *conseguenze negative* di entità grave (corrispondente alla classe CC3 di EN 1991-1-7).

Sulla base di tale classificazione, nella NTC '08 sono inoltre specificate le verifiche richieste in ciascun caso.

In particolare, per la categoria 3, è richiesto un progetto avanzato, in cui siano effettuati studi approfonditi, sia per le azioni, che per il modello strutturale, eventualmente, usando analisi dinamiche, modelli non lineari ed interazione azione-struttura. Peraltro, ormai da diversi anni, in relazione al ripetuto verificarsi di eventi accidentali estremi, come le esplosioni da attentati con bombe, è fortemente avvertito il problema della valutazione del rischio per le costruzioni, dovuto alle esplosioni, e della individuazione di strategie da seguire per ridurlo. Questo, soprattutto, in quei paesi, come ad esempio, gli USA, dove gravi episodi di attacchi terroristici con bombe, hanno causato la morte e il ferimento di un notevole numero di persone.⁴ Nell'ultimo periodo, con il susseguirsi di numerosi attacchi terroristici (Fig. 2), tale problema ha assunto il carattere di una tragedia di rilievo mondiale. Si pensi ad esempio, alla gravità dei danni prodotti, in termini di vite umane e di feriti, negli attentati a Manchester e a Londra city (1992, 1993 e 1996), all'Ambasciata USA in Kenya (1998), ad un night club e ad un ristorante di Bali (2002 e 2005), all'hotel Marriot di Jakarta (2003), all'ambasciata australiana, in Indonesia, e, soprattutto, agli eventi dell'11 settembre 2001 ed ai più recenti attentati ai treni di Londra e Madrid. Tale contesto, ha posto in termini prioritari, il problema della sicurezza e della salvaguardia delle costruzioni, cosiddette "sensibili", per il loro ruolo strategico e/o storico-simbolico, dalle azioni da esplosioni, causate da attentati, per lo più riconducibili all'esplosione di veicoli imbottiti di esplosivi (si presentano con una incidenza di circa l'80% degli attentati).

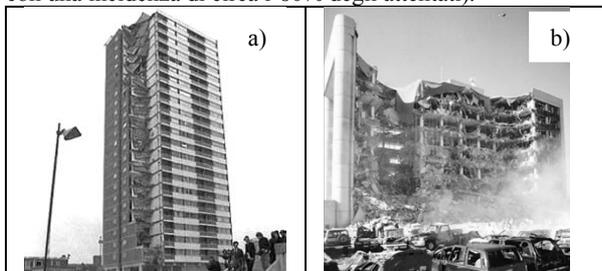


Fig. 1 - a) Esplosione interna di Ronan Point (1968); b) Esplosione esterna da attentato ad Oklahoma City (1995)

In tal senso, è fortemente sentita la necessità di disporre di linee guida per una progettazione, che consideri i rischi connessi alla eventualità di attacchi terroristici. Al riguardo, notevolmente avanzato è il contributo offerto negli USA, ove, oltre a studi e ricerche teoriche e sperimentali, sono stati predisposti interessanti documenti che consentono la caratterizzazione delle azioni da esplosioni e di valutare gli effetti sulle costruzioni.⁵

⁴ Si pensi al tragico attentato del Murrah Federal Building di Oklahoma City del 1995 (Fig. 1 b)), dove sono morte 168 persone e 500 feriti) [03].

⁵ Ad esempio, il manuale tecnico TM5 1300 (US Army 1990) [04], dove sono fornite indicazioni per la realizzazione di strutture resistenti

A fronte di questo notevole sforzo di ricerca e di indirizzo prodotto negli USA, non risulta un analogo impegno da parte della comunità tecnico-scientifica Europea, in specie nel nostro Paese, dove tale esigenza di attenuare il rischio è ancora più necessaria, data la diffusa presenza di monumenti o costruzioni simboliche e/o strategiche da salvaguardare.

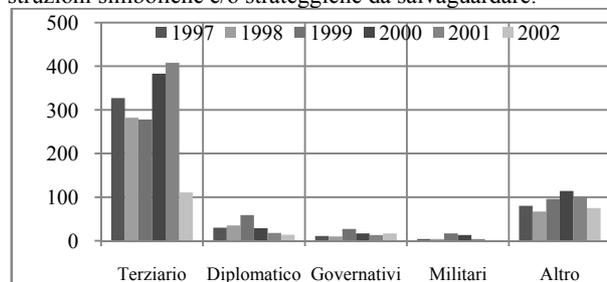


Fig. 2 - Numero di edifici colpiti da attacco terroristico fra il 1997 e il 2002 (Fonte FEMA 426)

È pur vero, però, che i principi e le modalità operative relative al progetto avanzato, introdotte negli Eurocodici e nella NTC '08, per la categoria 3 delle costruzioni, esposte ad esplosioni interne, possono essere estese anche ai casi in cui l'esplosione che investe la costruzione è esterna ed è dovuta ad esplosivi (esplosioni ad alto contenuto energetico). Infatti, la natura delle esplosioni, provocate da bombe, rappresenta un tipo di azione che si configura con aspetti di elevato contenuto energetico (rapidità della reazione chimica, entità delle sovrappressioni generate, ecc.), che richiede si consideri un progetto avanzato, previsto dalla NTC '08, per la categoria 3 di costruzioni e che deve includere i seguenti punti: calcoli delle pressioni di esplosione, includenti gli effetti di confinamento; calcoli strutturali dinamici non lineari; aspetti probabilistici e analisi delle conseguenze; ottimizzazione economica delle misure di mitigazione del rischio.

Nella presente memoria, si esaminano alcuni aspetti dell'azione, prodotta da esplosioni esterne (non confinate), dovute ad attentati, la cui valutazione è requisito essenziale, ai fini della valutazione della sicurezza delle strutture.

A tale scopo, nel prosieguo, dopo un richiamo sulle principali proposte di letteratura, per la caratterizzazione dell'azione dell'esplosione, che ne evidenzia la notevole incertezza (dispersione), si sono sviluppate delle valutazioni sugli effetti che tali incertezze, possono determinare in relazione alla risposta delle strutture in calcestruzzo armato, sulla base delle quali si sono formulate alcune considerazioni conclusive.

2. CENNI SULLE AZIONI DA ESPLOSIONI

2.1 Aspetti generali sulle esplosioni

Con il termine esplosione è da intendersi una rapida e violenta reazione chimica, propria degli esplosivi (ad esempio

alle esplosioni. Ma, anche, i documenti con i principi base per attenuare il rischio nei riguardi delle esplosioni da attacco terroristico, predisposti dalla Federal Emergency Management Agency (FEMA). In particolare, nei documenti FEMA n. 426, 427, 428, 429 e 430 [05,.,09], sono fornite indicazioni, rispettivamente, con riferimento agli aspetti generali delle azioni da esplosioni e ai casi specifici di edifici, con destinazione d'uso commerciale, scolastico, suscettibili di grandi affollamenti e con riferimenti ai diversi componenti architettonici di una costruzione.

TNT), che avviene con grande sviluppo di gas e di calore. Tale termine è, forse non propriamente, anche usato quando ci si riferisce agli effetti della rapida combustione di: liquidi infiammabili; gas infiammabili; polveri combustibili; miscele o combinazioni diverse delle precedenti sostanze. In questi casi, infatti, pur essendo presenti le classiche manifestazioni, quali la rapida espansione dei gas, prodotti dalla combustione, la produzione di calore, luce e fiamma, la formazione di un'onda d'urto, risulta che la velocità di reazione del fronte di reazione è molto più contenuta (al massimo 1000÷2000 m/s, nel caso di detonazione), rispetto a quella di esplosioni dovute ad esplosivi, per le quali si possono raggiungere anche i 7000÷8000 m/s. Così pure, le sovrappressioni, generate da questi tipi di esplosione, che solo in particolari condizioni possono raggiungere anche i 7-8 bar e risultano di gran lunga inferiori a quelle prodotte dagli esplosivi veri e propri, che possono raggiungere anche le migliaia di bar.⁶ Infatti, nel caso di esplosioni, prodotte da esplosivi veri e propri, la reazione chimica esotermica molto veloce, che converte il materiale esplosivo (solido o liquido) in gas a grande pressione, il quale si espande rapidamente, nel tentativo di ricercare l'equilibrio con l'aria circostante, determinando così un'onda d'urto (shock wave), che si propaga comprimendo l'aria con velocità supersonica, radialmente dalla sorgente (centro della carica esplosiva).

Con riferimento ad esplosioni di bombe esterne alle costruzioni, usualmente (ad esempio in [04]), si considerano tre diverse condizioni: condizioni "free air burst", "air burst" e "surface burst". L'esplosione si definisce in condizioni "free air burst", quando avviene in adiacenza o sopra un edificio, senza che si determini una amplificazione dell'onda d'urto. Si definisce in condizioni "air burst", quando avviene in prossimità della superficie del terreno, e con distanza dall'edificio, tale che l'onda d'urto giunge sul terreno, prima di interessare l'edificio. In tal caso, alla propagazione dell'onda d'urto iniziale si aggiunge un fronte (mach front), formatosi con l'iterazione dell'onda incidente e dell'onda riflettente (di cui si dirà in seguito), in corrispondenza della superficie del terreno, con l'onda riflettente che rappresenta l'onda incidente amplificata. Infine, si definisce in condizioni "surface blast", quando la carica è localizzata molto vicino al terreno. In tal caso, l'onda incidente è riflessa e amplificata dalla superficie del terreno, determinando una propagazione dell'onda riflessa simile al "mach front" dell'"air burst", ma con forma di tipo semisferico.

2.2 Principali parametri di caratterizzazione dell'azione da esplosioni esterne (non confinate)

Con la propagazione dell'onda d'urto dal centro della carica esplosiva, la sovrappressione decresce rapidamente con la distanza R (Stand off), dal centro di esplosione (Fig. 3). L'intensità e la forma dell'onda d'urto, dipendono dalla natura e dall'energia rilasciata dalla carica. La sovrappressione deca-

de rapidamente anche con il tempo (la durata è dell'ordine dei millisecondi). Con riferimento a tali tipiche leggi temporali (time-history) delle sovrappressioni incidenti, si possono individuare i tempi t_1 , t_a , τ e τ' . Dove t_1 è il tempo di arrivo dell'onda d'urto, t_a è il tempo di crescita della sovrappressione, fino al valore massimo, τ e τ' , sono, rispettivamente, i tempi di durata della sovrappressione positiva ed eventualmente negativa. Il carattere istantaneo della crescita della sovrappressione incidente, consente di assumere $t_a=0$ e quindi $\tau+t_a \approx \tau$. La legge temporale, con cui con cui la sovrappressione incidente decade dal suo valore massimo ΔP_{max} , è, generalmente, assunta di tipo esponenziale.⁷ In letteratura, tale legge temporale è molto spesso semplificata con un andamento triangolare di ampiezza τ_n (Fig. 3) [04], [10].

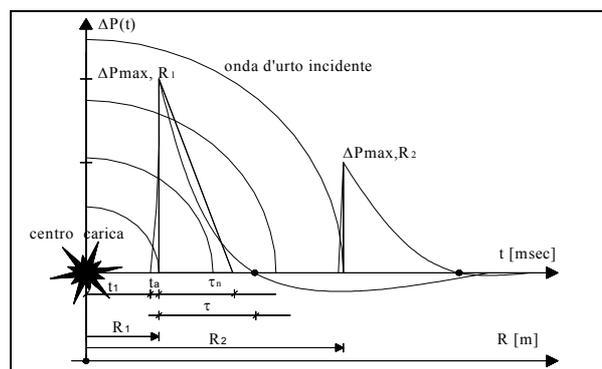


Fig. 3 - Andamento (per uno scenario "free air burst") del valore di sovrappressione incidente nel tempo (time-history).

L'impulso, dato dalla sovrappressione incidente, si concretizza con l'integrale della legge temporale di sovrappressione. Con riferimento alla sola fase positiva si può scrivere:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a + \tau} (\Delta P(t)) dt = c \cdot \Delta P_{max} \cdot \tau, \text{ dove } c \text{ è un coefficiente}$$

numerico che tiene in conto dell'equazione assunta per la time-history dell'impulso (nel caso di impulso triangolare $c \approx 1/2$). Oltre agli effetti diretti, dovuti alla propagazione dell'onda d'urto, ad una esplosione sono associati due ulteriori importanti effetti, il cui ruolo risulta fondamentale nella definizione delle azioni da esplosione sulle costruzioni. Tali effetti sono la pressione dinamica e la sovrappressione riflessa. Nella figura 4, a titolo esemplificativo, sono indicati gli andamenti delle tipiche leggi temporali della sovrappressione incidente, della pressione dinamica e delle sovrappressione riflessa, ad una generica distanza R dal centro della carica. La pressione dinamica si determina per effetto dello spostamento d'aria, causato dalla propagazione dell'onda d'urto. Questa pressione, determinata dallo spostamento d'aria (blast wind), è detta pressione dinamica. Il valore massimo q_{max} , in condizioni tipiche, viene usualmente correlato al valore massimo ΔP_{max} di sovrappressione incidente.⁸

⁶ In relazione alle caratteristiche ambientali si possono determinare due tipi di esplosioni da combustione: la deflagrazione e la detonazione. La *deflagrazione*, che si verifica quando il fronte di fiamma viaggia attraverso la miscela a velocità subsonica (dell'ordine di 100 m/s), è caratterizzata da picchi di sovrappressione che possono avere valori da 10 kN/m² a 1.500 kN/m². Mentre, con la *detonazione*, che si verifica quando l'onda d'urto di pressione si propaga a velocità supersonica (anche maggiore di 1.000 m/s), è invece caratterizzata da valori dei picchi di sovrappressione possono superare i 2.000 kN/m², con durata è molto breve, generalmente dell'ordine delle decine di ms.

⁷ La tipica legge delle pressioni con il tempo assume l'espressione: $\Delta p(t) = \Delta P_{max} e^{-\alpha t}$, dove ΔP_{max} è la pressione di picco di pressione riflessa, e α è il coefficiente di decadimento.

⁸ La pressione dinamica viene tradotta in pressione applicata sulle costruzioni, attraverso un coefficiente C_D , che tiene conto dalla forma della costruzione e dall'orientamento della stessa.

In particolare, la pressione dinamica gioca un ruolo fondamentale nella determinazione del carico da esplosione per strutture aperte, piccole strutture, o componenti di costruzioni.

In ogni caso, dato che i danni sulle costruzioni possono dipendere anche dalle forze di trascinamento, che si destano per effetto del vento di blast, è necessario valutare l'entità di tali forze, in relazione alla forma della costruzione. In particolare, occorre definire la durata e il valore del carico che si desta per effetto della pressione dinamica. Tale carico dinamico è generalmente fornito, in relazione al valore di picco della sovrappressione.⁹

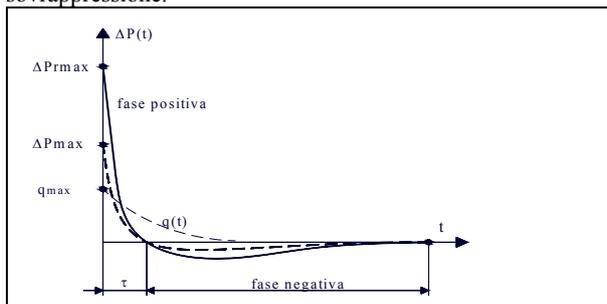


Fig. 4 - Andamento del valore di sovrappressione incidente, riflessa e della pressione dinamica nel tempo (time history).

Sempre nella figura 4, è riportato anche l'andamento temporale del più importante effetto delle esplosioni sulle costruzioni, costituito dalle sovrappressioni riflesse. Infatti, quando l'onda d'urto (shock wave) colpisce la superficie di un ostacolo (ad esempio i componenti di una struttura), essa si riflette e si rinforza, producendo una sovrappressione sull'ostacolo, notevolmente superiore alla sovrappressione incidente. La sovrappressione riflessa è sempre maggiore della sovrappressione incidente, e varia con l'angolo di incidenza che la direzione della onda di sovrappressione incidente forma con la superficie dell'ostacolo (da perpendicolare ad obliqua, fino a parallela). Ad esempio, la sovrappressione riflessa può giungere fino a valori di 13 volte superiori alla sovrappressione incidente, quando la superficie dell'ostacolo è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, nel caso che i valori della sovrappressione incidente sia dell'ordine delle centinaia di MPa. Per la valutazione dei parametri delle sovrappressioni, che le esplosioni determinano sulle costruzioni, si possono impiegare sostanzialmente tre metodi: metodi empirici; metodi semi-empirici; metodi numerici.¹⁰ Nel prosieguo si richiamano le principali proposte empiriche, generalmente impiegate per la valutazione dei parametri che caratterizzano gli effetti delle esplosioni.

2.3 Metodi empirici di valutazione dei parametri del carico d'esplosione esterne in condizioni "free air burst"

Entrando nel merito dei diversi aspetti, che caratterizzano i parametri dell'esplosione (airblast), di fondamentale impor-

⁹ Il valore di picco q_{max} , si ricava dal valore della sovrappressione ΔP_{max} con un fattore variabile fra i valori 0,2 e 0,4, rispettivamente assunto per $q_{max} < 170$ kPa e $q_{max} > 350$ kPa.

¹⁰ Sia per esplosioni interne che esterne di qualsiasi natura, per il calcolo delle sovrappressioni, per i problemi di maggiore rilevanza, è possibile far ricorso a tecniche numeriche (ad esempio in Lu and Wang (2006) [19]), riconducibili alla computational fluid dynamics (CFD), basata su metodi Euleriani e Lagrangiani.

tanza sono le proprietà dell'esplosivo. Dal lato operativo, si tiene conto delle proprietà, considerando un'equivalenza fra il peso dei diversi esplosivi, e il peso (W) di trinitrotoluene (TNT),¹¹ che possiede un equivalente contenuto energetico.¹²

La quasi totalità delle proposte di letteratura fornisce l'andamento delle sovrappressioni e la durata delle stesse, in funzione della distanza ridotta (Hopkinson scale) $\bar{R} = Z = R/W^{1/3}$, espressa in $[m/kg^{1/3}]$, dove R e W sono, rispettivamente, la distanza (in [m]) dal centro della carica e il peso in kg di TNT, equivalente alla carica dell'esplosivo considerato.

Classiche relazioni empiriche, in forma polinomiale con Z, che forniscono la sovrappressione da esplosione a differenti distanze ridotte, sono quelle fornite da Sadovskiy (1952) [11], Brode (1955) [12], da Petrovskiy e Naumyenko (1956) [13], da Henrich (1979) [10], e da Mills (1987) [14].

Più di recente, a tali proposte si sono aggiunte nuove proposte, che vanno dalle relazioni empiriche proposte da Baker (1983) [15], da Kingery-Bulmash (1984) (1986) [16] [17], a metodi empirico-grafico, come quelli riportati nei manuali tecnici predisposti dall'US Army, come il TM5-1300 (1990) e il TM5-855-1 (1986) [18], basati su dati sperimentali e che talvolta ripropongono, in forma grafica, alcuni dei modelli empirici richiamati. In figura 5, sono posti a confronto gli andamenti delle sovrappressioni incidenti di tali proposte di letteratura. In letteratura, sono fornite delle relazioni empiriche, con cui la sovrappressione dell'onda incidente, viene convertita in sovrappressione d'onda riflessa quali, ad esempio, quelle proposte da Henrich (1979) [10] e da Mills (1987) [14]. Oltre a tali classiche proposte, sono disponibili altre proposte operative, dedotte con un approccio statistico, come quella indicata da Hsim Yu Low e Hong Hao (2001) [21], ricavata interpolando i risultati di alcune proposte di letteratura. In figura 6, sono riportati gli andamenti delle sovrappressioni riflesse, in funzione della distanza Z, valutate con riferimento ad alcune di queste classiche proposte di letteratura, tra le quali quella proposta nel documento TM5-1300 dell'U.S. Army (1990) - (USA). Dal confronto dei valori delle sovrappressioni riflesse, valutate con riferimento alle diverse proposte, anche se tale differenza tende a ridursi, all'aumentare della distanza ridotta Z, si osserva la notevole dispersione dei valori, data dalle diverse proposte.

Per quanto riguarda l'impulso, trasmesso alla superficie dell'ostacolo, anche in questo caso, le proposte empiriche di valutazione dell'impulso, sono formulate con espressioni polinomiali della distanza ridotta Z. Nella figura 7, è presentato un confronto che evidenzia l'andamento del valore del tempo di durata (τ) della fase positiva della sovrappressione. Come si può osservare dalla figura 7, le due proposte esaminate forniscono valori molto diversi.

¹¹ Per alcuni principali esplosivi in letteratura sono riportati dei coefficienti di equivalenza al TNT. Nella tabella seguente, sono riportati i coefficienti di equivalenza di alcuni tipi di esplosivi.

esplosivo	TNT equivalente
RDX (Cyclonite)	1,185
PETN	1,282
Compound B (60 % RDX+40% TNT)	1,148
Pentolite 50/50	1,300
Dinamite	1,148
Sentex	1,250

¹² Nel caso della bomba fatta esplodere ad Oklahoma nel 1995, è stato calcolato una carica del peso di 1814 kg (Longinow, 1996) [20].

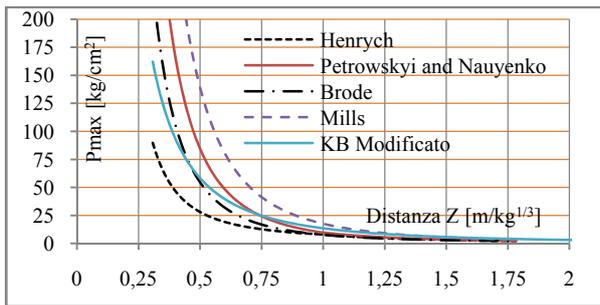


Fig. 5 – Sovrappressioni incidenti da onda d'urto

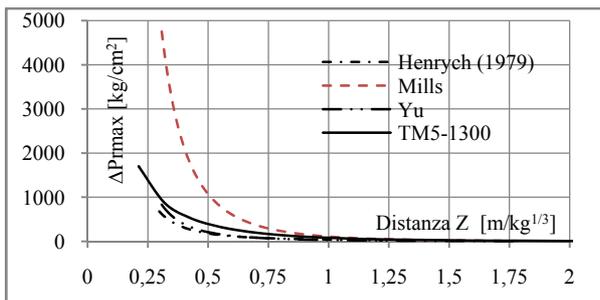


Fig. 6 – Sovrappressioni da onda di riflessione

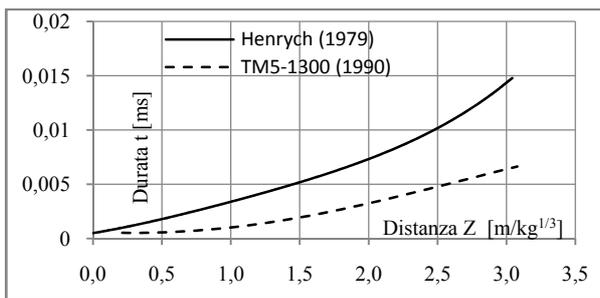


Fig. 7 – Confronto tempo di durata della fase positiva della sovrappressioni in funzione della distanza Z.

2.4 Osservazioni sull'azione da esplosione

Per le azioni da esplosioni si evidenziano due principali fonti di incertezza. La prima è legata alle notevoli diversità di valori dei parametri che caratterizzano l'esplosione, forniti dalle diverse proposte empiriche di letteratura. La seconda è legata alle notevoli possibilità di scenari plausibili, che si possono ipotizzare in termini di posizione e potenza (peso di TNT equivalente) della carica esplosiva. La prima fonte di incertezza e aleatorietà può gestirsi in modo classico, con riferimento all'assunzione dei parametri che caratterizzano gli effetti dell'esplosione come variabili aleatorie (v.a.), basate sui risultati delle sperimentazioni, o sulla base di esperimenti numerici riferiti alle proposte empiriche di letteratura. La seconda fonte di incertezza e aleatorietà, può gestirsi solo con un'analisi del rischio, che escluda gli scenari poco probabili. Infatti, per effetto della limitata disponibilità di dati sperimentali, il livello di pericolo, associato ad un attacco con esplosivo, non può essere studiato sulla base di dati statistici. Peraltro, le diverse condizioni di scenario determinano notevoli differenze fra i valori, che assumono i parametri delle esplosioni e, quindi, degli effetti sulle strutture.

Ad esempio, dai valori dei parametri calcolati con riferimento al manuale TM5-1300, riportati in tabella 1, si evi-

denzia la grande variabilità di situazioni di carico che possono interessare una costruzione, già solo nel considerare una variazione della distanza ridotta Z da 5 a 6 [m/kg^{1/3}]. Le valutazioni sono riferite a scenari di tipo "surface burst", dove l'esplosione è causata da una carica di TNT, posta sul suolo ad una distanza R da un edificio. In figura 8, sono indicate le distribuzioni sulle facciate e sulla copertura delle sovrappressioni.

Scenario	R _G [m]	Z [m/kg ^{1/3}]	W [kg]	ΔPr _{max} [kPa]	t [msec]
1	19,72	5,35	50	88,69	9,74
2	25,00	5,38	100	87,60	12,33
3	30,00	5,12	200	95,70	14,92
4	40,00	5,97	300	84,80	18,02
5	40,00	5,42	400	85,77	19,70
6	40,00	5,04	500	99,80	19,94
7	40,00	6,83	200	56,81	18,34

Tabella 1- Valori di carico da sovrappressione riflessa e della durata della fase positiva, per alcuni plausibili scenari per un edificio in condizioni di surface burst.

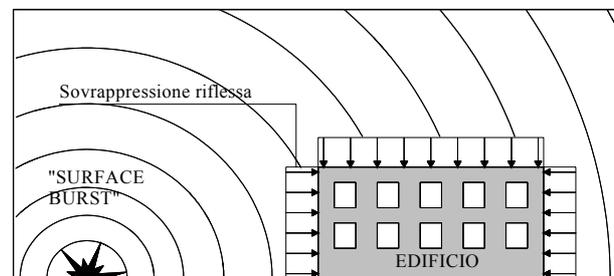


Fig. 8 – Carico da esplosione per uno scenario "surface burst", con sovrappressioni ipotizzate costanti sulle superfici.

Nella figura 8, i valori delle sovrappressioni sono considerati costanti sulle superfici delle facciate e della copertura, in quanto ipotizzate poco estese. Quando, invece, le superfici, sono molto estese, le sovrappressioni possono presentare valori di sovrappressioni, variabili con la distanza dal centro della carica.

3 STRATEGIE DI ATTENUAZIONE RISCHIO DA ESPLOSIONI

3.1 Aspetti generali e approccio economico (Blast-LCC)

Nella gestione del rischio connesso ad esplosioni da attentato e per la individuazione delle strategie, per mitigare tale rischio, si possono seguire diverse strade. In particolare, con riferimento ai soli aspetti strutturali, nella gestione delle strategie per l'attenuazione del rischio rispetto al collasso, oltreché basarsi del controllo della robustezza e sul tipo di collasso della struttura, si può operare sul controllo del carico d'esplosione, che si può ottenere solo con riferimento alla distanza R di Stand off, data l'impossibilità di poter operare sull'altra variabile, che è la quantità di carica (W). Tale obiettivo viene usualmente perseguito, introducendo delle barriere fisiche (fisse o provvisorie) che impediscano ai veicoli, potenzialmente pericolosi, di avvicinarsi oltre una certa distanza.¹³ La barriera stabilisce, così, il potenziale limite di minore distanza della costruzione, dal centro della carica (stand off).

¹³ Tali barriere, quando fisse, possono essere realizzate oltre che per limitare l'accesso anche per costituire dei veri e propri ostacoli che possono "assorbire" gli effetti del blast.

La distanza ottimale di stand off può essere ricavata, con riferimento ad una analisi dei costi che consideri, oltre al costo dell'edificio, anche i costi della protezione e dell'area necessari per la costruzione della fascia di protezione. Dal lato operativo, si tratta di valutare la distanza di stand off minima (R), in relazione alla plausibile massima quantità di carica, trasportabile in un veicolo, con una procedura che ottimizza i costi della costruzione e i costi diretti e indiretti, per la realizzazione delle protezioni fisiche. Nella figura 9, sono riportati gli andamenti qualitativi dei costi in funzione della distanza R, e quindi alla distanza R. Come si può osservare dalla figura 9, la distanza di stand off ottimale corrisponde alla distanza Z, di minimo costo totale.

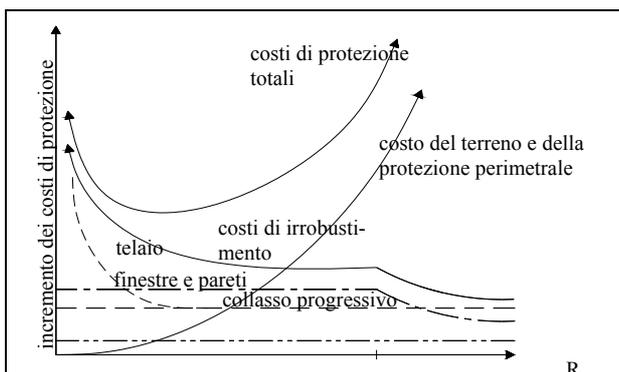


Fig. 9 – BLCC di una costruzione che consideri anche i costi di riduzione del rischio (fonte FEMA 428)

3.2 Considerazioni e proposta operativa di valutazione della distanza di stand off ottimale

Con riferimento ai soli stati limite di danno strutturale, la individuazione della distanza minima di stand off, può essere perseguita, più semplicemente, in tutti quei casi di edifici che offrono la possibilità di poter essere protetti da barriere di accesso. Infatti, come si può osservare dalla figura 9, gli incrementi dei costi degli interventi di irrobustimento, sia in fase di progetto di nuovi edifici, che nel caso di edifici esistenti, laddove siano possibili, risultano essere molto elevati e di limitata efficacia nel contenimento dei danni, rispetto alle protezioni con barriere fisiche di accesso, che abbattano drasticamente il carico da esplosione sulle costruzioni.

In tal caso, si tratta di valutare la distanza R, sulla base dei danni ritenuti accettabili, per effetto dell'azione di blast sulla costruzione e con strutture dimensionate con riferimento ai carichi ordinari, con riferimento ad una plausibile fissata carica massima (massimo peso W di TNT). Ad esempio, con riferimento alla figura 8, definiti i danni accettabili per le facciate, per la copertura e per le controventature (che si oppongono azioni di trascinamento (wind blast), si tratta di valutare valori delle sovrappressioni massime e delle pressioni dinamiche, che determinano i massimi danneggiamenti accettabili (verifica di stato limite di danno), per i diversi componenti strutturali (le strutture in facciata, le controventature e le strutture di copertura). La distanza minima R di Stand off, corrisponde alla massima delle distanze minime (R_i) di stand off, che determina le condizioni di stato limite di danno per i diversi componenti strutturali. Per la definizione degli stati limite di danno, si può procedere in analogia a quanto previsto per le strutture in zona sismica, anche se, nel caso di azioni da esplosione, è necessario considerare che la risposta dei mate-

riali e delle strutture può risultare notevolmente diversa, in quanto legata alla velocità di deformazione dei materiali, indotta dall'azione dell'esplosione.

4 IL COMPORTAMENTO DELLE STRUTTURE IN C.A. ESPOSTE AL CARICO DI ESPLOSIONI

4.1 Cenni sul comportamento dei materiali in regime di carico da esplosione

È noto che le proprietà dei materiali acciaio e calcestruzzo, sono dipendenti dalla velocità di deformazione indotta dalle azioni. Ad esempio, Grote et al. (2001) [22], sulla base dei risultati di letteratura di prove sul comportamento del calcestruzzo, soggetto a elevate velocità d'impatto, propongono una modifica del modello di Scott et al. (1982) [23], fino a coprire velocità di deformazioni da impatto di 700 s^{-1} .¹⁴

Anche per l'acciaio il comportamento si modifica con la velocità di deformazione. Anche se il modulo elastico e la deformazione ultima, rimangono sostanzialmente costanti, con la velocità di carico, si osserva un significativo incremento della deformazione e della tensione di snervamento, a fronte di un più contenuto incremento della resistenza ultima (non superiore al 5-10%, per elevate velocità di deformazione).

4.2 Cenni sul comportamento delle strutture in regime di carico da esplosione

Nella valutazione del comportamento delle strutture esposte alle esplosioni, accanto alle classiche incertezze e aleatorietà delle proprietà meccaniche del calcestruzzo e

¹⁴ In ambito tecnico-normativo, si ricorda che per considerare l'incremento del valore di picco della resistenza (f_c'), viene considerato un fattore di incremento dinamico (IDF) K_d , introdotto dal CEB-FIP (1990) [24]. Successivamente, la proposta del CEB è stata modificata da Malvar (1998) [25]. Nella proposta CEB il fattore K_d cresce con la velocità di deformazione imposta ed assume le seguenti espressioni:

$$K_d(\dot{\epsilon}) = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1,026\alpha} \quad \text{per } \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1}$$

$$K_d(\dot{\epsilon}) = \gamma(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1/3} \quad \text{per } \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1}, \text{ dove: } \dot{\epsilon} = \text{velocità di deformazione; } \dot{\epsilon}_s = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \text{ (quasi-static strain rate); } \log \gamma = 6.156\alpha - 2; \alpha =$$

$1/(5 + 9f_c' / f_{co})$; $f_{co} = 10 \text{ MPa}$. La deformazione di picco viene incrementata dal valore quasi-statico ϵ_c al valore dinamico ϵ_{dc} , in funzione della velocità di deformazione imposta, secondo la seguente espressione: $\epsilon_{dc} = (0.12 K_d^3(\dot{\epsilon}) + 0.76)\epsilon_c = K^* \epsilon_c$. I risultati degli studi [26] mostrano che anche il modulo elastico del calcestruzzo aumenta con l'aumento della velocità di deformazione.

Liu and Owen (1986) [27] forniscono un modello di comportamento dell'acciaio per carichi dinamici con espressione:

$$f_{yd} / f_{ys} = \lambda \log_{10}(\dot{\epsilon}_d / \dot{\epsilon}_s) + 1, \text{ dove } f_{yd} \text{ e } f_{ys} \text{ sono la resistenza di}$$

snervamento dinamica e statica, $\dot{\epsilon}_d$ e $\dot{\epsilon}_s$ sono i corrispondenti valori

della velocità di deformazione; λ è 0,03 e $\dot{\epsilon}_s$ è circa $10^{-2}/\text{s}$. Malvar e Crawford (1998) [28] propongono una formulazione per il coefficiente di amplificazione dinamico (DIF), sia per la tensione di snervamento che ultima, in funzione della velocità di deformazione dell'acciaio

delle barre, avente la seguente espressione: $\text{DIF} = (\dot{\epsilon} / 10^{-4})^\alpha$. Con α

che assume per la tensione di snervamento, l'espressione:

$$\alpha = 0,074 - 0,04 \cdot f_y / 414, \text{ mentre, per la tensione ultima:}$$

$$\alpha = 0,019 - 0,009 \cdot f_y / 414, \text{ dove } \dot{\epsilon} \text{ è la velocità di deformazione } [\text{s}^{-1}],$$

f_y è la tensione di snervamento dell'acciaio [MPa]. La formulazione è

valida per acciai, con snervamento tra i 290 MPa e i 710 MPa, e per

valori di $\dot{\epsilon}$ tra 0.0001 s^{-1} e 225 s^{-1} .

dell'acciaio d'armatura, in regime quasi-statico, occorre considerare le incertezze e le aleatorietà delle stesse proprietà, legate alla velocità di deformazione, imposta dalle azioni da esplosione. Tale circostanza determina una correlazione delle v.a. da cui dipende la resistenza, con le v.a. che caratterizzano l'azione da esplosione. Peraltro, un'analisi che consideri la variazione della velocità di deformazione con aggiornamento delle proprietà dei materiali, in funzione della variazione della velocità di deformazione, risulterebbe estremamente complessa. Generalmente, nelle analisi in regime dinamico, in presenza di azioni da esplosione, si assume che la velocità di deformazione sia costante durante e dopo l'applicazione del carico impulsivo e che sia uniforme in tutta la struttura. Sulla base di tale ipotesi si ritiene, spesso, adeguata una soluzione tecnica approssimata, ottenuta con riferimento ad un oscillatore semplice (SDOF), che simuli il comportamento della struttura, sotto carico impulsivo da esplosione. Tale procedura è molto usata nelle analisi dinamica di strutture in c.a. esposte ad esplosioni, anche in riferimento a valutazioni della sicurezza probabilistica (ad esempio, in Yu e Hao (2001) [21]).

5 ANALISI E OSSERVAZIONI IN RIFERIMENTO IL COMPORTAMENTO DI TRAVI IN C.A.

5.1 Valutazioni e osservazioni sul comportamento di travi in c.a. in regime di carico da esplosione

Al fine di evidenziare come la risposta delle strutture in c.a., sia influenzata dalle caratteristiche del carico da esplosione, si sono sviluppate valutazioni di danneggiamenti prodotti su delle travi in c.a. In particolare, a titolo esemplificativo, per lo studio, si sono considerate le strutture di copertura di un edificio, che, si suppone, sia organizzata con travi, poste con interasse di 1,63 m, con una luce di circa 24,3 m, vincolate alle estremità con una condizione di incastro. La consistenza geometrica e meccanica è ipotizzata con riferimento a travi reali (denominate 2, 3 e 4), già studiate in Acito et al. (2004) [29]. Per semplicità, lo studio è condotto nelle ipotesi carico di esplosione uniforme e nell'ipotesi dei carichi permanenti e dei pesi propri strutturali, già indicati in Acito et al. (2004). Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle travi, sono state utilizzate per la formulazione dei legami momento-curvatura ($M-\chi$), assegnati a ciascun concio della trave studiata e valutati, in relazione alle proprietà dei materiali, considerando, per il calcestruzzo, il confinamento esercitato dalle armature trasversali (Acito et al. (2004) [30]). Eseguendo il confronto fra i danneggiamenti corrispondenti a diversi scenari si osserva, ad esempio, che il danneggiamento, espresso in termini di spostamento residuo della sezione di mezzzeria, corrispondente allo scenario 1 di tabella 1, con sovrappressione di 88,69 kPa, risulta minore del danneggiamento indotto dall'azione di sovrappressione di 56,81 kPa, dello scenario 7. Tale circostanza, diventa ancora più evidente, se a titolo di esempio, si ipotizza uno scenario che comporti la stessa sovrappressione di 56,81 MPa, ma con una durata di 30 ms. In tal caso, il danneggiamento (freccia residua di circa 8 cm) diventa notevolmente superiore.

Ulteriori analisi dinamiche (25 analisi) sono state eseguite, a partire dai valori della sovrappressione e del tempo di durata relative allo scenario 6 di tabella 1. Le analisi sono state sviluppate assumendo i valori estremi, corrispondenti ai frattili superiori e inferiori del 5% e del 5%, valutati a partire dai valori della sovrappressione e della durata dello scenario 6, in ipotesi di v.a. di tipo normale, caratterizzate da $COV=0,2$

e 0,3. Inoltre, sono stati anche eseguite delle analisi con riferimento a scenari con diversi valori di distanza ridotta Z , a partire da cariche di peso W di 100, 200 e 500 kg. Per la valutazione della risposta strutturale, si sono assunti i valori deterministici dei legami ($M-\chi$) in regime quasi-statico. Nella figura 10, sono riportati gli andamenti dello spostamento della sezione di mezzzeria, ottenuti con riferimento ad alcuni scenari considerati fra i quali lo scenario caratterizzato da una sovrappressione di 2667 kPa, con durata 1,32 ms (con area d'impulso pari a 1741 kPa ms), dato dalla esplosione di una carica di 200 kg di TNT, posta a distanza ridotta $Z=1$. Come si può osservare dalla figura 10, tale andamento si sovrappone abbastanza bene con quello effetto di uno scenario caratterizzato da una sovrapposizione molto minore, di 288,17 kPa, anche se applicata con una durata di 19,94 ms, ma che, però, presenta circa lo stesso impulso, pari 1760 kPa ms. Tale circostanza, si conferma nella figura 11, dove sono riportati gli andamenti delle variazioni degli impulsi associati all'esplosioni, e degli spostamenti della sezione di mezzzeria, calcolati con le analisi dinamiche. Tali variazioni sono valutate rispetto all'impulso e al corrispondente spostamento della sezione di mezzzeria della trave, relativi allo scenario 6, assunto come riferimento. Infatti, ad esclusioni degli scenari caratterizzati da elevate sovrappressioni (7-10 volte quella dello scenario 6 di riferimento), pur in presenza di grandi deformazioni residue della struttura, si osserva una variazione dell'effetto (spostamento), analoga alla variazione della causa (carico di blast), intesa come azione d'impulso.

Al fine di valutare se le ipotesi assunte nel modello numerico per le analisi dinamiche, relative al comportamento in regime quasi-statico dei materiali siano corrette, si sono valutate le velocità di deformazioni prodotte per alcuni scenari considerati. Nelle figure 12 e 13, sono riportati gli andamenti della curvatura e della velocità di deformazione del calcestruzzo (valutata in corrispondenza delle fibre più compresse) e dell'acciaio (valutata nel baricentro delle armature tese), in corrispondenza del concio di estremità della trave.

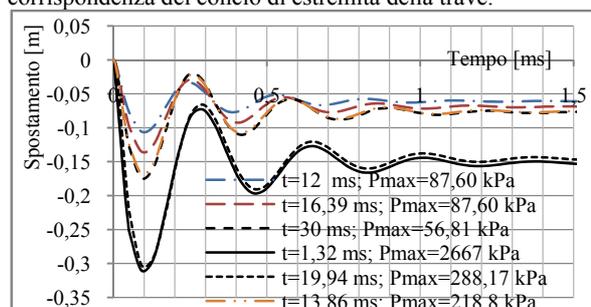


Fig. 10 - Confronto dell'andamento dello spostamento della sezione di mezzzeria

I valori delle velocità di deformazioni sono riferiti ad un valore del rapporto incrementale, calcolato rispetto all'origine, fino al primo picco di curvatura massima. I valori massimi di velocità di deformazione del calcestruzzo, pari a $\dot{\epsilon}=0,05/s$ e a $\dot{\epsilon}=0,15/s$, per l'acciaio, determinano dei valori dei fattori di incremento dinamico (DIF) pari a $K_{dc}=1,221$ e pari a $K_{ds}=1,035$, rispettivamente. Peraltro, la variazione delle proprietà dei materiali per effetto DIF, non modifica significativamente il legame costitutivo $M-\chi$ dei conci di estremità, confutando così la validità dei risultati delle analisi, ottenute con i legami costitutivi in regime quasi-statico.

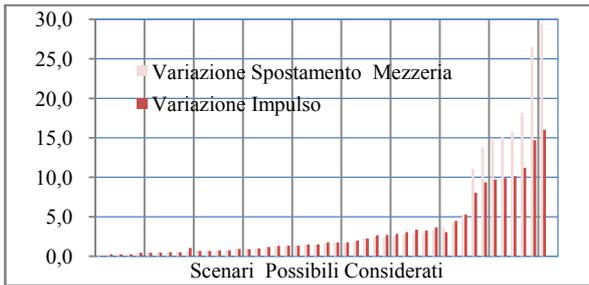


Fig. 11 – Confronto fra le variazioni dello spostamento massimo e del corrispondente impulso rapportati ai valori corrispondenti ai valori medi dello scenario 6.

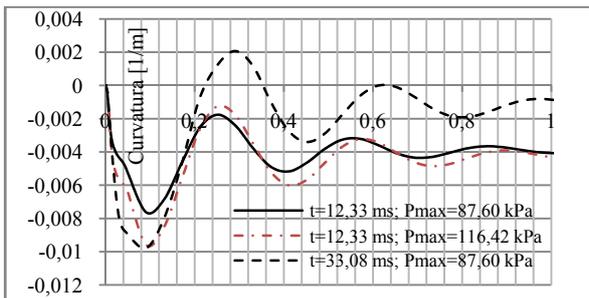


Fig. 12 – Andamento delle curvature nel tempo del concio di trave agli incastri

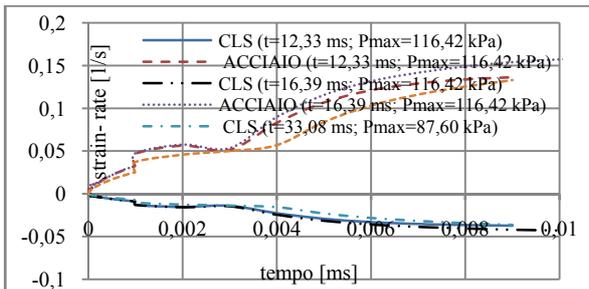


Fig. 13 – Andamento delle velocità di deformazione delle fibre di calcestruzzo più compresse e dell'acciaio teso del concio di trave agli incastri, valutate fino al 1° picco (Fig. 12).

Nella figura 14, sono riportati gli andamenti dei diagrammi $M-\chi$ del concio di estremità, valutati per alcuni scenari considerati nelle analisi.

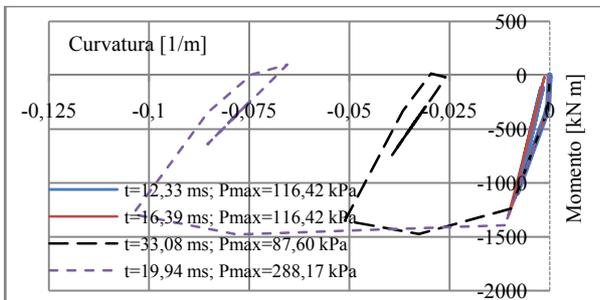


Fig. 14 – Andamento del legame $M-\chi$ nel tempo, del concio di trave agli incastri

5.2 Verifica probabilistica dello stato limite di danno

Dato l'elevato grado d'incertezza e aleatorietà del carico da esplosione, che si riflette nella risposta della struttura, la quale è già affetta dalle incertezze e aleatorietà dei materiali e delle caratteristiche geometriche, una più corretta valutazione dello stato limite di danno, può ottenersi con un approccio di tipo probabilistico. In tal caso, in un problema di verifica, per una data carica esplosiva (di peso W di TNT) e per una data posizione delle barriere, che fissano la distanza di stand off R , si tratta di valutare che la probabilità di superare lo stato limite di danno sia accettabile. In particolare, per lo SLD considerato, la misura si ritiene positiva se risulta: $P_{fi} \leq P_{fi}^*$, dove P_{fi}^* è la probabilità limite ritenuta accettabile.

Per la definizione dello stato limite di danno, si possono considerare diversi aspetti. Ad esempio, nel caso di una trave in c.a., si può assumere che lo spostamento massimo della sezione di mezzeria, in regime plastico, rispetti uno stabilito rapporto di duttilità. In tal caso, la funzione di stato limite può essere formulata con l'espressione: $g = \mu \cdot V_y - V_{max}$, dove μ è il rapporto di duttilità assunto come accettabile, v_{max} è lo spostamento massimo indotto dalle azioni, v_y è lo spostamento valutato al limite elastico.

In modo più semplice, lo spostamento limite accettabile può essere assunto, ad esempio, con riferimento alla luce L della trave. In tal caso, si può far riferimento ad uno spostamento massimo istantaneo e/o allo spostamento residuo della sezione di mezzeria (ad esempio, come limite istantaneo, si può assumere $v_{max} \leq L/50$, mentre come limite residuo, si può assumere $v_{res,max} \leq L/100$). In alternativa alla freccia della sezione di mezzeria, si può assumere che la curvatura massima in regime plastico, rispetti uno stabilito rapporto di duttilità. In tal caso, la funzione di stato limite può essere formulata con l'espressione: $g = \mu \cdot \chi_y - \chi_{max}$, dove μ è il rapporto di

duttilità, assunto come accettabile, χ_{max} è la curvatura massima plastica, indotta dalle azioni, χ_y è la curvatura massima, valutata al limite elastico (ovviamente, nel caso in esame, essendo la trave incastrata e con carico distribuito uniforme, la curvatura osservata non può che riguardare il concio di estremità incastrata). La procedura per il calcolo della probabilità di failure, può essere sviluppata secondo le classiche procedure analitiche approssimate FOSM-RI, nell'ipotesi di disporre di semplici relazioni analitiche, che descrivono il comportamento dinamico della struttura, prima e dopo le plasticizzazioni. Tale circostanza, però, può facilmente conseguirsi in tutti quei casi in cui la struttura può ricondursi ad un oscillatore ad un grado di libertà (SDOF), come è, ad esempio, nel caso di travi a sezioni costanti e con armature identiche in tutte le sezioni. Negli altri casi, la gestione più semplice può risultare di tipo numerico, la cui precisione riflette la numerosità di "esperimenti" numerici, ottenuti con riferimento al carico da esplosione di un dato scenario, generati secondo procedure tipo Monte Carlo. È pur vero, però, che a fronte dei valori campionati delle azioni con procedura Monte Carlo, devono seguire della analisi dinamiche, il cui impegno temporale può risultare eccessivamente oneroso. Per ovviare a tale onerosità, si possono sviluppare delle valutazioni di campionatura delle azioni da esplosione di un dato scenario, con procedura Monte Carlo, da utilizzare come input per un modello con rete neurale (RNA), addestrata sui risultati di analisi numeriche

(FEM), svolte in regime di dinamica non lineare.¹⁵ In tal modo, si ottiene la possibilità di disporre di una statistica molto estesa di risposte della struttura, che possa consentire di tarare una v.a. di repertorio che caratterizzi, al meglio, la risposta strutturale. Ad ogni modo, una volta caratterizzata la risposta strutturale, si può procedere alla valutazione della probabilità di failure, con procedura FOSM-RI, in cui la v.a. lato domanda, da considerare nella equazione di stato limite di danno, è assunta con il valore medio e il valore della deviazione standard, della statistica degli esperimenti di analisi dinamica considerati.¹⁶ In luogo di tale procedura, in modo semplice, si può operare una stima della probabilità di superamento dello stato limite di danno, limitando le analisi dinamiche a poche decine di elaborazione ed assumendo, per la caratteristica di comportamento, osservata con la sperimentazione numerica (spostamento, curvatura, momento, ecc.), un'aleatorietà di tipo normale. Ad esempio, con riferimento ai risultati delle 25 analisi dello scenario 6, si è valutato il valore medio e la deviazione standard della freccia massima istantanea v_{max} (al primo picco) e della freccia residua v_{resid} . (a tempo infinito). Nella tabella 2, sono riportati tali valori calcolati, con riferimento allo scenario considerato.

scenario	μ_{Vresid}	σ_{Vresid}	μ_{Vmax}	σ_{Vmax}
6	0,09736	0,074298	0,18848	0,136526

Tabella 2: Valutazione dei valori medi e delle deviazioni standard dello spostamento

I corrispondenti valori della stima della probabilità di superamento dello stato limite di danno, con riferimento ai valori massimo istantaneo e residuo, rispettivamente ipotizzate pari a $L/50=48,6$ cm e $L/100=24,3$ cm, risultano essere:

$$P(v_{max} \leq L/100) = 1,4 \cdot 10^{-2} \quad ; \quad P(v_{resid} \leq L/50) = 2,4 \cdot 10^{-2}$$

5.3 Valutazione della distanza di stand off, per le strutture a trave in C.A.

In un problema di calcolo della distanza di stand off si procede in verso opposto, a quanto svolto per la verifica. Fissato lo stato limite di danno si ricerca, per una data quantità di carica, la distanza minima da garantire con barriere, associate

¹⁵ È noto l'impiego di reti neurali (RNA) per la realizzazione di un modello empirico approssimato ingresso-uscite di un qualsiasi sistema, a partire da un insieme di esempi di funzionamento che coprono in modo efficace lo spazio del funzionamento del sistema. In questo caso, si può addestrare la RNA considerando i risultati delle analisi numeriche (uscite), a partire dai valori di input costituiti dai valori di sovrappressione e di durata utilizzati nelle analisi. Infatti, con la procedura con RNA è possibile simulare il funzionamento del "sistema" sia nel senso ingresso-uscita (input-output), sia nel senso uscita-ingresso (output-input). Pertanto, una volta definito l'output corrispondente al raggiungimento dello stato limite, con la RNA si possono stimare i dati di input che danno luogo a quelle uscite.

¹⁶ Nell'ipotesi di v.a. lato resistenza e lato azione, non correlate, ipotesi accettabile in ambito delle basse velocità di deformazione dei materiali, e di ipotesi di funzione di stato limite non lineare, la procedura FOSM-RI prevede la seguente espressione dell'indice di sicurezza:

$$\beta = \frac{g(\mu_{X1}, \dots, \mu_{Xn})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{X_i}^2}}, \quad \text{con } a_i = \frac{\partial g}{\partial X_i}, \quad \text{dove } \mu_{X_i} \text{ e } \sigma_{X_i} \text{ sono, rispettivamente, i valori medi e la deviazione standard delle v.a., lato resistente e lato domanda, che sono considerate nella relazione di stato limite.}$$

vamente, i valori medi e la deviazione standard delle v.a., lato resistente e lato domanda, che sono considerate nella relazione di stato limite.

alla sovrappressione e alla durata della stessa, che produce il raggiungimento dello stato limite di danno. In questo caso, la ricerca della sovrappressione e del tempo di durata può svolgersi per tentativi. La difficoltà di individuare lo scenario corrispondente potrebbe essere superata con l'impiego di procedure che utilizzino dei sistemi intelligenti addestrati sulla base di un certo numero di simulazioni numeriche. Anche in questo caso, però, per rendere operativi tali procedure è necessario sviluppare numerose simulazioni numeriche per addestrare la rete. Peraltro, la corrispondenza fra la variazione della causa (impulso) e la variazione dell'effetto (spostamento sezione di mezzeria), osservata nel caso di scenari con un impulso non elevato, può favorire la ricerca per tentativi della distanza di stand off. Infatti, la valutazione per tentativi della distanza R di stand off, parte dalla valutazione di un possibile valore di sovrappressione e della durata, che comportano il raggiungimento dello stato limite di danno ipotizzato, può essere agevolato dalla considerazione che pur in regime non lineare, in ambito di scenari con sovrappressioni non elevate, tenendo conto degli andamenti dei rapporti di figura 11. In tal caso, dopo pochi tentativi si può ricavare la distanza R, attraverso le relazioni empiriche di letteratura, una volta ipotizzare una plausibile quantità di peso W di TNT. Ad esempio, valutato con analisi numerica lo spostamento massimo della sezione di mezzeria pari a $v_{max}=0,1339$ m, con riferimento ad uno scenario 3 di tabella 1, corrispondente ad un impulso di 713,4 kPa ms, si può stimare che l'impulso corrispondente al danneggiamento massimo considerato accettabile (ipotizzato in $0,486 \text{ m}=L/50$), sia pari a $713,4 \times 0,486 / 0,1339 = 2589,41$ kPa ms. Sulla base di tale valore dell'impulso, si può ricavare stimare una stima della distanza ridotta Z, fissato il peso della carica in $W=300$ kg. Infatti, uguagliando il valore dell'impulso pari a 2589,41 kPa ms, al valore espresso dalle relazioni empiriche, in funzione della distanza ridotta Z, assunta come incognita, si ricava la Z corrispondente. In particolare, nel caso si faccia riferimento alle relazioni empiriche proposte da Henrych (1979) si ottiene $R=14,8$ m, con $\tau=12,0$ ms e $\Delta P_{max}=422,9$ kPa, mentre, con riferimento alle proposte del documento TM5 - 1300, si ottiene $R=13,1$ m, con $\tau=4,17$ ms e $\Delta P_{max}=1252$ kPa.

6 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio presenta una rassegna delle principali proposte empiriche per la valutazione delle azioni da esplosione. In particolare, si sono prese in considerazione le azioni da esplosioni esterne dovute ad esplosivi veri e propri, riconducibili a possibili scenari di attentati terroristici. Nello studio sono evidenziati i principali aspetti delle azioni da esplosione, ponendo a confronto le principali relazioni empiriche per la valutazione dei parametri che definiscono l'azione delle esplosioni. Da tale confronto, si è potuto constatare la notevole dispersione dei valori dei parametri caratteristici dell'azione delle esplosioni, forniti da tali relazioni empiriche. Le simulazioni con analisi in regime di dinamica non lineare, su casi semplici di strutture in calcestruzzo armato, in presenza di scenari plausibili di azioni da esplosione, ha permesso di evidenziare il ruolo della durata dell'applicazione delle sovrappressioni (impulso), dovute alle diverse ipotesi di scenari.

In particolare le simulazioni sulla trave di c.a. studiata, hanno anche permesso di evidenziare che:

- entro ambiti d'impulsi non elevati si può considerare che per una trave di altezza ordinaria, le proprietà dei materia-

li possono considerarsi non significativamente modificate dal regime dinamico indotto dall'esplosione;

- le strutture progettate con riferimento a carichi ordinari, in ipotesi di accettare danni che non compromettano la stabilità delle stesse, possono offrire una importante capacità resistente nei riguardi di azioni da esplosione;
- a partire da condizioni di danno accettabili per i componenti strutturali di una costruzione, risulta molto agevole valutare una stima della probabilità di superamento;
- a partire da condizioni di danno accettabili per i componenti strutturali di una costruzione, risulta agevole progettare la distanza di stand off R, da assicurare alla costruzione, mediante barriere fisiche provvisorie o fisse, che impediscano ai veicoli potenzialmente pericolosi di avvicinarsi alla costruzione.

7 - RINGRAZIAMENTI

Nel redigere questa memoria mi è stato di prezioso stimolo e di utili suggerimenti il prof. A. Migliacci che da sempre cura il problema della sicurezza strutturale.

8 - REFERENCES

- [01] UNI EN 1991-1-7:2006. Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-7: Azioni in generale - Azioni eccezionali.
- [02] DM 14 gennaio 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni, Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008.
- [03] Osteraas J. D. (2006). "Murrah building bombing revisited: A qualitative Assessment of blast damage and collapse patterns". ASCE J. Of Perform. Of Constructed Facilities, Vol. 20, No. 4, November 2006.
- [04] TM5-1300. 1990. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. US Army. USA.
- [05] Federal Emergency Management Agency, FEMA 426, Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings.
- [06] Federal Emergency Management Agency, FEMA 427, Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks.
- [07] Federal Emergency Management Agency, FEMA 428, Primer for Designing Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks.
- [08] Federal Emergency Management Agency, FEMA 429, Primer for Terrorist Risk Reduction in High Occupancy Buildings.
- [09] Federal Emergency Management Agency, FEMA 430, Security Component for Architectural Design.
- [10] Henrych J. The dynamics of explosion and its use. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [11] Sadovskiy M.A. (1952), Mechanical Effects of Air Shock Waves from Explosions According to Experiments. Moskau.
- [12] Brode H.L., Numerical solution of spherical blast waves. Journal of Applied Physics, No. 6, (June 1955).
- [13] Naumenko I.A., Petrovski I.G., The Shock Wave of a Nuclear Explosion. Moskau (1956)
- [14] Mills C.A. The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects. In: Proceedings of the 1st International Conference for Hazard Protection, Edinburgh, 1987.
- [15] Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A., (1983). Explosion hazards and evaluation. Elsevier.
- [16] Bulmash G., Kingery C.N., (1984) "Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst." Raport ARBL-TR-02555 - US Army.
- [17] Bulmash, G. and Kingery, C. N. (1986). "Computational determination of blast wave pressure-time histories." Proceedings of the 1986 ASME International Computers in Engineering Conference and Exhibition, Vol. 2. ASME, NY, 343-347.
- [18] TM5-855-1 (1986). "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons US department of the Army, (1987).
- [19] Lu Y. and Wang Z. (2006). "Characterization of structural effects from above-ground explosion using coupled numerical simulation". Computer and structures 84 (2006) 1729-1742.
- [20] Longinow A., Mniszewski R. K. (1996). "Protecting buildings against vehicle bomb attacks". ASCE J. Practice Periodical on struct. Design and construction, Vol. 1, No. 1, February 1996.
- [21] Hsin Yu Low, Hong Hao (2001). "Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading". Structural Safety 23 (2001) 157-178.
- [22] Grote, D., Park, S., & Zhou, M. (2001), "Dynamic behaviour of concrete at high strain rates and pressures". Journal of Impact Engineering , V25, 2001, pp. 869-886.
- [23] Scott, B.D., Park, R., & Priestley, M.J.N. 1982. Stress-Strain Behaviour of Concrete by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates. ACI Structural Journal, V19, 1, pp. 13-27.
- [24] CEB-FIP (1990). CEB-FIP Model Code 1990, Comité Euro-International du Béton, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK.
- [25] Crawford, J.E., Malvar, L.J. (1998). "Dynamic increase factors for concrete". Twenty-eighth DDES Seminar, Orlando, FL, August 1998.
- [26] Bischoff, P.H., Perry, S.H., 1991. Compression behavior of concrete at high strain-rates. Mater. Struct. 24, 425-450.
- [27] Liu GQ, Owen DRJ. (1986), Ultimate load behavior of reinforced concrete plates and shells under dynamic transient loading. International Journal for Numerical Methods in Engineering 1986;22:189-208.
- [28] Malvar L.J. 1998. Review of Static and Dynamic Properties of Steel Reinforcing Bars, ACI Materials Journal , V95, 5, pp. 609-616.
- [29] M. Acito, A. Migliacci (2004), Il progetto del risanamento strutturale dell'impalcato del 26° piano del grattacielo Pirelli a Milano, Giornate AICAP di Verona 2004.
- [30] M. Acito, A. Migliacci, A. Franchi (2004), Il risanamento strutturale del grattacielo Pirelli a Milano, Studi e Ricerche Vol. 24. Italcementi Editore 2004.