

SVILUPPO DI UNA TECNICA DI IPS BIO-MEDIATA E POSSIBILI METODOLOGIE DI MONITORAGGIO

Giuseppe Astuto

Università degli Studi di Napoli Federico II

giuseppe.astuto@unina.it

Emilio Bilotta

Università degli Studi di Napoli Federico II

bilotta@unina.it

Alessandro Flora

Università degli Studi di Napoli Federico II

flora@unina.it

Sommario

L'attività sperimentale è basata sulla messa a punto di una tecnica di parziale saturazione indotta (IPS), particolarmente idonea nel ridurre il rischio di liquefazione dei depositi granulari. La tecnologia sperimentata sfrutta un processo metabolico bio-chimico grazie al quale è possibile generare bolle di azoto molecolare direttamente all'interno dei pori del terreno, incrementando notevolmente la compressibilità del fluido equivalente di porosità, composto da acqua e gas. L'attività di ricerca è stata dapprima focalizzata sui processi bio-chimici interessati durante la nucleazione delle bolle, studiando il fenomeno transitorio di formazione. Successivamente, sono state testate due potenziali metodologie di monitoraggio e controllo del grado di saturazione, identificate in due diversi parametri: resistività elettrica e velocità di propagazione delle onde di volume. La forte sensibilità delle grandezze misurate al grado di saturazione possono fornire informazioni utili per monitorare l'efficacia del trattamento di IPS.

1. Introduzione

Nell'ambito della meccanica dei terreni parzialmente saturi, la tecnica di parziale saturazione indotta (IPS) può essere identificata come una tecnica innovativa e a bassa invasività atta a ridurre la suscettibilità di liquefazione dei depositi granulari. Un terreno inizialmente saturo, modellato quindi come mezzo bi-fase, può essere desaturato mediante differenti tecniche, e.g. iniezioni d'aria, elettrolisi dell'acqua (Yegian et al., 2007), iniezioni di perborato di sodio (Eseller-bayat et al., 2013). Il miglioramento meccanico, in termini sia statici che dinamici, è fortemente influenzato dalla configurazione della fase gassosa che si instaura all'interno del mezzo— che diventa quindi un materiale trifase— e come quest'ultima interagisce con i grani, alterando o meno gli sforzi interparticellari. A tal proposito, è conveniente definire una suddivisione concettuale dei terreni parzialmente saturi. In funzione della configurazione della fase gassosa, diversi autori classificano un terreno come *non-saturo* un terreno in cui la configurazione gassosa è continua; viceversa, un terreno è definito *parzialmente saturo* quando la configurazione gassosa è discontinua (Kamata et al. 2009; Tsukamoto 2018). Nel primo caso, si instaura una suzione di matrice la quale aumenta lo sforzo normale fra i grani, aumentando resistenza e rigidità. Nel secondo caso invece, per gradi di saturazione sufficientemente alti, la fase gassosa è presente sotto forma di bolle occluse: lo sforzo interparticellare non viene alterato e il terreno mantiene, con buona approssimazione, le stesse caratteristiche meccaniche. In altri termini, quando un terreno è tale da poter essere definito *parzialmente saturo*, il principio delle tensioni efficaci può ritenersi ancora valido.

In tali condizioni, la presenza delle bolle– aventi compressibilità volumetrica notevolmente maggiore dell’acqua– riduce la rigidità volumetrica del fluido equivalente. Pertanto, il terreno può essere ancora modellato come un mezzo bifase: scheletro solido e fluido di porosità equivalente. La presenza di un fluido a maggiore compressibilità volumetrica riduce, a parità di input sismico, le sovrappressioni neutre generate dall’evento dinamico e, di conseguenza, incrementa la resistenza ciclica del terreno, come dimostrato in prove triassiali (Tsukamoto et al., 2014; Mele et al., 2018) e in centrifuga (Zeybek & Madabhushi, 2017).

1.1 Tecnica di Bio-IPS

La tecnica testata nel presente lavoro è basata sull’utilizzo di una miscela biochimica contenente precise specie di microrganismi capaci di generare bolle di azoto molecolare come prodotto finale del proprio metabolismo. In dettaglio, i microrganismi selezionati (batteri) sono in grado di attuare reazioni di *denitrificazione*, processo biologico anossico di riduzione di nitrati, NO_3^- , in N_2 . Ovviamente, data la natura biologica del processo, è impossibile raggiungere un’efficienza di riduzione nitrati del 100%, la cui riduzione percentuale dipende da svariati fattori, come la presenza di specifici enzimi, contenuto d’acqua e il rapporto carbonio-azoto, C/N (Rebata-Landa and Santamarina 2012, Chung and Chung 2000, Davidson et al. 1993). Inoltre, sebbene quello della denitrificazione sia il processo principale di riduzione, esistono altre reazioni parallele che concorrono simultaneamente alla formazione di azoto molecolare, come schematicamente riportato in Fig. 1.

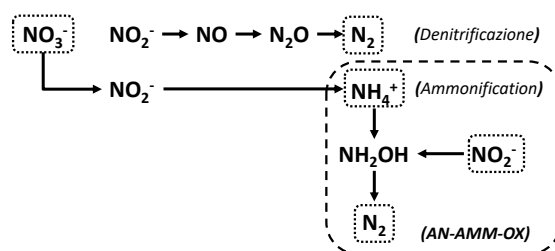


Fig. 1. Reazioni di Bio-IPS

In particolare, alla denitrificazione si affianca la reazione di *ammonificazione*, la quale produce ioni NH_4^+ (azoto ammoniacale), a loro volta ridotti dalla reazione *An-Amm-Ox* (Anoxic Ammonia Oxidation), grazie alla quale viene prodotta una seconda aliquota, seppur minore, di N_2 .

2. Programma sperimentale: potenziale desaturante

L’attività di laboratorio è focalizzata essenzialmente su due diversi aspetti, tra loro strettamente collegati: *i)* determinare il potenziale desaturante delle miscele bio-chimiche *ii)* identificare e testare potenziali tecniche di controllo per il monitoraggio del grado di saturazione raggiunto mediante bio-IPS. Dunque, da un lato è stato necessario effettuare delle prove di desaturazione, su campioni di terreno ricostituiti e inizialmente saturi, determinando il grado di saturazione raggiunto alla fine del processo metabolico, nonché monitorare l’intero processo transitorio. Dall’altro, sono state effettuate delle misure di resistività elettrica e misure di onde P al fine di ottenere una potenziale tecnica di misura di S_r – le prove effettuate e le apparecchiature utilizzate saranno brevemente descritte nel seguito. Ulteriori dettagli possono essere reperiti in Astuto (2021).

2.1 Prove di desaturazione

Le prove di desaturazione sono state effettuate per differenti concentrazioni iniziali di nitrato e concentrazione batterica. Per alcuni dei test sono state condotte delle misure transitorie di NH_4^+ sul fluido di porosità, come riportato in Tab. 1. Per tutti i test, i campioni di terreno sono stati ricostituiti pluviano il materiale secco direttamente all’interno della miscela bio-chimica, utilizzando dei classici

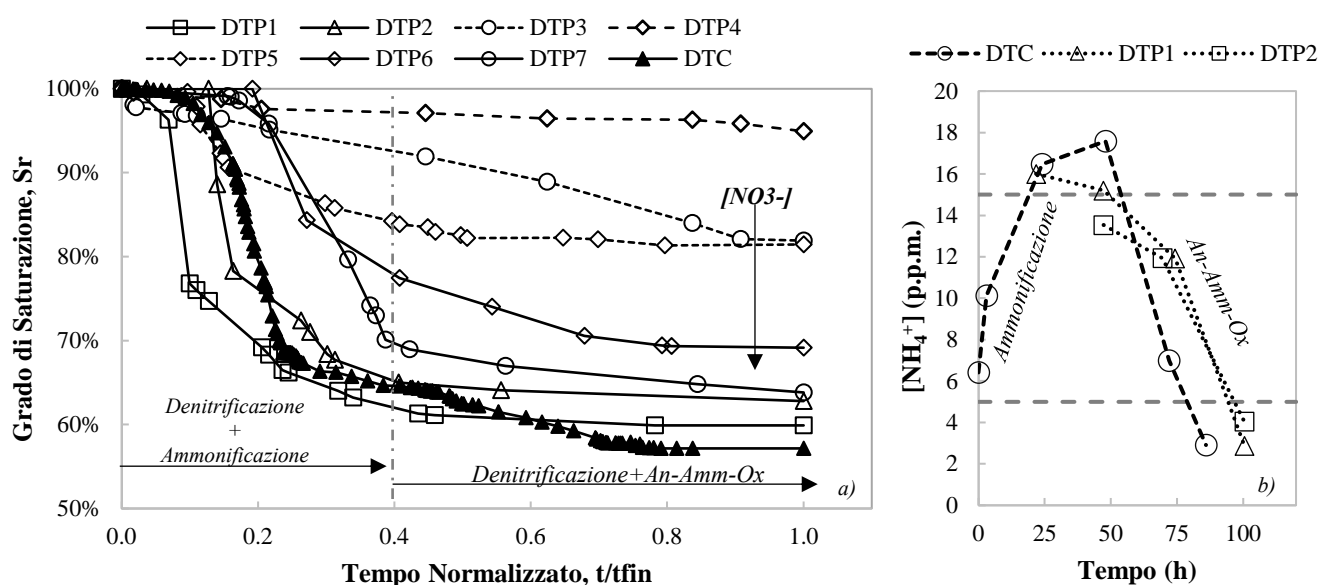
permeametri $\Phi=50$ mm, dotati di un drenaggio superiore collegato ad una buretta graduata. All'atto di nucleazione delle bolle, si innesca un gradiente idraulico– dovuto alla nucleazione stessa– il quale genera un moto di filtrazione dall'interno all'esterno del provino. Se il terreno si trova inizialmente in condizioni di completa saturazione, il volume del fluido espulso risulta pari al volume delle bolle generate tra i pori. Pertanto, misurando il quantitativo di fluido interstiziale convogliato dal drenaggio superiore, è possibile calcolare, nel tempo, il grado di saturazione.

Tab. 1. Test di desaturazione

Test	Concentrazione Batterica	[NO ₃]	S _r	Misure di [NH ₄ ⁺]
(-)	(C.F.U.)	(mg/L)	(%)	(-)
DTC	1,00E+08	2500	57,15%	✓
DTP1	1,00E+08	2500	59,90%	✓
DTP2	1,00E+04	2500	62,80%	✓
DTP3	1,00E+04	240	81,90%	✗
DTP4	1,00E+04	24	94,90%	✗
DTP5	1,00E+04	200	81,30%	✗
DTP6	1,00E+04	2000	69,14%	✗
DTP7	1,00E+04	2000	63,83%	✗

I risultati dei test di desaturazione sono riportati in Fig. 2 (a), in termini di grado di saturazione. È possibile notare come, all'aumentare della concentrazione iniziale di NO₃⁻, aumenti il volume di gas generato, data la maggiore disponibilità di nutrienti per generare N₂. Inoltre, possono essere identificati due stage di nucleazione: un primo, in cui il gradiente di velocità del gas generato è relativamente alto– reazione di denitrificazione– e un secondo in cui, in accordo con i processi di Fig. 1, il gradiente risulta minore.

Questo è dovuto alla reazione di An-Amm-Ox la quale, a partire dall'NH₄⁺ prodotto dal processo di ammonificazione, porta ad una seconda aliquota di N₂. La cinetica appena descritta è ulteriormente convalidata grazie alle misurazioni di NH₄⁺– effettuate mediante analisi spettrofotometriche su campioni

Fig. 2. Risultati dei test di desaturazione (a) e delle analisi spettrofotometriche di NH₄⁺ (b)

di fluido di porosità espulso, Fig. 2 (b). Nella fase iniziale, in cui viene prodotto azoto principalmente per denitrificazione, viene generato parallelamente azoto ammoniacale– fino ad un picco di circa 18

p.p.m.– secondo la reazione di ammonificazione. Successivamente, l' NH_4^+ viene ridotto, formando N_2 non più dalla denitrificazione, ma dall'An-Amm-Ox, grazie alla quale viene ancora prodotto N_2 , con gradienti di velocità minori.

3. Tecniche di monitoraggio: introduzione e risultati sperimentali

Con riferimento a potenziali applicazioni in sito della tecnica di IPS, è necessario possedere strumenti e metodologie che siano in grado di misurare il grado di saturazione ottenuto mediante l'intervento di mitigazione. Ovviamente, gli sforzi di ricerca dovrebbero essere focalizzati su delle tecniche indirette di misura, facilmente applicabili e con bassa invasività: i.e. misure di resistività elettrica e velocità delle onde P.

3.1 Misure di resistività elettrica

La resistività elettrica del terreno, ρ , misura della capacità del mezzo di opporsi al passaggio di corrente elettrica, è influenzata da diversi fattori, come mineralogia (Weil et al. 2011), salinità (Rhoades et al. 1976), porosità e contenuto d'acqua (Dannowski and Yaramanci 1999). Tra questi, la resistività elettrica del suolo è fortemente dipendente dal grado di saturazione e, in particolare, dalla resistività elettrica del fluido di porosità (Bhatt and Jain 2014). In particolare, data una sezione regolare, è possibile calcolare la resistività elettrica come segue:

$$\rho = V/I \cdot A/L$$

in cui V è il potenziale applicato, I l'intensità di corrente che fluisce nel mezzo, A sezione, L distanza tra due punti di misura. Pertanto, applicando una differenza di potenziale nota e misurando l'intensità di corrente– o viceversa– e note le geometrie, è facile risalire alla resistività ρ . Nella sperimentazione in esame è stato realizzato un modello in piccola scala– $B=200\text{mm}$, $L=390\text{mm}$ and $H=150\text{ mm}$ – strumentato agli estremi con delle piastre metalliche grazie alle quali è possibile applicare un campo elettrico, mediante imposizione di una differenza di potenziale nota, e misurando in serie l'intensità di corrente. Inoltre, il modello presenta dei drenaggi laterali, collegati a burette graduate, al fine di calcolare i gradi di saturazione così come esposto nelle prove di desaturazione. Al fine di indagare non solo la correlazione ρ - S_r , bensì anche la sua dipendenza dal fluido di porosità, sono state effettuate due prove con fluidi di porosità con chimismo differente, come riportato sinteticamente in Tab. 2.

Tab. 2. Prove di resistività elettrica con diversi fluidi di porosità

Test	Metodo di preparazione	Fluido di porosità	Processo di Saturazione/Desaturazione
DRC-1	Dry pluviation	Acqua dolce	Imbibizione graduale
DRC-2	Wet pluviation	Miscela Bio-IPS	Bio-IPS

I risultati riportati in Fig. 3(a) mostrano come, sebbene l'andamento di ρ con S_r sia qualitativamente simile, gli ordini di grandezza sono completamente differenti. Ciò è dovuto al diverso chimismo del fluido di porosità, dipendente dagli elevati ioni in soluzione – nella miscela bio-chimica– indispensabili per il sostentamento e l'attivazione metabolica dei microrganismi. In realtà, se le resistività misurate vengono normalizzate in funzione della resistività del solo fluido interstiziale – e quindi portando indirettamente in conto il chimismo del fluido – le curve tendono a sovrapporsi, indicando che per un dato materiale, con determinate proprietà di stato, la correlazione ρ - S_r risulta essere unica (Fig. 3(b)).

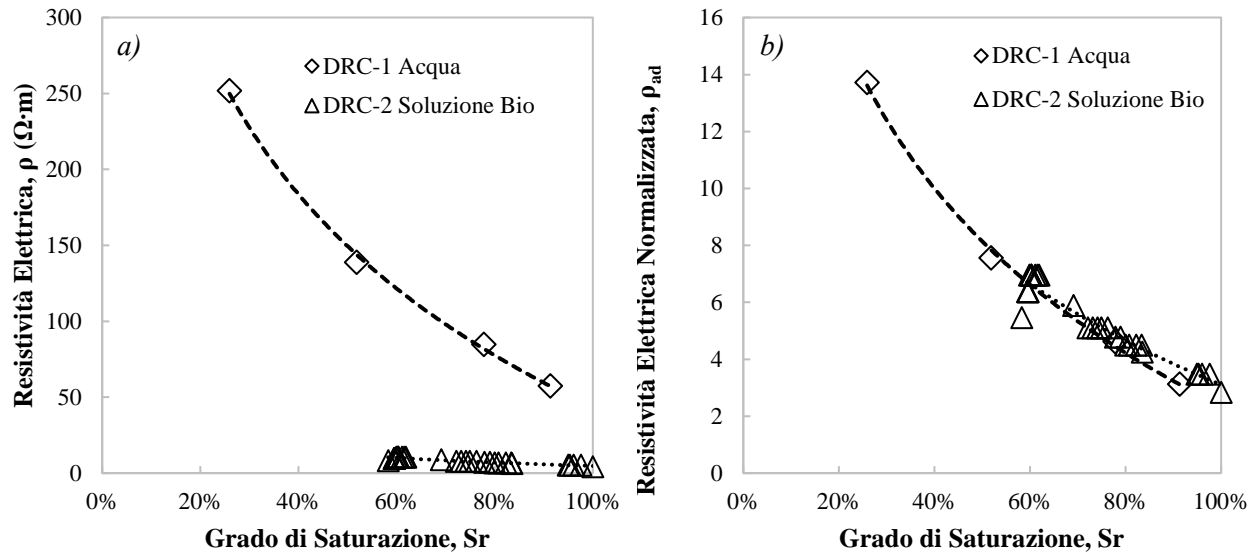


Fig. 3. Risultati delle prove di resistività elettrica per diversi fluidi di porosità; a) valori assoluti, b) valori normalizzati)

3.2 Misure delle velocità delle onde P

La velocità di propagazione delle onde di volume è fortemente influenzata dalla rigidità del mezzo attraversato. Per un terreno completamente saturo la velocità delle onde P, la quale si propaga nel mezzo più rigido, si attesta intorno ai 1480 m/s (Santamarina et al. 2001). Tale velocità è sostanzialmente la velocità di propagazione dell'onda di volume nell'acqua, la cui rigidità volumetrica è estremamente maggiore di quella dello scheletro solido. Nel caso di terreni parzialmente saturi, la presenza di una fase gassosa con compressibilità volumetrica nettamente minore altera la velocità delle onde P. Pertanto, una relazione V_p-S_r può rappresentare un utile strumento di monitoraggio. A tal fine sono state effettuate delle prove mediante bender element in cella triassiale su provini ricostituiti— mediante metodo moist

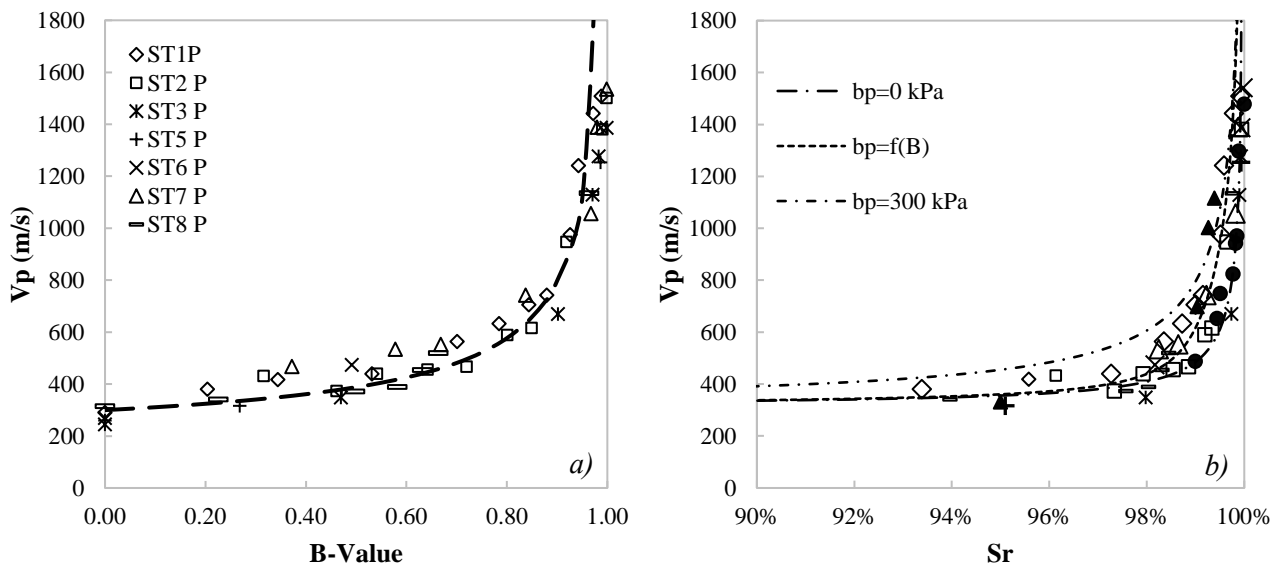


Fig. 4. Risultati delle prove con bender elements: a) V_p ; B-Value — b) Curva sperimentale V_p ; S_r

tamping. Le misure di V_p , effettuate in fase di saturazione del provino, sono state incrociate con convenzionali prove di B-test. I B-value restituiscono una risposta integrale del provino sottoposto ad un incremento isotropo di tensione totale, e risulta essere un parametro di laboratorio largamente affidabile per assicurare la completa saturazione del provino. Infatti, la conoscenza dei B-value risulta molto utile in fase di elaborazione dati sui segnali di output, ottenuti a partire da un impulso sinusoidale

compreso tra 25 e 75 kHz – frequenze per le quali il movimento del bender riesce a indurre onde di compressione. I risultati della sperimentazione sono riportati in Fig. 4, in cui è facile notare la forte dipendenza delle V_p per un range di $95\% < S_r < 100\%$.

4. Conclusioni

Le prove di desaturazione dimostrano come i microrganismi selezionati siano in grado di ridurre nitrati mediante reazioni anossiche di denitrificazione. Le analisi transitorie effettuate allo spettrofotometro su campioni di fluido interstiziale confermano i processi teorici circa il metabolismo batterico. La formazione di azoto ammoniacale, che porta alla formazione addizionale di azoto molecolare mediante reazione anammox, può rappresentare un buon indicatore sulla cinetica del processo. Le concentrazioni iniziali di nitrato influenzano il grado di saturazione finale; tale concentrazione, quindi, andrà definita in fase di progetto, in funzione del grado di saturazione di target. Le metodologie testate riguardanti il monitoraggio dimostrano come entrambi i parametri utilizzati siano influenzati dal grado di saturazione del terreno. La resistività elettrica mostra una discreta sensibilità all' S_r , ma risulta fortemente influenzata dal chimismo del fluido di porosità: pertanto dovrà essere necessariamente effettuata una normalizzazione della resistività stessa, rispetto alle caratteristiche chimiche del fluido interstiziale. La velocità delle onde P, invece, mostra una fortissima dipendenza dal grado di saturazione solo per un range contenuto di S_r – $95\% < S_r < 100\%$. Per gradi di saturazione inferiori a tale soglia, il ruolo dello scheletro solido diventa predominante, e le V_p non mostrano più una sensibilità tale da poter monitorare alcun cambiamento di S_r . Pertanto, una potenziale metodologia efficace di monitoraggio può essere rappresentata dal controllo simultaneo dei due parametri: le V_p assicurano l'innescio dell'IPS, mentre la resistività può fornire stime sull'ordine di grandezza dell' S_r raggiunto.

Bibliografia

- Astuto, G. (2021). “Bio-Induced Partial Saturation as a Liquefaction Mitigation Technique.” *University of Napoli Federico II*.
- Chung, Y. C., and Chung, M. S. (2000). “BNP test to evaluate the influence of C/N ratio on N₂O production in biological denitrification.” *Water Science & Technology*, 42(3–4), 23–27.
- Eseller-bayat, E., Yegian, M. K., and Alshawabkeh, A. (2013). “Liquefaction Response of Partially Saturated Sands. I : Experimental Results.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 863–871.
- Kamata, T., Tsukamoto, Y., and Ishihara, K. (2009). “Undrained Shear Strength of Partially Saturated Sand in Triaxial Tests.” *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(1).
- Rebata-Landa, V., and Santamarina, J. C. (2012). “Mechanical Effects of Biogenic Nitrogen Gas Bubbles in Soils.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(2), 128–137.
- Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., and Prather, R. J. (1976). “Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity.” *Soil Science Society of America Journal*, 40(5), 651–655.
- Tsukamoto, Y. (2018). “Degree of saturation affecting liquefaction resistance and undrained shear strength of silty sands.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Ltd, (March), 0–1.
- Weil, M. H., Dejong, J. T., Martinez, B. C., and Mortensen, B. M. (2011). “Seismic and Resistivity Measurements for Real-Time Monitoring of Microbially Induced Calcite Precipitation in Sand.” *Geotechnical Testing Journal*, 35(2), 330–341.
- Yegian, M. K., Eseller-Bayat, E., Alshawabkeh, A., and Ali, S. (2007). “Induced-Partial Saturation for Liquefaction Mitigation: Experimental Investigation.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(3), 295–305.
- Zeybek, A., and Madabhushi, S. P. G. (2017). “Influence of air injection on the liquefaction-induced deformation mechanisms beneath shallow foundations.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Ltd, 97(October 2015), 266–276.