

## **ANALISI SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO DI TERRENI A MATRICE GROSSOLANA SOTTOPOSTI A CONGELAMENTO ARTIFICIALE**

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

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

Marina Pirulli  
*Politecnico di Torino*  
*marina.pirulli@polito.it*

Claudio Scavia  
*Politecnico di Torino*  
*claudio.scavia@polito.it*

### **Sommario**

Il congelamento artificiale dei terreni è una tecnica di impermeabilizzazione e consolidamento temporaneo utilizzata per gli scavi sottofalda volti alla realizzazione di pozzi o gallerie. L'indagine del comportamento di terreni sciolti o rocce fratturate in fase di congelamento rappresenta un aspetto fondamentale, per una conoscenza approfondita di benefici e conseguenze in termini di resistenza e deformazioni. A tal fine, l'Università di Roma Tor Vergata ha progettato un'apparecchiatura triassiale a controllo di temperatura (*FROZEN*), in grado di consentire la riproduzione di quanto osservabile in sito. L'apparecchiatura prevede infatti che il congelamento dei provini avvenga dal centro verso le pareti esterne, con diffusione del carico termico in direzione radiale. Il presente lavoro si concentra sull'analisi dei terreni intermedi, a matrice sabbiosa. In particolare, gli autori analizzano l'influenza della presenza di terreno fine sulla risposta idro-meccanica dei provini, in fase di congelamento. Da un punto di vista idraulico, il fine influenza notevolmente la direzione del movimento dell'acqua nei pori, che è espulsa durante il congelamento della sabbia pura, mentre viene richiamata verso il fronte congelato in presenza di inclusioni argillose. Di conseguenza, le deformazioni risultano trascurabili nel caso del terreno sabbioso, di espansione nel terreno a granulometria intermedia.

### **1. Introduzione**

Il congelamento artificiale dei terreni è una tecnica di stabilizzazione e impermeabilizzazione temporanea dell'area di scavo di pozzi e gallerie sottofalda. Essa viene utilizzata in ambienti urbani, laddove l'obiettivo principale è la salvaguardia delle strutture esistenti (Viggiani e Casini, 2015). L'applicazione avviene mediante l'inserimento di sonde all'interno del terreno, intorno alla sezione di scavo, nelle quali circola un fluido refrigerante, che provoca il raffreddamento del terreno circostante; esso, non entrando a diretto contatto con il terreno, rende la tecnica a basso impatto ambientale (Rocca, 2011). Pur trattandosi di un metodo le cui prime applicazioni sono antecedenti al secolo

scorso, esso risulta non ancora preferito ad altre tecniche di consolidamento tradizionali (ad esempio, le iniezioni cementizie o chimiche), poiché costoso, specialmente per le numerose incertezze legate alla risposta termo-idro-meccanica dei terreni cui applicato. L'osservazione sperimentale del fenomeno del congelamento alla scala di laboratorio permette un'analisi dettagliata del comportamento dei terreni. In questa direzione, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica dell'Università di Roma Tor Vergata ha costruito un'apparecchiatura triassiale in grado di riprodurre il fenomeno del congelamento artificiale così come viene realizzato in sito (Bartoli et al., 2018). Come descritto nel seguito, il macchinario permette la circolazione di fluido refrigerante all'interno di un tubo di rame posto al centro del provino, inducendo il congelamento nelle modalità analoghe a quanto avviene in sito, intorno alla sonda refrigerante.

Il presente lavoro si concentra sull'analisi del comportamento di terreni a granulometria intermedia. L'interesse ingegneristico è legato alla presenza degli stessi sia in depositi naturali, sia in terreni artificialmente ricostituiti per la realizzazione di opere civili (ad esempio, per sottofondi stradali). La modellazione fisica di terreni a matrice grossolana contenenti una variabile percentuale di fine è stata ampiamente affrontata in letteratura (e.g. Reiffsteck et al., 2005; Konrad et al., 2005; Yu et al., 2016). Il comportamento meccanico delle miscele a temperatura ambiente, è legato alle caratteristiche della sola matrice grossolana, se la percentuale di fine è inferiore ad un valore definito "critico", tra il 20 ed il 30% circa (Reiffsteck et al., 2005).

Il processo di congelamento di un materiale grossolano con aggiunta di materiale fine, in confronto al terreno grossolano puro, è analizzato per definire l'influenza dell'inclusione di fine sul comportamento della miscela.

## **2. Campagna sperimentale**

L'obiettivo dello studio è analizzare l'influenza della percentuale di fine in una matrice grossolana, durante il processo di congelamento artificiale. I provini sono congelati all'interno di una cella triassiale a controllo di temperatura (*FROZEN*, Bartoli et al., 2018).

Lo studio oggetto di questo articolo si concentra sull'influenza del fine nel comportamento della miscela durante il processo di congelamento. Si è scelto di analizzare il comportamento di una sabbia monogranulare, con inclusioni di argilla pari al 15% del volume solido.

### *2.1 Apparecchiatura di prova: FROZEN*

*FROZEN* (Bartoli et al., 2018) è una cella triassiale, per l'esecuzione di prove a controllo di temperatura, realizzata dall'Università di Roma Tor Vergata. Essa è costituita da tre parti principali (*Fig. 1*): una pressa, una cella triassiale, ed un sistema di circolazione del fluido refrigerante. L'attrezzatura induce il raffreddamento del provino attraverso lo scorrimento del fluido all'interno di un tubo di rame posizionato al centro del campione, e trasmette al materiale il carico termico in direzione radiale. Ciò consente la riproduzione delle condizioni di congelamento di sito, quando la tecnica del congelamento artificiale viene applicata per il consolidamento del terreno, per la costruzione di pozzi o gallerie.

Il provino ha un diametro teorico di 100 mm ed un'altezza di 200 mm.

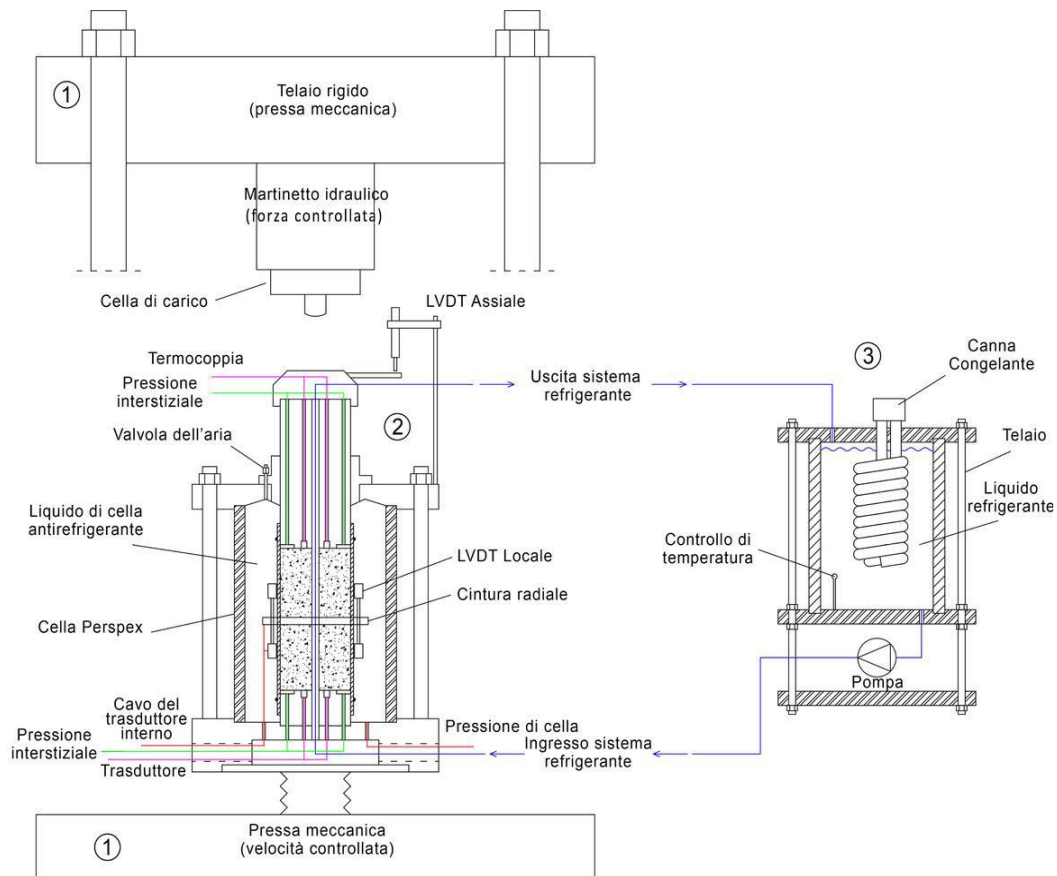


Fig 1. Schema della cella triassiale a controllo di temperatura dell'Università di Roma Tor Vergata (Bartoli et al., 2018).

Rispetto alle prove triassiali standard, le prove oggetto di studio constano di una fase aggiuntiva, il congelamento, successiva alla fase di consolidazione (Tab 1).

Prova triassiale standard	Prova in <i>FROZEN</i>
Saturazione Consolidazione Rottura	Saturazione Consolidazione <b>Congelamento</b> Rottura

Tab 1. Fasi della prova triassiale standard vs della prova effettuata con la cella triassiale a controllo di temperatura, *FROZEN*.

Tutte le fasi vengono effettuate in condizioni di carico isotrope.

## 2.2 I terreni

La sabbia proveniente da Fontainebleau (al centro-Nord della Francia) e il caolino Speswhite sono stati scelti per la sperimentazione. La prima è una sabbia fine monogranulare, la cui dimensione dei grani è compresa fra 100 e 400  $\mu\text{m}$ . Il secondo è un'argilla non attiva, a ridotta plasticità.

Le miscele vengono preparate con lo stesso volume dei vuoti teorico. Naturalmente, a seguito dei processi standard della prova triassiale (saturazione e consolidazione), e della fase di congelamento, i

provini presentano un indice dei vuoti differente.

### 2.3 Osservazioni sperimentali

La campagna sperimentale qui presentata è costituita da tre prove TXCD, a differente pressione di consolidazione, per ciascun materiale considerato: sabbia pura e sabbia con aggiunta del 15% di argilla (Tab 2). L'analisi si concentra sulla valutazione degli effetti del fenomeno del congelamento sui provini, al variare del contenuto di argilla e della pressione di confinamento cui è soggetto il provino in fase di raffreddamento.

Materiale	Pressione di consolidazione [kPa]		
Terreno sabbioso	50	200	800
Terreno sabbioso con 15% di caolino			

Tab 2. Campagna sperimentale.

I provini sono raffreddati con liquido refrigerante a circa -20°C: alla base del provino, prima zona soggetta a raffreddamento, la temperatura è dunque più bassa rispetto alla parte alta, alla cui altezza il liquido refrigerante perde calore per dispersione termica dovuta allo scambio con il terreno. Come osservabile in Fig 1, i circuiti di drenaggio si trovano in prossimità della parete esterna del provino; dunque, essi consentono l'ingresso o la fuoriuscita d'acqua dal provino, sino al congelamento pressoché completo dello stesso. Il processo di congelamento ha una durata di circa dieci ore.

I risultati ottenuti vengono interpretati con riferimento a due parametri: la variazione del volume dei vuoti, in termini di indice dei vuoti,  $\Delta e$ , ed il richiamo o l'espulsione d'acqua dal provino, valutato come la variazione di indice dei vuoti  $\Delta e_w$  cui conseguirebbe il movimento d'acqua  $\Delta V_{water}$ , trascurando l'espansione in volume dovuta al passaggio di stato.

$$\Delta e = e - e_{precongelamento} \quad ; \quad \Delta e_w = -\frac{\Delta V_{water}}{V_s} ,$$

in cui  $e$  rappresenta l'indice dei vuoti,  $e_{precongelamento}$  è il valore di indice dei vuoti a fine processo di consolidazione,  $V_s$  è il volume della fase solida.

Durante il congelamento, il movimento dell'acqua presente nei pori del provino è dovuto a due fattori: l'aumento di volume della stessa, durante il passaggio fisico di stato in ghiaccio, e la suzione criogenica (Thomas et al., 2009). La prima componente, il passaggio di stato, causa una forza di espulsione dell'acqua del provino conseguente all'aumento di volume, dal fronte di congelamento verso le zone non congelate. La seconda componente, la suzione criogenica, provoca una forza di richiamo dell'acqua verso il fronte congelato.

L'analisi dei risultati sperimentali evidenzia che durante il congelamento i due materiali considerati presentano un comportamento differente (Fig 2).

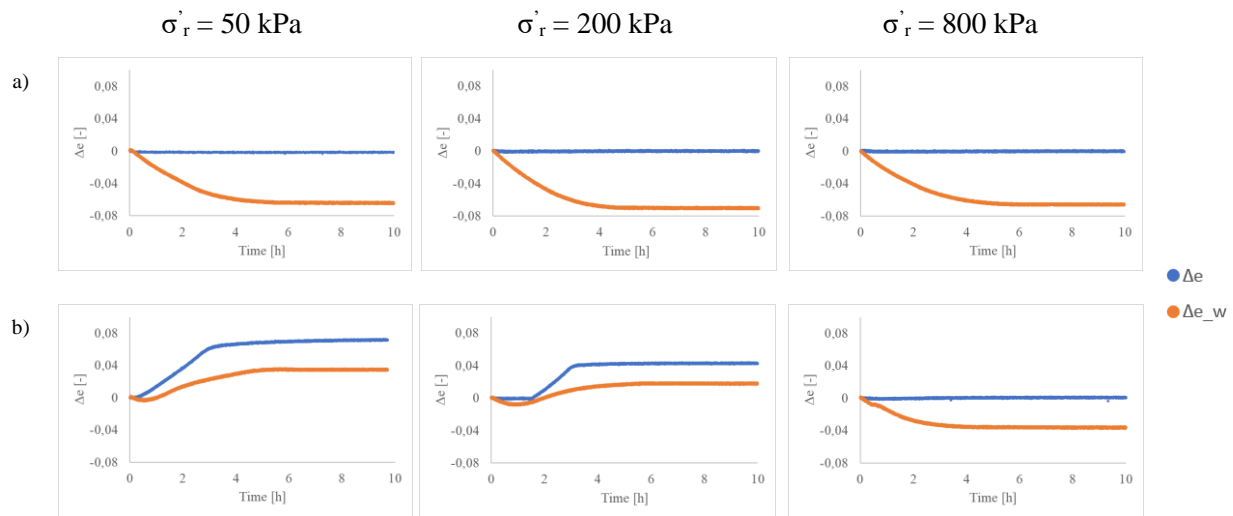


Fig 2. Risultati sperimentali: variazione dell'indice dei vuoti  $\Delta e$  e  $\Delta e_w$  in fase di congelamento. a) Campioni sabbiosi; b) Campioni sabbiosi con 15% di caolino.

Il campione costituito unicamente da sabbia non mostra variazione di indice dei vuoti: l'acqua dei pori si espande al passaggio di stato, sul fronte di congelamento, provocando l'espulsione dell'acqua non ancora congelata verso l'esterno del provino. Inoltre, il comportamento non evidenzia un'influenza della pressione di consolidazione.

Al contrario, il campione contenente il 15% di caolino, a pressione di consolidazione pari a 50 kPa mostra un'espansione del volume dei vuoti, conseguente al richiamo d'acqua all'interno del provino: l'acqua viene richiamata verso il fronte congelato per suzione criogenica, ed il provino si espande a causa della compresenza di forza di richiamo e passaggio di stato. A pressione di consolidazione di 200 kPa, tale comportamento è confermato ma l'espansione e l'ingresso d'acqua risultano inferiori. Infine, a pressione di consolidazione di 800 kPa, il provino non espande, e la componente dominante risulta essere quella di espulsione dell'acqua per passaggio di stato. La pressione di consolidazione inibisce dunque l'espansione del provino.

### 3. Conclusioni

Il presente lavoro descrive il risultato di una campagna condotta con un macchinario a controllo di temperatura (*FROZEN*) realizzato dall'Università di Roma Tor Vergata, che prevede il congelamento del provino di terreno dal centro dello stesso, mediante un tubo di rame, all'interno del quale circola un fluido refrigerante. Ciò consente l'osservazione della fase di congelamento, riproducendo quanto avvenga in sito quando il congelamento artificiale viene applicato per il consolidamento del terreno, precedentemente alla fase di costruzione di pozzi o gallerie.

Gli esperimenti effettuati si concentrano sull'analisi dell'influenza della percentuale di fine sul comportamento dei terreni a matrice sabbiosa. Tre prove triassiali CID sono descritte per ciascun terreno considerato, a differente pressione di consolidazione: sabbia pura, e sabbia contenente il 15% di caolino.

Dalle evidenze sperimentali si osserva che, considerando le due principali componenti che governano il fenomeno, l'espulsione d'acqua dovuta all'espansione per passaggio di stato ed il richiamo d'acqua verso il fronte congelato per suzione criogenica, i due terreni considerati sono dominati da ciascun aspetto in diversa misura. Nei provini di sabbia pura si osserva una prevalenza dell'espulsione d'acqua per aumento di volume nella formazione del ghiaccio, ed il comportamento non cambia variando la

pressione di consolidazione. Differentemente, la sabbia con argilla mostra un forte richiamo d'acqua per suzione criogenica, e conseguente espansione. Tuttavia, il comportamento cambia all'aumentare della pressione di consolidazione.

Ulteriori analisi sperimentali di terreni sabbiosi a percentuale di caolino variabile potranno fornire una conferma al comportamento osservato.

### **Bibliografia**

- Bartoli, M., Raparelli, S., Casini, F., & Viggiani, G. M. B. (2018). Un'attrezzatura avanzata per prove su terreni artificialmente congelati. IARG 2018, 1–6. Genova.
- Konrad, J. M., & Lemieux, N. (2005). Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material. *Canadian geotechnical journal*, 42(2), 515-527.
- Reiffsteck, P., & Pham, P. T. N. (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-Luetsch, M. (2009). Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Geotechnique*, 59(3), 173-184.
- Viggiani G, Casini F. (2015). Artificial Ground Freezing: from applications and case studies to fundamental research. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, Edinburgh UK.
- Yu, X., Zhang, N., Pradhan, A., & Puppala, A. J. (2016). Thermal conductivity of sand–kaolin clay mixtures. *Environmental Geotechnics*, 3(4), 190-202.