

STUDIO DELL'EFFETTO DI DRENI ORIZZONTALI IN TERRENI LIQUEFACIBILI SOTTO AZIONE SISMICA

Gianluca Fasano

Università degli Studi di Napoli "Federico II"

gianluca.fasano@unina.it

Domenico De Sarno

Università degli Studi di Napoli "Federico II"

domenico.desarno@unina.it

Alessandro Flora

Università degli Studi di Napoli "Federico II"

flora@unina.it

Emilio Bilotta

Università degli Studi di Napoli "Federico II"

bilotta@unina.it

Sommario

Nella nota si presentano alcune soluzioni dell'equazione della consolidazione bidimensionale (nell'ipotesi di Terzaghi – Rendulic) con termine di accumulo delle sovrappressioni indotte da azioni sismiche, applicato al caso dei drenni orizzontali. Il problema è stato risolto con un metodo alle differenze finite. Obiettivo del lavoro è di produrre, attraverso analisi parametriche, abachi di progetto per interventi con drenni orizzontali che consentano di definire l'interasse tra i drenni in modo da non superare una determinata sovrappressione media nel banco, al fine di ridurre il rischio di liquefazione.

La generazione delle sovrappressioni indotte dal sisma è stata implementata attraverso l'introduzione di un termine di accumulo, così come proposto da studi presenti in letteratura.

1. Il fenomeno della liquefazione

La liquefazione dei terreni è un fenomeno che viene innescato dal progressivo accumulo di sovrappressioni del fluido interstiziale dovuto ad azioni dinamiche. Tale accumulo riduce progressivamente le tensioni efficaci fino ad annullarle e l'attingimento di quest'ultimo stadio comporta la totale perdita di resistenza a taglio del terreno che assume il comportamento di un fluido viscoso. Si può comprendere quindi che la liquefazione è un fenomeno che può manifestarsi solo in terreni granulari, privi di coesione, sciolti e sottofalda.

La liquefazione ha comportato grossi danni economici e per tale motivo negli ultimi anni è stata oggetto di numerosi studi. Principale obiettivo di diversi studi è quello di elaborare e validare interventi atti alla mitigazione del rischio indotto da tale fenomeno.

2. Tecniche di mitigazione del rischio

Accertata la concreta possibilità che in un determinato sito possa verificarsi l'innescamento della liquefazione, l'obiettivo principale è quello di ridurre il rischio che tale fenomeno possa comportare dei danni.

Possibili interventi per ridurre la suscettibilità a liquefazione di un terreno sono:

- la compattazione, che consente di aumentare la densità relativa del terreno, modificando il

comportamento tensio-deformativo, che tende a diventare dilatante, riducendo così lo sviluppo di sovrappressioni;

- la desaturazione, che rende il fluido interstiziale più compressibile e rallenta l'accumulo delle sovrappressioni;
- i sistemi di drenaggio, che consentono di dissipare le sovrappressioni sviluppate durante la fase di accumulo evitando l'attingimento di livelli di sovrappressione troppo elevati.

La compattazione è generalmente utilizzata per ridurre la suscettibilità a liquefazione di terreni superficiali. Tale tecnica può essere utilizzata solo nel caso di edifici di nuova costruzione e fuori dai centri abitati. La desaturazione è una tecnica ancora in fase di sviluppo per le difficoltà di implementazione e controllo. Il vantaggio di questa tecnica è che richiede una riduzione del grado di saturazione di pochi punti percentuali (riduzione che può essere indotta con diversi metodi) per ridurre drasticamente la rigidità del fluido interstiziale, strettamente legata allo sviluppo delle sovrappressioni. La tecnologia dei sistemi di drenaggio è già utilizzata in diversi campi e la sua efficacia per la mitigazione del rischio da liquefazione è consolidata e validata da diversi studi di letteratura.

3. Dreni orizzontali

Le attuali tecnologie riguardanti sistemi di drenaggio per la mitigazione del rischio da liquefazione prevedono generalmente l'installazione di dreni verticali in ghiaia o in materiale sintetico. Tuttavia, questi ultimi possono difficilmente essere realizzati al di sotto di edifici esistenti. In tal caso, una soluzione è rappresentata dai dreni orizzontali che possono essere installati tramite l'utilizzo della tecnologia del *directional drilling* che consente di effettuare trivellazioni direzionali in ambito urbano. Le potenzialità dell'applicazione di tale tecnica di mitigazione sono però limitate dall'assenza di metodi di progetto speditivi. Allo scopo di superare tale limite in questo lavoro si propongono degli abachi di progetto per dreni orizzontali in presenza di azioni dinamiche, utilizzando la metodologia già proposta e validata da altri autori come Seed e Booker (1977) e successivamente Bouckovalas et al. (2009) per dreni verticali.

3.1 Soluzione numerica

Il problema dello sviluppo e della dissipazione delle sovrappressioni indotte dall'azione sismica è a rigore un problema idro-meccanico accoppiato. Tuttavia, è possibile semplificare tale processo adottando una legge di accumulo delle sovrappressioni e risolvendo l'equazione della consolidazione nell'ipotesi di Terzaghi-Rendulic (Rendulic 1936), scritta nella forma:

$$\frac{k}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = m_v \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial t} \right) \quad 1$$

dove k è il coefficiente di permeabilità, u è la sovrappressione, m_v è il modulo di compressibilità volumetrica, N è il numero di cicli e u_g è la sovrappressione indotta, il cui accumulo è rappresentato dall'ultimo termine dell'equazione 1. La variazione della sovrappressione indotta col numero di cicli può essere espressa tramite le relazioni 2 a , 2 b suggerite da Bouckovalas et al. (2009).

$$\frac{\partial u_g}{\partial N} = \frac{\sigma'_0}{\pi A N_1} \frac{1}{\left(\frac{t}{t_d} \frac{N_{eq}}{N_1} \right)^{1-\frac{1}{2A}} \cos\left(\frac{\pi}{2} r_u\right)}; \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{N_{eq}}{t_d}; \quad 2 a, 2 b$$

in cui σ'_0 è la tensione efficace verticale nel punto considerato, N_1 è il numero di cicli che porta a liquefazione (Kramer e Wang 2015), N_{eq} è il numero di cicli equivalente del sisma (Green e Terri 2005), r_u rappresenta il rapporto tra la sovrappressione e la tensione efficace nel punto in esame, t_d è la durata

significativa del sisma (Trifunac e Brady 1975) e infine A è un parametro che definisce la forma della curva di accumulo (Seed et al. 1975). È importante notare che il termine di accumulo è una funzione non lineare di r_u . Dalle equazioni 1 e 2 si ha:

$$T_{ad} \left(\frac{\partial^2 r_u}{\partial \left(\frac{x}{d}\right)^2} + \frac{\partial^2 r_u}{\partial \left(\frac{y}{d}\right)^2} \right) = \frac{\partial r_u}{\partial \left(\frac{t}{t_d}\right)} - \frac{N_{eq}}{\pi A N_1} \frac{1}{\left(\frac{t}{t_d} \frac{N_{eq}}{N_1}\right)^{1-\frac{1}{2A}} \cos\left(\frac{\pi}{2} r_u\right)} \quad 3$$

$$T_{ad} = \frac{t_d k}{d^2 m_v \gamma_w} = \frac{t_d}{d^2} c_v \quad 4$$

L'equazione è stata quindi risolta in funzione delle variabili spaziali adimensionalizzate rispetto al diametro dei dreni (d) e del tempo adimensionalizzato rispetto alla durata significativa del sisma. Tali variabili di progetto, unitamente con le caratteristiche meccaniche ed idrauliche del terreno, consentono di definire il valore del parametro T_{ad} . Il rapporto N_{eq}/N_1 rappresenta il numero di cicli equivalenti dell'azione sismica rapportato al numero di cicli che conduce a liquefazione il terreno in esame.

Il sistema geometrico analizzato è riportato in Fig 1. **L'origine riferimento non è stata trovata.**, con dreni disposti a quinconce ($\alpha=60^\circ$). Data la simmetria verticale del sistema, è stata analizzata solo una striscia avente sul bordo superiore e in corrispondenza dei dreni una sovrappressione nulla. Data la simmetria i bordi laterali risultano essere impermeabili, ad esclusione dei tratti occupati dai dreni orizzontali. Il bordo è stato modellato come impermeabile e posto ad una distanza tale da non influenzare la soluzione all'interno del volume di interesse. La soluzione è infatti fornita per uno spessore H/d all'interno del quale risulta rilevante l'effetto dell'intervento di mitigazione. Tale volume si estende fino ad una profondità di circa $0.5 \cdot s/d$ al di sotto dell'ultima fila di dreni.

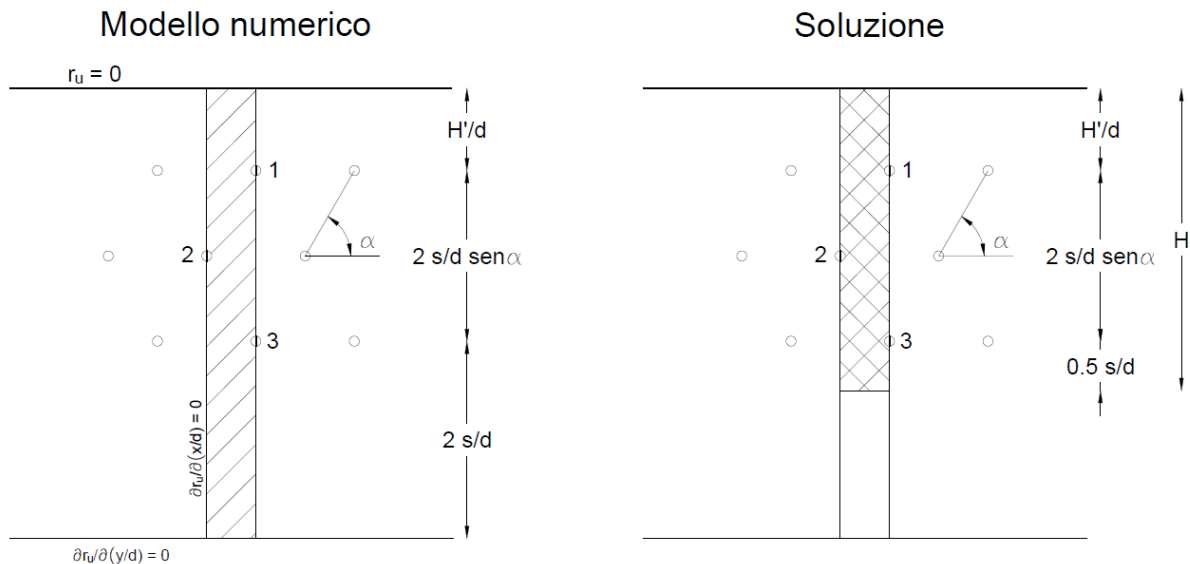


Fig 1. Schema geometrico del sistema.

La geometria del sistema varia quindi in funzione di s/d ed H'/d . Le analisi parametriche sono state eseguite variando s/d , la distanza H'/d , T_{ad} e N_{eq}/N_1 . Il problema differenziale è stato risolto alle differenze finite con un metodo implicito.

3.2 Risultati numerici

La risoluzione del problema di consolidazione conduce ad una distribuzione delle r_u che risulta funzione della posizione del punto e del tempo. Per una lettura più chiara dell'effetto dei dreni, si rappresentano i profili verticali della r_u media e massima sull'orizzontale in Fig 2 fino alla profondità H.

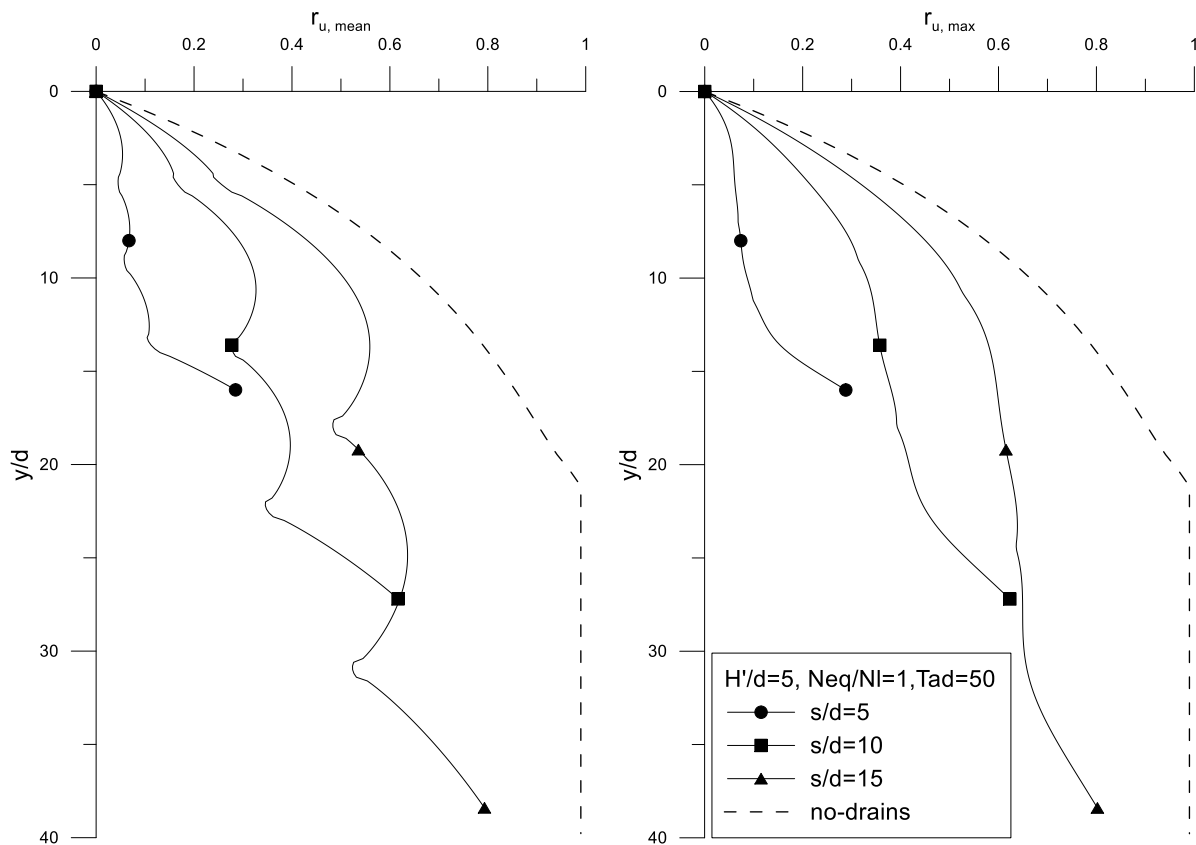


Fig 2. Profili verticali di $r_{u,mean}$ (sx) e $r_{u,max}$ (dx) per $H'/d=5$, $T_{ad}=50$ e $N_{eq}/N_1=1$.

La presenza dei dreni, indipendentemente dall'interasse scelto, riduce le sovrappressioni in maniera significativa rispetto alla configurazione senza dreni. All'aumentare dell'interasse, si può notare l'incremento del valor medio e massimo della sovrappressione ad una qualunque profondità. Ovviamente, al crescere dell'interasse cresce lo spessore di terreno trattato con l'intervento. I profili di $r_{u,mean}$ presentano oscillazioni maggiori rispetto a quelle dei massimi in quanto tengono conto della minore sovrappressione in prossimità dei dreni.

3.3 Metodo di progetto

I risultati delle analisi parametriche sono riportati sotto forma di abachi, in ognuno dei quali è fissata la distanza H'/d e N_{eq}/N_1 . Questi riportano il rapporto di sovrappressione medio e massimo per $t=t_d$ nel volume da trattare al variare di s/d e T_{ad} (Fig 3). Ai fini progettuali è quindi necessario conoscere il coefficiente di consolidazione bidimensionale, la resistenza a liquefazione del terreno da trattare (N_1) e informazioni riguardanti la pericolosità sismica del sito (N_{eq} , t_d).

Noti questi parametri e fissato il diametro e la profondità della fila superiore di dreni dal bordo superiore (H'), è univocamente determinato l'abaco e la curva da utilizzare per il progetto dei dreni.

In base ai requisiti richiesti dal singolo progetto è possibile individuare il valore desiderato del rapporto di sovrappressione di progetto $r_{u,mean d}$ (o in alternativa $r_{u,max d}$). Con quest'ultimo è quindi possibile determinare l'interasse massimo affinché sia rispettata la condizione di progetto nello spessore H.

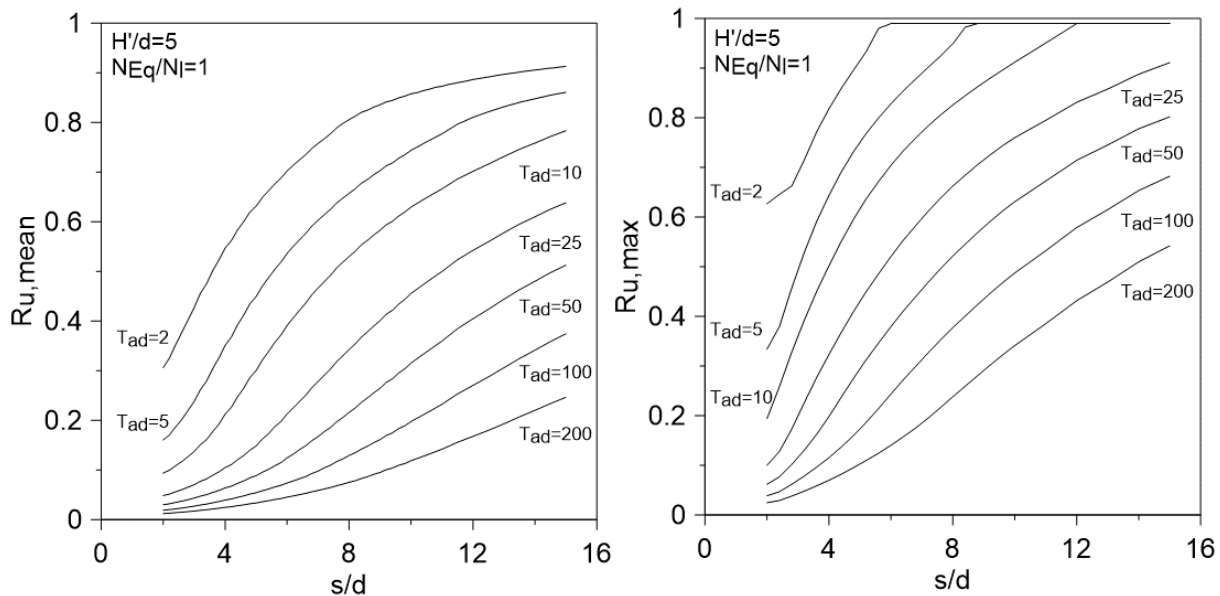


Fig 3. Abaco di progetto

4. Conclusioni

I dreni orizzontali rappresentano un efficace intervento da adottare nel caso in cui si voglia ridurre il rischio di liquefazione di terreni sotto edifici esistenti.

Le analisi e la metodologia adottata nella stesura di tale lavoro ha permesso di definire abachi di progetto che consentono di progettare in via speditiva interventi di mitigazione di liquefazione tramite dreni orizzontali.

Bibliografia

- Bouckovalas, G., Papadimitriou, A., e Niarchos, D. (2009). "Gravel drains for the remediation of liquefiable sites". *Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, (May).
- Green, R. a., e Terri, G. a. (2005). "Number of Equivalent Cycles Concept for Liquefaction Evaluations - Revisited". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 477–488.
- Kramer, S. L., e Wang, C. (2015). "Empirical Model for Estimation of the Residual Strength of Liquefied Soil". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9), 1–15.
- Rendulic, L. (1936). "Porenziffer und porenwasserdruck in tonen". *Der Bauingenieur*, 17, 559–564.
- Seed, H. B., e Booker, J. R. (1977). *Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains*. American Society of Civil Engineers.
- Seed, H. B., Martin, P. P., e Lysmer, J. (1975). *The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction*. College of Engineering, University of California.
- Trifunac, M. D., e Brady, A. G. (1975). "A study on the duration of strong earthquake ground motion". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581–626.