

CRITERIO DI VULNERABILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE SISMICA PER EDIFICI CON FONDAZIONI SUPERFICIALI DERIVATO DA MODELLI NUMERICI E RETI NEURALI ARTIFICIALI

Anna Baris

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
anna.baris@unicas.it

Erminio Salvatore

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
erminio.salvatore@unicas.it

Rose Line Spacagna

CNR IGAG Area della Ricerca Roma 1
roseline.spacagna@igag.cnr.it

Luca Paoella

Università di Cassino e del Lazio Meridionale
luca.paoella@unicas.it

Giuseppe Modoni

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
modoni@unicas.it

Sommario

L'enorme impatto causato dalla liquefazione durante i terremoti del passato ha sollevato la necessità di criteri ampiamente applicabili per valutare la vulnerabilità e il rischio su larga scala. In questo contributo viene delineato un metodo semplice per valutare la vulnerabilità alla liquefazione di edifici con fondazioni superficiali, integrando precedenti studi di letteratura con analisi numeriche bidimensionali parametriche e reti neurali artificiali. Il calcolo viene eseguito per diverse caratteristiche stratigrafiche e meccaniche del sottosuolo e della rigidità flessionale dell'edificio. La dipendenza dei cedimenti assoluti e differenziali dai parametri è dedotta con una rete neurale artificiale (ANN). Seguendo un tipico approccio adottato per la valutazione dello stato limite di esercizio in condizioni statiche, si deduce quindi una relazione tra cedimenti assoluti e distorsione angolare, introducendo il ruolo della rigidità flessionale del sistema struttura-fondazione.

1. Introduzione

La liquefazione sismica stimola l'interesse della comunità scientifica geotecnica che promuove continuamente studi per chiarire i fattori che determinano la suscettibilità del terreno e l'innescò (es. Ishihara, 1996; Youd TL *et al.*, 2001; Boulanger & Idriss, 2014) e meccanismi concatenati (Iwasaki *et al.*, 1978; van Ballegooy *et al.*, 2014; Chiaradonna *et al.*, 2020). La ricerca è fondamentale orientata a prevedere in modo più realistico la domanda sulle strutture (Bird *et al.*, 2005; Bray & Macedo, 2017; Karamitros *et al.*, 2013; Castiglia *et al.*, 2020; Baris *et al.*, 2020). Il danno strutturale indotto dagli spostamenti in fondazione di un edificio dipende dalla rigidità e dalla fragilità del sistema struttura-fondazione, fattori questi legati alla tipologia, all'estensione e all'altezza dell'edificio. In altre parole, gli edifici sono meno vulnerabili se in grado di assorbire la distorsione senza sviluppare collasso materiale. Cedimenti assoluti, rotazioni e distorsioni angolari sono comunemente adottati per quantificare la richiesta strutturale causata dagli spostamenti in fondazione. In particolare, EN 1997–Eurocodice7 e Poulos *et al.* (2001) convergono sulla distorsione angolare come variabile fondamentale, fissando soglie pari a 1/500, 1/300 o 1/150 rispettivamente per fessurazioni leggere, visibili e danni strutturali degli edifici intelaiati. Un'ipotesi simile è fatta da altri studi che hanno considerato l'effetto causato dal peso proprio degli edifici (es., Skempton & MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963; Burland & Wroth, 1974). Studiando gli spostamenti indotti da scavo sugli edifici, Boscardin & Cording (1989) hanno definito il livello di danno in funzione della distorsione angolare e

della deformazione a trazione orizzontale. Grant *et al.* (1974) propone di stimare statisticamente la distorsione angolare come il limite superiore di una relazione con i cedimenti assoluti misurati su edifici fondati su terreni coesivi o incoerenti per fondazioni superficiali. Per la liquefazione, esistono diversi metodi per prevedere i cedimenti assoluti. Allo stato dell'arte, questa valutazione si basa in gran parte su procedure empiriche sviluppate per stimare la post-liquefazione, il cedimento di consolidazione monodimensionale in condizioni *free-field* (es., Tokimatsu & Seed, 1987; Ishihara & Yoshimine, 1992). Tuttavia, nessuna di queste procedure empiriche considera l'interazione terreno-struttura e i meccanismi complessi risultanti (Dashti & Bray, 2013). Sulla base di analisi numeriche e attribuendo i cedimenti indotti dalla liquefazione alle caratteristiche del sisma e al fattore di sicurezza statico degradato, Karamitros *et al.* (2013) forniscono una formula analitica semplificata per la stima dei cedimenti assoluti di plinti su crosta argillosa. Bray & Macedo (2017), attraverso un'analisi numerica parametrica, hanno proposto di esprimere il cedimento totale come somma di tre contributi: indotto dal taglio, indotto dal volume e indotto dall'espulsione. Eseguendo una vasta analisi numerica parametrica, Bullock *et al.* (2018) definiscono una relazione predittiva per il cedimento di strutture a fondazione superficiale su sabbie liquefacibili in grado di catturare contemporaneamente il ruolo delle proprietà strutturali e del terreno. Il presente lavoro si concentra sulla relazione tra cedimenti assoluti e distorsione angolare prodotta dalla liquefazione per sviluppare un semplice criterio di vulnerabilità ampiamente applicabile agli edifici di un sistema urbano. Vengono eseguite analisi numeriche parametriche bidimensionali accoppiate, applicando diversi input sismici, considerando diverse proprietà stratigrafiche e meccaniche del sottosuolo e proprietà strutturali. Le dipendenze tra le variabili vengono quindi dedotte calibrando, testando e convalidando due diverse reti neurali artificiali: *ANN_{wav}* prevede il cedimento medio atteso e *ANN_{beta}* fornisce la relativa distorsione angolare. Infine, sono state prodotte delle curve di fragilità che definiscono cinque stati di danno in funzione della distorsione angolare.

2. Criterio di vulnerabilità

La metodologia proposta per la valutazione della vulnerabilità di edifici con fondazioni superficiali (Fig. 1), identifica la componente differenziale della deformazione del terreno come principale causa di danno. In una prima fase, viene fornito uno strumento per il calcolo del cedimento assoluto in fondazione basandosi su una delle più recenti formule predittive presenti in letteratura (Bullock *et al.*, 2018) perfezionata con l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale; per poi proseguire con la valutazione delle corrispondenti distorsioni angolari attraverso l'uso di una rete neurale. Infine, viene valutata la probabilità di raggiungimento di cinque diversi livelli di danno indotto da liquefazione, attraverso la costruzione di cinque curve di fragilità in funzione della distorsione angolare.



Fig 1. Diagramma di flusso per la valutazione della vulnerabilità degli edifici con fondazioni superficiali soggetti a spostamenti differenziali indotti da liquefazione

1.1 Valutazione del cedimento medio in fondazione

L'analisi parametrica è stata condotta con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC v8 (Itasca Consulting Group, Inc., 2016) simulando un mezzo costituito da tre strati: il primo e l'ultimo strato sono riconducibili a un terreno coesivo; nello strato intermedio, il modello costitutivo PM4Sand Versione 3.1 (Boulanger & Ziotopoulou, 2017) è stato adottato per riprodurre il fenomeno della liquefazione sismica nelle sabbie. Nel corso delle analisi, sono state fatte variare progressivamente le

caratteristiche geometriche, meccaniche e fisiche della crosta e dello strato liquefacibile, l'input sismico e le proprietà geometriche della struttura, simulata introducendo una trave a cui sono stati attribuiti diversi valori di rigidità flessionale equivalente. Partendo dai risultati ottenuti su oltre 300 analisi numeriche bidimensionali accoppiate, sono stati valutati i cedimenti medi in fondazione e confrontati con il cedimento calcolato con il criterio probabilistico semi-empirico proposto da Bullock *et al.* (2018). Tale criterio introduce la presenza della crosta come mera entità, trascurandone le caratteristiche meccaniche, fisiche e geometriche; inoltre, non viene esplicitata la rigidità flessionale della fondazione: il che giustifica la dispersione dei dati riportati nel confronto tra il cedimento derivato da simulazione numerica e quello calcolato con la relazione semi-empirica (Fig. 2). Al fine di correggere il cedimento ottenuto con Bullock *et al.* (2018) introducendo le caratteristiche della crosta e della rigidità della fondazione, è stata sviluppata la rete neurale artificiale *ANNwav* utilizzando l'algoritmo di Levenberg-Marquardt. La rete, caratterizzata da 25 hidden layers, ha restituito un errore quadratico medio pari a $mse=16 \cdot 10^{-4}$ e può essere usata come strumento predittivo del cedimento medio atteso in fondazione: i parametri di input richiesti sono il cedimento calcolato con Bullock *et al.* (2018), S_{adj}^- , la rigidità flessionale equivalente della struttura, EI, la resistenza a taglio non drenata, Cu, e lo spessore della crosta, Hc (vedi Tabella 1).

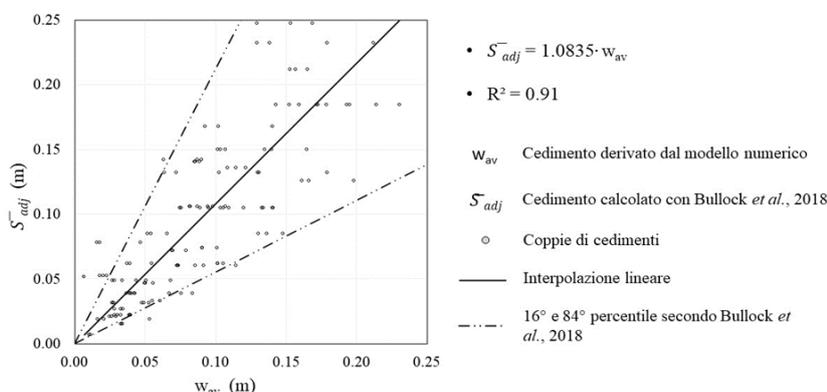


Fig 2. Confronto tra i cedimenti medi calcolati con Bullock *et al.* (2018) e i cedimenti derivati dall'analisi numerica parametrica

Tabella 1 Parametri di input per il modello predittivo *ANNwav*

Input	Output
S_{adj}^- [m]	
$Cu \cdot H_c^3$ [kPa·m ³]	W_{av} [m]
EI [MN·m]	

1.2 Valutazione della distorsione angolare in fondazione

Nello stato limite di esercizio è prassi consolidata porre in relazione la distorsione angolare con i cedimenti assoluti, al fine di verificare l'ammissibilità degli spostamenti che si sviluppano in fondazione (es., Skempton & MacDonald, 1956; Polshin & Tokar, 1957). Seguendo questa filosofia, i cedimenti massimi e le distorsioni angolari ottenuti nello studio di sensitività sono stati plottati su un piano bi-logaritmico evidenziando una forte dipendenza della rotazione relativa dalla rigidità equivalente (Fig. 3). Inoltre, analizzando l'allineamento di coppie caratterizzate da rigidità pari a zero, è stata trovata un'analogia con la soluzione proposta da Grant *et al.* (1974) per fondazioni superficiali isolate su terreni a grana grossa (linea nera continua in Fig. 3). Attraverso un'analisi della varianza (ANOVA, Fisher, 1918), è stata accertata la dipendenza della distorsione angolare dalla rigidità flessionale del sistema di fondazione, EI; inoltre, l'ANOVA ha individuato altri due parametri che influenzano la rotazione relativa: lo spessore, Hc, e la resistenza a taglio non drenata

della crosta, C_u .

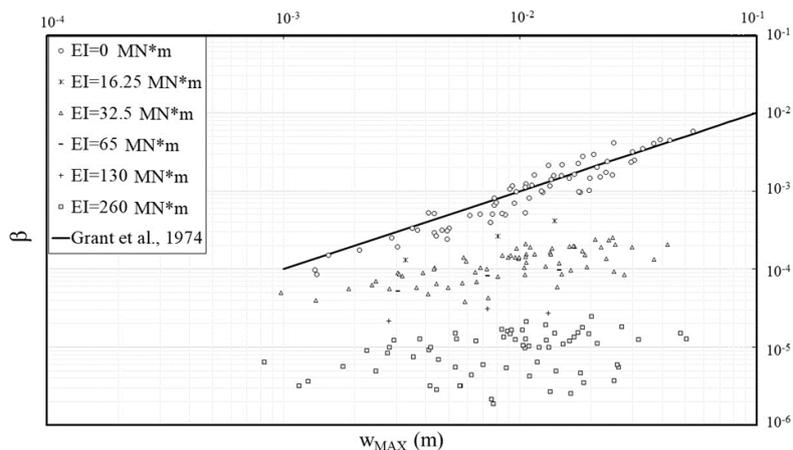


Fig 3. Rappresentazione nel piano bi-logaritmico cedimento massimo in fondazione vs distorsione angolare e analogia con il criterio di Grant et al., 1974

Ottenute le variabili di dipendenza, è stata sviluppata una seconda rete neurale artificiale volta alla predizione della distorsione angolare (ANN_{beta}), i cui parametri di input sono elencati in Tabella 2. La ANN_{beta} è stata sviluppata con l’algoritmo di regolarizzazione bayesiana, ha 10 hidden layers ed ha restituito un errore quadratico medio uguale a $mse=7*10^{-5}$.

Tabella 2 Parametri di input del modello predittivo ANN_{beta}

Input parameter	Output
W_{av} [m]	β
$C_u * H_c^3$ [kPa*m ³]	
EI [MN*m]	

1.3 Curve di fragilità

Boscardin & Cording (1989) hanno proposto un criterio di vulnerabilità sulla tolleranza delle strutture agli spostamenti del terreno indotti dallo scavo e all’assestamento da peso proprio degli edifici. I risultati dell’indagine sono riassunti sotto forma di abaco da utilizzare nella stima dei potenziali danni alle strutture. Calcolando la deformazione orizzontale, e_h , per ogni simulazione eseguita nell’analisi parametrica e tracciando le coppie β - e_h nel piano, è stata trovata una somiglianza tra lo studio parametrico presentato e il criterio di vulnerabilità sopra menzionato. Il risultato è mostrato in Fig. 4: fatta eccezione per alcuni punti, le coppie β - e_h si allineano con una buona approssimazione con l’interpolazione lineare per i cedimenti dovuti al peso proprio proposta dal criterio di vulnerabilità di Boscardin & Cording (1989). Tale analogia consente di individuare le soglie di distorsione angolare che definiscono il passaggio tra i vari livelli di danno, ottenendo un criterio di vulnerabilità deterministico per la definizione della tipologia di danno causato da liquefazione sismica in strutture intelaiate con fondazioni superficiali. Fotopoulou *et al.* (2018), attraverso analisi statiche non lineari, sviluppano un criterio di fragilità con curve log-normali per edifici in cemento armato con fondazioni dirette, adottando il cedimento differenziale come variabile di domanda. Le curve proposte sono caratterizzate da una deviazione standard log-normale costante per ogni livello di danno, pari a $\sigma_\beta=0.5$. Al fine di passare da un criterio di vulnerabilità deterministico (Fig. 4) a uno di natura probabilistica, servendosi di funzioni di distribuzione log-normali bi-parametriche, sono state costruite cinque curve di fragilità, ad ognuna delle quali è associato un diverso livello di danno in funzione della distorsione angolare in fondazione. Il primo parametro di input per il calcolo della funzione log-normale bi-parametrica è la media della distorsione angolare relativa ad ogni livello di danno: considerata

l'analogia presentata in Fig. 4, le medie sono poste pari ai valori di passaggio proposti dal criterio deterministico di Boscardin & Cording (1989).

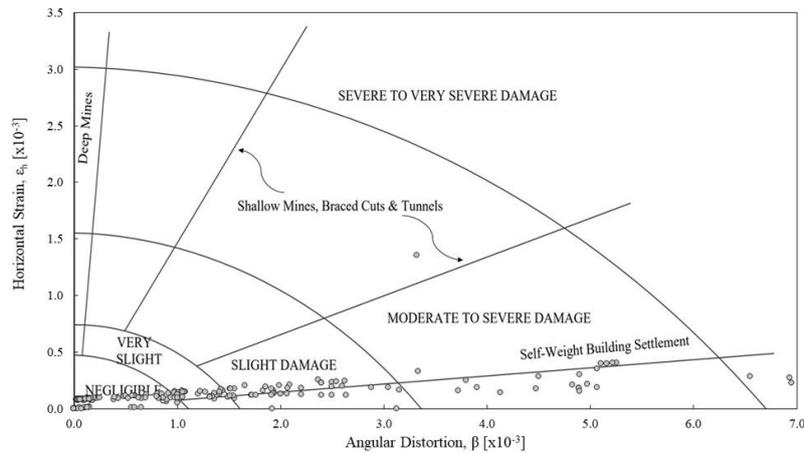


Fig 4. Rappresentazione nel piano distorsione angolare – deformazione orizzontale di trazione e analogia con il criterio di Boscardin & Cording, 1989

Il secondo parametro di input necessario è dato dalla deviazione standard log-normale della distorsione angolare in fondazione, tale parametro rappresenta la dispersione totale relativa a ciascuna curva di fragilità: servendosi della deviazione standard fornita da Fotopoulou *et al.* (2018), vengono proposte le curve riportate in Fig. 5.

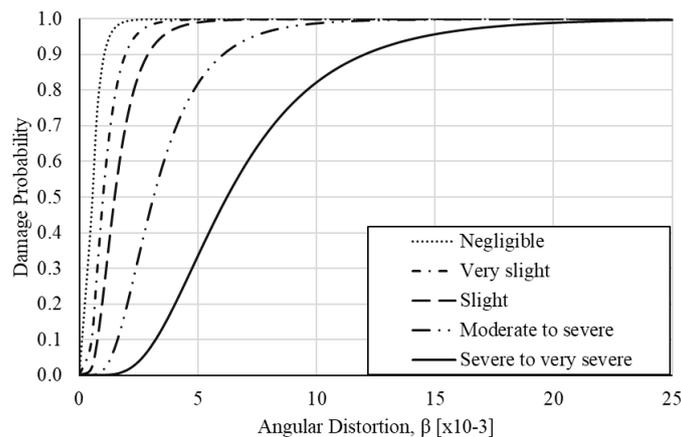


Fig 5. Curve di fragilità per gli edifici con fondazioni superficiali soggetti a distorsioni angolari dovute alla liquefazione

Conclusioni

Lo studio evidenzia la possibilità di utilizzo degli approcci per la valutazione dello stato limite di esercizio in condizioni statiche anche per la valutazione dei danni causati dai cedimenti differenziali indotti da liquefazione. Inoltre, il criterio di fragilità ricavato risulta essere di semplice applicazione ed estendibile a uno studio di vulnerabilità a scala urbana.

Bibliografia

- Baris, A., Spacagna, R.L., Paoella, L., Koseki, J., Modoni, G. (2020). Liquefaction fragility of sewer pipes derived from the case study of Urayasu (Japan). *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-020-00957-2
- Bird, J. F., Crowley, H., Pinho, R., Bommer, J. J. (2005). Assessment of building response to liquefaction-induced differential ground deformation. *Bulletin of the New Zealand Society for earthquake engineering*, Vol. 38, No. 4, December 2005.
- Bjerrum, L. (1963). "Discussion session IV." *Proc, European Conf. on Soil Mech. and Found. Engr.*, Wiesbaden, Germany, II, 135-137.

- Boscardin, M.D. & Cording, E.J. (1989). Building response to excavation-induced settlement. *Jn. Geotech. Eng., ASCE*, 115(1): 1-21.
- Boulanger, R.; Idriss, I. (2014). CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures; Report No. UCD/CGM-14/01; Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California: Davis, CA, USA.
- Boulanger, R. W., Ziotopoulou, K. (2017). "PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 114 pp.
- Bray, J. & Macedo, J. (2017). 6th Ishihara lecture: "Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement". *Soil Dynamics Earthquake Eng* 102, 215–231.
- Bullock, Z., Karimi, Z., Dashti, S., Porter, K., Liel, A., & Franke, K. (2018). A Physics-Informed Semi-Empirical Probabilistic Model for the Settlement of Shallow-Founded Structures on Liquefiable Ground. *Geotechnique*.
- Burland, J. B., and Wroth, C. P. (1974). "Settlement of buildings and associated damage." *Proc. Conf. on Settlement of Structures*, Pentech Press, London, England, 611-654.
- Castiglia, M., Fierro, T., Santucci de Magistris, F. (2020). Pipeline Performances under Earthquake-Induced Soil Liquefaction: State of the Art on Real Observations, Model Tests, and Numerical Simulations. *Shock and Vibration*. CEN 2017a: prEN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design.
- Chiaradonna, A., Lirer, S., Flora, A. (2020). A liquefaction potential integral index based on pore pressure build-up. *Engineering Geology* 272(2006):105620. DOI:10.1016/j.enggeo.2020.105620.
- Fisher R. A. (1918). The correlation between relatives on the supposition of mendelian inheritance. *Trans. R. Soc. Edinb.* 53: 399–433.
- Fotopoulou, S., Karafagka, S., Pitilakis K. (2018). Vulnerability assessment of low-code reinforced concrete frame buildings subjected to liquefaction-induced differential displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 110, 173-184.
- Grant, R., Christian, J.T., and Vanmarcke, E.H. (1974). "Differential settlement of buildings". *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 100(9), pp. 973-991.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford University Press Inc, New York, NY
- Itasca Consulting Group, Inc. (2016). *FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.0*. Minneapolis: Itasca.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., Yasuda, S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. In: *2nd international conference on microzonation*.
- Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Chaloulos Y.K. (2013). "Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 46. 64-76.
- Kuhlemeyer, R., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE*, 99(SM5), 421-427.
- Skempton A.W. and MacDonald D. H. (1956). Discussion of "The allowable settlements of buildings" *Proc, Inst. Civ. Engrs., Part II*, 5, 774.
- Polshin, D.E., Tokar, R.A. (1957). "Maximum allowable non-uniform settlement of structures." *Proc, 4th InI. Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., 1*, London, England, 402-405.
- Poulos, H.G. (2001). Pile foundations. Ch. 10 of *Geotechnical and Geoenvironmental Handbook*, Ed. R.K. Rowe, Kluwer Academic Publishers, Boston, 261-304. *Foundations and retaining structures - Research and practice*.
- Seed RB, Cetin KO *et al.* (2003) Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. Keynote presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA, April 30
- Skempton, A.W., MacDonald, D.H. (1956). The allowable settlement of buildings. *Proc, Inst, of Civ. Engrs., Part III*, 5, 727-784.
- Tokimatsu, K., and H. B. Seed. 1987. "Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking." *J. Geotech. Eng.* 113 (8): 861–878. [https:// doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:8\(861\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:8(861)).
- van Ballegooy, S., *et al.* (2014) Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch. *Earthquake spectra* (30) No. 1: pp 31–55, February 2014
- Youd, T.L. *et al.* (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J Geotech. Geoenviron. Eng.* 127:817–833.