



# La ricostruzione di un attentato terroristico con la simulazione numerica

- Riccardo Andreotti
- Marco Boniardi
- Andrea Casaroli



**U**n'esplosione di numeri. Abbiamo tutti in mente le impressionanti immagini del “fungo atomico” generato dall'esplosione di un ordigno nucleare eppure, per fortuna, sono solo due i casi di bombe nucleari fatte esplodere in un conflitto.

Le molte immagini e filmati di cui disponiamo, aventi per oggetto esplosioni subacquee, nel deserto od in atmosfera, risalgono alle migliaia di test nucleari che fra il 1945 ed il 1963 furono condotte per sperimentare gli effetti delle nuove generazioni di ordigni man mano sviluppati.

La moratoria del 1963 ha fortunatamente posto fine alla sperimentazione “reale” di questi ordigni sempre più potenti, ma la ricerca e lo sviluppo di nuovi armamenti nucleari non si sono affatto arrestati, ma hanno semplicemente imboccato una nuova via più celata, più economica e in grado di fornire una quantità di informazioni infinitamente superiore alla sperimentazione reale: la simulazione numerica.

Nei primi anni '70 nei laboratori di ricerca militare delle allora superpotenze erano già disponibili algoritmi di calcolo per simulare in tre dimensioni la dinamica impulsiva tipica di impatti ed esplosioni, e con il progressivo e sempre più veloce sviluppo dell'hardware l'uso di tali strumenti ha preso sempre più piede, fino alla nascita di codici commerciali venduti a partire dalla fine degli anni '70 alle industrie più innovative della meccanica e oggi largamente utilizzati in tutti i settori industriali, in particolare per la sicurezza passiva nel campo dei veicoli.

In questo scenario, lo scorso giugno, è stato inaugurato il nuovo supercomputer più veloce del mondo.

Si chiama “Sequoia” e si trova presso il Lawrence Livermore National Laboratory in California. Le sue prestazioni sono circa dieci miliardi di volte (non è un errore di battitura...) superiori a quelle di un suo antenato di 40 anni fa.

Assorbe una potenza elettrica di 8 megawatt. È stato prodotto da IBM su commis-

sione della National Nuclear Security Administration, ed il suo utilizzo principalmente sarà la sperimentazione di esplosioni nucleari mediante simulazioni numeriche su larga scala. Solo in secondo luogo sarà dedicato a problemi scientifici quali il cambiamento climatico, lo studio del genoma umano, la ricerca astronomica ed energetica.

Questi fatti testimoniano come gli strumenti di simulazione siano fondamentali nella ricerca nei settori strategici, in quanto aumentano la comprensione dei fenomeni, abbattano i costi e l'impatto ambientale della sperimentazione e, una volta a regime, riducono i tem-

pi di sviluppo tecnologico aumentando la qualità; il futuro premierà chi prima sarà in grado di estenderne l'uso a nuove applicazioni e per nuove finalità, come ad esempio la progettazione di grandi strutture e la ricostruzione di eventi distruttivi nell'ambito dell'ingegneria forense, oggetto di questo articolo.

### L'attentato

Il 26 febbraio 1993 un furgone Ford Econoline venne fatto esplodere al piano B-2 dei sotterranei della torre nord del World Trade Center (WTC) di New York. La bomba era costituita da circa 1500 lb (680 kg) di nitrato di urea potenziato da idrogeno allo stato gassoso contenuto in tubi metallici.

L'attacco venne condotto con l'intenzione di far collassare le torri uccidendo migliaia di persone. Anche se, fortunatamente, lo scopo non venne raggiunto, l'esplosione provocò la morte di 6 persone ed il ferimento di altre 1042.

I danni strutturali furono infatti limitati al collasso di una parte delle solette e dei supporti laterali delle 9 colonne in acciaio situate attorno all'epicentro. L'esplosione creò un cratere a forma di L di lunghezza 50 metri, larghezza 30 metri e profondità 15 metri.

In questo articolo vengono presentati i risultati della simulazione numerica dell'esplosione, allo scopo di valutare gli aspetti positivi e negativi che tale tipo di approccio presenta nei confronti della previsione degli effetti di una esplosione sulle strutture circostanti.

Nell'elaborato vengono introdotte le metodologie utilizzate per la definizione del modello e per la conduzione della simulazione. Dal confronto tra lo scenario reale post attentato ed i risultati della simulazione numerica, si è osservato come la simulazione numerica costituisca certamente il più potente mezzo di indagine per la comprensione delle modalità di evoluzione e di interazione dell'onda di pressione con le strutture dell'edificio e quindi di stima dei danni sofferti dalla struttura.

In ultima istanza si è discusso il possibile scenario futuro, ed i passi da compiere per

#### Ing. Riccardo Andreotti

Svolge attività di ricerca presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano dove si occupa dello sviluppo di modelli di simulazione numerica di processi metallurgici e di danneggiamento di strutture, con particolare riguardo ai casi di sinistri industriali dovuti a incendi, scoppi ed esplosioni. La sua attività di ricerca riguarda il settore della Failure Analysis & Forensic Engineering, [www.fa-fe.com](http://www.fa-fe.com), che consiste nell'analisi delle cause di cedimento in esercizio di macchine o componenti meccanici. Nell'ambito dell'utilizzo della simulazione numerica finalizzata allo sviluppo di prodotto e alla prevenzione di danno opera come socio e consulente presso [www.area3.it](http://www.area3.it), annoverando fra i propri clienti primarie imprese ed università nazionali ed internazionali nel settore aerospaziale, biomedicale, energetico e dell'arredamento.

#### Ing. Marco Virginio Boniardi

Professore ordinario di metallurgia presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, opera da circa venti anni nel settore della Failure Analysis & Forensic Engineering, [www.fa-fe.com](http://www.fa-fe.com), (l'analisi dei cedimenti in esercizio di macchine/impianti/componenti). Nel corso degli anni il Prof. Boniardi si è occupato di numerosi casi di scoppi ed esplosioni su impianti e componenti industriali e ha partecipato ad indagini riguardanti incendi o sinistri. Autore di più di 100 pubblicazioni scientifiche, collabora abitualmente con studi legali ed imprese nazionali ed internazionali nei settori dei trattamenti termici, degli acciai inossidabili, della resistenza a fatica dei materiali metallici, della corrosione e della fucinatura, dello stampaggio e della laminazione delle leghe ferrose.

#### Ing. Andrea Casaroli

Svolge attività di ricerca nel settore della metallurgia e dei materiali metallici presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano si occupa di indagini in caso di sinistri industriali dovuti a incendi, scoppi ed esplosioni. La sua attività di ricerca verte nel settore della Failure Analysis & Forensic Engineering, [www.fa-fe.com](http://www.fa-fe.com), che consiste nell'analisi delle cause di cedimento in esercizio di macchine o componenti meccanici. Nel corso degli anni ha collaborato con numerose imprese nazionali ed internazionali alla risoluzione di problemi di corrosione e malfunzionamento di componenti meccanici.

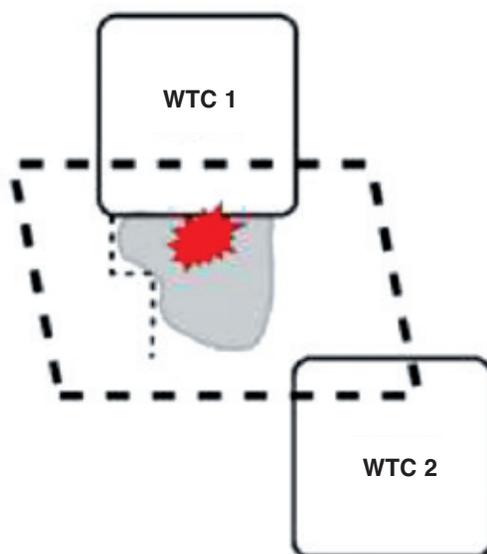


Figura 1 - Vista in piano delle due torri del WTC (WTC1 e WTC2). La figura mostra l'epicentro dell'esplosione, il cratere, la parete ovest (linea tratteggiata a tratto sottile) e l'area considerata dalla simulazione numerica (linea tratteggiata a tratto spesso)

l'utilizzo sistematico della simulazione numerica come strumento per la valutazione e la certificazione di nuovi progetti civili e industriali che debbano garantire elevati standard di sicurezza, sia rispetto ad eventi accidentali, sia rispetto ad attacchi di matrice terroristica.

### Modello strutturale dell'edificio

La struttura degli edifici del WTC era basata su uno schema reticolare, costituito unicamente da travi in acciaio verticali ed orizzontali detta "moment-frame". Tale struttura è in grado di sopportare carichi sia verticali che orizzontali senza l'ausilio di controventature diagonali.

Partendo dal progetto originale del WTC [1], è stato creato un modello 3D costituito dai piani sotterranei della torre nord e da quelli compresi fra le due torri.

Definito il modello, si è provveduto a creare la mesh dei principali elementi strutturali, attraverso l'utilizzo di elementi finiti 1D, 2D e 3D. Le strutture in acciaio sono state modellate con elementi 2D di tipo shell; le

giunzioni bullonate con elementi 1D di tipo beam di lunghezza nulla; le solette, le travi, i muri ed i pilastri in calcestruzzo armato sono stati modellati sia con elementi 3D che con elementi 2D di tipo shell, e trattati come materiali compositi calcestruzzo-acciaio.

Gli strumenti di simulazione sono indispensabili per la ricerca nei settori strategici, poiché consentono di comprendere i fenomeni e riducono notevolmente i costi e l'impatto ambientale della sperimentazione, non solo, ma una volta a regime, riducono i tempi di sviluppo tecnologico aumentando la qualità. Per questo motivo occorre estenderne l'uso a nuove applicazioni come, ad esempio, la progettazione di grandi strutture e la ricostruzione di eventi distruttivi nell'ambito dell'ingegneria forense

## MANUALE PER L'APPLICAZIONE DELLE DIRETTIVE ATEX

### Classificazione dei luoghi, valutazione e gestione dei rischi da atmosfere esplosive

- Contiene CD Rom con una ricca e aggiornata modulistica, liste di controllo, istruzioni operative, esempi applicativi di classificazione e valutazione del rischio da atmosfere esplosive

**Autore:** A. Cavaliere - **Edizione:** giugno 2011  
**Prezzo:** € 37,60 anziché 47,00



Un manuale indispensabile per i tecnici incaricati della classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione, della valutazione del rischio da atmosfere esplosive e della scelta delle misure di prevenzione, protezione ed organizzative.

Nel testo si è cercato di evitare, ove possibile, un

approccio all'argomento di tipo "legale-formale", preferendo piuttosto una trattazione di tipo "tecnico-scientifico", derivante dalla pluriennale esperienza dell'autore in materia, applicata all'interno di varie tipologie di impianti industriali. Il volume è aggiornato alle ultime norme tecniche e, per alcuni argomenti, come la classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione, si è anche fatto riferimento a norme di prossima pubblicazione.

Nella giungla delle prescrizioni legislative e nel groviglio delle disposizioni tecniche, il testo rappresenta un utile punto di riferimento per diverse categorie professionali: dai datori di lavoro, ai responsabili dei servizi di prevenzione e protezione, dai progettisti di impianti e macchine destinate ad essere installate in zone pericolose per la presenza di atmosfere esplosive, ai costruttori di apparecchi o componenti a sicurezza, senza trascurare i verificatori e, in generale, tutte quelle figure professionali che intendono analizzare le problematiche relative alla presenza di atmosfere esplosive nei luoghi di lavoro.



Per maggiori informazioni  
 contatta il Servizio Clienti  
 al numero 06 33245277  
 oppure scrivi a [libri@epcclibri.it](mailto:libri@epcclibri.it)

## Materiali

I fenomeni esplosivi esercitano sulle strutture che li circondano un carico di tipo impulsivo.

Quando la velocità di applicazione del carico è elevata, come nel caso in esame, il materiale che viene caricato tende ad assumere un comportamento di tipo fragile, cioè a rompersi di schianto senza deformazioni evidenti; ciò avviene indipendentemente dal comportamento che il materiale avrebbe in condizioni normali di esercizio.

Per l'esecuzione della simulazione, si è quindi reso necessario implementare nell'analisi numerica un modello di materiale che tenesse conto della velocità di applicazione del carico, sia per l'acciaio che per il calcestruzzo. Non avendo a disposizione le relazioni sforzi - deformazioni in funzione della velocità di applicazione del carico, ma solo quelle in condizioni quasi - statiche [1], sono state utilizzate:

- le relazioni proposte da Kawata [2] per quanto riguarda il comportamento a trazione dell'acciaio;
- i dati sperimentali presentati da Gary [3] per modellare il comportamento del calcestruzzo a compressione.

Ulteriori informazioni riguardo l'effetto della velocità di applicazione del carico sul comportamento a trazione del calcestruzzo e dell'acciaio, sono state reperite in ACI Materials Journal [4,5] e in Comit Euro - International du Beton [6]. Per ogni modello utilizzato si è comunque verificato che il comportamento del materiale fosse coerente con la curva sforzo - deformazione ottenuta in condizioni quasi statiche.

Di seguito sono stati brevemente descritti i modelli di Kawata e di Gary utilizzati rispettivamente per l'acciaio e per il calcestruzzo.

*Modello dell'acciaio* - La maggior parte degli elementi strutturali del WTC sono realizzati in acciaio ASTM A36. La composizione chimica, la curva sforzi - deformazioni quasi statica e il comportamento al creep dell'acciaio ASTM A36 sono largamente conosciuti. Al

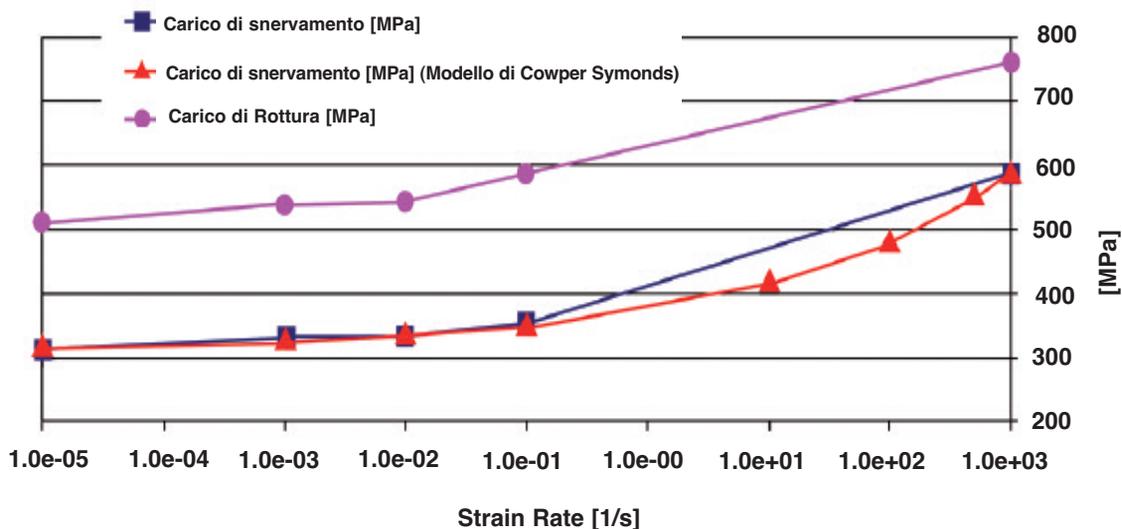


Figura 2 - Incremento del carico di snervamento dell'acciaio ASTM A36 all'aumentare della velocità di applicazione del carico. I risultati ottenuti con il modello di Kawata [2] sono descritti dalla curva blu, quelli ottenuti con il modello di Cowper - Symond [7] dalla curva rossa

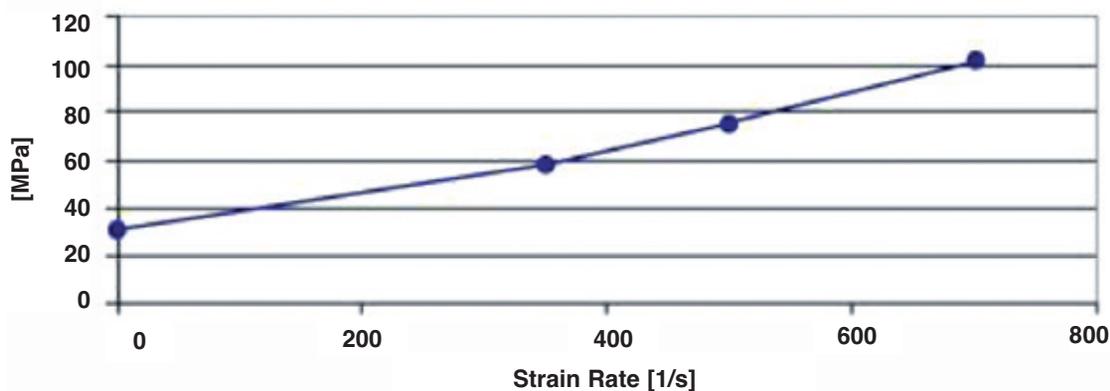


Figura 3 - Incremento del carico massimo di compressione del calcestruzzo all'aumentare della velocità di applicazione del carico. L'andamento è in accordo con il modello di Cowper - Symond [7] implementato nella simulazione

contrario non si è invece riusciti a rintracciare in letteratura alcun dato riguardo all'effetto della velocità di applicazione del carico sulla curva sforzi - deformazioni. Per colmare tale lacuna, è stato utilizzato il modello empirico di Kawata [2].

Tale modello, valido per gli acciai al carbo-

nio, permette di stimare, a partire dalle percentuali di carbonio e manganese presenti nella lega, la variazione dei carichi di snervamento e di rottura a differenti velocità di deformazione.

L'acciaio ASTM A36 prevede una percentuale di carbonio compresa fra lo 0.25% e lo

Quando la velocità di applicazione del carico è elevata, il materiale che viene caricato tende ad assumere un comportamento fragile, cioè tende a rompersi di schianto senza trasformazioni evidenti e questo avviene indipendentemente dal comportamento che il materiale avrebbe in condizioni di normale esercizio

0.29% e di manganese compresa fra lo 0.8% e lo 1.2%. Applicando il modello di Kawata a questa composizione si sono ricavati i dati di snervamento (*Figura 2, curva blu*) e di rottura (*Figura 2 curva viola*). Applicando, poi, il metodo di Cowper Symonds [7] a tali valori, è stato possibile implementare l'effetto della velocità di applicazione del carico nel file di input necessario per l'esecuzione della simulazione (*Figura 2*).

La costante di elasticità dell'acciaio, indicata dal modulo di Young, è stata invece assunta come costante.

*Modello del calcestruzzo* - Per quanto riguarda il calcestruzzo, la curva sforzi - deformazioni in funzione della velocità di applicazione del carico è stata ricavata dalla letteratura (Gary [3]). Anche in questo caso:

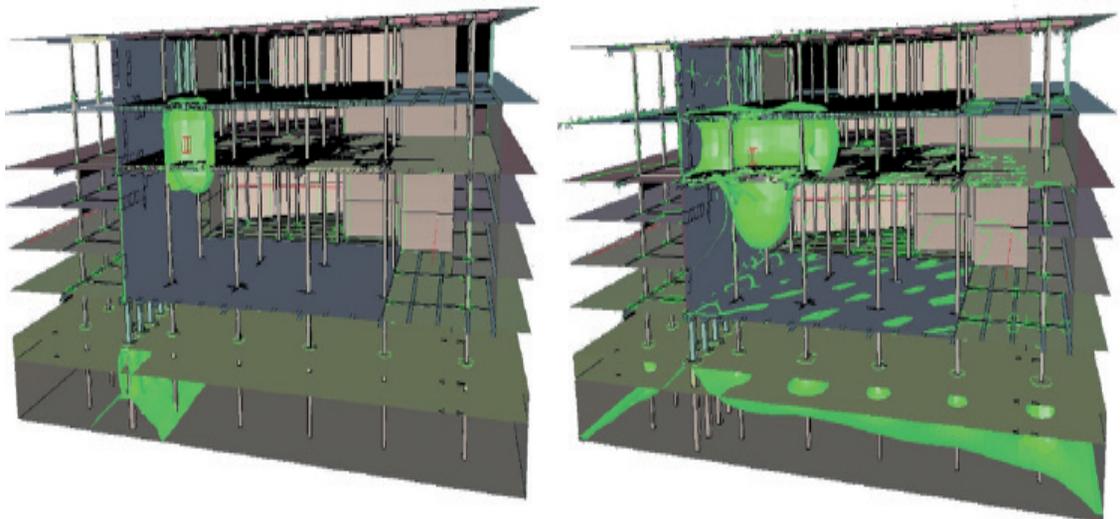
- è stato utilizzato il metodo di Cowper Symonds [7], per implementare i dati numerici ricavati dalla letteratura (Gary [3]) nel file di input (*Figura 3*)
- il modulo di Young è stato assunto come costante.

### Carica Esplosiva

In accordo con la documentazione prodotta dalla Federal Emergency Management Agency (FEMA) [8], il potere esplosivo della carica di nitrato di urea e di idrogeno è stato considerato equivalente a quello di 816.5 kg di TNT, modellati utilizzando elementi 3D di tipo esaedrico definiti in un sistema di riferimento Euleriano.

Il volume totale occupato dalla carica è di 0.5 metri cubi.

Per quanto riguarda il fenomeno della detonazione dell'esplosivo, esso è stato riprodotto grazie ad un algoritmo (high explosive



*Figura 4 - Sezione dell'edificio in direzione est. La figura mostra la propagazione dell'onda di pressione a 3 millisecondi (figura a sinistra) e a 12 millisecondi (figura a destra). Si nota come l'onda di pressione sia propagata attraverso la soletta che sostiene il pavimento del piano B-2, raggiungendo i tre piani sottostanti*

burn model [8]) che, in corrispondenza di posizione e istante di detonazione, fa propagare all'interno del volume di esplosivo la trasformazione da solido in gas di detonazione altamente compressi.

Ciò permette di riprodurre esattamente le velocità, le pressioni e le energie sviluppate dall'esplosivo. I gas prodotti della detonazione seguono poi un modello di espansione di tipo Jones - Wilkins - Lee [8,10], che permette di riprodurre il generarsi dell'onda di pressione.

Tutti i parametri di Chapman Jouget e quelli necessari per le equazioni di stato del TNT sono stati estrapolati dall'LLNL Explosive Handbook [9].

### Modello dell'aria ed interazione con la struttura

Per permettere la propagazione dell'onda

d'urto, generata dall'esplosione del camion bomba, alle strutture dell'edificio, si è reso necessario modellare l'aria con elementi finiti 3D definiti nello stesso sistema di riferimento euleriano in cui è definito l'esplosivo.

Il comportamento dell'aria è stato descritto come adiabatico, mentre l'interazione tra il dominio euleriano, utilizzato per l'aria, e quello lagrangiano, utilizzato per gli elementi strutturali, è stato realizzato imponendo una condizione di vincolo di normalità in trazione e compressione.

### Simulazione

La simulazione è stata realizzata utilizzando il solutore LSDYNA, codice ad elementi finiti di tipo esplicito [7].

Lo step temporale medio e limite sono stati fissati rispettivamente a 20 microsecondi e



Idranti a muro 

Materiale pompieristico

Idranti sopra e sottosuolo 

Impianti Sprinkler

Raccorderia scanalata

Materiali intumescenti

# Tranquilli, c'è Ziggiotto.



**Ziggiotto & C. srl**  
Viale del Lavoro 37055 Ronco all'Adige (VR) ITALY  
tel. +39 045 7000427 fax +39 045 6609022 e-mail: ziggiotto@ziggiotto.it web: www.ziggiotto.it



Figura 5 - Immagine che mostra il lato est del cratere al livello B-2 (vista verso nord).  
Si nota la posizione dell'esplosivo in rosso

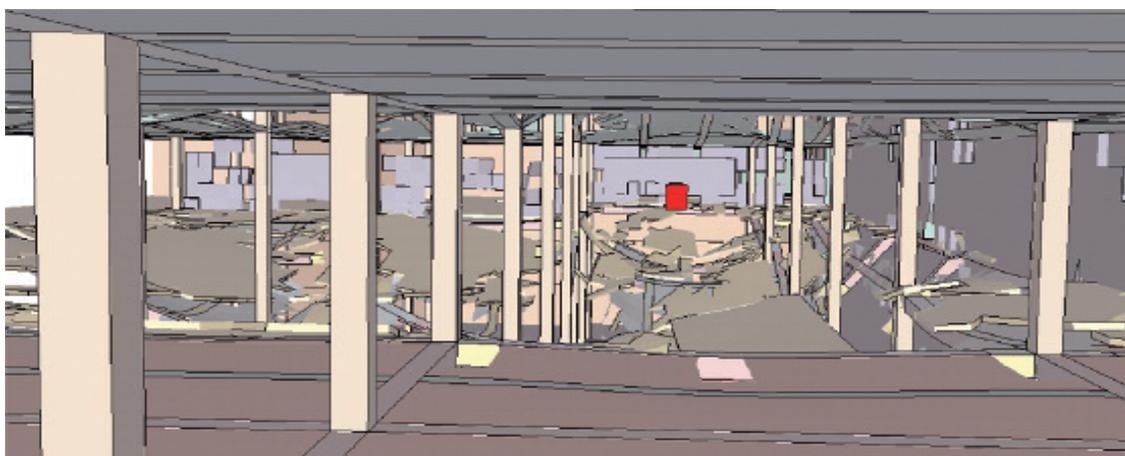


Figura 6 - Immagine che mostra il lato nord del cratere al livello B-2 (vista verso ovest).  
Si nota la posizione dell'esplosivo in rosso

28.9 microsecondi, mentre la durata totale della simulazione è stata fissata in 0.35 secondi.

Per la sua esecuzione il modello ha previsto l'utilizzo di 5 milioni di elementi.

### Risultati delle simulazione

Pochi millisecondi dopo la detonazione, la porzione di pavimento del piano B-2 al di sotto del camion bomba è stata investita da una onda di pressione incidente di 30MPa (306 kgf/cm<sup>2</sup>). L'esplosione, parzialmente riflessa dal pavimento, ha causato un picco di pressione riflessa di 200MPa (2040 kgf/cm<sup>2</sup>)

sulla faccia superiore della soletta, che sostiene il pavimento, e la successiva propagazione dell'onda attraverso i tre piani sottostanti (Figura 4). Con il trascorrere del tempo, l'esplosione si è estesa all'intero piano B-2 andando a colpire la parete ovest con una pressione di circa 0.3 MPa (3 kgf/cm<sup>2</sup>) (Figura 5).

Nelle figure da 7 a 9 è possibile notare come:

- dopo 12 millisecondi (figura 7 - terzo fotogramma) i danni alla struttura siano trascurabili
- dopo 57 millisecondi (figura 8 - secondo fotogramma) i danni alla struttura siano evi-

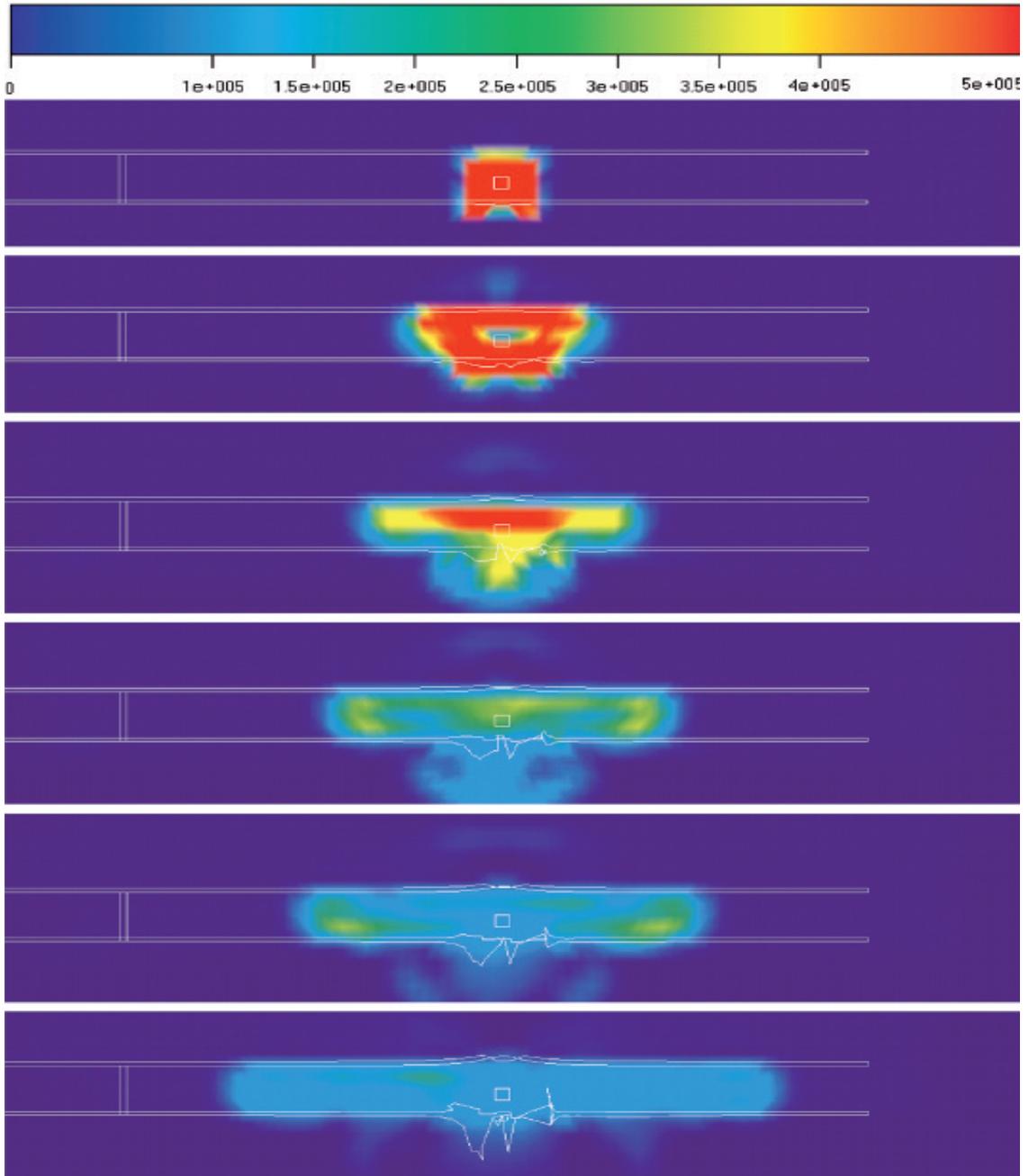


Figura 7 - Campo di pressioni [Pa] all'interno del piano B-2 dopo 9, 10, 12, 15, 18, 27 millisecondi dalla detonazione. La vista è in direzione nord; la linea bianca rappresenta la posizione degli elementi portanti dell'edificio dopo la detonazione

- denti solo nella zona circostante alla carica esplosiva, benché l'onda di pressione sia ormai propagata all'intero piano B-2
- dopo 150 millisecondi (figura 8 - terzo fotogramma) i danni siano estesi all'intera struttura del piano B-2
- la simulazione numerica riproduca il collasso della soletta, lasciando nove colonne prive dei propri supporti laterali (Figura 9), in totale accordo a quanto redatto dalla FEMA nel suo rapporto ufficiale

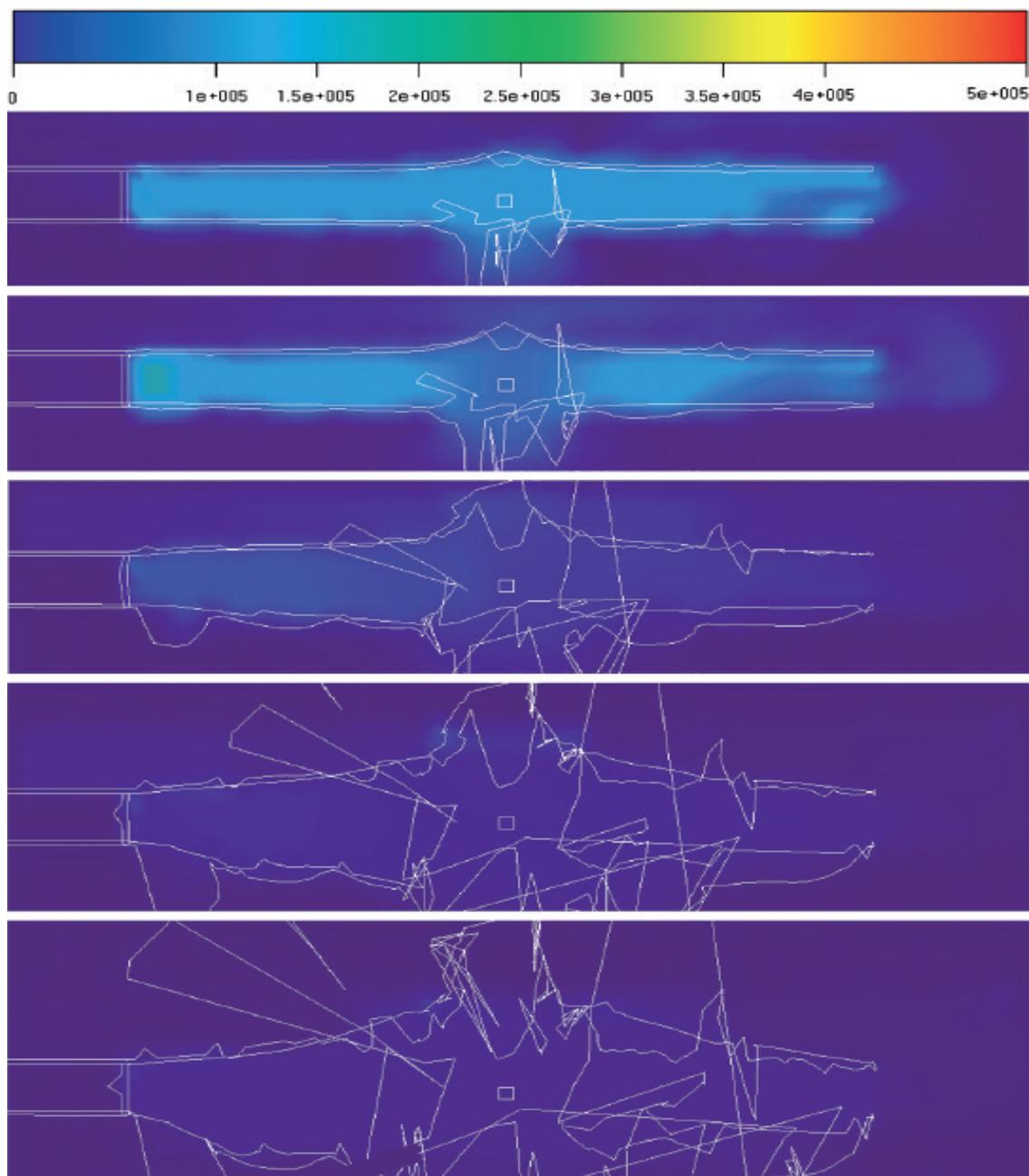


Figura 8 - Campo di pressioni [Pa] all'interno del piano B-2 dopo 45, 57, 150, 250, 350 millisecondi dalla detonazione. La vista è in direzione nord; la linea bianca rappresenta la posizione degli elementi portanti dell'edificio dopo la detonazione

- il collasso della soletta che sosteneva il pavimento del piano B-2, sia dovuto al campo di alte pressioni generato dalla riflessione delle onde di pressione contro i muri ed il pavimento, in prossimità dell'esplosione
- il danneggiamento delle strutture si sia

compiuto tra i 15 ed i 300 millisecondi successivi alla detonazione.

Dalla figura 10 è invece possibile notare come la forma finale del cratere, ottenuta al termine della simulazione, sia molto simile a quella riportata sul report ufficiale della FEMA [8].

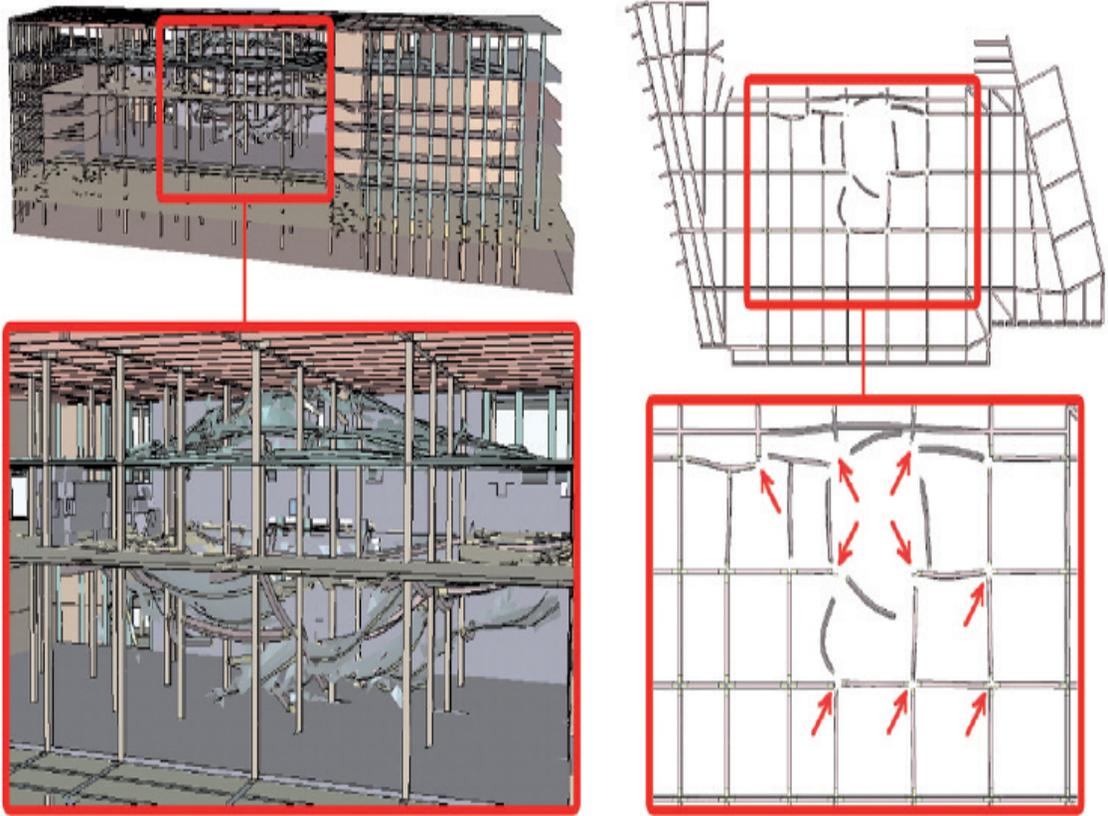
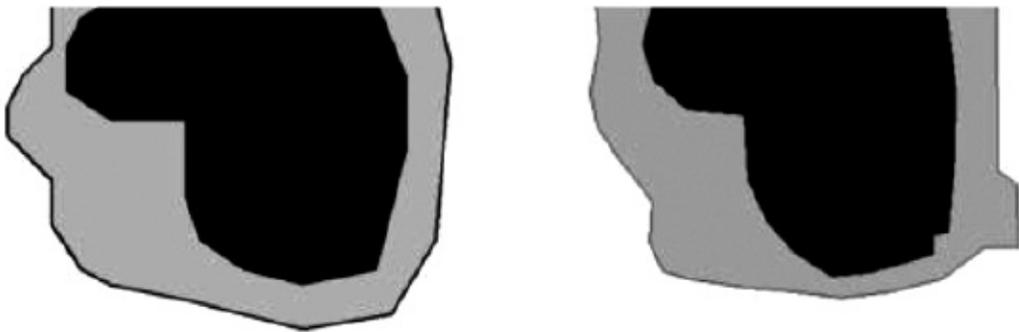


Figura 9 - Aspetto del piano B-2 e di quelli sottostanti al termine della simulazione (350 millisecondi dopo la detonazione). A sinistra è riportata una vista in 3D, mentre a destra è visibile la vista in pianta della struttura reticolare, in cui si possono notare i supporti laterali divelti dall'esplosione in corrispondenza delle 9 colonne menzionate dalla FEMA



- Area in cui la soletta è collassata
- Area in cui la soletta si è danneggiata senza collassare

Figura 10 - Confronto della forma e dell'estensione della zona danneggiata della soletta del piano B-2 ottenuta al termine della simulazione (a sinistra) con quella reale (a destra) riportata dalla FEMA nel suo report ufficiale [8]

Dal confronto emerge come la simulazione descriva in modo accurato, non solo l'area in cui la soletta è collassata, ma anche quella in cui si è danneggiata senza arrivare a cedimento.

### Conclusioni

Il confronto tra la forma e l'estensione della zona danneggiata del piano B-2 ottenuta al termine della simulazione, e il cratere reale descritto dalla FEMA nel suo report ufficiale [8], mostra un ottimo grado di coerenza del modello implementato con la realtà.

La possibilità di monitorare per ogni punto dello spazio e per ogni istante di tempo:

- l'andamento delle onde di pressione generate dall'esplosione
- gli sforzi e le deformazioni di qualsiasi elemento coinvolto dall'esplosione costituisce il vantaggio principale mostrato dalla simulazione numerica.

Grazie a ciò, è infatti possibile:

- analizzare e comprendere l'evoluzione di esplosioni accidentali o dolose, in modo da identificarne le cause
- valutare l'effetto di nuove soluzioni progettuali, in modo da minimizzare i pericoli di eventuali esplosioni.

Uno svantaggio di questo approccio, tuttavia, è la sensibilità dei risultati dai modelli utilizzati, problema che, per essere risolto "sul campo", richiede una onerosa fase ricorsiva di analisi e verifica dei risultati, finalizzata alla validazione finale dei modelli usati.

La progressiva diffusione di queste metodologie rende ragionevole ritenere che nel prossimo futuro la comunità tecnico-scientifica riuscirà a identificare una prassi operativa in grado di portare alla riproduzione dei fenomeni in modo affidabile e meno oneroso.

In questo modo, la standardizzazione delle metodologie di simulazione e la creazione di indici di vulnerabilità, che sintetizzino il danno globale di una struttura e quindi la sua vulnerabilità, potrà consentire di introdurre la simulazione come insostituibile cri-

terio per la certificazione della sicurezza di nuovi edifici, impianti e strutture già nella fase progettuale.

Un approccio peraltro del tutto analogo a quanto normalmente viene fatto per la sicurezza passiva di veicoli, con la differenza, non trascurabile, che i costi realizzativi delle grandi strutture non consentiranno mai una campagna di test reali analoga ai consueti "crash-test".

Questo dovrebbe far riflettere sull'immenso valore della simulazione applicata a manufatti non testabili nella realtà, sia come mezzo di ottimizzazione progettuale e investigazione dei fenomeni, che come unico strumento possibile di certificazione.

### Bibliografia

- [1] Information and WTC original plans on <http://911research.com/>
- [2] Masaaki Itabashi, Kozo Kawata: Carbon content effect on high strain-rate tensile properties for carbon steels, International Journal Of Impact Engineering n.24 (2000)
- [3] G. Gary: Essais à grande vitesse sur beton. Problemes spécifiques, Rapport spécifique du GRECO, GRECO Publisher (1990), Paris (in French)
- [4] L.J. Malvar and C.A. Ross: ACI Mat. J. Vol. 95, (1998), p. 735
- [5] L.J. Malvar and C.A. Ross: ACI Mat. J. Vol. 95, (1998), p. 609
- [6] Comit Euro-International du Buton. Concrete structures under impact and impulsive loading, CEB Bulletin 187, Lausanne 1988
- [7] LS-DYNA Version 960. 2002. Livermore Software Technology Corporation
- [8] Federal Emergency Management Agency: TheWorld Trade Center Bombing: Report and Analysis, United States Fire Administration, Technical Report Series (1993), p. 24
- [9] B.M. Dobratz, P.C. Crawford: LLNL Explosives Handbook, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore CA (1985), table 8.7