

## **CARATTERIZZAZIONE DELL'EFFETTO DI DETONAZIONI IN CONDUTTURA SOTTERANEA SUL SUOLO CIRCOSTANTE**

Pamela BONALUMI  
*Politecnico di Milano, DIS*  
[bonalumi@stru.polimi.it](mailto:bonalumi@stru.polimi.it)

Matteo COLOMBO  
*Politecnico di Milano, DIS*  
[mcolombo@stru.polimi.it](mailto:mcolombo@stru.polimi.it)

Cesare COMINA  
*Università degli Studi di Torino, DST*  
[cesare.comina@unito.it](mailto:cesare.comina@unito.it)

Marco DI PRISCO  
*Politecnico di Milano, DIS*  
[mdiprisc@stru.polimi.it](mailto:mdiprisc@stru.polimi.it)

Sebastiano FOTI  
*Politecnico di Torino, DISTR*  
[sebastiano.foti@polito.it](mailto:sebastiano.foti@polito.it)

Andrea GALLI  
*Politecnico di Milano, DIS*  
[galli@stru.polimi.it](mailto:galli@stru.polimi.it)

### **Sommario**

Vengono presentati in questa nota alcuni risultati preliminari relativi ad una serie di test di esplosione all'interno di una condotta sotterranea, volti a valutare gli effetti delle esplosioni stesse sulle caratteristiche meccaniche dei terreni circostanti e sulla struttura. Il brillamento delle cariche esplosive è stato monitorato tramite diversi accelerometri posti sia sulla struttura, che interrati nel terreno circostante e sulla sua superficie. Inoltre, prima e dopo gli eventi esplosivi, sono state condotte diverse prove di caratterizzazione (geofisiche e geotecniche) sul terreno circostante la struttura. Si è osservata una notevole attenuazione delle accelerazioni indotte dalle detonazioni a moderate distanze dalla sorgente ed un effetto di decremento delle caratteristiche meccaniche dei terreni nei pressi della struttura.

### **Introduzione**

Negli ultimi anni, l'incremento di attentati terroristici ha portato ad un rinnovato interesse per la progettazione di edifici pubblici capaci di sopportare carichi eccezionali come quelli legati ad eventi esplosivi. Diverse ricerche e prove sperimentali specifiche sono state condotte principalmente su strutture fuori terra sottoposte ad esplosioni esterne o su strutture scatolari interrate sottoposte ad esplosioni interne [1, 2, 3], con l'obiettivo di fornire manuali e linee guida per il corretto dimensionamento delle strutture di protezione [4]. Tuttavia, gli studi concernenti esplosioni interne a strutture sotterranee, come tunnel o condutture, o le indagini sperimentali relative a particolari combinazioni di carico, struttura e suolo risultano ancora carenti in letteratura.

Nel caso di strutture interrato sottoposte ad esplosioni interne, devono essere certamente considerati anche gli effetti dannosi legati al trasferimento dell'energia di detonazione al suolo. In particolare, l'estensione dei danni creati nell'intorno di strutture quali condutture sepolte è strettamente collegato alle deformazioni meccaniche indotte nel terreno a seguito delle esplosioni. Pochi dati esistono su questo specifico problema, dal momento che le precedenti ricerche relative all'argomento si sono principalmente focalizzate sulla propagazione di onde d'urto generate da esplosioni fuori terra [5] o sotterranee [6] o sull'effetto di mine su strutture fuori terra [7]. In ogni caso, in letteratura si possono trovare solo studi molto limitati sugli effetti di un'esplosione interna in strutture sotterranee, in particolare in gallerie, sul terreno circostante.

Nel seguito si presentano alcuni risultati ottenuti da una più ampia indagine sperimentale riguardante una serie di esplosioni interne in una tubazione di cemento interrata in terreno soffice. Il monitoraggio delle accelerazioni indotte in superficie e nel terreno e prove di caratterizzazione geofisica sono state effettuate con l'obiettivo di raccogliere utili dati sperimentali, in grado di fornire una prima valutazione degli effetti delle onde d'urto sul terreno sciolto circostante, che rappresenta una condizione più svantaggiosa per il comportamento strutturale rispetto a materiale roccioso [8].

### Test site

I test di detonazione sono stati condotti su una condotta di cemento a scala reale, interrata in terreno sciolto presso il centro di addestramento della Protezione Civile e dei Vigili del Fuoco della Regione Lombardia, vicino a Milano. La condotta oggetto di studio è interrata per una profondità di circa 2.3 m in terreno soffice ed è costituita da conci prefabbricati di cemento privi di armatura metallica e aventi lunghezza di circa un metro. La condotta, avente una lunghezza complessiva tra due pozzetti di circa 26 m, è caratterizzata da un diametro interno di un metro e da uno spessore di circa 85 mm. Il calcestruzzo costituente la tubazione è dotato di resistenza a compressione  $f_{cm}$  di circa 30 MPa (Fig. 1).

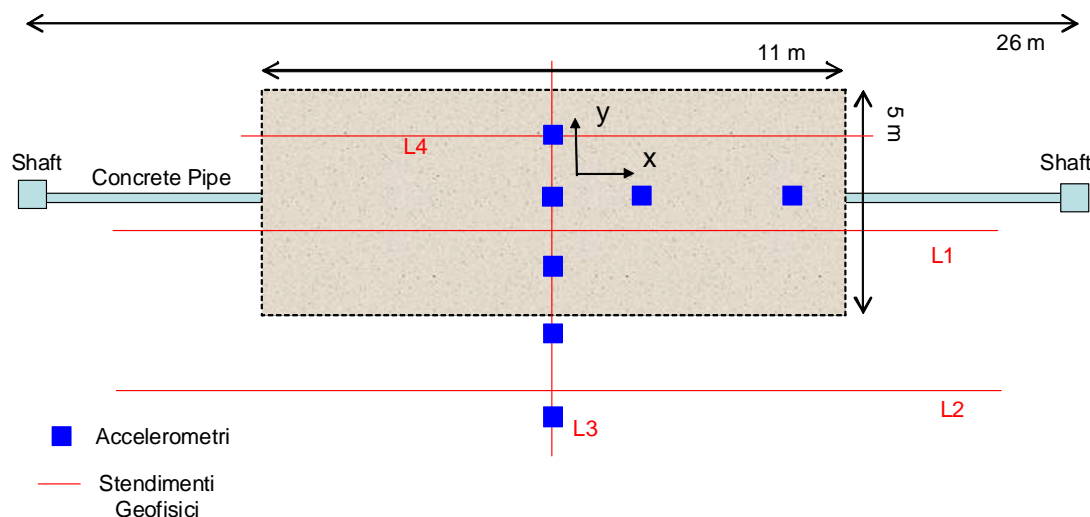


Figura 1. Struttura di prova, posizione degli accelerometri di superficie e degli stendimenti geofisici.

I test di esplosioni effettuati appartengono a due diverse categorie: una prima serie di esplosioni a carica detonante ridotta (10gr e 12gr) sono stati eseguiti in modo da mantenere la struttura in campo elastico, evitando il suo danneggiamento e garantendo così la ripetibilità delle prove. Una seconda serie di esplosioni sono invece state effettuate con cariche esplosive maggiori (120gr e 1200gr) al fine di indurre il danneggiamento e la fessurazione della struttura per valutare il comportamento del sistema struttura-terreno in condizioni ultime.

La dinamite ERGODYN 35E è stata scelta come esplosivo per i test di esplosione per le sue caratteristiche fisiche e per la capacità di garantire detonazioni in condizioni di sicurezza. L'esplosivo è stato posizionato in un apposito cilindro di cartone, sospeso nel centro della sezione di interesse.

Il terreno circostante la struttura è stato monitorato e caratterizzato attraverso diverse tipologie di strumentazioni e di prove. Si riportano nel seguito i risultati preliminari derivanti dal monitoraggio degli accelerometri triassiali di superficie e dalle prove di caratterizzazione geofisica. A causa della necessità di posizionare la strumentazione necessaria per i test di detonazione sia sulla struttura che nel terreno circostante la stessa, sono state eseguite delle operazioni di scavo e di successivo riempimento di una zona circostante la condotta (Fig. 1). Tale zona rappresenta quindi un'area particolarmente disturbata che dovrà essere opportunamente considerata.

### Misure accelerometriche di superficie

Con riferimento alle misure accelerometriche di superficie si riportano in Fig. 2 le mappe di accelerazione di picco ottenute dalla detonazione di una carica di 12 gr. Risultati paragonabili sono stati ottenuti anche per gli altri test condotti con simile entità di carica. Come si nota dalla Fig. 2, la componente di moto più gravosa ai fini della sollecitazione è l'accelerazione verticale localizzata direttamente al di sopra del punto di detonazione.

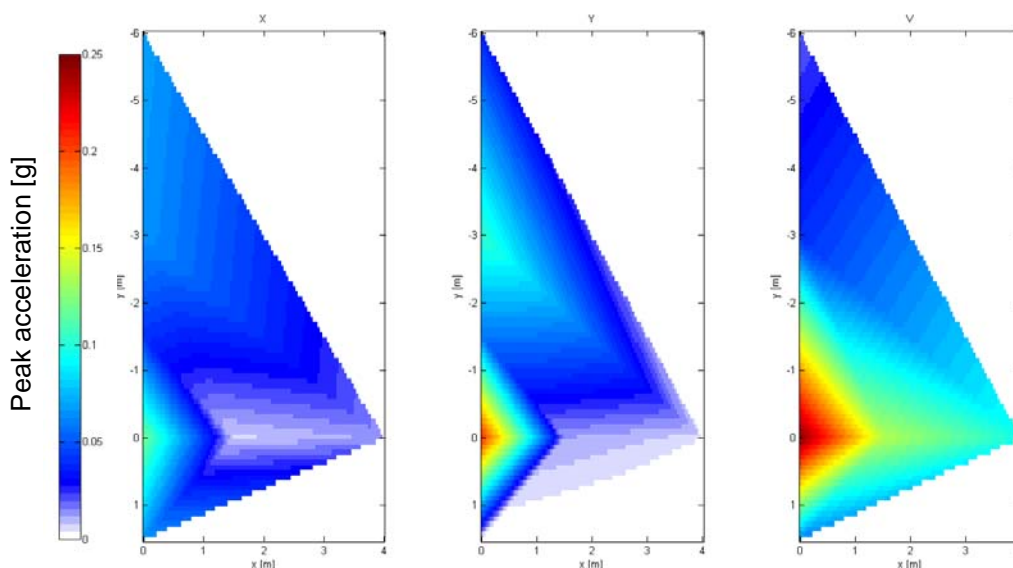


Figura 2. Mappe del picco di accelerazione nelle tre direzioni per l'esplosione di una carica di 12 gr.

Si nota inoltre come vi sia una forte attenuazione del picco di accelerazione nel terreno circostante la struttura. Ciò può essere motivato dall'effetto combinato di attenuazione intrinseca del materiale ed attenuazione geometrica dell'onda d'urto. Inoltre il contenuto in frequenza valutato per il picco di accelerazione risulta particolarmente elevato (intorno ai 400 Hz) e tale da far insorgere significativi fenomeni di scattering dell'onda nel terreno. Ulteriori analisi nel dominio della frequenza comporteranno una migliore comprensione di tale fenomeno.

### Risultati di prove geofisiche

Diverse prove geofisiche di tipo sismico (prove SWM e tomografie sismiche) sono state eseguite nella zona circostante la struttura, lungo gli stendimenti indicati in Fig.1, al fine di valutare gli effetti delle esplosioni sul terreno circostante. Si riportano nel seguito alcuni dei

risultati ottenuti per lo stendimento L4, posizionato nei pressi della condotta oggetto di prova. Le prove SWM sono state svolte in tre diversi istanti di tempo, rispettivamente prima e dopo il brillamento delle cariche a minor contenuto esplosivo (circa 12 cariche da 12 gr) e dopo il brillamento delle cariche a maggior contenuto esplosivo (120gr e 1200gr). È stato così possibile analizzare tre diverse curve di dispersione, ciascuna riferita all'istante temporale relativo alla prova. Come si evince qualitativamente dai risultati riportati in Fig. 3-a, a seguito della detonazione delle cariche a maggiore contenuto esplosivo è possibile osservare un piccolo incremento di velocità alle alte frequenze (strati superficiali) ed un decremento di velocità alle basse frequenze (strati più profondi). Sembra inoltre che l'effetto di addensamento/irrigidimento degli strati più superficiali sia legato alla prima serie di cariche minor entità, mentre il disgregamento del terreno a maggiori profondità è da imputare principalmente alle cariche con maggior contenuto energetico. In Fig. 3-b sono riportati i profili di velocità risultanti dalle inversioni delle singole curve di dispersione. Dall'analisi dei profili è possibile stimare quantitativamente l'effetto delle cariche sulle velocità dei singoli strati. Si nota un incremento di velocità di circa 10 m/s per lo strato superficiale ed un decremento di velocità di circa 100 m/s in profondità a seguito dei test di esplosione.

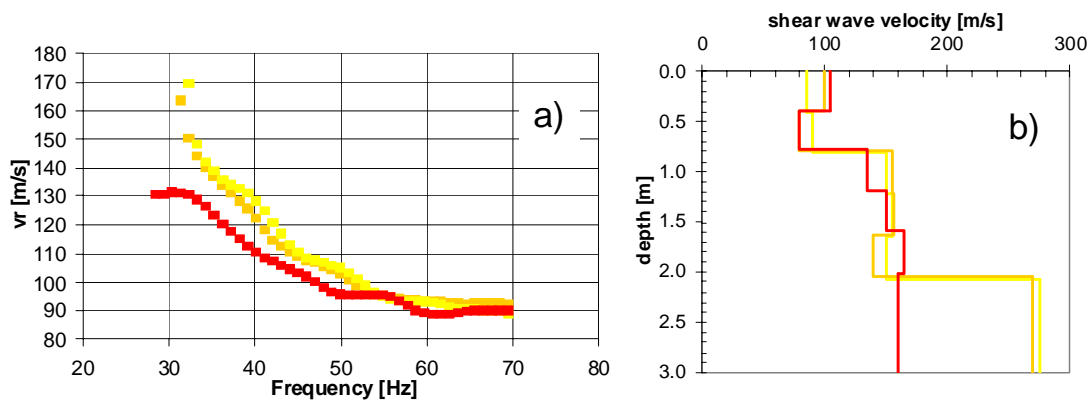


Figura 3. Confronto tra le curve di dispersione ottenute lungo lo stendimento L4 prima (rosso) e dopo (azzurro) il brillamento delle cariche a minor contenuto esplosivo e dopo (verde) il brillamento delle cariche a maggior contenuto esplosivo con i corrispettivi profili di velocità.

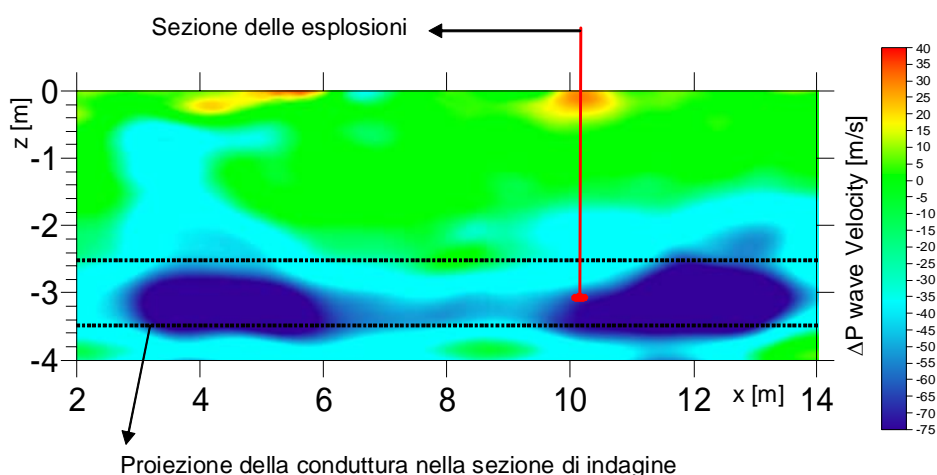


Figura 4. Immagine tomografica ottenuta come differenza delle mappe di velocità prima e dopo gli eventi a maggior contenuto esplosivo.

Le prove di tomografia sismica lungo il medesimo stendimento (L4) sono state eseguite principalmente per mettere in luce variazioni bidimensionali delle caratteristiche meccaniche dei depositi di terreno a seguito della detonazione delle cariche. Risulta quindi interessante valutare la differenza tra le due mappe di velocità ottenute prima e dopo i test di esplosione condotti con cariche a maggior contenuto esplosivo (120gr e 1200gr). Appare chiaro come il brillamento delle cariche all'interno della condotta abbia comportato una notevole riduzione della velocità (dell'ordine di circa 70 m/s) nel materiale naturale circostante la struttura, attribuibile al disgregamento del terreno ed alla diminuzione della sua resistenza. Di contro, è possibile osservabile una zona in superficie, di estensione minore, caratterizzata da un leggero incremento di velocità (dell'ordine di circa 30 m/s) in corrispondenza della sezione di detonazione. Tale risultato appare coerente anche con le misure topografiche eseguite successivamente ai test di esplosione, le quali hanno evidenziato un abbassamento della superficie in corrispondenza della zona di detonazione delle cariche, con conseguente addensamento/compattazione del materiale riportato all'interno dello scavo.

### **Conclusioni**

I risultati dei test di caratterizzazione eseguiti prima e dopo i test di esplosione hanno mostrato come la detonazione di cariche a basso contenuto energetico abbiano un effetto trascurabile sul terreno circostante, mentre cariche di maggior entità inducano una modifica sostanziale delle caratteristiche meccaniche del terreno relativamente sia agli strati superficiali che a quelli più profondi. Le mappe di accelerazione del suolo registrate durante i test di esplosione mostrano una rapida attenuazione dell'onda. Ulteriori analisi nel dominio della frequenza e simulazioni numeriche della propagazione delle onde, effettuabili grazie all'accurata caratterizzazione meccanica eseguita sul terreno, saranno in grado di fornire una visione più completa del fenomeno studiato.

### **Ringraziamenti**

La presente ricerca è stata finanziata dal progetto Europeo INTERREG IT/CH 2006\_2013 - ACCIDENT ID 7629770, Measure 2.2. Gli autori vogliono inoltre ringraziare l'Ammiraglio Roberto Vassale per la sua preziosa assistenza nell'esecuzione dei test esplosivi.

### **Bibliografia**

- [1] R.Eytan, A. Kolodkin, Practical strengthening measures for existing structures to increase their blast resistance: walls and ceilings, Proceedings of the Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures. Panama City, Florida, 1993.
- [2] G.C.Mays, J.G. Hetherington, T.A. Rose, Response to blast loading of concrete wall panels with openings. *J. Struct. Engrg.*, 125 (1999) 1448-1450.
- [3] B.M. Luccioni, M. Luege, Concrete pavement slab under blast loads, *International Journal of Impact Engineering*, 32 (2006) 1248-1266.
- [4] UFC 3-340-02. Unified Facilities Criteria (UFC) - Structures to resist the effects of accidental explosions. HQUSACE, NAVFAC and AFCEA, 2008.
- [5] R. D. Ambrosini, B.M. Luccioni, R.F. Danesi, J.D. Riera, M.M. Rocha, Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface. *Shock Waves*, 12(1):69-78, 2002.
- [6] C. Wu, Y. Lu, H. Hao, W.K. Lim, Y. Zhou, and C.C. Seah. Characterisation of underground blast-induced ground motions from large-scale field tests. *Shock Waves*, 13(3):237-252, 2003.
- [7] Y. Lu, H. Hao, and G. Ma, Experimental investigation of structural response to generalized ground shock excitations, *Experimental Mechanics*, 42 (2002) 261-271.
- [8] H. Liu. Dynamic analysis of subway structures under blast loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(6): 699-711, 2009.