

INFLUENZA DELLA CURVA DI RITENZIONE DEL GHIACCIO SUL CRIOSOLLEVAMENTO

Valerio Molè

*Università degli Studi di Roma Tor Vergata
valerio.mole@uniroma2.it*

Francesca Casini

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

Sommario

I terreni possono essere soggetti a diminuzioni della temperatura che ne determinano il congelamento. Tale fenomeno può verificarsi sia per effetto della naturale variazione di temperatura dell'ambiente esterno, nelle zone fredde del pianeta, sia nel caso in cui si utilizzi la tecnica del congelamento artificiale dei terreni (AGF, Artificial Ground Freezing). L'AGF è una tecnica di impermeabilizzazione del terreno che viene spesso eseguita in ambiente urbano per la realizzazione di gallerie. In questo contesto risulta estremamente importante effettuare un'attenta valutazione delle deformazioni volumetriche del terreno indotte dal congelamento. Per poter descrivere, comprendere e prevedere tale fenomeno risulta opportuno affiancare le evidenze sperimentali e la modellazione numerica, per effettuare la taratura dei parametri che regolano i processi termici, idraulici e meccanici che si instaurano con il congelamento. In questo lavoro i risultati sperimentali ottenuti con prove di criosollevarimento sono state interpretate e utilizzate per calibrare la curva di ritenzione del ghiaccio, ossia la legge che lega le proprietà termodinamiche del terreno e il grado di saturazione dell'acqua liquida.

1. Introduzione

Il processo di congelamento è accompagnato da un significativo incremento di volume del terreno. Qualora si esegua un intervento di congelamento artificiale dei terreni (AGF) (Viggiani *et al*, 2016) in prossimità di strutture esistenti, queste possono essere soggette a ingenti spostamenti (Molè *et al*, 2017). Questa condizione può verificarsi nel caso della realizzazione di gallerie in ambiente urbano, quando è necessario eseguire lo scavo con metodi tradizionali e si sceglie di utilizzare l'AGF come tecnica di impermeabilizzazione del terreno da scavare. In questo contesto è necessario eseguire una attenta valutazione degli effetti indotti dal congelamento.

La diminuzione della temperatura, fino al di sotto della temperatura di congelamento del fluido interstiziale, determina un incremento del contenuto di ghiaccio all'interno dei vuoti del terreno. Ad esso è correlata una diminuzione della permeabilità e, quindi, una variazione delle pressioni interstiziali. Ne consegue una variazione dello stato di sforzo efficace e, pertanto, l'insorgere di deformazioni meccaniche di rigonfiamento. Una parte cospicua dell'aumento di volume del terreno è causata dall'espansione del fluido interstiziale che subisce la transizione di fase, soggetto alla diminuzione di temperatura al di sotto del punto di congelamento. D'altra parte il decremento di temperatura nel terreno genera una variazione delle pressioni interstiziali e, quindi, si innescano moti di filtrazione dell'acqua che dalle zone non congelate raggiunge il fronte congelato, dove diviene ghiaccio producendo un ulteriore incremento di volume.

Per poter descrivere, comprendere e prevedere tale fenomeno risulta opportuno predisporre delle prove di laboratorio, chiamate prove di "frost heave" (criosollevarimento), finalizzate a misurare gli spostamenti che subisce un campione di terreno soggetto al carico termico. Per riprodurre questa tipologia di prova sono state condotte delle analisi numeriche utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti "Code

Bright". Le analisi numeriche sono state svolte adottando diversi valori per i parametri che caratterizzano la curva di ritenzione del ghiaccio al fine di valutarne l'influenza sugli spostamenti dovuti al congelamento.

2. Comportamento termo-idro-meccanico dei terreni congelati

I terreni congelati possono essere schematizzati come mezzi trifase, costituiti da particelle solide (grani), fase liquida (acqua) e fase solida (ghiaccio). La presenza delle due fasi all'interno dei vuoti dei terreni congelati consente di porre questi in analogia con i terreni parzialmente saturi, cioè quei terreni i cui vuoti sono occupati dalla fase liquida rappresentata dall'acqua e dalla fase gassosa rappresentata dall'aria. Sia nel caso dei terreni parzialmente saturi che congelati, si sviluppano delle tensioni superficiali di interfaccia, σ_{ij} , lungo le superfici che delimitano le due fasi, chiamate "menischi". Tali tensioni superficiali devono essere bilanciate dalla differenza di pressione tra le due fasi stesse. Nel caso dei terreni congelati la differenza tra la pressione del ghiaccio e la pressione dell'acqua prende il nome di suzione, s , ed è definita come:

$$s = \max(P_i - P_l; 0) \quad (1)$$

nella quale P_i è la pressione del ghiaccio e P_l è la pressione dell'acqua.

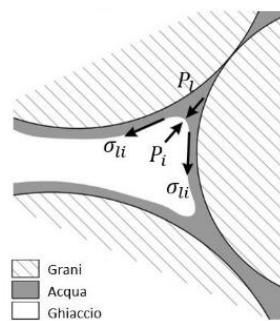


Fig 1. Schematizzazione delle fasi presenti nei terreni congelati

La suzione rappresenta la variabile che regola il processo di trasporto della massa fluida dovuto alla diminuzione della temperatura.

2.1 Equilibrio termodinamico dei terreni congelati

L'equilibrio termodinamico per un sistema bifasico, che si ottiene se risultano soddisfatte contemporaneamente le condizioni di equilibrio meccanico, termico e chimico, è espresso dall'equazione di Clausius-Clapeyron. La forma di tale equazione, integrata utilizzando la pressione atmosferica e la temperatura $T = 273,15$ K come valori di riferimento, è la seguente:

$$dP_i = \frac{\rho_i}{\rho_l} dP_l - \rho_i l \cdot \ln\left(\frac{T}{273,15}\right) \quad (2)$$

dove l è il calore latente di fusione, P_i e P_l sono la pressione del ghiaccio e la pressione dell'acqua, ρ_i e ρ_l sono la densità di massa del ghiaccio e dell'acqua, rispettivamente, e T è la temperatura, misurata in scala termodinamica.

Dalla (2) è possibile ricavare la suzione, come segue:

$$s = P_i - P_l = \left(\frac{\rho_i}{\rho_l} - 1\right) P_l - \rho_i l \cdot \ln\left(\frac{T}{273,15}\right) \quad (3)$$

L'incremento del contenuto di ghiaccio nel terreno, associato alla diminuzione della temperatura, si traduce in un aumento della pressione del ghiaccio, che determina l'insorgere di valori positivi di suzione. Alla crescita in suzione è correlata la diminuzione dell'acqua liquida contenuta nel terreno e, quindi, del grado di saturazione. Uno degli aspetti principali da considerare per descrivere il comportamento dei terreni congelati è la curva di ritenzione del ghiaccio, che mette in relazione la suzione, s , e il grado di saturazione liquida, S_l . Essa è espressa per mezzo dell'equazione di Van Genuchten (1980), nel modo seguente:

$$S_l = \max \left\{ \left[1 + \left(\frac{P_i - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^\lambda ; S_{res} \right\} \quad (4)$$

nella quale P , λ e S_{res} sono parametri del materiale. S_{res} rappresenta il minimo valore che il grado di saturazione può assumere, e dipende dalla salinità dell'acqua interstiziale (Zhang L., 1991).

Il grafico riportato nella Figura 2 mostra l'andamento della curva di ritenzione per due diversi terreni, sabbia e argilla. Si evince come una buona calibrazione dei parametri che definiscono la curva di ritenzione giochi un ruolo fondamentale. Infatti, a parità di suzione possono corrispondere due valori del grado di saturazione molto diversi tra loro. In particolare terreni argillosi presentano valori maggiori del grado di saturazione rispetto a terreni sabbiosi. Ne consegue che in tali terreni è presente una quantità maggiore di fluido che filtrando dalla zona non congelata raggiunge il fronte congelato, dove cambia fase, incrementando il volume totale della porzione di terreno investita dal congelamento.

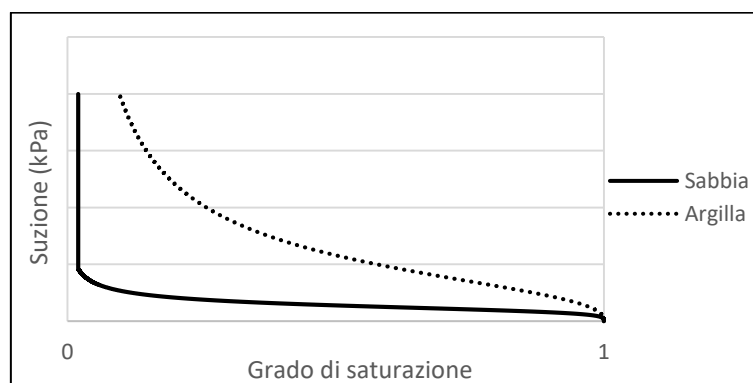


Fig 2. Andamento tipico della curva di ritenzione del ghiaccio per terreni sabbiosi e argillosi.

3. Prova di criosollevarimento

La suscettibilità di un terreno nei confronti del congelamento è definita in termini del sollevamento, e quindi dell'incremento di volume, che il terreno stesso presenta al diminuire della temperatura. In concomitanza con l'utilizzo di informazioni di letteratura (per esempio determinando la percentuale di particelle aventi diametro inferiore a 0,02 mm ovvero utilizzando le indicazioni fornite dal Unified Soil Classification System), per classificare un terreno in termini di suscettibilità al congelamento risulta opportuno predisporre delle particolari prove di laboratorio, conosciute come prove di criosollevarimento. Queste prove sono finalizzate a valutare gli spostamenti che si verificano in corrispondenza della sezione sommitale di un provino di terreno cilindrico, soggetto a pressione isotropa e a temperatura minore di zero in testa. Il campione viene posto in un dispositivo simile a una cella triassiale. In questo caso, tuttavia, i piatti superiore e inferiore della macchina si trovano a temperature diverse. Attraverso il piatto superiore circola salamoia (acqua e cloruro di calcio), alla temperatura di circa -6°C mentre nel piatto inferiore viene immesso un fluido di circolazione ad una temperatura di circa $+6^{\circ}\text{C}$. In questo modo viene impedito il congelamento della parte inferiore del provino. Inoltre, dal piatto inferiore è consentito

l'ingresso di acqua nel campione, la quale può muoversi verso il fronte congelato (isoterma alla temperatura $T = 0^{\circ}\text{C}$). La pressione di confinamento radiale viene applicata per mezzo di aria in pressione e il campione è avvolto in una membrana che evita l'ingresso dell'aria al suo interno. La prova ha una durata di diverse decine di ore, in questo modo nel campione si raggiungono condizioni di temperatura stazionarie. Lungo il provino sono applicati quattro sensori di temperatura. Nella Figura 3 sono riportate una schematizzazione della prova e una fotografia scattata durante l'esecuzione della prova stessa.

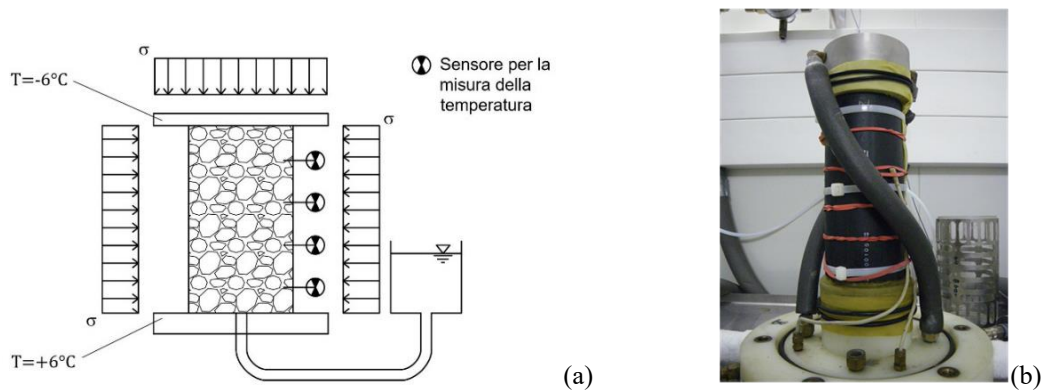


Fig 3. Prova di criosollevamento: (a) schema; (b) immagine.

4. Analisi numeriche

Sono state condotte analisi numeriche, volte a riprodurre la prova di criosollevamento, fissando diversi valori dei parametri che caratterizzano la curva di ritenzione del ghiaccio (P , λ e S_{res}). Tali analisi sono state eseguite impiegando “Code Bright” (Olivella *et al* 1996), un codice di calcolo agli elementi finiti nel quale è implementato un modello costitutivo termo-idro-meccanico per descrivere il comportamento dei terreni congelati (Nishimura *et al*, 2009).

4.1 Geometria e condizioni al contorno del modello numerico

Le analisi numeriche sono state eseguite in condizioni di simmetria assiale, sfruttando la simmetria rispetto all'asse verticale del campione. Le simulazioni sono state suddivise in tre intervalli di tempo. Inizialmente è stata applicata al provino una temperatura di 23°C . Nel secondo intervallo è stato imposto un decremento di temperatura in corrispondenza della base superiore (fino a -6°C) e della base inferiore (fino a $+6^{\circ}\text{C}$). Durante il terzo intervallo sono state mantenute costanti le condizioni di temperatura per una durata superiore al tempo necessario all'instaurarsi di condizioni stazionarie di temperatura. In questo modo, dopo una fase iniziale in cui il campione sviluppa l'espansione volumetrica causata dal passaggio di fase dell'acqua in ghiaccio, è possibile valutare gli effetti, al variare dei parametri della curva di ritenzione, generati in termini di acqua che entra nel campione e raggiunge la zona congelata dello stesso, producendo ulteriori variazioni di volume. Nella Figura 4 è riportata la geometria del modello, il reticolo utilizzato e le condizioni al contorno imposte per ogni intervallo di tempo.

4.2 Risultati

A partire dall'analisi AN 1 sono state condotte 3 coppie di analisi. Per ciascuna di tali coppie sono stati fissati i valori di due parametri ed è stato fatto variare il terzo. Nella Tabella 1 sono riportati i valori dei parametri della curva di ritenzione del ghiaccio utilizzati per ciascuna simulazione.

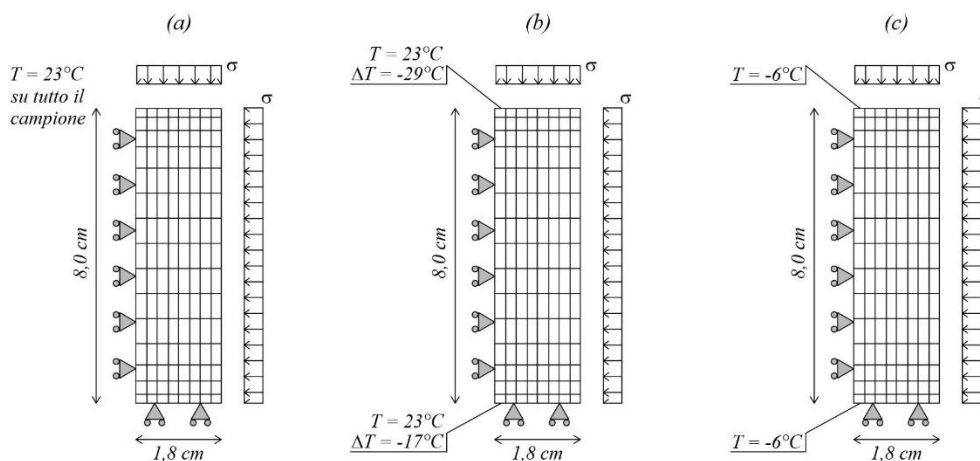


Fig 4. Geometria e condizioni al contorno del modello numerico: primo (a); secondo (b; terzo intervallo (c).

	Analisi numerica	P (kPa)	λ	S_{res}
	AN 1	100	0.5	0.05
Al variare di λ	AN 2	100	0.65	0.05
	AN 3	100	0.8	0.05
Al variare di P	AN 4	50	0.5	0.05
	AN 5	10	0.5	0.05
Al variare di S_{res}	AN 6	100	0.5	0.075
	AN 7	100	0.5	0.1

Tab. 1. Parametri della curva di ritenzione del ghiaccio adottati nelle analisi numeriche.

La Figura 5 mostra i grafici degli spostamenti ottenuti con le analisi numeriche in corrispondenza della sezione sommitale del campione, nonché la forma delle curve di ritenzione del ghiaccio corrispondenti alle diverse combinazioni di parametri adottati. Fissando diversi valori del grado di saturazione residuo rispetto al valore utilizzato in AN 1, in particolare $S_{res} = 0.075$ (AN 6) e $S_{res} = 0.1$ (AN 7), non si sono ottenute differenze apprezzabili in termini di spostamenti esibiti dal campione. Per questo motivo nella Figura 5 non si riportano i grafici degli spostamenti ottenuti con le analisi AN 6 e AN 7.

I grafici mostrano che al crescere del parametro λ è correlata una diminuzione degli spostamenti. Inoltre, nel caso in cui $\lambda = 0.8$ (AN 3) gli spostamenti raggiungono il valore massimo in corrispondenza della decima ora e si mantengono costanti fino alla fine della simulazione. Invece, per valori di λ più bassi gli spostamenti verticali della testa del provino hanno un andamento crescente, più marcato nel caso in cui $\lambda = 0.5$. Anche variazioni della pressione di ingresso del ghiaccio, P , provocano modifiche degli spostamenti esibiti dal campione. In particolare questi sono minimi e raggiungono un valore massimo nel caso in cui $P = 10$ kPa mentre risultano maggiori e presentano un andamento crescente per valori di P più elevati. Risulta quindi cruciale calibrare in modo corretto i parametri della curva di ritenzione del ghiaccio per effettuare previsioni veritiere degli spostamenti che si potrebbero verificare in occasione di un intervento di congelamento artificiale dei terreni.

5. Conclusioni

La tecnica del congelamento artificiale dei terreni determina l'insorgere di ingenti deformazioni di rigonfiamento nei terreni interessati dall'intervento. La scelta dei parametri che definiscono la curva di

ritenzione del ghiaccio può avere effetti considerevoli sulla previsione degli spostamenti. Quindi, nel tentativo di valutare gli effetti che il congelamento può indurre su un determinato terreno risulta di notevole importanza calibrare al meglio tali parametri. Una buona progettazione di un intervento di congelamento artificiale dei terreni è bene che sia supportata da prove di laboratorio i cui risultati consentano la taratura dei parametri della curva di ritenzione del ghiaccio, attraverso analisi numeriche a ritroso dei dati sperimentali ottenuti da prove di criosolleamento.

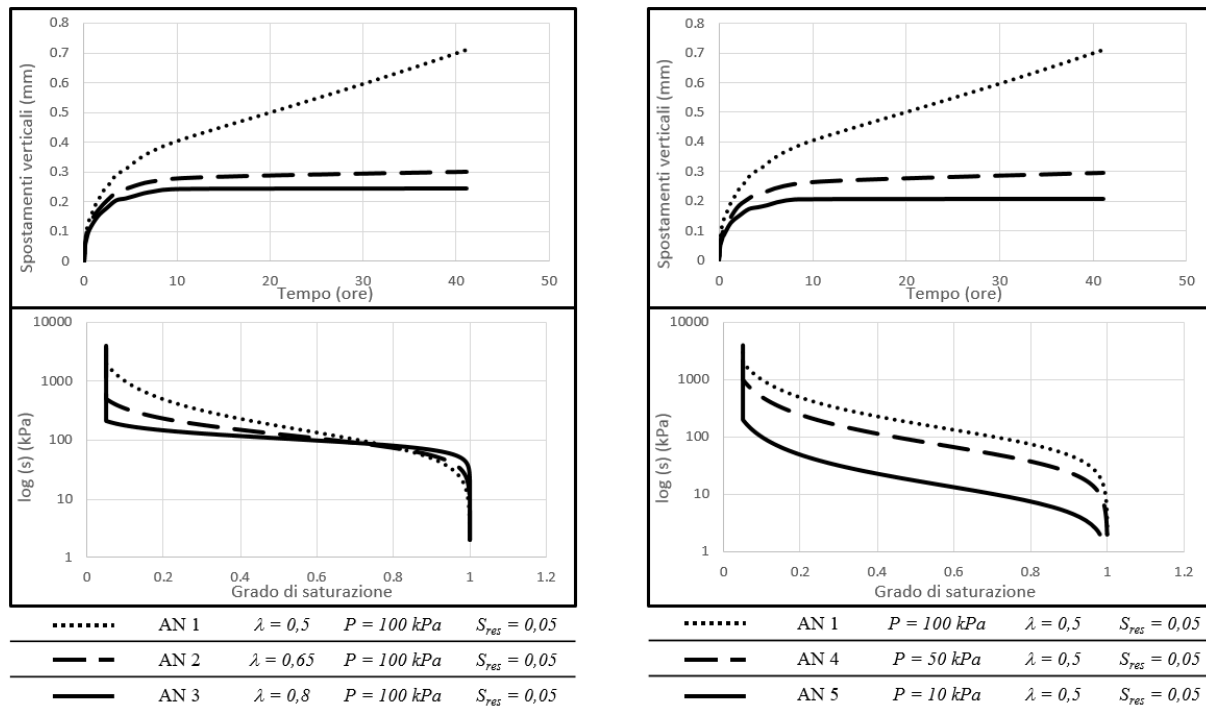


Fig 5. Grafici degli spostamenti ottenuti con le simulazioni numeriche e curve di ritenzione del ghiaccio.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il supporto fornito dalla Regione Lazio con il progetto “FROZEN” che finanzia la borsa di studio del primo autore.

Bibliografia

- Alonso E.E., Gens A., Josa A. (1990). “A constitutive model for partially saturated soils”, *Géotechnique*, 40 (3).
- Casini F., Gens A., Olivella S., Viggiani G. (2016). “Artificial ground freezing of a volcanic ash: laboratory tests and modelling”, *Environmental Geotechnics*, 3 (3), 141-154.
- Harris J.s. (1995). *Ground Freezing in Practice*. Thomas Telford, Trowbridge, pp 39-41.
- Molè V. (2016). “Validazione di un modello costitutivo per i terreni artificialmente congelati: applicazione al caso di Roma – San Giovanni Metro C”, Tesi di laurea magistrale, Università di Roma Tor Vergata.
- Molè V., Casini F., Viggiani G. (2017). “Il congelamento artificiale dei terreni eseguito nei pressi di un palo di Fondazione di grande diametro”. XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Roma.
- Nishimura S., Gens A., Olivella S. & Jardine R.J. (2009). “THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application”, *Géotechnique*, 59 (3), 159,171.
- Olivella S., Gens A., Carrare J., Alonso E.E. (1996). “Numerical formulation for a simulator ‘CODE_BRIGHT’ for the coupled analysis of saline media”, *Engn Comput*, 13 (7), 87-112.
- Van Genuchten M.T. (1980). “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Viggiani G., Casini F., Bertero A., Cribari F., Romani E. (2016). “Artificial Ground Freezing: case studies, technological development and fundamental research. Conferenze di Geotecnica di Torino XXIV Ciclo.