POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Il congelamento artificiale dei terreni: analisi sperimentale di terreni a matrice grossolana

Original

Availability:
This version is available at: 11583/2988909.13 since: 2024-05-22T11:54:16Z

Publisher:
Associazione Geotecnica Italana AGI

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

21 November 2026

XII Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici. IAGIG 2023. Padova, 31 Maggio - 1 Giugno 2023
© 2023 Associazione Geotecnica Italiana, Roma, Italia - ISBN 9 788897 517177

IL CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI: ANALISI SPERIMENTALE DI TERRENI A MATRICE GROSSOLANA

Giulia La Porta (giulia.laporta@polito.it)
Politecnico di Torino

Francesca Casini (francesca.casini@uniroma2.it)
Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

Marina Pirulli (marina.pirulli@polito.it)
Politecnico di Torino

ABSTRACT. Il congelamento artificiale dei terreni è una tecnica di stabilizzazione ed impermeabilizzazione in fase di scavo di opere sottofalda, quali pozzi o gallerie. Le incertezze legate al comportamento dei terreni sottoposti al trattamento sono numerose. Al fine di comprendere il comportamento termo-idro-meccanico dei terreni congelati nelle fasi di congelamento e rottura, è stata effettuata una campagna sperimentale su terreni a matrice sabbiosa con diverse percentuali di materiale fine. L'apparecchiatura triassiale utilizzata, sviluppata presso l'Università di Roma Tor Vergata, consente il congelamento dei provini dall'interno verso l'esterno, con diffusione del carico termico in direzione radiale, mediante la presenza di un tubo refrigerante che attraversa il centro dei provini stessi. Il materiale fine provoca un differente comportamento in fase di congelamento: la sabbia pura non risulta suscettibile al gelo, mentre la sabbia contenente il 15% in peso di caolino si espande e richiama acqua nel provino per suzione criogenica. In fase di taglio, la sabbia pura mostra una resistenza più elevata, rispetto al secondo materiale considerato.

1. INTRODUZIONE

Il congelamento artificiale dei terreni è una tecnica di stabilizzazione ed impermeabilizzazione temporanea dell'area di scavo di opere sotterranee sottofalda, quali pozzi o gallerie. Essa è particolarmente utilizzata in aree urbane, al fine di limitare le deformazioni e conseguenti subsidenze superficiali in fase di realizzazione delle opere (Viggiani & Casini, 2015). Il metodo consiste nell'inserimento di sonde congelatrici nel terreno, intorno alla zona di scavo, all'interno delle quali circola un fluido refrigerante, che provoca il congelamento del terreno circostante (Rocca, 2011). Il fluido refrigerante viene selezionato tra acqua in salamoia e azoto liquido, in relazione alla temperatura-obiettivo nel terreno. Il sistema è a circuito chiuso, con recupero del fluido, nel caso di utilizzo dell'acqua in salamoia, o a circuito aperto, con liberazione dell'azoto gassoso in atmosfera, nel secondo caso. Di conseguenza, si tratta di una tecnica ad impatto ambientale ridotto, poiché il fluido refrigerante non viene rilasciato nel terreno.

Tale metodo di stabilizzazione è tuttavia caratterizzato da elevati costi, dovuti alla complessità della tecnica, e ad incertezze legate al comportamento termo-idro-meccanico del terreno trattato. L'analisi di laboratorio della risposta del terreno sottoposto a congelamento rappresenta un importante contributo alla comprensione del fenomeno. In questo contesto, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Informatica dell'Università di Roma Tor Vergata ha realizzato un'attrezzatura triassiale (*FROZEN*) che consente il congelamento del provino dall'interno verso l'esterno, con diffusione del carico termico in direzione radiale, analogamente a quanto si osserva in sito, intorno alla sonda congelatrice. Infatti, il sistema è costituito da un tubo di rame, che attraversa il centro del provino, all'interno del quale circola fluido refrigerante.

L'articolo riporta i primi risultati di una campagna sperimentale svolta su provini a matrice sabbiosa, con crescente contenuto di materiale fine (caolino), con l'obiettivo di valutare l'influenza di quest'ultimo sul comportamento in fase di congelamento e rottura dei provini.

I materiali a granulometria mista risultano di notevole interesse, per la presenza degli stessi in depositi naturali (e.g. Viggiani & De Sanctis, 2009) e terreni artificialmente ricostituiti per opere quali, ad esempio, sottofondi stradali. Il loro comportamento a temperatura ambiente è ampiamente analizzato in letteratura (e.g., Reiffsteck et al., 2005): il materiale fine influenza meccanicamente la matrice grossolana solo se presente in percentuali superiori al 20 o 30% circa.

© 2023 Associazione Geotecnica Italiana, Roma, Italia - ISBN 9 788897 517177

2. ANALISI SPERIMENTALE

Nel seguito sono riportati i risultati sperimentali ottenuti con l'apparecchiatura *FROZEN* (Bartoli et al., 2018), su due provini con diverso contenuto di fine (0% e 15% di caolino), con tensione di confinamento pari a 50 kPa. Il confronto sul comportamento osservato è riportato durante la fase di congelamento e la fase di taglio.

2.1 Apparecchiatura triassiale in controllo di temperatura: FROZEN

FROZEN (Bartoli et al., 2018) è un'apparecchiatura triassiale realizzata al fine di effettuare prove a controllo di temperatura. Essa consta di una cella triassiale (1), una pressa meccanica (2), e un sistema di circolazione di fluido refrigerante, (3) in Figura 1.

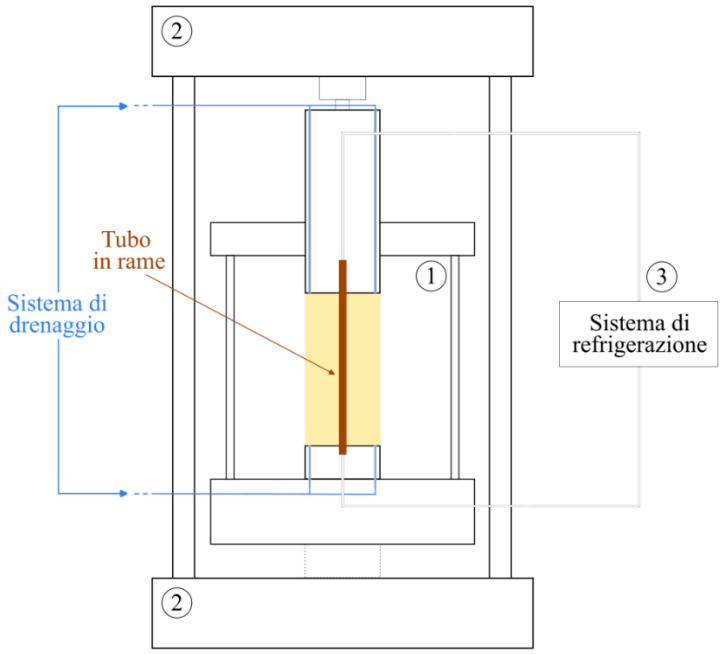


Figura 1. Schema dell'attrezzatura triassiale in controllo di temperatura.

Il provino è attraversato assialmente da un tubo in rame, collegato al sistema di refrigerazione esterno, che, attraverso una pompa, mette in circolo il fluido refrigerante. Questo provoca il trasferimento del carico termico nel provino. Durante il processo, il provino può deformarsi volumetricamente, e richiamare od espellere acqua, fino al congelamento del sistema di drenaggio.

Il provino ha una dimensione di 100 mm di diametro e 200 mm di altezza. Esso è realizzato mediante compattazione statica in condizioni umide iniziali, e successivamente saturato. Rispetto ad una prova triassiale standard, *FROZEN* prevede una fase di congelamento, in condizioni di pressione isotropa, fra le fasi di consolidazione e rottura.

2.2 I materiali

Per la sperimentazione mostrata, è stata utilizzata la sabbia di Fontainebleau (Francia), caratterizzata da una granulometria fine e omogenea, compresa fra 100 e 400 μm. Il materiale fine aggiunto è caolino Speswhite, un'argilla non attiva, a bassa plasticità.

I provini sono realizzati con porosità costante pari a 0.74. Tuttavia, il diverso comportamento delle miscele osservato durante le fasi di saturazione e congelamento ha portato a densità differenti all'inizio delle fasi descritte in seguito.

2.3 Prove sperimentali ed osservazioni

Nell'articolo sono descritte due prove sperimentali triassiali consolidate isotropicamente, in condizioni drenate (TXCID). I provini sono congelati post-consolidazione, con fluido refrigerante circolante alla temperatura di circa -20°C. Il profilo di temperatura è monitorato grazie alla presenza di termocoppie lungo l'altezza del provino: esso

© 2023 Associazione Geotecnica Italiana, Roma, Italia - ISBN 9 788897 517177

risulta più freddo nella zona inferiore, poiché il fluido, lungo l'altezza, perde calore per scambio termico col terreno e dispersione termica del sistema. Il processo di congelamento ha una durata di circa dieci ore.

I risultati relativi alla fase di congelamento sono interpretati in termini di variazione dell'indice dei vuoti $\Delta e = \Delta V_v/V_s$ e $\Delta e_w = \Delta V_w/V_s$ rispetto alla fase di consolidazione, in cui V_v è il volume dei vuoti, V_w è il volume di acqua liquida e V_s è il volume della fase solida. La variazione di volume del provino, utile per la stima del Δe, è misurata mediante trasduttori locali di deformazione, mentre il volume di acqua liquida in movimento dal provino è valutato per mezzo di un volumometro collegato al circuito di drenaggio.

La variazione del volume di acqua liquida durante la fase di congelamento è guidata da due fattori: il passaggio di stato dell'acqua a ghiaccio, che provoca un aumento di volume della fase ghiaccio e una conseguente espulsione della rimanente acqua liquida verso l'esterno, e la suzione criogenica, che causa una forza di richiamo dell'acqua verso il fronte di congelamento (Thomas et al., 2009). La Figura 2 riporta i risultati della fase di congelamento, per i due materiali testati.

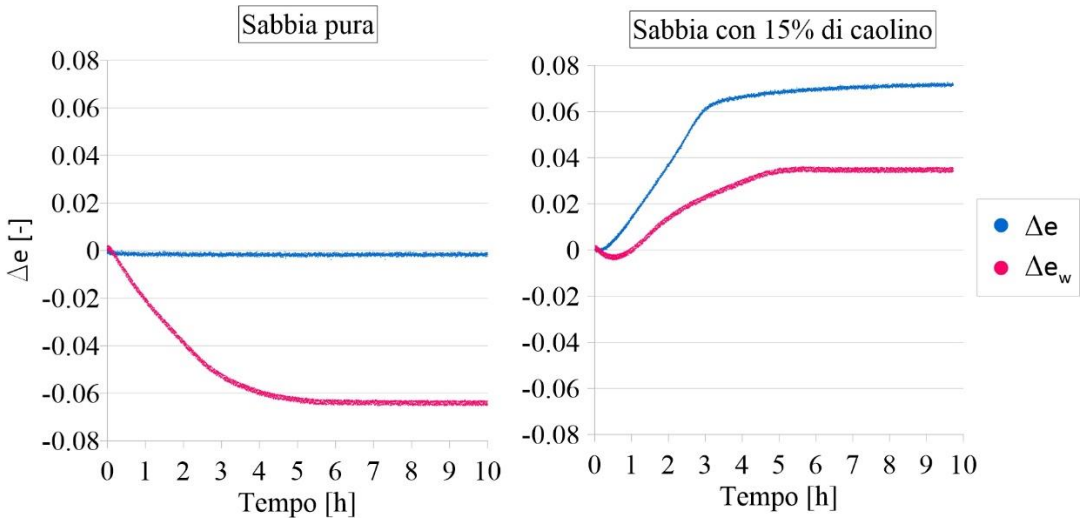


Figura 2. Risultati sperimentali della fase di congelamento, per le prove effettuate a 50 kPa di tensione efficace di confinamento.

La sabbia pura risulta non suscettibile al gelo: infatti, non si misurano variazioni volumetriche durante la fase di congelamento. Il movimento dell'acqua è in uscita dal provino: il comportamento è governato dal passaggio di stato dell'acqua, che espandendo espelle l'acqua liquida della zona non congelata verso i drenaggi. Contrariamente a tale comportamento, la sabbia contenente il 15% di caolino mostra un evidente rigonfiamento, causato dal richiamo di acqua liquida al fronte congelato per suzione criogenica e dalla ridotta permeabilità che attenua il drenaggio dell'acqua.

Durante il congelamento, l'acqua contenuta nei vuoti di un terreno non si trasforma interamente in stato solido, bensì una percentuale, definita *residua*, rimane allo stato liquido (Andersland & Ladanyi, 2003). La resistenza di un materiale congelato dipende da due principali fattori: la forza di coesione generata dal contenuto di ghiaccio, e le forze di adesione fra grani della matrice solida ed il ghiaccio, importanti in presenza non trascurabile di acqua liquida. Nel caso dei materiali considerati, il contenuto residuo di acqua liquida, trascurabile per la sabbia pura, cresce all'aumentare del contenuto di materiale fine (Vu et al., 2022). Dunque, nella sabbia pura la coesione dovuta al ghiaccio ne governa il comportamento meccanico. Inoltre, osservazioni di letteratura dimostrano che all'aumentare del contenuto di acqua non congelata nei pori, la resistenza dei materiali decresce (Kadivar & Manahiloh, 2019). Le forze di adesione risultano dunque di inferiore impatto sulla resistenza, rispetto alla coesione provocata dal ghiaccio.

La fase di rottura delle due prove avviene a controllo di deformazione, con una velocità di rottura di 0.33 mm/min, ed è analizzata in termini di evoluzione del carico deviatorico rispetto alla deformazione assiale (Figura 3).

© 2023 Associazione Geotecnica Italiana, Roma, Italia - ISBN 9 788897 517177

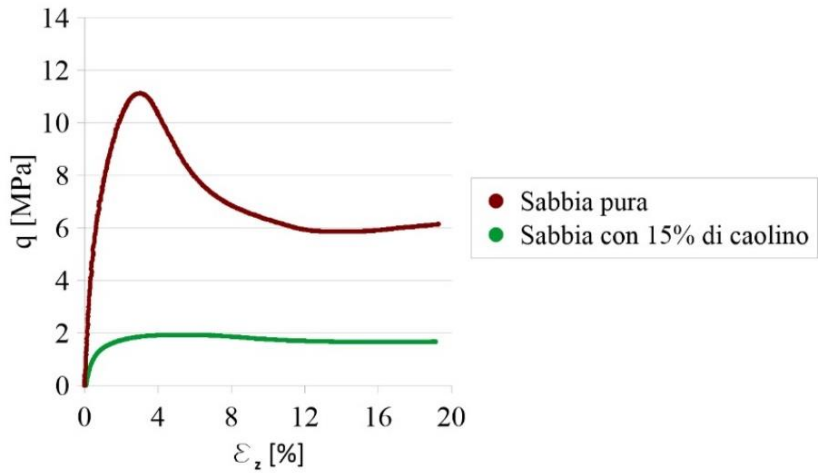


Figura 3. Risultati sperimentali della fase di taglio, per le prove effettuate a 50 kPa di tensione efficace di confinamento.

Anche per la fase di taglio, i due campioni testati mostrano un comportamento diverso: la resistenza della sabbia pura risulta notevolmente maggiore (picco 11 MPa e residuo di 6 MPa), rispetto alla resistenza della sabbia con il 15 % di caolino (picco 2 MPa e residuo di 1.8 MPa).

3. CONCLUSIONI

Il lavoro presenta i risultati di una campagna sperimentale condotta su terreni a matrice sabbiosa sottoposti a congelamento, al fine di valutare l'influenza del contenuto di fine sul comportamento termo-idro-meccanico. Le prove sono state effettuate mediante un'apparecchiatura triassiale in controllo di temperatura (*FROZEN*), che consente il congelamento del provino dall'interno verso l'esterno, con diffusione del carico termico in direzione radiale. Due prove CID, a pressione di confinamento efficace di 50 kPa, sono riportate e descritte: un provino di sabbia pura, ed un provino sabbioso contenente il 15% in peso di caolino.

Durante la fase di congelamento, il primo provino non mostra deformazioni volumetriche: il suo comportamento è governato dal passaggio di stato, e conseguente espulsione dell'acqua liquida verso l'esterno; al contrario, il provino contenente caolino mostra richiamo d'acqua verso il fronte congelato, per suzione criogenica, e conseguente espansione.

Per la fase di taglio, la sabbia presenta un carico deviatorico di picco maggiore rispetto alla sabbia con caolino, poiché il contenuto residuo di acqua liquida, più elevato in presenza di fine, ne peggiora la resistenza meccanica.

4. BIBLIOGRAFIA

Andersland, O.B., Ladanyi, B., 2003. *Frozen ground engineering*. John Wiley & Sons.

Bartoli, M., Raparelli, S., Casini, F., Viggiani, G. M. B. (2018). Un'attrezzatura avanzata per prove su terreni artificialmente congelati. *IARG 2018*, Genova.

Kadivar, M., Manahiloh, K.N. (2019). Revisiting parameters that dictate the mechanical behavior of frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*, *163*, pp.34-43.

Reiffsteck, P., Pham, P. T. N., Arbaut, J. (2005). Influence of particle size distribution on mechanical behavior of a soil. *Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 583–586.

Rocca, O. (2011). *Congelamento artificiale del terreno*. Hevelius.

Thomas, H. R., Cleall, P., Li, Y. C., Harris, C., Kern-Luetschg, M. (2009). Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Geotechnique, 59*(3), 173-184.

Viggiani, G. M. B., De Sanctis, L. (2009). Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, *22*(1), 215-240.

Viggiani G. M. B., Casini F. (2015). Artificial Ground Freezing: from applications and case studies to fundamental research. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, Edinburgh UK.

Vu, Q.H., Pereira, J.M., Tang, A.M. (2022). Effect of fines content on soil freezing characteristic curve of sandy soils. *Acta Geotechnica*, *17*(11), pp.4921-4933.