

STUDIO NUMERICO SUL CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI PER GLI SCAVI DI SOTTOATTRAVERSAMENTO DEL FIUME ISARCO

Giulia Guida

Università degli Studi di Roma Tor Vergata
giulia.guida@uniroma2.it

Francesca Casini

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

Sommario

Questa nota presenta il modello termo-idraulico utilizzato per studiare lo sviluppo di terreno congelato indotto dalla tecnica di congelamento artificiale dei terreni per il caso studio “sottoattraversamento Isarco” (gallerie di base del Brennero). La modellazione numerica, oltre a fornire uno strumento di interpretazione dei dati di monitoraggio di sito, ha consentito di indagare il ruolo della filtrazione sul processo di congelamento artificiale dei terreni.

1. Introduzione

Il congelamento artificiale dei terreni è una tecnica provvisoria di sostegno dello scavo che a causa dei suoi elevati costi e difficoltà operative si adotta principalmente in contesti critici, *e.g.*, scavo di gallerie in terreni eterogenei a grana grossa sotto falda (Casini *et al.* 2022), oppure scavi in ambiente urbano dove c'è la necessità di limitare gli spostamenti di subsidenza (Russo *et al.*, 2015; Viggiani & Casini, 2015).

Il terreno viene artificialmente congelato per mezzo di sonde all'interno delle quali circola un fluido refrigerante che sottraendo calore al terreno fa sì che l'acqua interstiziale si congeli. Le sonde congelatrici vengono generalmente installate lungo il contorno esterno della sezione di scavo per l'intera lunghezza del tratto in modo tale da creare un involucro impermeabile di terreno congelato all'interno del quale scavare la galleria. Al fine di garantire la sicurezza, le operazioni di scavo iniziano solo quando lo spessore di terreno congelato è di almeno 1 m, e il congelamento artificiale si mantiene attivo finché non viene applicato il rivestimento definitivo della galleria.

L'evoluzione del volume di terreno congelato attorno alle sonde dipende sia dalle caratteristiche delle sonde congelatrici (disposizione, modalità d'installazione, tipo di fluido refrigerante, portata e tempo di applicazione), sia dalle caratteristiche del sito (proprietà dei terreni attraversati, regimi di filtrazione, grado di salinità del fluido interstiziale, *etc.*).

In questa nota si riporta la formulazione termo-idraulica utilizzata per simulare il processo di congelamento artificiale dei terreni del tratto del sottoattraversamento del fiume Isarco (gallerie di base del Brennero), studiando l'influenza del regime di filtrazione sullo sviluppo del volume di terreno congelato.

2. Modellazione

Il congelamento artificiale dei terreni è un processo complesso che coinvolge scambi di massa e energia termica, trasformazioni di fase e sviluppo di suzione. Oltre a influenzare il campo di temperature e pressioni dell'acqua del mezzo poroso, i cicli di congelamento e scongelamento possono causare una variazione delle tensioni efficaci e deformazioni, specialmente in presenza di elevati contenuti di fine (Nishimura, 2021). Tuttavia, nei terreni a grana grossa gli effetti volumetrici indotti dai cicli di congelamento e scongelamento influenzano in modo marginale le proprietà termo-idrauliche del materiale (Alzoubi *et al.* 2020). Per il processo di congelamento artificiale dei terreni a grana grossa del sottoattraversamento del fiume Isarco si è quindi adottato un modello termo-idraulico accoppiato.

Un terreno sotto falda sottoposto ad un processo di congelamento può essere schematizzato come un materiale tri-fase composto da granelli solidi, acqua liquida e ghiaccio. Sotto le ipotesi di scheletro solido e fluido indeformabili, l'equazione di bilancio della massa della specie acqua è stata formulata in accordo a Nishimura *et al.* (2009):

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(S_w \rho_w + S_i \rho_i)] + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

dove ϕ è la porosità del mezzo, S_w e S_i sono i gradi di saturazione dell'acqua liquida e del ghiaccio ($S_w + S_i = 1$), ρ_w e ρ_i sono le densità dell'acqua e del ghiaccio e \mathbf{u} è la velocità di filtrazione dell'acqua liquida. La legge governante il campo di temperatura è il bilancio di energia termica:

$$\frac{\partial}{\partial t} [E_s \rho_s (1 - \phi) + E_w \rho_w S_w \phi + E_i \rho_i S_i \phi] + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T + E_w \rho_w \mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

dove $E_s = c_{p,s} T$, $E_w = c_{p,w} T$ e $E_i = -L + c_{p,i} T$ sono le energie specifiche delle particelle solide, dell'acqua liquida e del ghiaccio rispettivamente, funzione delle relative capacità termiche $c_{p,s}$, $c_{p,w}$ e $c_{p,i}$; λ è la conduttività termica, la quale può essere definita in funzione della conduttività termica delle singole fasi pesate rispetto alle corrispondenti frazioni volumetriche: $\lambda = [(1 - \phi)\sqrt{\lambda_s} + \phi S_w \sqrt{\lambda_w} + \phi S_i \sqrt{\lambda_i}]^2$ (Cosenza *et al.* 2003). Si ammette che il flusso di energia termica possa avvenire per conduzione in tutte e tre le fasi e per convezione attraverso la velocità di filtrazione dell'acqua liquida.

La transizione di fase da acqua liquida in ghiaccio è un processo esotermico che influenza (i) il grado di saturazione dell'acqua liquida e (ii) il regime delle temperature a causa del calore latente di fusione. Analogamente ai terreni parzialmente saturi, la quantità di acqua liquida interstiziale è regolata dal livello di suzione s , definita come differenza tra la pressione del ghiaccio e la pressione dell'acqua liquida (Eq.3). L'integrazione della legge generalizzata di Clausius-Clapeyron (Eq.3) fornisce la definizione della pressione del ghiaccio p_i in funzione della pressione dell'acqua liquida p_w e della temperatura T in condizioni di equilibrio dei potenziali chimici:

$$s = p_i - p_w, \quad p_i = \frac{\rho_i}{\rho_w} p_w - \rho_i L \ln \left(\frac{T}{273.15K} \right). \quad (3)$$

Quando la temperatura scende sotto lo zero, il secondo termine dell'equazione (3) diventa negativo determinando variazioni positive della pressione del ghiaccio e un conseguente incremento di suzione e riduzione del grado di saturazione dell'acqua liquida secondo la legge di ritenzione di van Genuchten:

$$S_w = (1 - S_{res})[1 + (\alpha s)^N]^M, \quad (3)$$

dove S_{res} , N e M sono parametri di modello.

Nel bilancio di energia (Eq.2), il termine di accumulazione relativo alla fase ghiaccio tiene conto del contributo negativo del calore latente di fusione dato dalla natura esotermica del fenomeno di congelamento.

Durante il congelamento il terreno diventa progressivamente impermeabile ovvero caratterizzato da una velocità di filtrazione nulla. La velocità di filtrazione è stata definita tramite la legge di Darcy generalizzata:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{k} \frac{k_{rel}}{\mu_w} (\nabla p_w + \rho_w g) \quad (2)$$

dove \mathbf{k} è il tensore della permeabilità intrinseca, k_{rel} è la permeabilità relativa della fase liquida (definita in funzione del grado di saturazione effettivo secondo la relazione di van Genuchten), p_w è la pressione dell'acqua liquida, g è l'accelerazione di gravità e μ_w è la viscosità dell'acqua liquida. Si ammette quindi che il flusso di massa sia possibile solamente in presenza di acqua liquida. In presenza di solo ghiaccio ($S_w \rightarrow 0$) la velocità di filtrazione tende a zero il mezzo diventa impermeabile.

3. Simulazioni numeriche

Le equazioni di bilancio descritte nella sezione 2 sono state implementate nel codice agli elementi finiti Comsol Multiphysics®. Le simulazioni numeriche riproducono il processo di congelamento artificiale dei terreni eseguito per una sezione di riferimento relativa al tratto di galleria GINIPI del sottoattraversamento Isarco (Gallerie di Base del Brennero), che si estende dal pozzo POBPN al pozzo POBPS per una lunghezza di circa 58 m (vedi Figura 1.a). A causa della ridotta copertura di terreno al di sopra della galleria, è stata costruita una soletta in calcestruzzo spessa 0.5 m sul letto del fiume. Le dimensioni caratteristiche della sezione di scavo sono 8.25 m di larghezza in prossimità dell'arco rovescio, 10 m di larghezza in prossimità dei piedritti e 9.30 m di altezza. 71 sonde congelatrici sono state installate tutte intorno alla sezione di scavo come riportato nella sezione trasversale di figura 1(b).

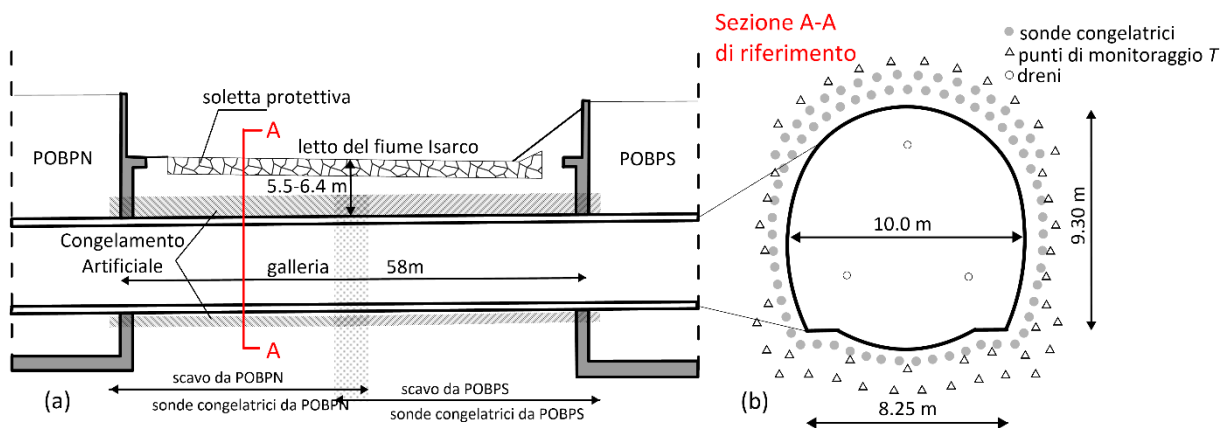


Fig 1. Schema della sezione longitudinale della galleria GINIPI. (b) Sezione della sezione trasversale di riferimento con la posizione delle sonde congelatrici.

Il problema è stato schematizzato per mezzo di un dominio bidimensionale 60 m x 40 m in cui il contorno superiore corrisponde al letto del fiume, mentre i contorni inferiore e laterali sono disposti sufficientemente lontani dalle sonde congelatrici, così da non indurre effetti di bordo. La posizione delle sonde congelatrici, modellate tramite circonferenze di diametro 76 mm pari a quello del tubo esterno della sonda, è coerente con quella di sito. Il terreno (sabbia ghiaiosa con un'alta percentuale di ciottoli) è schematizzato come un materiale tri-fase omogeneo le cui proprietà sono state dedotte dalle indagini geotecniche condotte in sito e da letteratura (vedi tabella 1 e 2, Williams, 1964; Usowicz, 2013). Le condizioni iniziali sono una temperatura costante di 12°C e un regime di filtrazione stazionario avente una differenza del carico piezometrico di $\Delta h = 0.7$ m imposto ai lati del dominio, coerente con le misure dei piezometri in sito. Il regime transitorio della simulazione prevede l'attivazione delle sonde congelatrici ($T = -75^\circ\text{C}$) ad azoto fino al giorno 9. Dal giorno 9 al giorno 13 nelle sonde viene applicata una temperatura $T = -30^\circ\text{C}$ per simulare il passaggio a salamoia.

Tabella 1 Proprietà del terreno

Porosità	$\phi=0.35$
Calore latente di fusione dell'acqua	$L=334 \text{ kJ/kg}$
Permeabilità intrinseca	$k=5\text{e-}11 \text{ m}^2$
Parametri di Van Genuchten	$m=0.38, P=15 \text{ kPa}, S_{\text{res}}=0.05$

Tabella 2 Proprietà termiche del terreno

	Grani solidi	Acqua liquida	Ghiaccio
Densità	$\rho_s=2600 \text{ t/m}^3$	$\rho_w=1000 \text{ t/m}^3$	$\rho_i=920 \text{ t/m}^3$
Conduttività termica	$\lambda_s=1.0 \text{ W/(mK)}$	$\lambda_w=0.6 \text{ W/(mK)}$	$\lambda_i=2.14 \text{ W/(mK)}$
Capacità termica	$c_{p,s}=800 \text{ J/(kg K)}$	$c_{p,w}=4200 \text{ J/(kg K)}$	$c_{p,i}=2100 \text{ J/(kg K)}$

4. Risultati

Il modello è stato dapprima validato tramite le temperature monitorate in sito (Guida & Casini, 2022) e poi utilizzato per eseguire delle analisi di sensitività mirate a studiare l'effetto del regime di filtrazione sullo sviluppo del terreno congelato.

Figura 2 mostra come la velocità di filtrazione indotta da un $\Delta h = 0.7 \text{ m}$ è localmente influenzata dallo sviluppo del terreno congelato attorno alle sonde. Figura 2(a) riporta la velocità di filtrazione dell'acqua liquida nei 5 punti della sezione di riferimento indicati in Fig.2b.

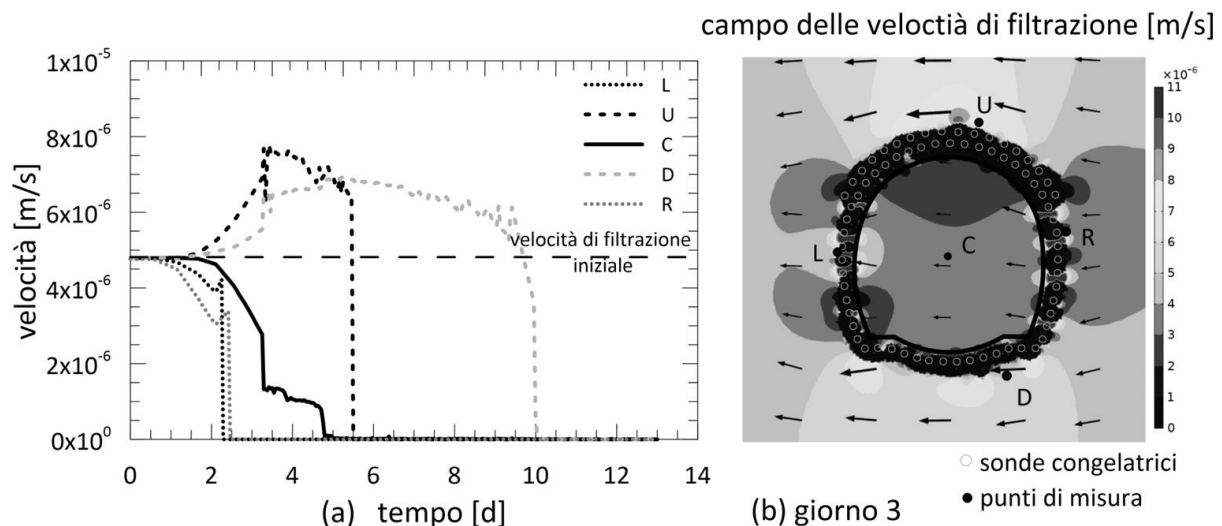


Fig 2. (a) Evoluzione della velocità di filtrazione nel tempo in 5 punti di misura interni ed esterni all'intervento di congelamento artificiale. (b) Curve di livello nell'intorno della sezione di riferimento relative al terzo giorno di simulazione e mappa dei punti di misura.

Prima dell'attivazione del congelamento, la velocità di filtrazione è la stessa in tutto il dominio e pari a $u_0=4.8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. I punti a monte (R) e a valle (L) della sezione della galleria mostrano entrambi un andamento della velocità che decresce fin da subito arrivando a zero a $t=2.5\text{d}$, quando sono raggiunti dal fronte congelato. La velocità di filtrazione del punto (C), posizionato nel centro della sezione di scavo, vede una riduzione della velocità di filtrazione intorno al giorno $t=2.2\text{d}$ arrivando a zero solo quando il muro congelato diventa una scatola chiusa impermeabile a $t=4.8\text{d}$. Al contrario, i punti posti superiormente (U) e inferiormente (D) alla sezione di scavo misurano un primo incremento della velocità di filtrazione finché non vengono raggiunti dal fronte congelato al giorno $t=5.5\text{d}$ e 10d rispettivamente. Figura 2b riporta il campo delle velocità di filtrazione relative al terzo giorno dall'attivazione delle sonde congelatrici. Le zone più scure sono quelle congelate, caratterizzate da una velocità di filtrazione nulla. Le zone più chiare, lungo i piedritti e nella zona superiore e inferiore all'area di scavo sono caratterizzate

da una velocità di filtrazione maggiore di quella iniziale (fino ai $6 - 8 \cdot 10^{-6}$ m/s) a causa della sezione di filtrazione ridotta.

Lo spessore dell'involucro di terreno congelato viene convenzionalmente definito a partire da una temperatura soglia di congelamento T^* che nella pratica progettuale è fissata a -10°C , ma che può essere fissata in funzione del tipo di terreno come proposto da Guida & Casini (2022) e Casini *et al.* (2022). Dai risultati delle simulazioni numeriche è possibile valutare lo spessore di terreno congelato identificando la curva di livello caratterizzata da $T=T^*$ e interpolando con due circonferenze coassiali, una per l'intradosso e una per l'estradosso, la porzione di dominio caratterizzata da $T < T^*$. La differenza tra i raggi dei due cerchi ci fornisce il valore dello spessore equivalente dell'involucro di terreno congelato. Si assume che lo spessore di terreno congelato rimanga nullo finché l'involucro esterno non risulta chiuso e continuo.

In Figura 3(a) è riportata l'evoluzione nel tempo dello spessore di terreno congelato adottando come temperatura soglia $T^*=-1^\circ\text{C}$ (calibrata per una sabbia secondo il metodo proposto da Guida & Casini, 2022) e -10°C . Per $T^*=-10^\circ\text{C}$ si osserva una sistematica sottostima dello spessore di terreno congelato rispetto a quello valutato con $T^*=-1^\circ\text{C}$ (vedi Figura 3.b), che oltretutto s'incrementa nel tempo (divergenza degli andamenti in Fig.3a). Per entrambi i livelli di soglia, si sono analizzati tre regimi di filtrazione differenti. Il regime di filtrazione influenza il tempo di chiusura del muro congelato che aumenta proporzionalmente con Δh , mentre influisce marginalmente sullo spessore del terreno congelato, infatti le curve sono sovrapposte per diversi Δh .

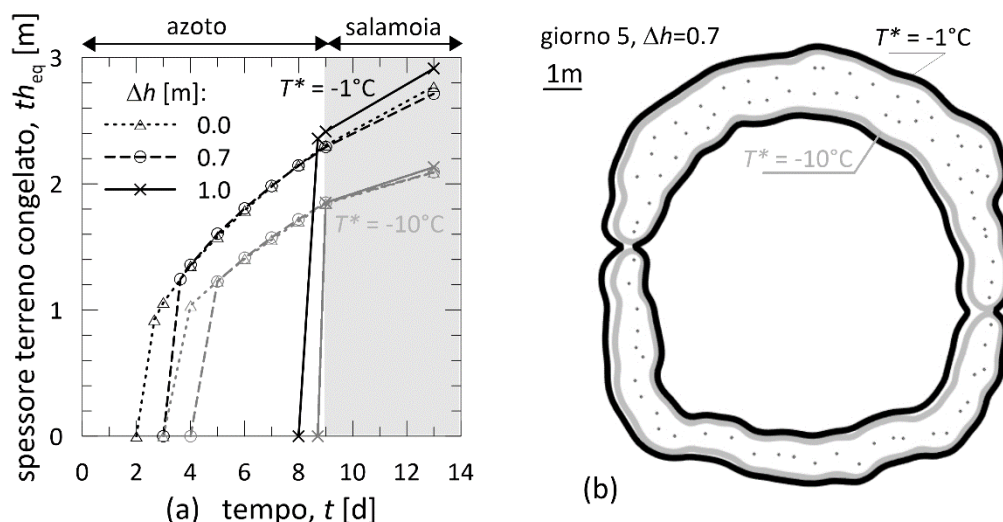


Fig 3. (a) Evoluzione dello spessore equivalente del muro nel tempo adottando due diverse temperature soglia e diversi regimi di filtrazione. (b) Ricostruzione del muro congelato al giorno 5 di simulazione avendo adottato come temperature di soglia $T^*=-1^\circ\text{C}$ e -10°C .

Figura 4 riporta i risultati delle analisi di sensitività in funzione del valore di dislivello idraulico imposto al contorno per entrambe le temperature di soglia adottate in termini di tempi di chiusura del muro congelato. Si osserva che adottando una temperatura di soglia $T^*=-10^\circ\text{C}$ si ha un sistematico ritardo di circa 1.3 giorni sulla chiusura del muro rispetto alla soglia $T^*=-1^\circ\text{C}$. Inoltre, al crescere della velocità di filtrazione ($\Delta h > 0.4$ m) il tempo di chiusura del muro aumenta a causa della presenza di zone di terreno non congelato nelle quali la velocità di filtrazione si amplifica, inibendo il processo di congelamento. In figura 4(b) e (c) si vede come in assenza di filtrazione ($\Delta h = 0$) la porzione di terreno che si congela per ultima è posta nell'angolo in basso a sinistra della sezione, mentre per un regime di filtrazione maggiore ($\Delta h = 1$ m) il punto che si congela per ultimo è posto lungo i piedritti. In quest'ultimo caso, lo spessore di terreno congelato arriva a 2 m prima di chiudersi ad un tempo $t = 8.8$ d. La posizione del punto del muro che si congela per ultimo dipende da come vengono disposte le sonde congelatrici. La loro posizione ed interasse deve essere quindi opportunamente studiata soprattutto in presenza di regimi di filtrazione rilevanti in modo da ottimizzare la progettazione dell'intervento e rendere la tecnica più

sostenibile in termini di costi.

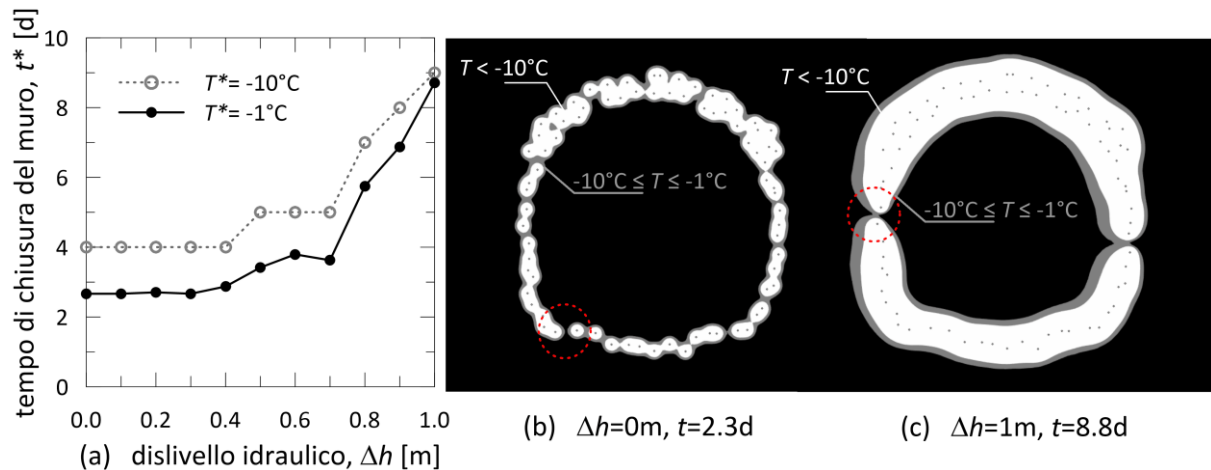


Fig 4. Effetto del regime di filtrazione sul (a) tempo di chiusura del muro e (b-c) sulla geometria del muro congelato.

4. Conclusioni

Grazie a una modellazione termo-idraulica accoppiata, questo studio indaga l'effetto della velocità di filtrazione sul processo di congelamento artificiale dei terreni applicato al caso studio del sottoattraversamento del fiume Isarco. Per un terreno a grana grossa, proprio del caso studio in esame, la filtrazione influenza principalmente i tempi di chiusura del muro congelato. Un aspetto progettuale di rilievo in caso di velocità di filtrazioni rilevanti è una corretta progettazione della posizione e distanza tra le sonde congelatrici.

Bibliografia

- Alzoubi, M. A., Xu, M., Hassani, F. P., Poncet, S., & Sasmito, A. P. (2020). Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 104, 103534.
- Casini, F. (2021). Multiphase soil mechanics for landscape protection: from testing to modelling. *Rivista Italiana di Geotecnica*: 5-34.
- Casini, F., Guida G., Restaini A., Celot A. (2021). Water retention Curve based design method for the Artificial Ground Freezing: the case study of Isarco river Underpass Tunnels (Brennero Base Tunnel). *Int. J. Geot. Geoenv. Eng.* Under Review.
- Cosenza, P., Guerin, R., & Tabbagh, A. (2003). Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. *European Journal of Soil Science*, 54(3), 581-588.
- Guida G., Casini F. (2022). Un metodo progettuale per l'ottimizzazione del congelamento artificiale dei terreni: il caso studio del sottoattraversamento del fiume Isarco. Atti di convegno IAGIG.
- 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.
- Nishimura, S. (2021). A model for freeze-thaw-induced plastic volume changes in saturated clays. *Soils and Foundations*, 61(4), 1054-1070.
- Russo, G., Corbo, A., Cavuoto, F., & Autuori, S. (2015). Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 226-238.
- Usovich, B., Lipiec, J., Usovich, J. B., & Marczewski, W. (2013). Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model-predicted data. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 57(2), 536-541.
- Viggiani, G., & Casini, F. (2015). Artificial ground freezing: from applications and case studies to fundamental research. In 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015 (Vol. 1, pp. 65-92). ICE Publishing.
- Williams PJ (1964). Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction. *Géotechnique*. 14(3), 231-246.