

MODELLAZIONE NUMERICA DEL CAMPO PROVA “FORI IMPERIALI” PER IL CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI

Arianna Pucci

Università degli Studi di Roma Tor Vergata

arianna.pucci@uniroma2.it

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

Giulia Viggiani

University of Cambridge

gv278@cam.ac.uk

Sommario

Il lavoro presentato in questa nota si occupa dell'interpretazione delle temperature monitorate nel campo prova “Fori Imperiali” per il congelamento artificiale dei terreni, tramite l'utilizzo di analisi numeriche termo – idrauliche accoppiate. Si propone un nuovo approccio di modellazione, basato sulla definizione di una funzione di scala α , determinata a partire dagli andamenti delle temperature ottenuti in modelli piani e assialsimmetrici verticali a singola sonda congelatrice. Tale funzione di scala consente di includere in modelli piani verticali gli effetti della tridimensionalità sull'evoluzione delle temperature, evitando la realizzazione di modelli 3D, che richiederebbero elevati oneri computazionali.

1. Introduzione

Il congelamento artificiale dei terreni (AGF) è una tecnica di impermeabilizzazione e sostegno temporaneo dello scavo tipicamente utilizzata per scavi in ambiente urbano, con lo scopo di contenere i cedimenti indotti a piano campagna, i quali potrebbero causare danni alle costruzioni preesistenti (Viggiani & Casini, 2015, Russo *et al.*, 2015). Il processo di congelamento del terreno avviene mediante l'utilizzo di appositi dispositivi di scambio di calore detti sonde congelatrici, in cui scorre fluido refrigerante a bassa temperatura. Il cilindro di terreno congelato che si forma attorno alla sonda aumenta progressivamente di diametro fino ad unirsi con i cilindri congelati che si formano attorno alle altre sonde, creando così un involucro chiuso di terreno congelato (Andersland *et al.*, 2003, Trevi S.p.A., 2013). L'impianto di congelamento può essere di due tipi, a seconda del fluido refrigerante usato: a circuito aperto per azoto liquido o a circuito chiuso per salamoia. Nell'impianto a circuito aperto, l'azoto liquido è immesso ad una temperatura di -196°C e alla fine del ciclo viene disperso in atmosfera allo stato gassoso. Nell'impianto a circuito chiuso, la salamoia viene refrigerata ogni volta fino a -40°C da un sistema frigorifero. La tecnica dell'AGF permette di limitare l'impatto ambientale, poiché il fluido refrigerante non viene rilasciato nel terreno e migliora temporaneamente le caratteristiche meccaniche

(incremento di rigidità e resistenza) e idrauliche (impermeabilizzazione) dei terreni. Gli svantaggi di tale tecnica sono soprattutto legati ai costi molto elevati, dovuti all'esosità dei materiali impiegati e degli impianti di refrigerazione in cantiere. Recentemente, il congelamento artificiale dei terreni è stato applicato nella realizzazione della Linea 1 della Metropolitana di Napoli, della Linea C della Metropolitana di Roma e della Linea 4 della Metropolitana di Milano.

2. Campo prova “Fori Imperiali”

Il campo prova “Fori Imperiali” per il congelamento artificiale dei terreni è stato realizzato per verificare l'efficacia del trattamento di congelamento come metodo per il sostegno e l'impermeabilizzazione dello scavo nell'ambito della tratta T3 della Linea C della Metropolitana di Roma. Il campo prova è stato realizzato inserendo verticalmente nel terreno delle sonde congelatrici disposte lungo due file, con lo scopo di simulare il congelamento attorno al perimetro di scavo di un'ipotetica galleria (*Fig. 1*). Le sonde congelatrici posizionate in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio della galleria sono state parzializzate attraverso isolante di tipo Armaflex. All'interno del campo sono state inserite 19 canne termometriche per il monitoraggio delle temperature, ciascuna delle quali con otto sensori posti ad otto differenti profondità.

La stratigrafia della zona dei Fori Imperiali è stata dedotta dalle numerose campagne di indagini geotecniche eseguite negli anni e può essere schematizzata da quattro strati:

- STRATO R: complesso di terreni di riporto con spessore tra i 2 e i 3 m, di natura molto eterogenea, a granulometria prevalentemente sabbiosa da fine a media.
- STRATO Tb1a: sabbie fini, debolmente limose con lenti di limi sabbiosi e argillosi. Si estendono fino ad una profondità di circa 27 m ed interessano per intero l'intervento di congelamento.
- STRATO SG: Si tratta di sabbie medio grosse con ghiaia, che si estendono dai 25 – 28 m dal piano campagna fino ad una profondità di circa 35 m.
- STRATO APL: Deposito pleistocenico che costituisce il bedrock per tutta l'area romana.

I risultati delle misure piezometriche hanno portato all'individuazione di una falda freatica con pelo libero posto nello strato Tb1a (a profondità di circa 8.25 m dal piano campagna), che entra in pressione nello strato di sabbie e ghiaie a causa della grande differenza di permeabilità tra questo strato e i due limitrofi. La geometria del campo prova e la stratigrafia descritta sono state riportate in *Fig. 1*.

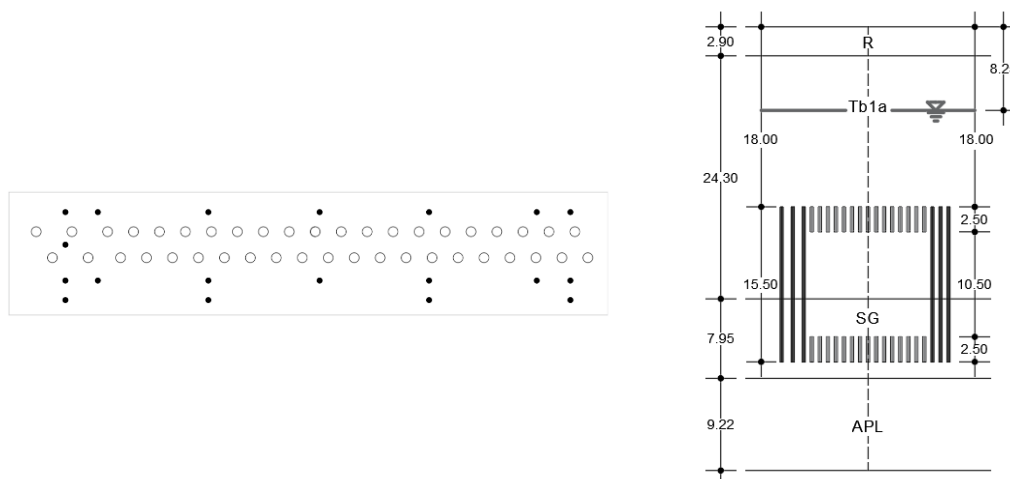


Fig. 1. Pianta e sezione del campo prova “Fori Imperiali” per il congelamento artificiale dei terreni (misure in metri)

3. Modellazione termo – idraulica dei terreni congelati

I terreni congelati possono essere trattati come mezzi parzialmente saturi trifase costituiti da granelli solidi e acqua interstiziale in fase liquida e/o solida (ghiaccio) (Fig. 2). In tali terreni, a causa delle forze di interazione tra le fasi, si sviluppa una differenza di pressione interstiziale tra la fase ghiaccio e la fase acqua liquida. In analogia con le teorie dei terreni parzialmente saturi, si può definire una suzione data dalla differenza tra pressione del ghiaccio P_i e pressione dell'acqua P_l (Nishimura *et al.*, 2009, Casini *et al.*, 2016).

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

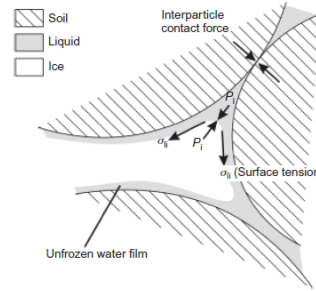


Fig. 2. Schematizzazione delle fasi presenti nei terreni congelati (Nishimura *et al.*, 2009).

La pressione del ghiaccio è definita dall'Eq. 2, ottenuta integrando l'equazione di Clausius – Clapeyron:

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_l} P_l - \rho_i l \cdot \ln\left(\frac{T}{273.15}\right) \quad (2)$$

In cui l è il calore latente di fusione e ρ_i e ρ_l le densità di massa di ghiaccio e acqua. A partire dall'Eq. 2, si può riscrivere la suzione, precedentemente definita nell'Eq. 1, in funzione della temperatura:

$$s = P_i - P_l = \left(\frac{\rho_i}{\rho_l} - 1\right) P_l - \rho_i l \cdot \ln\left(\frac{T}{273.15}\right) \quad (3)$$

In ultimo, la relazione tra la quantità di acqua liquida e la suzione è definita dall'equazione di Van Genuchten (1980):

$$S_l(s) = S_{res} + (S_s - S_{res})[1 + (\alpha s)^n]^{-m} \quad (4)$$

In cui S_l è il grado di saturazione dell'acqua liquida, α , n e m sono parametri del modello e S_{res} è il grado di saturazione residuo. Sostituendo nell'Eq. 4 la definizione di suzione riportata nell'Eq. 3, si può legare il grado di saturazione del liquido direttamente alla temperatura.

4. Analisi numeriche e principali risultati

Il modello termo – idraulico accoppiato adottato per simulare il congelamento artificiale dei terreni si basa sulla risoluzione numerica, tramite il software agli elementi finiti COMSOL Multiphysics, del bilancio di massa d'acqua (Eq. 5) e del bilancio di energia termica (Eq. 6):

$$\frac{\partial}{\partial t}(n S_w \rho_w + n S_i \rho_i) + \nabla \cdot (\rho_w \underline{u}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[e_s \rho_s (1 - n) + e_w \rho_w S_w n + e_i \rho_i S_i n] + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T + j_w^e) = 0 \quad (6)$$

In cui n è la porosità, \underline{u} è la velocità di filtrazione dell'acqua, definita tramite l'equazione di Darcy; e_s , e_w e e_i sono le energie specifiche del solido, dell'acqua interstiziale e del ghiaccio rispettivamente; il termine $\lambda \nabla T$ rappresenta il flusso conduttivo in cui λ è la conduttività termica espressa in $W/m \cdot K$ e j_w^e rappresenta, invece, il flusso convettivo. Tramite la risoluzione contemporanea dell'Eq. 5 e dell'Eq. 6, si ottengono i valori della pressione dell'acqua p_w e della temperatura T in ogni punto del dominio.

4.1 Geometria e condizioni al contorno

In prima istanza, è stata modellata una sola sonda congelatrice tramite un dominio sia piano che assialsimmetrico, caratterizzato dalla presenza degli strati Tb1a e SG, le cui proprietà sono riportate in *Tabella 1*. La temperatura iniziale del terreno è pari a 19.5°C e la falda si trova ad una profondità di 5.35 m dal p.c.. La condizione al contorno termica applicata alla sonda è una temperatura variabile lungo la coordinata z, con un valore di -100°C in testa e -120°C al piede. Le condizioni al contorno imposte sono schematizzate in *Fig. 3*.

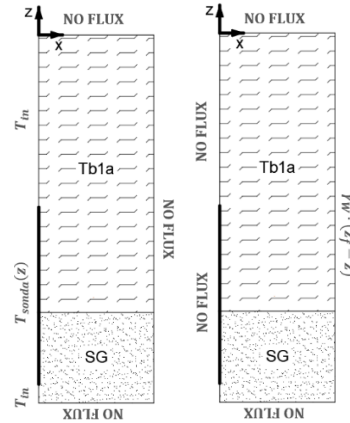


Fig. 3. (a) Condizioni al contorno termiche (b) Condizioni al contorno idrauliche

	Proprietà Fisiche		Proprietà Idrauliche	Parametri di Ritenzione			Proprietà Termiche	
	$\rho_s \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$n [-]$	$K_{sat} \left[\frac{m}{s} \right]$	$m [-]$	$P [kPa]$	$S_{w,res} [-]$	$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$
Tb1a	2577	0.41	$5 \cdot 10^{-6}$	0.5	150	0.15	1.2	800
SG	2778	0.437	$1.02 \cdot 10^{-4}$	0.375	15	0.05	1.7	1000

Tabella 1. Proprietà fisiche, termiche, meccaniche e parametri di ritenzione utilizzati nelle analisi numeriche.

4.2 Risultati

La *Fig. 4* mostra i risultati ottenuti in termini di evoluzione delle temperature nel tempo, alle distanze di 0.30 m e 0.43 m dalla sonda congelatrice e a differenti profondità dal p.c. ($z = -16.75$ m e $z = -28.85$ m).

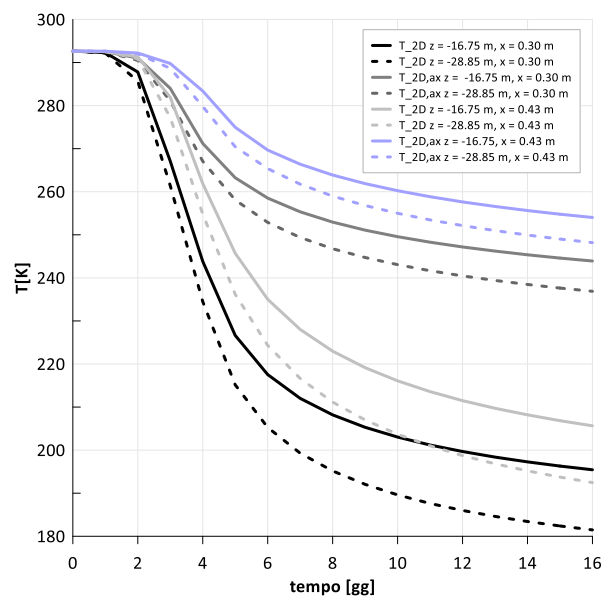


Fig. 4. Temperatura nel tempo per il modello piano e per quello assialsimmetrico.

Dalla Fig. 4 si può notare che le temperature registrate nel modello assialsimmetrico sono sempre maggiori di quelle registrate nel modello piano, poiché quest'ultimo non tiene conto della geometria finita della sonda in direzione y. Questo equivale a modellare la sonda come una parete congelante, che provoca un abbassamento maggiore delle temperature rispetto al caso assialsimmetrico. Inoltre, le temperature valutate alla profondità $z = -16.75$ m dal p.c. sono maggiori delle corrispondenti valutate a $z = -28.85$ m dal p.c., poiché la condizione al contorno termica imposta lungo la sonda congelatrice prevede un andamento della temperatura decrescente con la profondità. A partire dai risultati ottenuti, in ogni punto del dominio è stata determinata la funzione α , definita come il rapporto tra le temperature in Kelvin del modello piano e del modello assialsimmetrico:

$$\alpha = \frac{T_{2D}[K]}{T_{2D}^{ax}[K]} \in [0,1] \quad (7)$$

Le temperature sono state espresse in gradi Kelvin per ottenere un valore della funzione sempre compreso tra 0 e 1. Dal grafico riportato in Fig. 5 si può notare che la funzione α non è molto influenzata dalla profondità, poiché a grandi variazioni di z corrispondono piccole variazioni nei valori di α . Inoltre, per piccole distanze dalla sonda congelatrice, α assume un valore circa unitario, poiché le condizioni al contorno termiche imposte sono uguali nel caso piano e in quello assialsimmetrico. All'aumentare della distanza dalla sonda, la funzione decresce fino ad un valore minimo, che si registra all'incirca a $x = 0.30$ m, per poi riaumentare e tendere nuovamente ad 1, poiché anche a grandi distanze dalla sonda congelatrice la temperatura imposta al dominio è la stessa per i due modelli. Alla luce degli andamenti osservati, si è proceduto alla determinazione di un'espressione interpolante per la funzione α , dipendente dalla distanza x dalla sonda e dal tempo:

$$\alpha(x, t) = 1 + (1 - C(x)) \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(- \left(\frac{t}{A(x)} \right)^\beta \right) \text{ con } \begin{cases} \beta = 3.7 \\ A(x) = 2.29 + 6.19x \\ C(x) = \begin{cases} 1 - 1.1x & \text{se } x < 0.20 \text{ m} \\ 0.76 + 0.091x & \text{se } x \geq 0.20 \text{ m} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

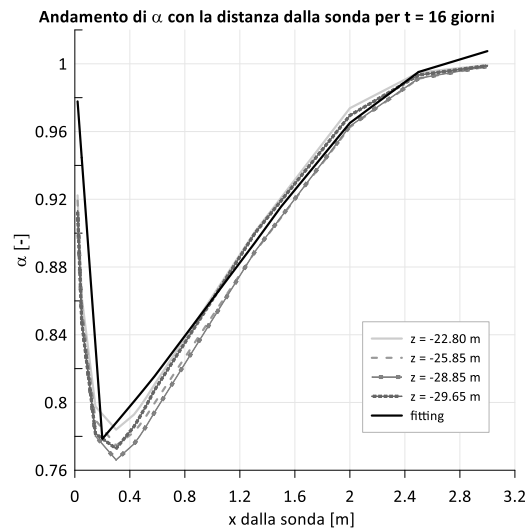


Fig. 5. Andamento di α a diverse profondità con la distanza dalla sonda per un tempo $t = 16$ giorni.

Potendo riprodurre un 2D verticale completo del Campo Prova “Fori Imperiali” con lo schema riportato in Fig. 1, utilizzando il coefficiente α appena calcolato, si può tenere conto dell'effetto tridimensionale sulle temperature dividendo le temperature ottenute dal modello piano 2D completo per la funzione di scala α :

$$T_{3D,eq} = \frac{T_{2D,completo}}{\alpha}$$

Nonostante la funzione α non tenga conto degli effetti di interazione tra le sonde, essendo stata calibrata da modelli a singola sonda, la previsione del 3D equivalente risulta in ottimo accordo con i dati di monitoraggio (Trevi S.p.A., 2011). La Fig. 6 mostra il confronto in termini di evoluzione delle temperature, in tre diversi punti del dominio, tra i dati di monitoraggio (in grigio scuro), le previsioni ottenute con il modello 2D completo del campo prova (in grigio chiaro) e le previsioni che tengono conto dell'effetto tridimensionale tramite la funzione di scala (in nero).

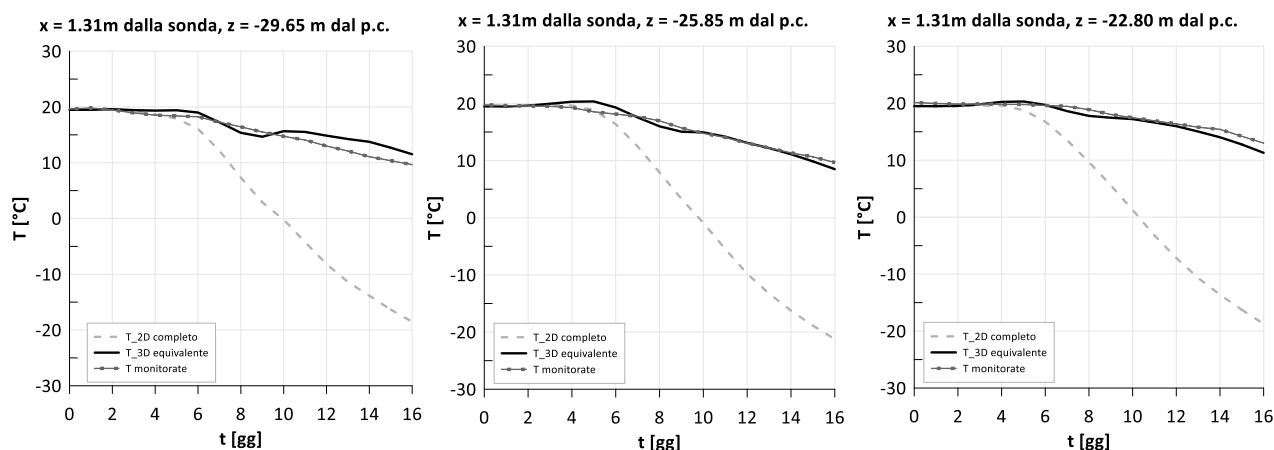


Fig. 6. Confronti tra le temperature monitorate, del 2D completo e del 3D equivalente a $x = 1.31$ m dalla sonda, per tre diverse profondità.

5. Conclusioni

Le temperature monitorate durante il congelamento artificiale dei terreni eseguito per il campo prova “Fori Imperiali” hanno permesso di studiare un approccio semplificato alla modellazione del fenomeno, che riesce a tener conto degli effetti tridimensionali di sito senza la necessità di realizzare modelli 3D al finito, i quali richiederebbero un onere computazionale notevole. Tale approccio semplificato si basa sulla definizione di una funzione di scala α , calibrata a partire dai risultati di modelli piani e assialsimmetrici di una singola sonda, installata nella stratigrafia in esame. Il confronto tra le previsioni del modello proposto e le temperature monitorate in sito è molto soddisfacente, nonostante α non tenga conto degli effetti di interazione tra sonde congelatrici.

Bibliografia

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003). “Frozen ground engineering”. John Wiley & Sons.
- Nishimura S., Gens A., Olivella S. & Jardine R.J. (2009). “THM – coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application”, *Géotechnique*, 59, No. 3, 159-171.
- Van Genuchten M.T. (1980). “A closed – form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- 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.
- 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. (2011). Allegati relativi al progetto del campo prova del congelamento artificiale “Fori Imperiali”.
- Trevi S.p.a. (2013). “Congelamento artificiale dei terreni – tecnologia”.