

## **INTERVENTI DI TRATTAMENTO PROFONDO DEI TERRENI PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO SISMICO: PRIMI RISULTATI**

Daniele Lombardi

*Università di Napoli Federico II  
daniele.lombardi@unina.it*

Alessandro Flora

*Università di Napoli Federico II  
flora@unina.it*

Stefania Lirer

*Università di Napoli Federico II  
stelirer@unina.it*

Francesco Silvestri

*Università di Napoli Federico II  
francesco.silvestri@unina.it*

### **Sommario**

L'articolo presenta un nuovo approccio volto alla riduzione del rischio sismico degli edifici esistenti attraverso l'immissione in profondità di un sottile strato di terreno trattato. In tal modo è possibile modificare in maniera significativa il segnale sismico atteso in superficie, abbattendo l'energia trasmessa e riducendo lo scuotimento sismico sull'edificio stesso; la massima riduzione è conseguita quando lo strato trattato ha ridotte rigidità a taglio e densità ed è posizionato a una profondità tale al di sotto del piano campagna da non influire sulle condizioni di sicurezza della struttura in elevazione. L'articolo presenta uno studio parametrico monodimensionale con riferimento a un ideale sottosuolo con caratteristiche simili a quelle di un suolo argilloso, considerando un accelerogramma registrato, e i primi risultati sperimentali su un materiale di potenziale interesse per la creazione dello stato trattato.

*Parole chiave:* Isolamento sismico, Trattamento dei terreni, analisi parametrica, prove di laboratorio.

### **Introduzione**

Varie tecniche sono state sviluppate nel tempo per attenuare il rischio sismico delle strutture; in particolare, mentre esistono diverse tecniche strutturali ideate per proteggere dallo scuotimento sismico le strutture di nuova costruzione (es. isolatori sismici), lo studio dell'isolamento sismico degli edifici esistenti è ancora di forte interesse, in special modo nel caso di edifici strategici (edifici storici, ospedali, ecc.). Al momento, il tipico approccio per la protezione sismica di questi edifici è la riduzione della vulnerabilità, attraverso il rafforzamento della sovrastruttura o delle fondazioni. Per edifici aventi rilevanza storica o architettonica questa operazione è spesso difficilmente realizzabile, in quanto la struttura non deve subire pesanti interventi che ne deteriorino le caratteristiche in modo irreversibile. In alcuni casi, il trattamento (jet grouting, grouting bassa pressione, ecc) dei terreni più superficiali è stato utilizzato come misura alternativa o complementare (per esempio D'Onofrio et al., 1999), in quanto l'irrigidimento degli strati più superficiali riduce gli spostamenti indotti dal sisma nel terreno trattato, anche se ha poca efficacia nel ridurre l'energia trasmessa alla struttura in superficie, che può ancora

essere molto elevata e quindi potenzialmente pericolosa. Di fatto, un procedimento semplice e conveniente ancora non è disponibile per isolare sismicamente gli edifici esistenti. Questo documento presenta un'attività di ricerca in tale ambito, con riferimento ad un approccio innovativo che consiste nel modificare artificialmente la propagazione delle onde di taglio nella parte superiore del sottosuolo attraverso il trattamento del terreno a una data profondità. Le modalità di inserimento dello strato trattato sono uno degli oggetti della ricerca in corso, in quanto essa potrebbe sia essere ottenuta con perforazioni inclinate e iniezioni, sia con iniezioni multiple direzionali; al di là del metodo di iniezione, l'idea di fondo è che lo strato trattato, in cui concentrare gli effetti indotti dal sisma evitando la trasmissione di energia in superficie, debba essere caratterizzato da una impedenza dinamica molto bassa  $\rho \cdot V_s$  (ossia da basse densità  $\rho$  e velocità delle onde di taglio  $V_s$ , ossia della rigidità iniziale  $G_0$ ). Questa soluzione non è mai stata proposta in letteratura nella modalità attuale, anche se l'adozione di barriere soffici è già stata considerata per la riduzione degli effetti vibratori indotti dal passaggio dei treni o delle vibrazioni indotte dal traffico veicolare (es. Chouw 1992, Kellezi 2011). Nel seguito sono presentate delle prime analisi parametriche considerando diverse proprietà e profondità dello strato trattato con riferimento ad un regime semplificato monodimensionale. L'adozione di nuove tipologie di trattamento del terreno richiede, però, un'attività di ricerca specifica nel campo chimico; il materiale utilizzato per ottenere le modifiche dell'impedenza dello strato prescelto potrebbe fratturare il terreno per creare un livello completamente artificiale (soluzione da adottare in terreni a grana fina normalmente consolidati) o permeare nel suolo a creare uno strato di terreno trattato (per terreni permeabili). La ricerca teorica e sperimentale è attualmente in corso sulle proprietà del materiale al fine di definire un materiale ideale e una adatta configurazione geometrica per l'intervento; in questa nota sono poi presentati i primi risultati ottenuti dalla sperimentazione su schiume poliuretaniche.

## Analisi monodimensionali

### Proprietà del terreno e dello strato trattato.

E' stato considerato un sottosuolo omogeneo che simula un banco di argilla normal-consolidato di media plasticità dello spessore di 80m, al di sotto del quale è stata prevista la presenza del *bedrock* a cui è stato applicato il segnale sismico. Gli andamenti del modulo di rigidezza a taglio  $G$  e dello smorzamento  $D$  del terreno, dipendenti dall'ampiezza delle deformazioni distorsionali, sono riportati in Fig.1.

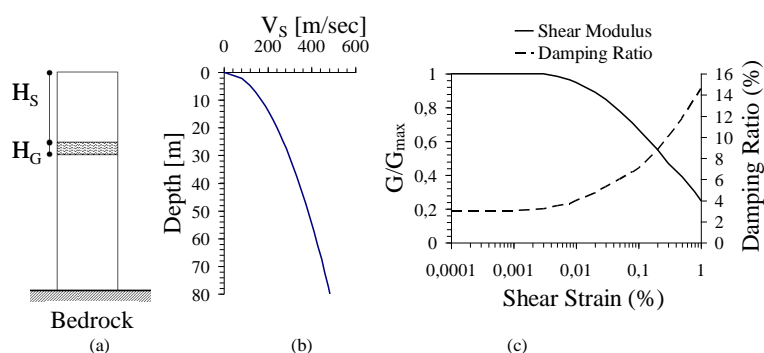


Figura 1. a) Schema geometrico adottato; proprietà del terreno naturale: b) Velocità delle onde di taglio  $V_s$  con la profondità; c) curve di decadimento del modulo di taglio  $G/G_0(\gamma)$  e di variazione dello smorzamento  $D(\gamma)$ .

$G_0$  è stato calcolato come  $G_0 = \rho \cdot V_s^2$ , considerando il profilo di  $V_s$  riportato in Fig. 1.a e assumendo  $\rho = 2040 \text{ kg/m}^3$ . Nelle analisi monodimensionali sono stati fatti variare la posizione dello strato trattato e le sue caratteristiche dinamiche, mentre il suo spessore ( $H_G$ ) è stato assunto costante e pari a 50cm. La Tab.1 sintetizza le proprietà del terreno naturale e dello strato trattato.

Tabella 1. Principali proprietà dei materiali.

materiale	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$G_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$D_0$ [%]	Comportamento del Materiale
Terreno naturale	20	2040	Hardin, 1978	Hardin, 1978	3	Non lineare
Strato trattato	10	1020	10	100	0	Lineare
			20	200		
			50	500		

Poiché  $V_s$  e  $G_0$  aumentano con la profondità mentre le proprietà dello strato trattato sono regolate dall'effetto del trattamento, ci si aspetta che maggiore sarà la profondità a cui è posizionato lo strato trattato più efficace sarà la riduzione nella propagazione delle onde verso la superficie.

### Segnali di ingresso.

Un accelerogramma reale, facente parte di un più ampio insieme di segnali sismici in un ampio intervallo di periodi predominanti (Silvestri and Tropeano, 2008), scalato a 0,4g è stato selezionato come segnale di ingresso (Fig.2, Tab. 2) e usato nell'analisi parametrica.

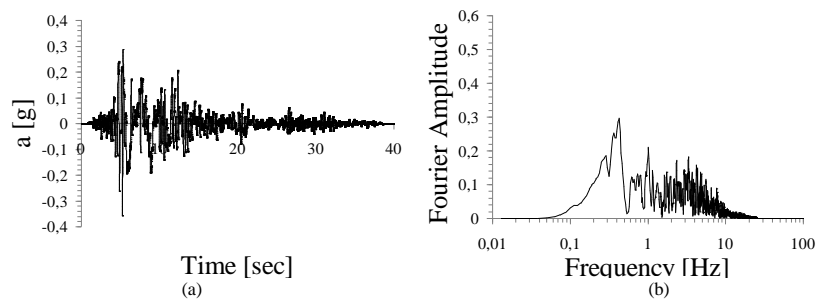


Figure 2. a) Accelerogramma adottato nelle analisi parametriche presentate b) Ampiezza di Fourier dell'accelerogramma scalato.

Tabella 2. Principali caratteristiche dell'accelerogramma considerato.

Stazione di registrazione	Evento sismico	Anno	Accelerazione di Picco [g]	Periodo Principale [s]	Periodo Predominante [s]	Durata Significativa [s]
Sturno (Italia)	Campano-Lucano 1	1980	0.358	0.872	0.2	15.48

Il periodo principale  $T_m$  è stimato come:

$$T_m = \frac{\sum \frac{A_i^2}{f_i}}{\sum A_i^2} \quad (1)$$

dove  $A_i$  sono le ampiezze di Fourier e  $f_i$  rappresentano le frequenze della trasformata discreta di Fourier nell'intervallo 0,25÷20 Hz. La durata significativa è l'intervallo di tempo all'interno del quale una significativa percentuale dell'Intensità di Arias totale è accumulata (nell'intervallo tra il 5% e il 95%).

### Analisi parametriche e loro interpretazione

Le analisi numeriche monodimensionali di risposta sismica sono state effettuate con il codice NERA (Bardet and Tobita, 2001). Le analisi di propagazione delle onde sismiche sono state effettuate variando la profondità  $H_s$  (Fig. 1) e le proprietà meccaniche (Tab. 1) dello strato trattato. La Tab. 3

indica lo schema di analisi condotte.

Tabella 3. Elenco delle analisi eseguite.

Accelerogramma	Schema di Trattamento	Profondità del Tratt., Hs[m]	Velocità delle onde di Taglio $V_s$ [m/s]	Codice identificativo		
Sturno	-	-	-	S 0		
	1	5	10, 20, 50	S 1 10	S 1 20	S 1 50
	2	10		S 2 10	S 2 20	S 2 50
	3	15		S 3 10	S 3 20	S 3 50
	4	20		S 4 10	S 4 20	S 4 50
	5	25		S 5 10	S 5 20	S 5 50

E' stato introdotto un parametro sintetico dell' efficacia del sistema  $E_I(T)$ , modificando lievemente il parametro proposto da D'Onofrio et al (1999).  $E_I(T)$  è definito come:

$$E_I(T) = \frac{S_{a,OFF}(T) - S_{a,ON}(T)}{S_{a,OFF}(T)} \quad (2)$$

in cui  $S_{a,OFF}(T)$  and  $S_{a,ON}(T)$  sono, al variare del periodo T, le ampiezze rispettivamente dello spettro di risposta in accelerazione del deposito senza e con l'intervento, con uno smorzamento strutturale del  $\xi=5\%$ . Un perfetto isolamento risulta da un  $E_I(T)$  pari a 1. Le Fig.e 3, 4 e 5 mostrano i risultati ottenuti per tre valori di  $V_s$  considerati per lo strato trattato: minore è l'impedenza dinamica  $\rho \cdot V_s$  dello strato trattato, maggiore è l'efficacia dell'isolamento sismico. L'efficacia  $E_I(t)$  è maggiore per i periodi più bassi (fino a pochi secondi), che sono quelli di maggior interesse per gli edifici storici essendo i loro periodi naturali usualmente dell'ordine di un secondo o meno. Per quanto riguarda l' iniezione dello strato trattato, maggiore è la profondità trattata, più alta è l'efficacia del trattamento.

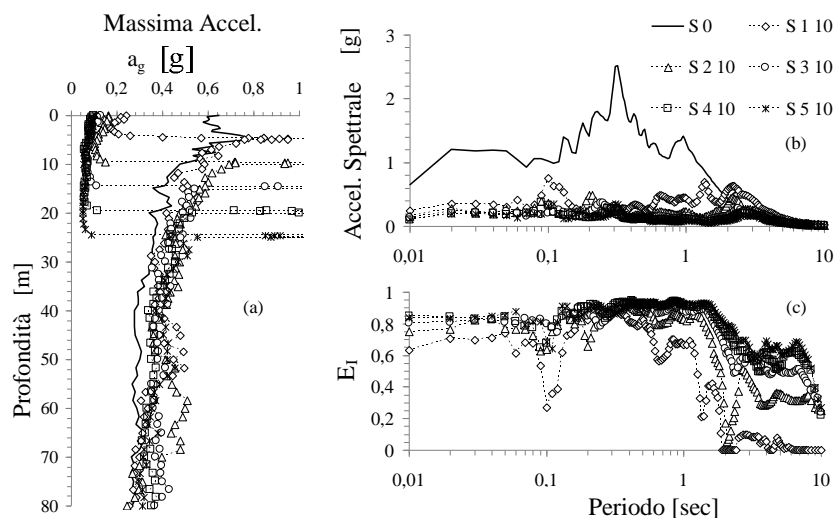


Figura 3. Risultati dall'uso di uno strato trattato con velocità delle onde di taglio  $V_s$  pari a 10m/s: a) profilo di  $a_{max}$  con la profondità; b) Spettro d'accelerazione; c) Efficacia del trattamento  $E_I(T)$ .

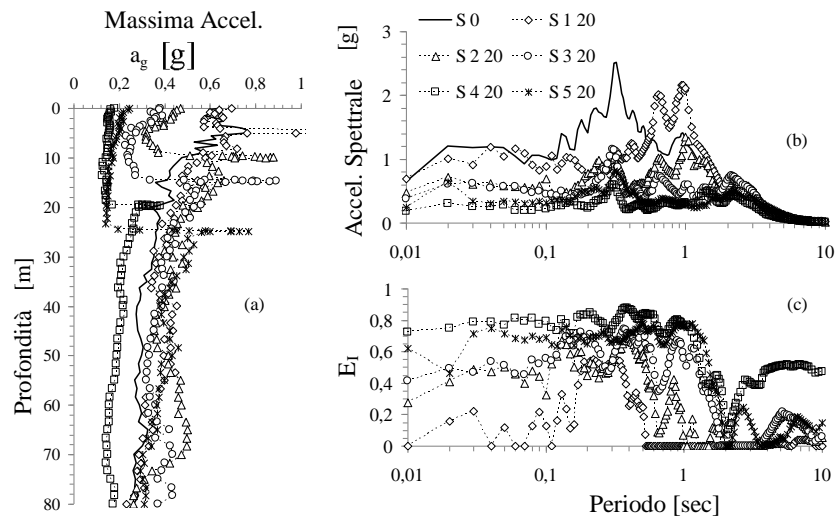


Figura 4. Risultati dall'uso di uno strato trattato con velocità delle onde di taglio  $V_s$  pari a 20m/s: a) profilo di  $a_{max}$  con la profondità; b) Spettro d'accelerazione; c) Efficacia del trattamento  $E_I(T)$ .

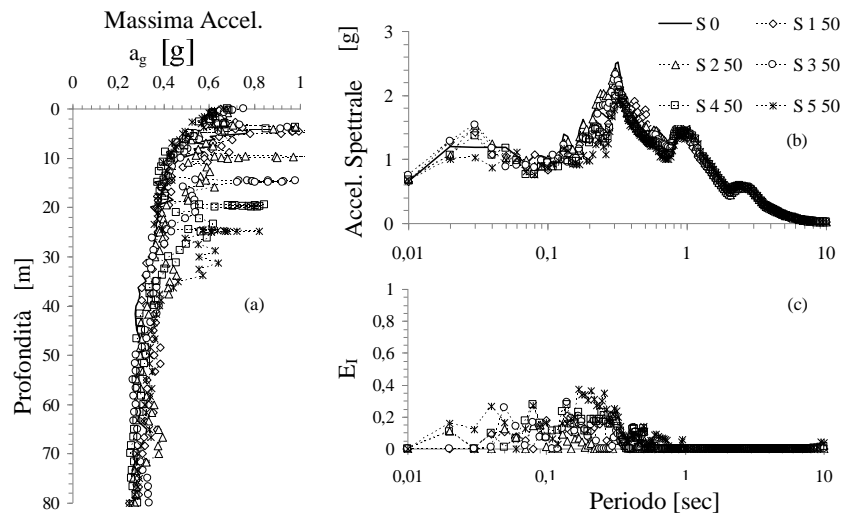


Figura 5. Risultati dall'uso di uno strato trattato con velocità delle onde di taglio  $V_s$  pari a 50m/s: a) profilo di  $a_{max}$  con la profondità; b) Spettro d'accelerazione; c) Efficacia del trattamento  $E_I(T)$ .

### Prove di laboratorio

L'attività sperimentale in corso sta interessando la possibilità, da parte dei materiali indagati, di espandere sotto pressioni sufficientemente simili a quelle presenti alle profondità a cui prevedere il trattamento. Le prime prove hanno riguardato la misura della densità e dell'espansione di iniezioni di poliuretano a una determinata pressione sferica mantenuta costante nel tempo (Fig.6):

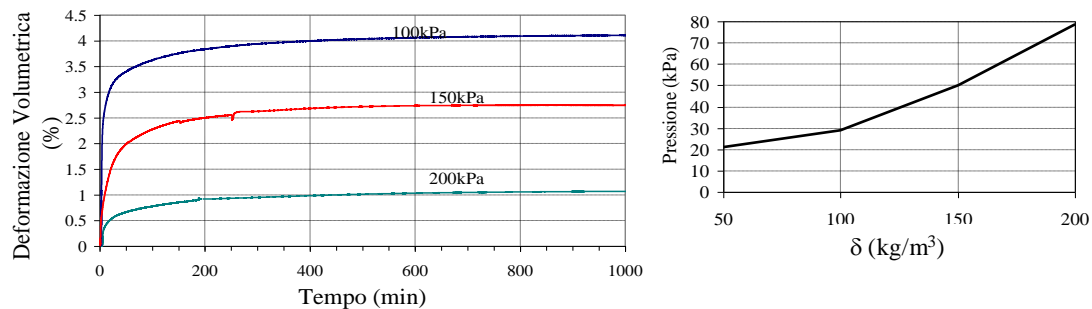


Figura 6. Densità  $\delta$  di provini di poliuretano soggetti a carichi sferici costanti nel tempo; risultati da prove di espansione sotto carichi sferici.

## **Sviluppi futuri**

Il trattamento proposto, da queste prime analisi, sembra essere efficace nel campo di periodi naturali appartenenti a costruzioni mediamente rigide, come gli edifici con struttura in muratura. In particolare, trattamenti a profondità maggiori (gli unici possibili quando si vuole salvaguardare l'integrità degli edifici) sembrano essere quelli più efficaci per l'isolamento, anche perché con la profondità aumenta il contrasto di impedenza dinamica fra i terreni circostanti e lo strato artificiale. Poiché le prime analisi sembrano incoraggianti, in questo momento si stanno portando avanti analisi mono e bidimensionali con un codice di calcolo alle differenze finite e, parallelamente, un'attività sperimentale volta alla definizione di un adatto materiale per le iniezioni e alla sua caratterizzazione meccanica. Dal punto di vista numerico, sarà necessario verificare, in particolare negli schemi bidimensionali in cui è previsto l'impiego di barriere inclinate immerse nel terreno, che, al variare del segnale (in particolare nelle nuove analisi stiamo impiegando wavelet con frequenze ben definite), il moto sismico sia effettivamente alterato dalla presenza delle discontinuità rappresentate dagli interventi, in quanto le loro dimensioni potrebbero essere legate alla lunghezza d'onda dei segnali interessanti il banco sottoposto ad analisi. Per quanto riguarda lo studio dei materiali dal punto di vista chimico è in corso una collaborazione con ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Chimica della Federico II allo scopo di valutare l'utilizzabilità di diversi materiali e, all'interno di una stessa sostanza, studiarne la variazione delle caratteristiche fisico-meccaniche in rapporto alla loro efficacia in vista di un possibile trattamento del terreno. I materiali fin ora scelti stanno subendo una prima serie di analisi di laboratorio in campo geotecnico al fine di determinarne i parametri meccanici e dinamici, avvalendosi sia di attrezzature dalla comprovata affidabilità (prove triassiali, edometriche, di colonna risonante), sia appositamente pensate per adeguarsi alle particolarità dei materiali testati. In particolare ci stanno interessando la capacità di questi materiali di espandere sotto pressioni sufficientemente elevate (superiori a 100÷200kPa) se immersi nel terreno in strati isolati o a esso mischiati e la loro contemporanea idoneità a mantenere densità e rigidità alquanto basse se confrontate a quelle dei terreni stessi. Il passo successivo consisterà nell'effettuare delle prove in piccola scala in centrifuga, allo scopo di saggiare l'affidabilità degli schemi geometrici individuati.

## **Bibliografia**

- Bardet J. P., Tobita T. (2001). NERA A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. NERA Manual.
- Chow Nand Schmid G. (1992). Building isolation using the transmitting behaviour of a soil layer. Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid: Vol.4 2519-2524.
- D'Onofrio A., Mancuso C., Silvestri F. (1999). Reduction of seismic vulnerability by geomaterial attenuation procedures. 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisboa: 725-730.
- Hardin B.O. (1978). The nature of stress-strain behavior for soils. Proc. ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Pasadena: Vol.1 3-90.
- Kellezi L. (2011). Dynamic behavior of a softer layer overlying hard soil / bedrock and vibration reduction. GEO-Danish Geotechnical Institute, Lyngby
- Silvestri F., Tropeano G. (2008). Effetto del non sincronismo inclusa la risposta sismica locale sulla sicurezza dei ponti. Rapporto progetto PRIN 2008.