

EFFETTI DEL CONGELAMENTO E DELLO SCONGELAMENTO SU MISCELE SABBIA-CAOLINO IN CONDIZIONI EDOMETRICHE

Andrea Viglianti

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata
andrea.viglianti@uniroma2.it

Francesca Casini

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata
francesca.casini@uniroma2.it

Sommario

In questo lavoro si riportano i risultati preliminari di prove di congelamento e scongelamento effettuate in un edometro a controllo di temperatura e di tensione verticale su miscele di sabbia e caolino. Sono state effettuate prove su sabbia pura e su sabbia con caolino a cinque tensioni verticali. I dati mostrano sia un'isteresi idraulica che meccanica durante il ciclo di congelamento e scongelamento. Queste prime evidenze sperimentali saranno la base per comprendere e prevedere gli spostamenti indotti dai cicli di congelamento e scongelamento indotto dal congelamento artificiale dei terreni.

1. Introduzione

Il congelamento artificiale dei terreni (AGF) è una tecnica temporanea di stabilizzazione e impermeabilizzazione per gli scavi sottofalda di terreni sciolti o rocce fratturate. Viene principalmente impiegato per la realizzazione di scavi in ambiente urbano in terreni granulari sotto un elevato battente idraulico. Durante l'applicazione dell'AGF, è di fondamentale importanza prevedere e monitorare gli spostamenti indotti a piano campagna (e.g. Viggiani & Casini, 2015; Russo *et al.* 2015).

L'AGF è una tecnica ecosostenibile che permette di migliorare le caratteristiche di resistenza e rigidità dei terreni e ridurne la permeabilità. Il processo di congelamento avviene attraverso la continua sottrazione di calore al terreno, operata mediante le sonde congelatrici. Il raffreddamento viene ottenuto facendo circolare nelle sonde un liquido refrigerante a bassa temperatura (salamoia o azoto liquido), che provvede all'estrazione del calore dal terreno e alla dissipazione dello stesso in atmosfera. L'estrazione di calore dal terreno determina la formazione di un cilindro di terreno congelato coassiale alla sonda congelatrice, che aumenta progressivamente il suo diametro fino a raggiungere la condizione di tangenza con le colonne di terreno congelato contigue e, successivamente, la chiusura del muro di terreno congelato (Trevi S.p.a., 2013).

1.1 Terreni congelati

I terreni saturi congelati possono essere schematizzati come mezzi trifase, costituiti da particelle solide, fase liquida (acqua) e fase solida (ghiaccio). L'acqua e il ghiaccio sono in equilibrio attraverso la tensione superficiale che è bilanciata dalla suzione, definita come la differenza tra la pressione del ghiaccio e dell'acqua.

In fase di congelamento, il terreno è soggetto a deformazioni di sollevamento dovute a due fenomeni:

l'incremento di volume prodotto dal passaggio di stato dell'acqua in ghiaccio, il quale è caratterizzato da una densità più bassa; il moto di filtrazione che si genera dalle zone non congelate verso il fronte congelato con conseguente formazione di lenti di ghiaccio, innescato dalla diminuzione della temperatura e dall'aumento di suzione. Entrambi i meccanismi dipendono dalla permeabilità del terreno e dalla velocità con la quale si applica la temperatura.

In scongelamento, il contenuto di ghiaccio diminuisce e lo scheletro solido del terreno si riadatta in una nuova configurazione di equilibrio, con un indice dei vuoti che può essere diverso da quello iniziale.

La quantità di acqua drenata durante lo scongelamento è funzione delle caratteristiche di permeabilità e rigidità del terreno (Andersland et al., 2003).

2. Modifica dell'edometro e setup di prova

Le prove sono state eseguite utilizzando un edometro sviluppato per i terreni parzialmente saturi (Pelaez et al. 2014; Coluzzi 2020). Per effettuare i cicli di congelamento-scongelamento, l'edometro è stato immerso in una miscela di acqua e glicole del bagno termostatico. È disposto su un cestello che lascia non immersa la parte superiore della testa di carico così da evitare di danneggiare il trasduttore di spostamento per le basse temperature raggiunte (Figura 1.a). Il sistema è stato isolato dall'ambiente esterno mediante una copertura in pannelli piral. (Figura 1.b). Per misurare la temperatura è stata inserita una termocoppia nel corpo centrale dell'edometro (Figura 1.c).

3. Materiale utilizzato e programma sperimentale

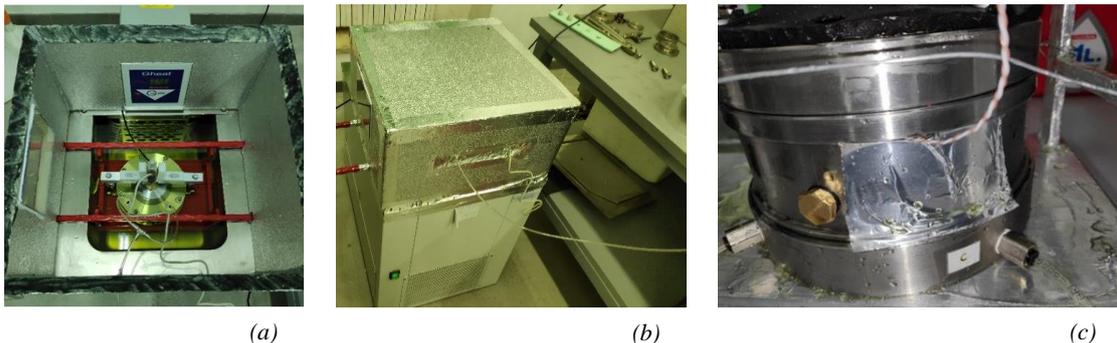


Fig. 1: Modifiche effettuate sull'edometro

I materiali utilizzati sono stati la sabbia di Fontainebleau e il caolino Speswhite. La sabbia è caratterizzata da un diametro dei grani compreso tra 100 e 400 μ m e un peso specifico pari a 2650 kg/m³. Il caolino da grani di dimensioni inferiori a 2 μ m e un peso specifico pari a 2650kg/m³. Le prove sono state eseguite su provini di terreno preparati artificialmente in laboratorio con differenti percentuali di caolino. Sono state analizzate tre differenti composizioni granulometriche (Coluzzi, 2020; Amici, 2021):

- S100K0: 100% di sabbia e 0% di caolino;
- S90K10: 90% di sabbia e 10% di caolino;
- S80K20: 80% di sabbia e 20% di caolino;

I provini della miscela S100K0 sono stati confezionati inserendo nel miscelatore acqua e sabbia e miscelati per qualche minuto per ottenere un composto omogeneo ed evitare l'evaporazione. I provini S90K10 e S80K20 sono stati confezionati in modo differente per evitare la formazione di grumi, tipici dei materiali argillosi. Per ottenere un composto omogeneo, sono state miscelate prima sabbia e caolino per 3 minuti e successivamente è stata aggiunta acqua e miscelato ancora per alcuni minuti. In seguito è stato atteso un giorno per la maturazione del grado di saturazione (pari al 90%).

La prova si articola nelle seguenti fasi:

- Saturazione e consolidazione a $\sigma'_v = 25\text{kPa}$;
- Compressione verticale per step con raddoppio del carico fino alla tensione target di 50, 100, 200, 400, 800kPa. Per ogni step è stato atteso un periodo tempo di consolidazione che aumenta con il contenuto di fine. Circa 2 ore per la S100K0 e dalle 3 alle 6 ore per la S90K10 e S80K20;
- Ciclo di congelamento e scongelamento alle temperature riportate in Tabella 1.

	CONGELAMENTO								SCONGELAMENTO							
T[°C]	5	0	-0.5	-1	-1.5	-2	-10	-20	-10	-2	-1.5	-1	-0.5	0	5	

Tab. 1: Temperature di analisi del ciclo di congelamento e scongelamento

Il ciclo è formato da rampe di 60 minuti, in cui la temperatura varia linearmente dal valore precedente al successivo (Tabella 1) e stasi di 300 minuti per ogni temperatura di raggiunta. La scelta della progressione di temperatura nell'intorno dello 0° è stata fatta per valutare cosa accade nell'intorno della temperatura di ingresso di ghiaccio tra 0 e -2°C . Infatti tra 0°C e -2°C il $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$. Poi è applicato un $\Delta T = -8^\circ\text{C}$ fino a $T = -10^\circ\text{C}$. Infine, un $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ con una temperatura minima applicata pari a -20°C che rientra nell'intervallo di applicazione dell'AGF nei casi reali. In Figura 2 è riportato il percorso di temperatura applicato in funzione del tempo.

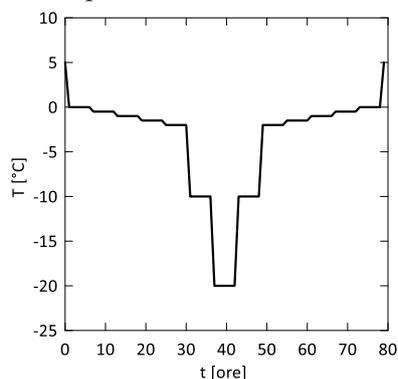


Fig. 2: Ciclo di congelamento e scongelamento

Alla fine del ciclo di congelamento e scongelamento, è stato eseguito uno scarico del provino diminuendo la tensione efficace con gli stessi $\Delta\sigma'_v$ della fase di carico fino alla tensione efficace minima di 25kPa.

4. Interpretazione dei risultati

Nel seguito sono riportati e discussi i risultati sperimentali relativi alla tensione efficace applicata di 200kPa sulle tre granulometrie testate.

Figura 3 riporta l'evoluzione della deformazione assiale misurata nella prova in funzione della temperatura applicata nel ciclo di congelamento e scongelamento. Durante il congelamento (curva blu) si misurano deformazioni di rigonfiamento, la cui entità aumenta con il contenuto di fine, da un valore di $\varepsilon_a = -0.0075$ per la sabbia pura a $\varepsilon_a = -0.0125$. Durante lo scongelamento, per la stessa temperatura applicata la curva arancione segue un andamento diverso (isteresi meccanica), con deformazioni assiali che iniziano a variare per temperature prossime a -2°C . Nell'intervallo di temperatura tra -2°C e 5°C si registra un rapido aumento delle deformazioni assiali, il cui valore finale è di rigonfiamento per la sabbia pura $\varepsilon_{a\text{finale}} \sim -0.003$ (S100k0, Figura 3c) e di compressione $\varepsilon_{a\text{finale}} \sim 0.013$ per S90K10 e $\varepsilon_{a\text{finale}} \sim 0.015$ per S80K20.

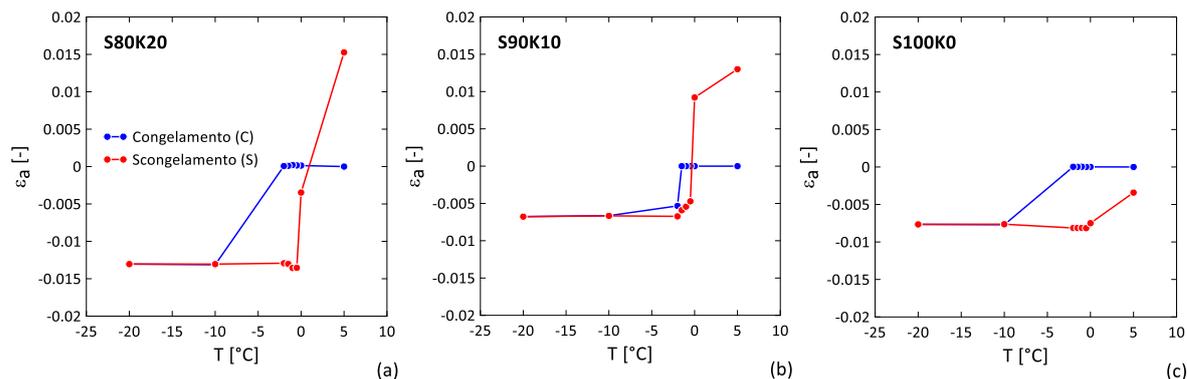


Fig. 4: Evoluzione della deformazione assiale con la temperatura, (a) 80% sabbia 20% caolino (S80K20), (b) sabbia 10% caolino (S90K10), (c) 100% sabbia 0% caolino (S100K0)

L'acqua drenata o assorbita dal provino è misurata con un volumetro (capacità 40ml) posizionato all'esterno del criostato. In Figura 4 è riportato l'andamento delle deformazioni dell'acqua liquida $\varepsilon_w = \Delta V_w / V_0$ (V_0 volume totale a inizio ciclo; ΔV_w variazione di volume d'acqua rispetto al volume d'acqua a inizio ciclo) in funzione della temperatura applicata; $\varepsilon_w > 0$ indicano drenaggio di acqua dal provino e $\varepsilon_w < 0$ richiamo di acqua dal provino. Al diminuire della temperatura i tre provini drenano acqua di entità confrontabile pari a $\varepsilon_w \approx 0.01$. In scongelamento, si misura un ε_w circa costante fino a una temperatura prossima allo zero, per poi misurare un rapido aumento per la temperatura tra 0°C e 5°C.

Per comprendere se l'entità delle ε_w e ε_a è legata soltanto alla risposta del provino o anche al sistema di drenaggio, sono previste delle prove di calibrazione della strumentazione con un provino finto (acciaio) in presenza e in assenza di acqua con diverse tensioni verticali applicate.

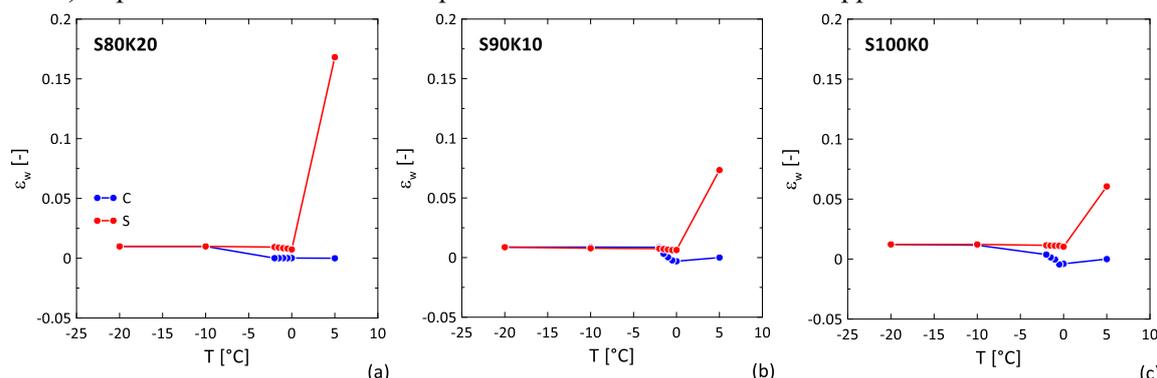


Fig. 3: Evoluzione della deformazione dell'acqua con la temperatura, (a) 80% sabbia 20% caolino (S80K20), (b) sabbia 10% caolino (S90K10), (c) 100% sabbia 0% caolino (S100K0)

L'evoluzione dell'indice dei vuoti Δe (pari a $-\varepsilon_v(1+e_0)$, con e_0 indice dei vuoti a 0°C) e dell'indice dei vuoti occupati dall'acqua Δe_w (pari a $-\varepsilon_w(1+e_{w0})$, con $e_{w0} = V_{w0}/V_s$; V_w è il volume d'acqua presente alla temperatura di 0°C; V_s volume occupato dai grani) è riportata in Figura 5. La differenza tra Δe e Δe_w è pari alla quantità di ghiaccio che si forma al diminuire della temperatura, Δe_i .

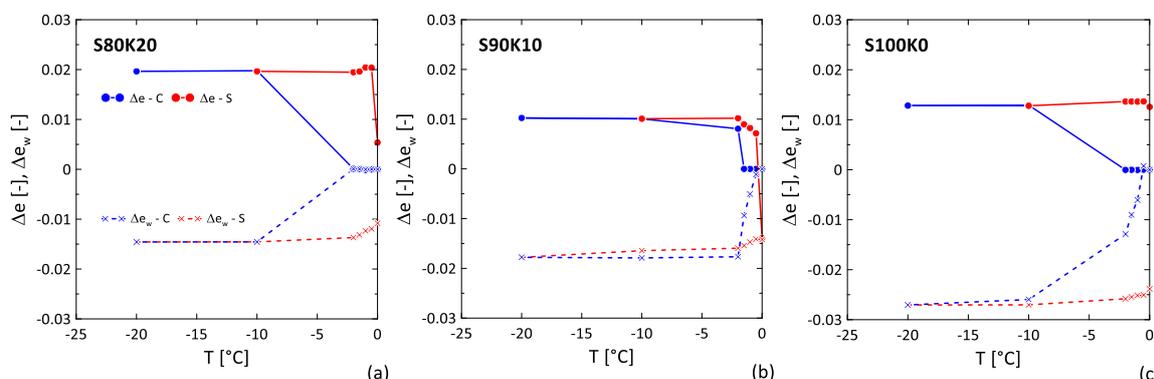


Fig. 5: Evoluzione dell'indice dei vuoti con la temperatura, (a) 80% sabbia 20% caolino (S80K20), (b) sabbia 10% caolino (S90K10), (c) 100% sabbia 0% caolino (S100K0)

In Figura 6a si riportano le curve di compressibilità nel piano $e - \log(\sigma'_v)$. Il diverso indice dei vuoti iniziale è legato sia alla fase di preparazione che alle deformazioni misurate durante la fase di saturazione. Il provino di sabbia, pur avendo l'indice dei vuoti maggiore, esibisce un comportamento elastico fino a $\sigma'_{v}=200$ kPa. Mentre all'aumentare del contenuto di fine si misura tensione di snervamento tra i 100 e i 200 kPa, con un'entità delle deformazioni elastoplastiche che aumentano con il contenuto di fine.

La variazione dell'indice dei vuoti Δe misurata durante il ciclo di congelamento e scongelamento in funzione della percentuale in sabbia del provino è riportata in Figura 5. L'entità del Δe diminuisce all'aumentare del contenuto in sabbia, fino a essere di rigonfiamento per la sabbia pura. Esso è legato a una riorganizzazione dello scheletro solido in seguito al fenomeno di isteresi idraulica e meccanica misurata e riportata nelle figure 3 e 4.

Durante la fase di scarico tutti i provini mostrano un comportamento rigido caratterizzato da un $C_s \approx 0$.

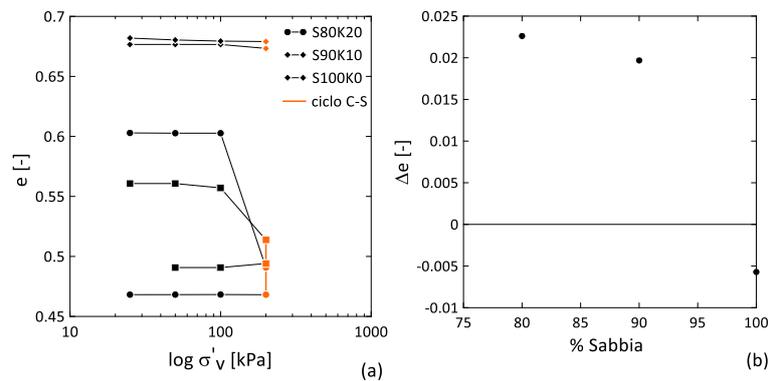


Fig. 6:(a) curve di compressibilità, (b) variazione dell'indice dei vuoti a seguito del ciclo congelamento e scongelamento

Conclusioni

I risultati preliminari mostrati in questo lavoro, evidenziano un comportamento isteretico idraulico e meccanico, dei terreni funzione del contenuto di fine del provino. All'aumentare del contenuto di fine aumenta la deformazione assiale misurata e la quantità di acqua drenata al termine di ogni ciclo di congelamento e scongelamento. Ulteriori prove verranno effettuate per verificare se l'entità dell'isteresi è funzione del carico applicato e dalla rapidità di applicazione del carico termico. Sono previste delle prove di calibrazione del sistema per valutare quale aliquota delle deformazioni misurate è attribuibile al sistema e quale al provino.

Bibliografia

- Amici M. (2021). *Studio sperimentale su miscele di sabbia e caolino sottoposte a ciclo di congelamento e scongelamento*. Tesi di Laurea Magistrale Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata.
- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003). *Frozen ground engineering*. John Wiley & Sons.
- Coluzzi D. (2020). *Messa a punto di un edometro per prove su terreni congelati. Primi risultati sperimentali su miscele di sabbia e caolino*. Tesi di Laurea Magistrale Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata.
- Peláez, R. R., Casini, F., Romero, E., Gens, A., & Viggiani, G. M. B. (2014). Freezing-thawing tests on natural pyroclastic samples. In *Unsaturated Soils: Research & Applications* (pp. 1689-1694). CRC Press.
- Russo G., Corbo A., Cavuoto F. & Autuori S. (2015). "Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis". *Tunneling and Underground Space Technology*, 50, 226-238.
- Trevi S.p.a. (2013). *Congelamento artificiale dei terreni - tecnologia*.
- Viggiani G.M.B. & Casini F. (2015), "Artificial Ground Freezing: from applications and case studies to fundamental research". *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 65-92.