

## Alcune considerazioni sulle procedure di progetto per strutture resistenti al carico da esplosione

Sergio Tattoni<sup>1</sup>, Flavio Stochino<sup>1</sup>

### 1. Introduzione

I drammatici fatti di cronaca dell'ultimo decennio hanno costretto ad una profonda riflessione sulla reale sicurezza delle nostre costruzioni nei confronti del carico da esplosione. Basti pensare ai numerosissimi attacchi terroristici che si susseguono in tutto il mondo o agli incidenti industriali e domestici che mietono vittime anche nel nostro Paese. Come ben definito da Genova-Silvestrini [ 1 ] “Con il termine esplosione si indica una violenta reazione, tipica degli esplosivi, caratterizzata da un forte sviluppo di gas e calore e conseguente aumento di volume dei prodotti di reazione”. Risulta evidente come il fenomeno sia complesso e di conseguenza non si dispone di modelli di calcolo in grado di prevedere in maniera globale i suoi effetti sulle strutture. Ad esempio la fenomenologia è completamente diversa a seconda che la propagazione del fenomeno avvenga a velocità subsonica (deflagrazione- onda di pressione) o supersonica (detonazione-onda d'urto). Nel primo caso elementi quali grado di confinamento e congestione dell'ambiente in cui avviene l'esplosione sono parametri chiave per valutare gli effetti dell'evento; nel secondo non hanno alcuna influenza.

### 2. Inquadramento legislativo Italiano

Dal punto di vista legislativo è stato tramite l'Eurocodice 1 [ 2 ] che si è introdotto per la prima volta un metodo per la definizione dell'azione derivante da un'esplosione. In Italia solo nel 2008 con l'emanazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni [ 3 ] si è recepito quanto da esso riportato. In realtà si definisce solo il valore di pressione che si genera nel caso di un'esplosione interna (per esempio in seguito ad una fuga di gas), mentre non fornisce indicazioni nel caso di esplosioni esterne. Indagando con più attenzione nel passato si può notare come il pericolo di esplosione sia stato trattato da due filoni principali della legislazione italiana: un filone relativo ad armi ed esplosivi ed uno relativo alle attività lavorative a rischio di esplosione. Per quanto riguarda il settore armi ed esplosivi il primo documento è stato il Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza [ 4 ] ed il suo Regolamento Attuativo [ 5 ]. In riferimento alle attività lavorative a rischio la legge vigente è il Testo Unico sulla Sicurezza [ 6 ]; si rimanda a Genova-Silvestrini [ 1 ] per una descrizione più completa.

### 3. Modello del carico da esplosione

Sin dall'introduzione è chiaro quanto sia complesso poter definire uno scenario di carico che rappresenti l'esplosione. Le incertezze e le difficoltà da affrontare si possono descrivere in più livelli: il primo è quello che riguarda la quantificazione della minaccia esplosiva in termini di kg di TNT equivalente<sup>2</sup>. Infatti soprattutto nell'analisi di scenari di carico legati a possibili attacchi terroristici non è semplice stabilire quale possa essere la quantità di materiale esplosivo contenuto in un'autobomba o nascosto in un pacco. Servirebbe uno studio statistico sulla serie storica di attentati in quella zona suffragato da una precisa analisi del rischio. Un secondo livello di incertezza riguarda la geometria dello scenario intesa sia come distanza tra la posizione della carica e la struttura obiettivo sia come posizione relativa tra i vari oggetti presenti (muri di protezione, opere di arredo urbano per le esplosioni esterne, ma anche dimensione e grado di occupazione volumica degli ambienti in cui avviene un'esplosione interna). Un terzo livello di incertezza riguarda i modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) che definiscono lo svilupparsi della reazione esplosiva. Pur conoscendo geometria dello scenario e quantitativi esatti dei materiali reagenti, rimangono importanti

---

<sup>1</sup> DICAAR Università degli Studi di Cagliari

<sup>2</sup> Il fattore di equivalenza è ricavato sulla base di considerazioni energetiche tra il TNT e l'esplosivo in questione.

marginari di aleatorietà nei riguardi delle condizioni atmosferiche (pressione, vento, umidità, temperatura dell'aria) che possono modificare radicalmente la time-history della pressione sull'obiettivo.

In letteratura esistono tanti modelli più o meno complessi che cercano di superare queste difficoltà; in Figura 1 sono mostrati due tipici risultati che rappresentano l'andamento della pressione nel tempo in riferimento alla costruzione obiettivo.

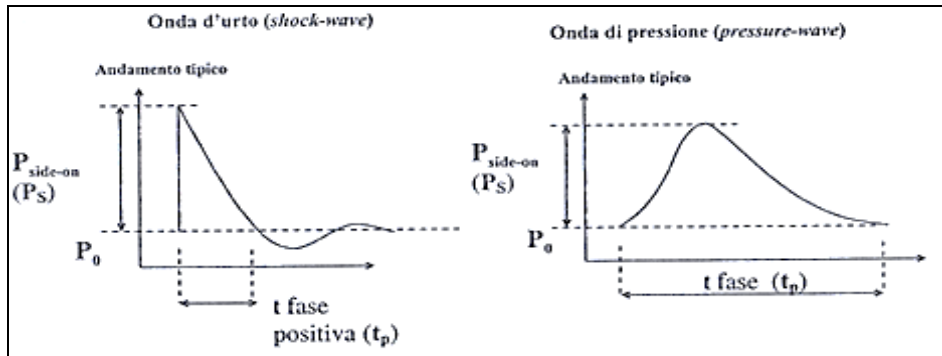


Figura 1: Modelli per la descrizione di un'onda d'urto dovuta a detonazione e onda di pressione dovuta a deflagrazione con i loro parametri caratteristici. Tratto da Genova-Silvestrini [ 1 ].

Grazie a questi modelli a partire da un unico parametro, che esprime il rapporto tra distanza di stand-off (distanza tra carica e obiettivo)  $d$  e massa  $m$  dell'esplosivo (espressa in termini di kg di TNT equivalente) chiamato distanza scalata  $z$  ( 1), si possono costruire dei diagrammi che forniscono picco della pressione, durata della fase positiva e impulso come quello mostrato in Figura 2.

$$z = \frac{d}{m^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

#### 4. Modello strutturale

Argomento di grande attualità è la modellazione della risposta strutturale sotto tali carichi. Il modello più semplice che si può concepire è quello di un oscillatore equivalente ad un grado di libertà (SDOF) che presenta opportune caratteristiche di massa, rigidità e smorzamento per rappresentare il comportamento della struttura reale. Tale modello è tanto più valido quanto più è semplice la costruzione che rappresenta. Infatti si presta a definire molto bene la risposta di singoli elementi strutturali quali travi, pilastri ecc. Fornisce indicazioni molto meno precise quando viene utilizzato per rappresentare edifici che si sviluppano in altezza e in lunghezza secondo schemi a telaio, piastre, cupole ecc. Infatti, il principale limite dello SDOF è che non può fornire indicazioni su modi di vibrare superiori al primo. Per tal motivo si sono proposti modelli MDOF a più gradi di libertà che si sono realizzati attraverso la tecnica degli elementi finiti. In alcuni studi le analisi si sono spinte fino a modelli di travi e piastre continue che richiedono un fortissimo onere computazionale e non risultano ancora applicabili nella pratica professionale. La parte più complessa di tali modelli strutturali consiste nel tener conto delle risorse plastiche delle strutture. Infatti pensare di rispondere a sollecitazioni estreme, come quelle del carico da esplosione rimanendo in campo elastico porterebbe a un sovradimensionamento economicamente non accettabile. Ne consegue che le analisi strutturali dovranno necessariamente essere elasto-plastiche non lineari.

Naturalmente anche la performance dei materiali strutturali dovrà essere accuratamente modellata soprattutto tenendo conto di come la velocità di deformazione (strain-rate) la influenzi e la modifichi. L'ultima versione del Model Code 2010 [ 7 ] fornisce alcune semplici formulazioni riguardanti il calcestruzzo che propongono leggi di variazione dei suoi parametri caratteristici in funzione della velocità di deformazione.

Merita un'attenzione particolare l'analisi della differenza tra la risposta globale dell'intera struttura e la risposta locale di alcuni suoi elementi. Per capire meglio basta un semplice esempio: se la detonazione di una certa quantità di esplosivo avviene abbastanza vicino alla struttura, inizialmente, l'onda d'urto interesserà solo una parte della costruzione. Se tale parte cede localmente la risposta della struttura sarà completamente diversa dal caso in cui tali azioni si possano redistribuire su altri elementi. Se la stessa carica è posta a una distanza maggiore, a parità di condizioni, l'onda d'urto investirà la struttura interessando un'area molto maggiore con una redistribuzione degli sforzi ben diversa. Pertanto uno dei controlli presenti nell'analisi strutturale dovrebbe consistere nell'assicurarsi che eventuali cedimenti locali non possano provocare crolli globali. Questo permette di sottolineare uno dei concetti fondamentali delle NTC 08 [ 3 ]: la robustezza. Infatti una delle caratteristiche richieste alle costruzioni da questa norma è la capacità di non subire danni sproporzionati alla causa che li ha prodotti. In altri termini una struttura è robusta quando è in grado di redistribuire le azioni che agiscono su di essa anche a seguito di danneggiamenti locali senza veder compromessa la sua sicurezza globale.

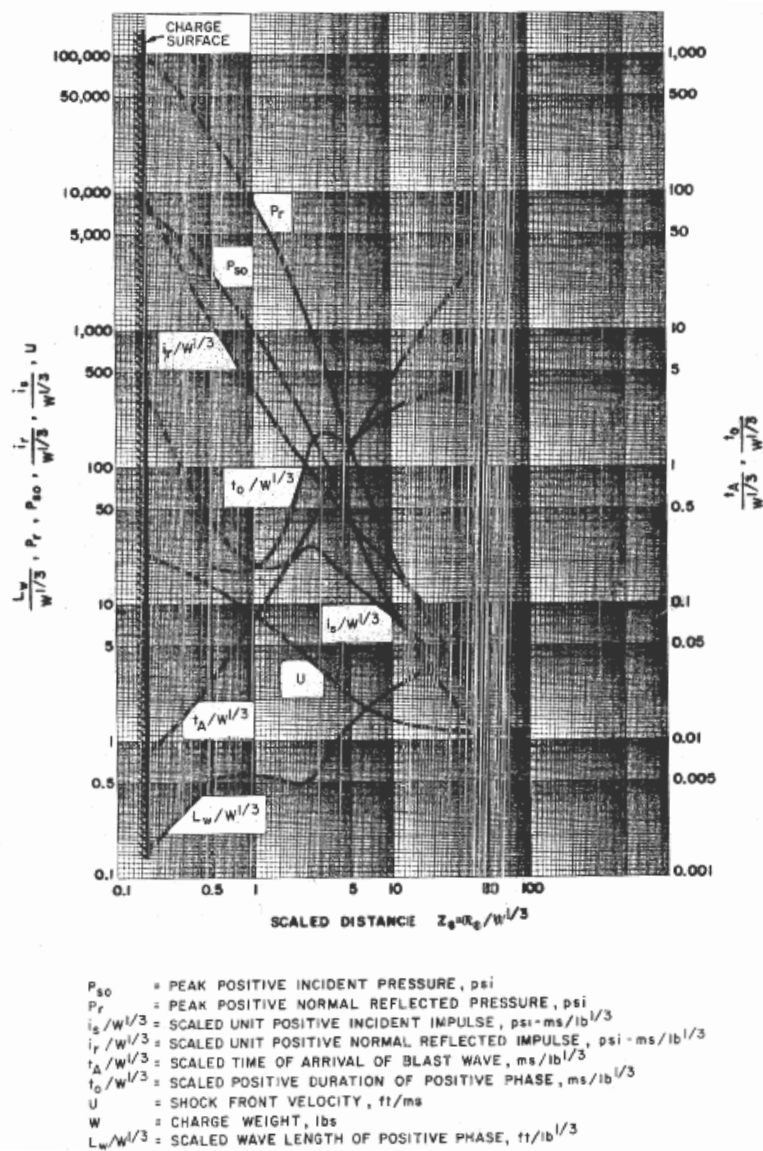


Figura 2: Parametri dell'onda d'urto per una esplosione emisferica a livello del mare. Diagramma tratto dal TM 5-1300 [ 8 ].

## 5. Interazione struttura/carico esplosivo

Il rapporto tra struttura e carico esplosivo si può descrivere secondo due metodi principali. Il primo prevede la scrittura e la soluzione dell'equazione del moto. Il secondo si esprime attraverso il principio di conservazione dell'energia rappresentato da equazioni di bilancio energetico. In questa sede ci si soffermerà sul primo metodo.

In relazione alle analisi dinamiche a seconda del rapporto tra la durata della fase positiva del carico  $t_p$  (vedi Figura 2) e il periodo fondamentale della struttura  $T$  è possibile individuare tre diversi regimi di carico. Secondo Mays-Smith [ 9 ] si distinguono:

- Regime impulsivo:  $\frac{t_p}{T} < 0.064$ . I tempi di applicazione del carico sono molto brevi. L'entità della deformazione massima dipende dall'entità dell'impulso, dalla massa e dalla resistenza della struttura.
- Regime dinamico:  $0.064 \leq \frac{t_p}{T} \leq 6.4$ . In tale regime l'entità della deformazione massima dipende dall'intera storia del carico nel tempo.
- Regime quasi-statico:  $\frac{t_p}{T} > 6.4$ . I tempi di applicazione del carico sono molto lunghi. L'entità della deformazione massima dipende solo dal picco del carico e dalla resistenza della struttura.

Queste tre situazioni limite forniscono lo spunto per introdurre il concetto di fattore di amplificazione dinamica del carico DLF. Esso è il rapporto tra il massimo spostamento dell'oscillatore in fase dinamica e lo spostamento statico ottenuto applicando il valore massimo dello stesso carico dinamico in modalità statica. L'andamento del DLF per diverse "forme di impulso" e diversi rapporti  $\frac{t_p}{T}$  è rappresentato in Figura 3. La forza statica equivalente  $F_{st}$  sarà pari al prodotto tra DLF e il picco del carico reale  $F$  (vedi ( 2)).

$$F_{st} = DLF \cdot F \quad (2)$$

E' bene ricordare che alla base del concetto di DLF esiste un'analisi dinamica i cui risultati sono rappresentati in Figura 3. Infatti trattando un caso così complesso solo in alcune situazioni si può considerare significativo questo approccio. Non appena la struttura inizia a possedere più gradi di libertà (ad es. palazzo multipiano) tutto il discorso viene a decadere poiché non ha molto senso parlare di SDOF equivalente. Pertanto il concetto di carico statico equivalente si può applicare solo in alcuni specifici e semplici casi: ad es. muro di protezione unidirezionale, singoli elementi strutturali ecc.

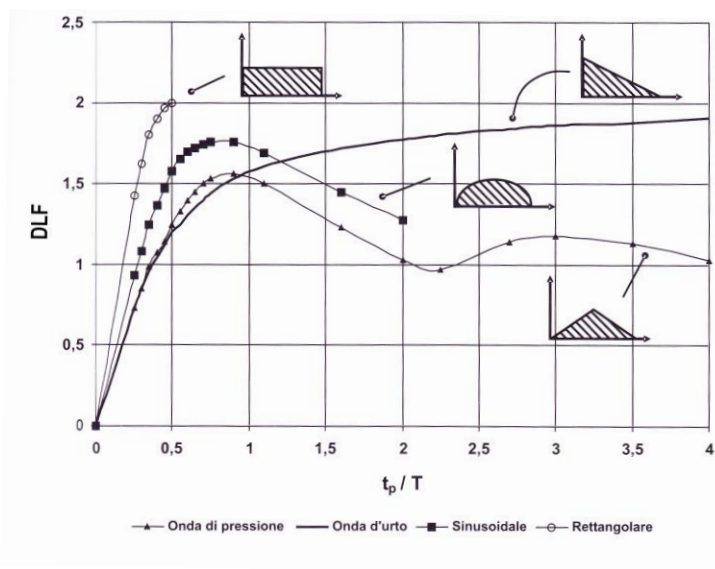


Figura 3: Fattore di amplificazione dinamica del carico per diversi tipi di impulso. Tratto da Genova-Silvestrini [ 1 ].

6. Linee guida per il progetto di elementi strutturali in C.A. resistenti all'esplosione.

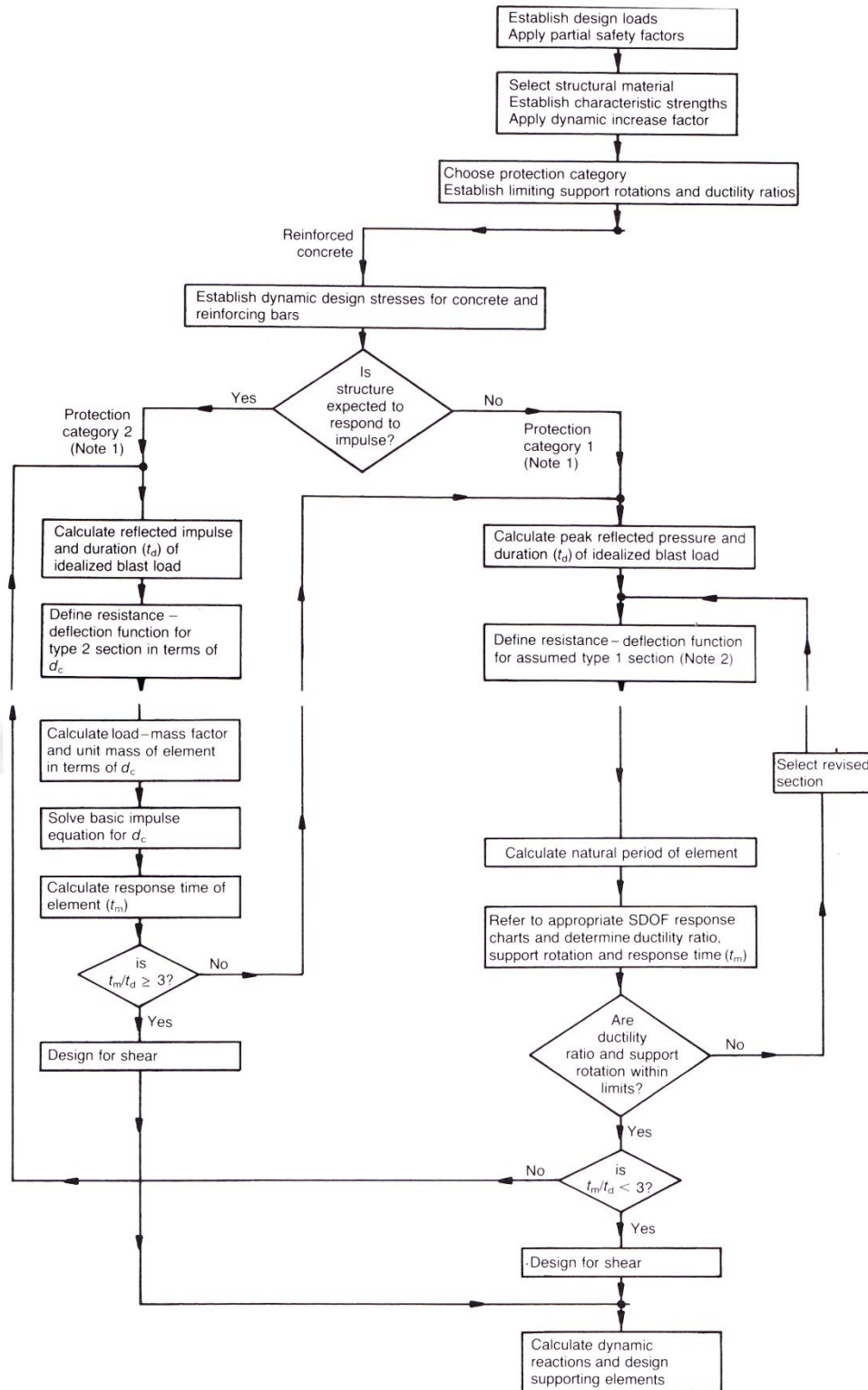


Figura 4: Diagramma di flusso della procedura di progetto secondo Mays-Smith [ 9 ].

In Figura 4 è riportato lo schema della procedura di progetto per elementi in C.A. resistenti ad esplosione proposta da Mays-Smith [ 9 ]. Tale schema si basa sull'ipotesi di definire una funzione resistenza-

spostamento per la struttura e ottenere la risposta strutturale sia sulla base di analisi dinamiche non lineari sia sulla base di considerazioni energetiche. Infatti, nel caso di carico impulsivo, si calcola la dimensione della sezione in modo tale che l'energia dell'impulso venga completamente assorbita dall'elemento strutturale tramite le sue capacità deformative elasto-plastiche. Se invece il regime di carico è di tipo dinamico ci si avvale di diagrammi in cui sono rappresentate le soluzioni dell'equazione del moto. Tutta la procedura è costantemente riferita ai valori dei coefficienti che permettono di calcolare le caratteristiche dello SDOF equivalente. Tali valori si possono trovare in diversi testi ([ 9 ],[ 1 ],[ 8 ]) e sono di fondamentale importanza per correlare le caratteristiche dinamiche dell'oscillatore equivalente (incognite) alle caratteristiche statiche dell'elemento strutturale reale (note). Si osservi come nella parte finale del diagramma di flusso vi siano dei controlli sulla resistenza a taglio. È molto importante che per dissipare nella maniera più opportuna l'energia che arriva dal carico il meccanismo di rottura sia di tipo duttile/flessionale e non fragile/a taglio. Secondo questa logica il progettista dovrà anche controllare la coerenza dei vincoli reali della struttura con le ipotesi assunte nel modello.

## 7. Conclusioni e riflessione sul caso Italia

L'argomento affrontato è tra i più complessi ed interessanti nei quali un ingegnere strutturale si può imbattere: analisi dinamiche non lineari, caratteristiche dei materiali variabili con la velocità di deformazione, incertezze ed aleatorietà nella definizione del carico. Appare evidente il bisogno di un approfondimento scientifico che ha tempi piuttosto lunghi. Purtroppo però, le esplosioni, in particolare quelle interne dovute a fughe di gas ecc. sono sempre più nella cronaca ordinaria ed esempi di collasso progressivo sottolineano come il concetto di robustezza sia fondamentale e da tenere in considerazione costantemente durante tutta la fase di progetto.

I Paesi anglosassoni e nordamericani sono patria dei maggiori esperti del settore. In tali Paesi la tradizione costruttiva è comunque molto diversa da quella che abbiamo in Italia. Infatti nel nostro caso le costruzioni in Calcestruzzo Armato rappresentano ancora la stragrande maggioranza della totalità. Il tema del carico sismico è divenuto preponderante nella formazione dei moderni professionisti e dopo le NTC 08 [ 3 ] tutto il territorio nazionale ha avuto mappatura sismica. Pertanto uno dei requisiti delle nuove costruzioni è quello di essere sismo resistenti e di possedere adeguate caratteristiche di duttilità e robustezza in grado di garantire le prestazioni richieste. Una delle moderne sfide dell'ingegneria strutturale è studiare il rapporto tra la resistenza al carico sismico ed al carico da esplosione. In Stochino-Tattoni [ 10 ] si è cercato di dare una risposta a tale quesito con un'analisi economica del costo dell'eventuale adeguamento strutturale di un edificio sismo-resistente ad un opportuno livello di robustezza tale da sopportare anche un prefissato carico da esplosione.

Infine l'ultima riflessione riguarda il concetto di carico statico equivalente introdotto nei precedenti paragrafi. Il professionista che si accinge ad affrontare un calcolo che riguardi il carico da esplosione deve valutare con molta attenzione le ipotesi, a volte troppo semplicistiche, di alcuni modelli. In funzione del grado di complessità della struttura si rende necessaria perlomeno un'analisi dinamica non lineare con un modello MDOF. Questa rappresenta un modo più realistico per tenere conto delle non-linearità meccaniche e geometriche caratteristiche del problema.

## Bibliografia

- [ 1 ] B. Genova, M. Genova, M. Silvestrini (2009), Sicurezza degli edifici nei riguardi dei fenomeni esplosivi, UTET Scienze Tecniche 2010, ISBN: 978-88-598-0415-4.
- [ 2 ] UNI EN 1991-1-7(2006) Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-7: General actions -Accidental actions
- [ 3 ] D.M. 14 gennaio 2008, Norme Tecniche per le costruzioni, pubblicato sulla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008
- [ 4 ] Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza (TULPS) approvato con r.d. del 18.03.1931 n.773
- [ 5 ] Regolamento di Esecuzione del Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza (RE-TULPS) approvato con r.d. del 06.05.1940 n.635

- [ 6 ] Decreto Legislativo n. 81 del 09.04.2008, pubblicato sulla G.U. n. 101 del 30 aprile 2008
- [ 7 ] MODEL CODE 2010-first complete draft- CEB FIB bulletin 55- ISSN 1562-3610, ISBN 978-2-88394-095-6
- [ 8 ] TM 5-1300 (1990), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion, Departments of the Army, the Navy and the Air Force, TM 5-1300, NAVFAC P-379, AFR 88-22
- [ 9 ] G.C: Mays, P.D. Smith (1995), Blast Effect on Buildings, Thomas Telford Publications London. ISBN 0-7277-2030-9
- [ 10 ] F.Stochino,S. Tattoni(2011), Incremento Prestazionale Per Edifici In Ca Resistenti Ad Esplosione E Relativa Valutazione Economica, atti del 26° Convegno Nazionale AICAP. Padova 2011, pp 375-380.