

ANALISI NUMERICA DELL'ISOLAMENTO SISMICO GEOTECNICO DI EDIFICI STORICI MEDIANTE INIEZIONI DI POLIURETANO

Michele Placido Antonio Gatto
Università degli Studi di Parma
micheleplacidoantonio.gatto@unipr.it

Lorella Montrasio
Università di Brescia
lorella.montrasio@unibs.it

Sommario

La mitigazione del rischio sismico degli edifici del patrimonio storico – artistico avviene tipicamente con interventi di irrigidimento per la riduzione della vulnerabilità strutturale, spesso in contrasto con il mantenimento dell'estetica originale. L'articolo mostra gli effetti di un intervento di isolamento sismico geotecnico basato su iniezioni di poliuretano nel terreno sulla risposta sismica di un terreno reale. Si tratta di una tecnica diffusa e già largamente impiegata nel consolidamento dei terreni di fondazione di edifici esistenti. La mitigazione sismica fornita da questo intervento si basa sulla riduzione delle accelerazioni superficiali e, conseguentemente, della pericolosità sismica; si tratta di un'alternativa agli interventi strutturali, vantaggiosa soprattutto per gli edifici esistenti perché permette di conservarne l'aspetto. Vengono mostrati i risultati delle analisi numeriche condotte agli elementi finiti, finalizzate a studiare gli effetti di sito nei pressi di un edificio storico, interessato in passato da ingenti danni legati a un forte terremoto; si considera la modifica degli strati superficiali del terreno con iniezioni di poliuretano. Per l'espansione del poliuretano, variabile a seconda della tipologia e del confinamento del terreno, si utilizza la teoria dell'espansione della cavità in mezzo elastoplastico; ciò consente di avere indicazioni specifiche sulla geometria finale, la densità e le proprietà meccaniche dell'intervento da simulare numericamente.

1. Introduzione

L'elevato rischio sismico degli edifici storici è principalmente dovuto alla loro vulnerabilità. Gli interventi più diffusi per la mitigazione sismica di tali edifici sono quelli di rinforzo strutturale, che nella maggior parte dei casi non tutelano la conservazione estetica, soprattutto quando si tratta di edifici del patrimonio artistico. Strutture vulnerabili ma non fatiscenti potrebbero essere sufficientemente protette riducendo la cosiddetta accelerazione attesa al suolo (PGA) che agisce direttamente su di esse. Poiché la PGA dipende fortemente dal tipo di terreno (effetti del sito), la letteratura scientifica su questo tema comprende soluzioni sia strutturali che geotecniche, ovvero le tecniche di isolamento di base (Eröz & DesRoches 2018; Barone et al. 2019; De Domenico et al. 2020), o l'Isolamento sismico geotecnico (GSI). Le tecniche di GSI comprendono tutti gli interventi volti a migliorare le proprietà dinamiche del terreno di fondazione mediante materiali sintetici o naturali (Tsang et al. 2012; Tsiavos et al. 2020; Tsang et al. al. 2021). Nonostante numerosi studi abbiano dimostrato l'efficienza delle tecniche GSI nella mitigazione del rischio sismico, spesso nascono dubbi sulla loro realizzazione, possibile quasi esclusivamente sotto nuovi edifici, e sugli

effetti secondari ad essi connessi, ad esempio i cedimenti dovuti alla deformabilità dei materiali impiegati. Intervenire nel terreno per la protezione sismica degli edifici esistenti appare tuttavia un'ottima soluzione per la conservazione estetica. Un intervento GSI che risponde positivamente alle esigenze di applicabilità al di sotto delle strutture esistenti e di assenza di effetti negativi sui cedimenti è quello basato sulle iniezioni di poliuretano ad alta pressione. Studi precedenti hanno dimostrato che tale tecnica aumenta la capacità portante del terreno fino a tre volte (Nowamooz 2016). Supportato da una consolidata tecnologia applicativa, unitamente alle incoraggianti prestazioni di questa tecnica, il gruppo geotecnico dell'Università degli studi di Parma svolge da anni numerose analisi sperimentali, teoriche e numeriche, volte a verificare l'idoneità delle iniezioni di poliuretano come GSI (Montrasio e Gatto, 2016; Gatto et al. 2019; 2021). Recentemente, il comportamento dinamico del poliuretano puro è stato ulteriormente studiato mediante prove RC per derivare una formulazione analitica, che consenta di prevedere i parametri dinamici (modulo di taglio e rapporto di smorzamento), in base al livello di deformazione variando la densità del materiale indurito e il confinamento esercitato dal suolo (a seconda della profondità di iniezione) (Gatto et al. 2022); i risultati sono il punto di partenza per simulare numericamente un'applicazione in terreni a bassa permeabilità, dove il poliuretano iniettato non si miscela al terreno e la sua espansione crea inclusioni assimilabili a cilindri di poliuretano puro. Questo articolo mostra una simulazione numerica degli effetti del poliuretano iniettato sotto un edificio storico, finalizzata a indagare l'efficienza di tale tecnica GSI sulla riduzione delle accelerazioni superficiali. Il terreno di fondazione, costituito prevalentemente da materiale a grana fine, consente di assumere inclusioni cilindriche di poliuretano e di calcolare le proprietà dinamiche del composito sulla base dei risultati di studi precedenti degli autori. Sezione 2 discute la metodologia teorica adottata per valutare l'espansione del poliuretano, in funzione del confinamento del suolo e delle proprietà meccaniche; Sezione 3 descrive il modello FE utilizzato per le simulazioni numeriche, i cui risultati sono illustrati in Sezione 4.

2. Le iniezioni di poliuretano per il consolidamento del terreno

Il poliuretano viene iniettato sotto le fondazioni di edifici esistenti all'interno di perforazioni di diametro 9-12 cm, distanziate in pianta da 50 a 150 cm; in ciascun foro viene introdotta una miscela liquida di poliolo-isocianato m_{PUR} , per più livelli di iniezione ogni metro di profondità. Per una descrizione dettagliata della tecnologia si rimanda a Gatto et al. (2021). Nei terreni a bassa permeabilità, è possibile assumere che il poliuretano iniettato non si misceli al terreno ma lo comprima. Il volume occupato dal poliuretano indurito sarà quello iniziale (della perforazione) incrementato di un fattore f , che tiene conto della compressione del terreno. Per il calcolo di f , si applica la teoria di espansione di cavità cilindriche in mezzi elasto-plastici (Carter, 1986; Yu & Houlsby, 1991; Dei Svaldi et al., 2005). Noti i parametri di rottura e deformabilità del terreno (c' , ϕ' , ψ , E , G , ν), la pressione di confinamento alla profondità dell'iniezione p_0 e la pressione di espansione del poliuretano p_{exp} , si ricaverà il diametro finale del volume occupato dal poliuretano d_{PUR} :

$$d_{PUR} = d_0 \cdot f(p_{exp}, p_0, c', \phi', \psi, E, G, \nu, m) \quad (1)$$

Gatto et al. (2022) descrivono in maniera dettagliata la formulazione. Poiché la pressione di espansione del poliuretano è legata alla densità del poliuretano indurito ρ_{PUR} , (Dei Svaldi et al., 2005), ma quest'ultima dipende proprio da d_{PUR} , è necessario ricorrere a una procedura iterativa per risolvere il problema. In Figura 1 si mostra lo schema finale post-intervento.

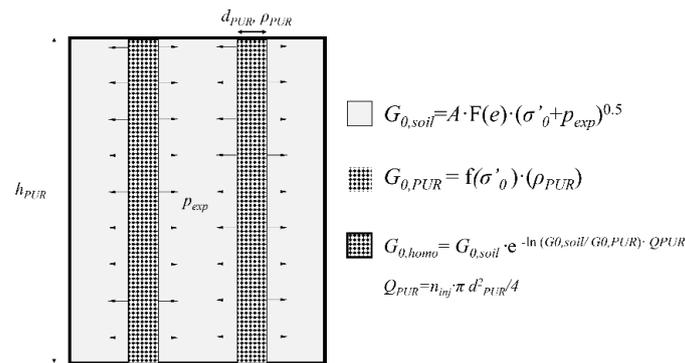


Fig 1. Configurazione del terreno iniettato dopo l'espansione del poliuretano e sintesi della metodologia di omogeneizzazione del modulo di taglio a piccola deformazione.

Lo strato iniettato è pertanto costituito da terreno e colonne di puro poliuretano. A questo strato, si attribuiscono caratteristiche omogeneizzate calcolate conoscendo quelle dei due materiali puri. Si osserva che per effetto di p_{exp} , la rigidezza del terreno è incrementata. Per le caratteristiche del puro poliuretano si utilizza la formulazione analitica ricavata da Gatto et al. (2022) da prove di colonna risonante su 9 campioni di puro poliuretano a differente densità. Infine, per il calcolo delle caratteristiche omogeneizzate, si utilizza la formulazione analitica determinata da Gatto et al. (2019) da prove di colonna risonante su campioni stratificati terreno – poliuretano.

3. Simulazione numerica delle iniezioni di poliuretano alla Cattedrale di Noto

La cattedrale di San Nicolò è il più importante luogo di culto di Noto (Sicilia orientale), dichiarata Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO nel 2002. Il monumento, costruito subito dopo il terremoto della Val di Noto (avvenuto nel 1693), è famoso per l'imponente facciata tardo-barocca in pietra bianca, che svetta dalla sommità della maestosa scalinata (Figura 2a). Il 13 dicembre 1990 un terremoto provocò danni strutturali, responsabili dei crolli successivi della navata centrale e destra della cattedrale, avvenuti nel 1996 (Figura 2b). In quest'area i terremoti sono frequenti per la vicinanza al contatto tra la placca africana ed euroasiatica. Di seguito si mostrerà l'applicazione numerica finalizzata ad evidenziare l'effetto delle iniezioni di poliuretano sulla sua risposta sismica del terreno di fondazione della Cattedrale. Trattandosi di una struttura rigida, è possibile disaccoppiare l'interazione terreno – struttura e concentrarsi sullo studio del comportamento sismico del terreno modificato.



Fig 2. Cattedrale di Noto. a) Vista frontale dell'edificio; b) Configurazione interna successiva al collasso del 1996 (Di Prisco et al. 2006)

3.1 Il modello numerico

Le analisi sono state eseguite agli elementi finiti con il codice numerico OpenSees (Mazzoni et al. 2016). Il dominio considerato è rappresentativo della stratigrafia ricavata da Cavallaro et al. (2003); consiste in un esaedro regolare, di base 1 m² e altezza di 70 m (spessore del terreno deformabile). Esso è discretizzato con elementi 3D-StandardBrick a 8 nodi, avente ciascuno tre gradi di libertà (DOF).

Le analisi numeriche sono condotte in due fasi: inizialmente si applica il peso proprio (fase statica), e successivamente si studia la risposta sismica ad un input di base (fase dinamica). L'input utilizzato è la storia temporale registrata nella stazione di Sortino (a circa 50 km da Noto) durante il terremoto del 1990; esso viene applicato orizzontalmente alla base del dominio sotto forma di forza viscosa puntuale, calcolata come prodotto della viscosità del substrato roccioso e della storia temporale della velocità (Joyner & Chen, 1975). Viene simulato, inoltre, uno scuotimento uniforme, attribuendo vincoli master-slave fra il nodo di input (master) e gli altri nodi della base (slave), e un substrato roccioso visco-elastico con carrelli ad asse verticale e smorzatore puntuale (elementi viscosi ZeroLength) nel nodo di input. Tutte le caratteristiche del modello descritte sono mostrate in Figura 3. Si noti che per un'analisi di taglio puro, i nodi appartenenti alle facce verticali dell'esaedro sono legati con condizioni master-slave per tutti i DOF.

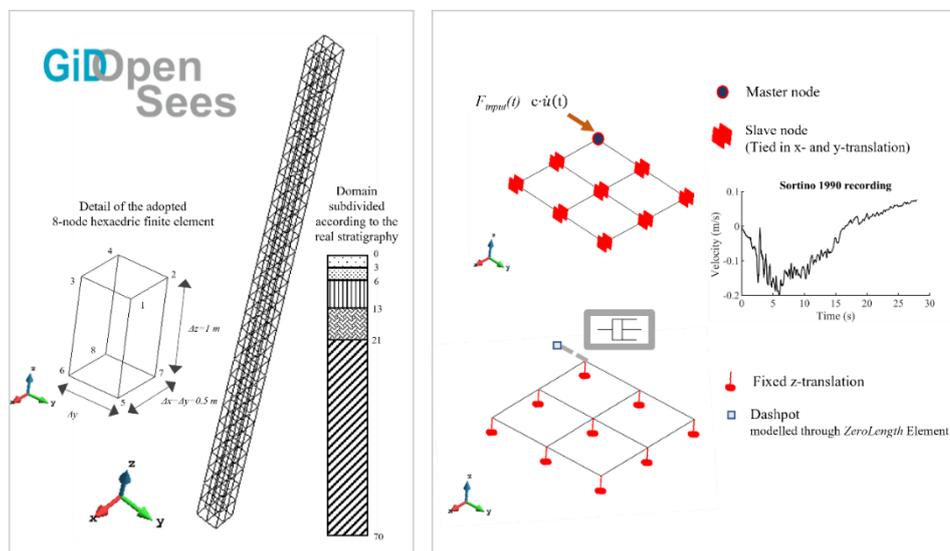


Fig 3. Caratteristiche del modello numerico agli elementi finiti

Poiché il terreno è principalmente coesivo, si utilizza un modello costitutivo Pressione Independent Multi Yield (PIMY), basato sulla teoria della multi-plasticità, che permette di simulare un materiale isteretico e non lineare. Il modello PIMY è assegnato a tutti gli elementi finiti, considerando per ogni strato di terreno i corrispondenti parametri derivati sperimentalmente (Cavallaro et al., 2003; Castelli et al., 2016). La viscosità del terreno è considerata mediante un approccio di Rayleigh, valutando i parametri necessari in base alle frequenze naturali degli strati e al rapporto di smorzamento. Esso è utilizzato anche per modellare gli strati modificati con le iniezioni di poliuretano. Nello specifico, vengono studiati nove casi, considerando tre spessori iniettati h_{PUR} (3, 4 e 5 metri) e ipotizzando per ciascun caso l'iniezione di tre diverse masse di poliuretano m_{PUR} (15, 20 e 25 kg) per livello di iniezione.

4. Risultati

In Figura 4a sono mostrate le storie temporali delle accelerazioni orizzontali registrate nel nodo superficiale centrale del dominio per ciascun caso indagato; l'accelerazione massima del terreno originario, senza iniezioni, è di 2.53 m/s^2 . Si può osservare che in tutti i casi l'accelerazione è ridotta grazie al miglioramento delle caratteristiche dinamiche del terreno date dal poliuretano. La riduzione più alta si ottiene quando gli effetti dell'iniezione vengono simulati fino a una profondità di cinque metri; inoltre, per una minore massa di poliuretano iniettato, le prestazioni GSI sono migliori. Ciò è dovuto alla bassa densità del poliuretano, responsabile della diminuzione del rapporto di impedenza con il terreno non iniettato. La riduzione massima ottenuta è di quasi il 20% per $h_{PUR}=5\text{m}$ e $m_{PUR}=15 \text{ kg/livello}$ di iniezione. La variazione delle accelerazioni massime registrate nella verticale centrale è mostrata in Figura 4b; oltre alla riduzione che interessa l'intero spessore dello strato iniettato, si dimostra che l'accelerazione è ridotta anche a 10-20 m di profondità.

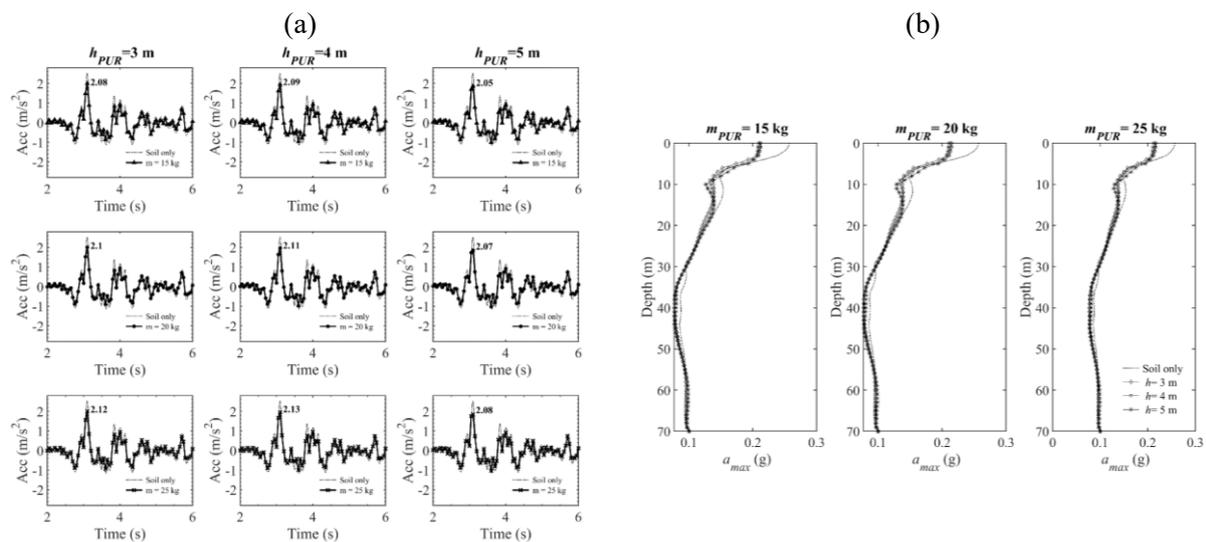


Fig 4. (a) Storie temporali delle accelerazioni numeriche registrate al nodo centrale superficiale del dominio per tutte le configurazioni esaminate. Nel caso "soil only" il valore massimo è 2.53 m/s^2 . (b) Variazione con la profondità delle accelerazioni massime.

5. Conclusioni

Questo studio ha mostrato la mitigazione sismica fornita dal poliuretano iniettato al di sotto di un edificio esistente, interessato in passato da ingenti danni dovuti al terremoto. Gli effetti di tale intervento di miglioramento del terreno sono stati considerati in una simulazione numerica dinamica, a seguito della valutazione dell'espansione e delle proprietà del poliuretano attraverso una metodologia teorico-sperimentale. I risultati hanno mostrato che l'accelerazione si riduce molto di più modificando (mediante iniezione) uno strato più spesso di terreno e iniettando una quantità minore di materiale. Ulteriori indagini saranno condotte verso la sperimentazione su larga scala, volta a validare la metodologia qui presentata.

Bibliografia

- Barone, S., Calvi, G. M. & Pavese, A. (2019). Experimental dynamic response of spherical friction-based isolation devices. *Journal of Earthquake Engineering* 23 (9): 1465-84.
- Cavallaro, A., Massimino, M.R., Maugeri, M. (2003). Noto Cathedral: soil and foundation investigation. *Construction and Building Materials* 17 (8): 533-541.
- Castelli, F., Cavallaro, A., Ferraro, A., Grasso, S., Lentini, V. (2016). A Seismic Geotechnical Hazard Study in the Ancient City of Noto (Italy). *Procedia Engineering* 158: 535–540.
- Dei Svaldi, A., Favaretti, M., Pasquetto, A. & Vinco, G. (2005). Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin. *Bulletin für Angewandte Geologie* 10(2):71–81.
- De Domenico, D., Gandelli, E. & Quaglini, V. (2020). Effective base isolation combining low-friction curved surface sliders and hysteretic gap dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 130.
- Di Prisco, C., Massimino, M.R., Maugeri, M., Nicolosi, M., Nova, R. (2006). Cyclic numerical analysis of Noto Cathedral: soil-structure interaction modelling. *Rivista Italiana di Geotecnica* 2.
- Eröz, M., & DesRoches, R. (2013). A Comparative Assessment of Sliding and Elastomeric Seismic Isolation in a Typical Multi-Span Bridge. *Journal of Earthquake Engineering* 17 (5): 637-57.
- Gatto, M.P.A., Montrasio, L., Tsinaris, A., Pitilakis, D., Anastasiadis, A. (2019). The dynamic behaviour of polyurethane foams in geotechnical conditions. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Rome, Italy, 17–20 June 2019.
- Gatto, M.P.A., Lentini, V., Castelli, F., Montrasio, L., Grassi, D. (2021). The use of polyurethane injection as a geotechnical seismic isolation method in large-scale applications: A numerical study. *Geosciences* 11 (5) :201. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050201>
- Gatto, M.P.A., Lentini, V. & Montrasio, L. (2022). Dynamic properties of polyurethane from resonant column tests for numerical GSI study. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Joyner, W.B. & Chen, A.T.F. (1975). Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 65(5), 1315–1336.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. (2006). *OpenSees Command Language Manual*; Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center: Berkeley, CA, USA.
- Montrasio, L., Gatto, M.P.A. (2016). Experimental Analyses on Cellular Polymers for Geotechnical Applications. *Procedia Engineering* 158: 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.441>
- Nowamooz, H. (2016). Resin injection in clays with high plasticity. *Comptes rendus Mécanique* 707 (11): 797–806
- Tsang, H.-H., Lo, S.H., Xu, X., Neaz Sheikh, M. (2012). Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber–soil mixtures: numerical study. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 41: 2009-2024.
- Tsang, H.-H., Tran, D.P., Hung, W.Y., Pitilakis, K., Gad, E.F. (2021). Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 50: 1271– 1289.
- Tsiavos, A., Sextos, A., Stavridis, A., Dietz, M., Dihoru, L., Alexander, N.A. (2020). Large-scale experimental investigation of a low-cost PVC ‘sand-wich’ (PVC-s) seismic isolation for developing countries. *Earthquake Spectra* 36(4):1886-1911.
- Yu, H.S., Houslsby, G.T. (1991). Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis. *Géotechnique*. 41(2):173-183.