

INTERPRETAZIONI E SIMULAZIONI NUMERICHE DEL CAMPO PROVA “PIAZZA VENEZIA” PER IL CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI

Luca Schillaci (luca.schillaci@alumni.uniroma2.eu)
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Giulia Guida (giulia.guida@uniroma2.it)
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Arianna Pucci (arianna.pucci@uniroma2.it)
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Eliano Romani (e.romani@metrocspace.com)
Metro C S.C.p.A.

Francesca Casini (francesca.casini@uniroma2.it)
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

ABSTRACT. Questo articolo riporta l’interpretazione dei dati di monitoraggio del campo prova per il congelamento artificiale dei terreni realizzato in prossimità della futura stazione “Piazza Venezia” della Linea C della Metropolitana di Roma. L’analisi dei dati della campagna d’indagini in laboratorio e in sito ha consentito di definire un accurato modello geotecnico di sottosuolo. Tramite simulazioni numeriche termo – idrauliche accoppiate del processo di congelamento artificiale dei terreni è stato invece possibile interpretare a ritroso i dati di monitoraggio a disposizione. La condizione al contorno termica del modello applicata alle sonde congelatrici per la previsione del comportamento osservato è stata valutata come soluzione del problema di trasmissione del calore tra il fluido refrigerante e il terreno.

1. INTRODUZIONE

La tecnica del congelamento artificiale dei terreni (AGF) è una tecnica di impermeabilizzazione e consolidamento temporaneo per gli scavi sottofalda in terreni sciolti o rocce frantumate, volti alla realizzazione di gallerie, pozzi e cunicoli di collegamento (e.g. Harris, 1995; Viggiani & Casini, 2015). La tecnica dell’AGF prevede l’installazione di sonde congelatrici nell’intorno della sezione di scavo dove circola un fluido refrigerante. Il congelamento attorno alle sonde congelatrici avviene prevalentemente in direzione radiale, portando alla formazione di vere e proprie colonne di ghiaccio che una volta unite tra di loro consentono di creare un guscio di terreno congelato, impermeabile e più resistente dal punto di vista meccanico (Andersland et al., 2003, Trevi S.p.A., 2013). Nel campo prova di “Piazza Venezia” si è utilizzato un impianto di congelamento a circuito aperto che utilizza come liquido refrigerante azoto compresso allo stato liquido, stoccato all’interno di opportuni silos ad una temperatura di $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. L’azoto liquido circola all’interno delle sonde congelatrici scambiando frigorifici con il terreno e al termine del ciclo, viene rilasciato in atmosfera allo stato gassoso (Colombo, 2010). Rispetto alle altre tecniche tradizionali di consolidamento dei terreni, come iniezioni chimiche cementizie, ombrelli di infilaggio e *jet grouting*, l’AGF ha un minore impatto ambientale, in quanto non rilascia nel terreno sostanze estranee.

2. CAMPO PROVA “PIAZZA VENEZIA”

Il campo prova “Piazza Venezia” è stato realizzato per valutare l’efficacia della tecnica del congelamento artificiale dei terreni come metodo per impermeabilizzare e sostenere lo scavo dei terreni presenti in sito, nell’ambito della tratta T3 della Linea C della Metropolitana di Roma. Il campo prova è costituito da 21 sonde congelatrici disposte verticalmente in due file (Fig. 1a). Le sonde congelatrici sono state coibentate esternamente con isolante Armaflex per realizzare la sagoma esterna di un’ipotetica galleria, mostrata in Figura 1.b. All’interno del campo sono state installate 13 canne termometriche per il monitoraggio delle temperature, ciascuna dotata di sei sensori posti a sei differenti profondità.

La stratigrafia del campo prova è stata dedotta dall’interpretazione delle indagini geologiche e geotecniche eseguite nel corso degli anni e può essere schematizzata in sei strati:

- STRATO R: terreni di riporto composti da una sabbia limosa di natura piroclastica.

- STRATO Ag1a: terreno alluvionale composto da argille limose e limi argillosi, debolmente sabbiosi, con lenti e sottili livelli discontinui di sabbia fina e, a luoghi, con resti di sostanza organica.
- STRATO Ag1b: terreno alluvionale composto da argille limose e limi argillosi, debolmente sabbiosi, con lenti e sottili livelli discontinui di sabbia fina e con frequenti livelli di sostanza organica vegetale.
- STRATO Ag2a: terreno alluvionale composto da argille limose e limi argillosi grigi, debolmente sabbiosi, con sporadici lenti e sottili livelli discontinui di sabbia fina e una maculazione torbosa nerastra e rari livelli sottilissimi di materiale organico.
- STRATO Dtf: Deposito detritico molto eterogeneo con un'inclinazione della superficie di tetto e di letto mediamente dell'ordine dei 20° costituito da sabbie medio-fini, sabbie con ghiaia poligenica, limi sabbioso-argillosi e frammenti/blocchi di tufo vulcanico.
- STRATO Apl: Deposito di argille pleistoceniche che costituisce il *bedrock* per tutta l'area romana.

I risultati delle misure piezometriche hanno portato all'individuazione di tre livelli di falda che generano un regime di filtrazione dall'alto verso il basso in corrispondenza dello strato Ag2a, Dtf e Apl. In particolare, il terreno Ag2a presenta un livello della falda alla profondità di circa 7.06 m da piano campagna, il terreno Dtf ad una profondità di circa 10.11 m da piano campagna e il terreno Apl ad una profondità di 16.08 m da piano campagna. Il regime delle pressioni interstiziali è riportato in Figura 1.c. L'ipotetica galleria dovrà attraversare gli strati di Ag2a, Dtf e Apl (vedi Fig. 1b). La presenza di uno strato eterogeneo sciolto sottofalda, quale il Dtf, particolarmente critico per lo scavo di gallerie, è il motivo per cui la tecnica dell'AGF è stata presa in considerazione.

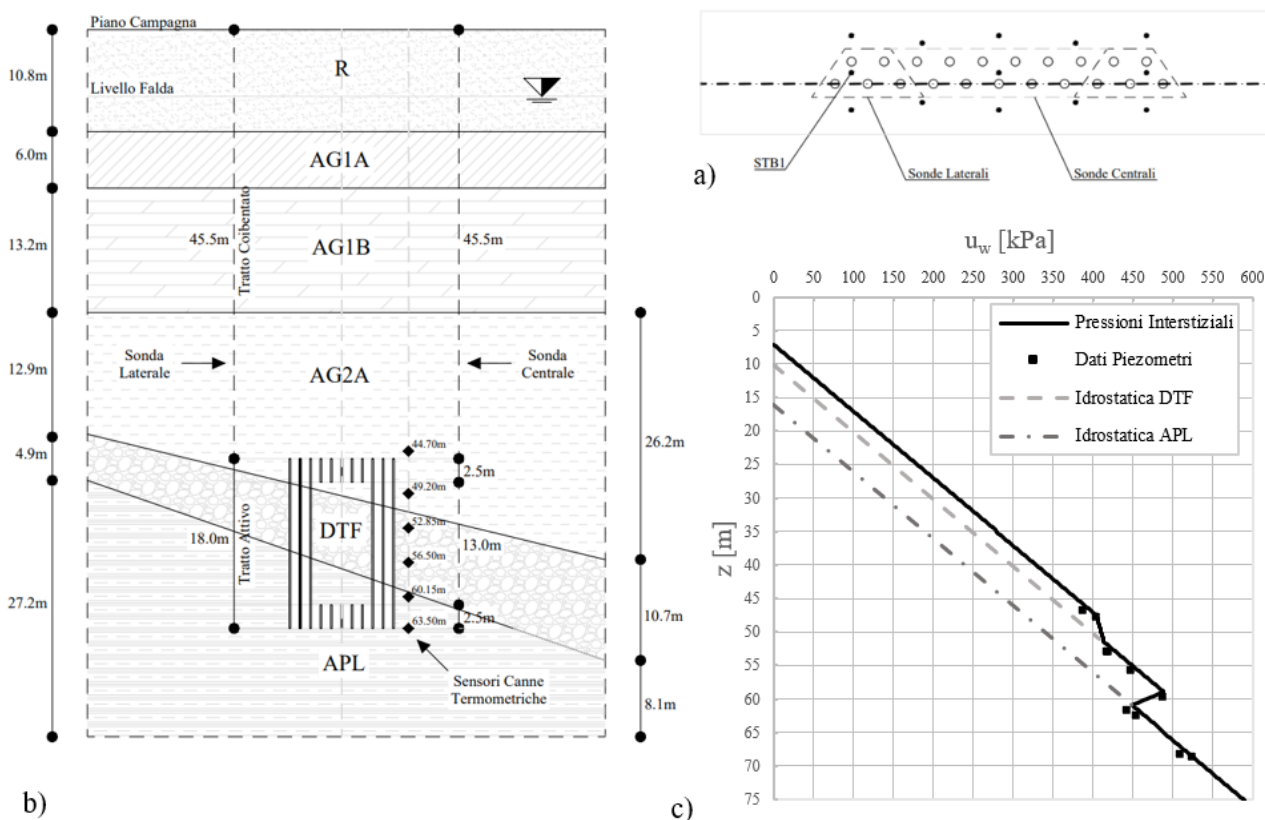


Figura 1. (a) Disposizione delle canne congelatrici e delle canne termometriche del campo prova "Piazza Venezia"; (b) Stratigrafia del campo prova "Piazza Venezia" con posizione dei tratti attivi delle sonde congelatrici e dei sensori delle canne termometriche; (c) Regime delle pressioni interstiziali di Piazza Venezia ottenuto dall'analisi dei dati piezometrici.

3. ANALISI NUMERICHE DEL CAMPO PROVA "PIAZZA VENEZIA"

Per simulare il processo del congelamento artificiale dei terreni nel campo prova di "Piazza Venezia" si è adottato un modello termo-idraulico accoppiato in grado di tenere in conto del cambiamento di fase dell'acqua in ghiaccio per effetto della riduzione della temperatura dovuto alla circolazione di fluido refrigerante nelle sonde congelatrici e della filtrazione.

La geometria del campo prova con sonde verticali e la presenza di una filtrazione dall'alto verso il basso imporrebbe uno studio tridimensionale del processo di congelamento, molto oneroso dal punto di vista computazionale. In questo studio si è invece adottato un approccio di modellazione semplificato che consiste nel modellare una sezione verticale del campo prova, il cui schema è riportato in Figura 2a, considerando la fila di sonde indicata con la linea tratto-punto in Figura 1.a. Tale modello tiene conto del particolare regime di filtrazione dettato dalla distribuzione delle pressioni interstiziali di Figura 1.b. Gli effetti della realtà tridimensionale sono tenuti in conto tramite una funzione di scala α per le temperature. Per maggiori dettagli sull'implementazione, i dati adottati nel modello e sull'approccio di modellazione si rimanda a Schillaci (2023).

La condizione al contorno termica applicata in prossimità delle sonde congelatrici è stata dettata da uno studio di trasmissione del calore per convezione del fluido refrigerante che scambia calore con l'esterno e per conduzione attraverso tutti gli strati che separano l'interno della sonda congelatrice dal terreno (riportati in Figura 2.b).

Le sonde congelatrici sono degli scambiatori di calore composti da due tubi concentrici dei quali quello esterno a fondo chiuso mentre quello interno a fondo aperto. Durante la fase di congelamento, l'azoto percorre tutta la lunghezza della sonda nel tubo centrale e ritorna verso l'impianto di distribuzione percorrendo la corona circolare che si viene a formare tra il tubo esterno e il tubo interno (Figura 2.b). La variazione di temperatura del fluido convettore $T_{F.C.}$ lungo l'intercapedine esterna della sonda è stata ricavata integrando l'equazione differenziale ottenuta eguagliando il calore assorbito dal fluido e calore scambiato per convezione. In Figura 2.c, si osserva come la temperatura del fluido convettore $T_{F.C.}$ varia con un andamento quasi lineare da un valore di circa -125°C al fondo foro a una temperatura di scarico assunta pari a -100°C . Figura 2.c riporta anche le temperature valutate all'interfaccia con il terreno per una sonda laterale e centrale ottenute risolvendo un problema di conduzione termica in direzione radiale (Fig. 2b riporta anche i valori delle conducibilità termiche utilizzate per il calcolo). La presenza di strati intermedi tra il tubo esterno della sonda congelatrice e il terreno fa sì che la temperatura da applicare come condizione al contorno nelle simulazioni numeriche, sia di circa 50°C superiore a quella del fluido refrigerante. Nei tratti coibentati delle sonde congelatrici la temperatura all'interfaccia con il terreno rimane simile a quella indisturbata $T_{soil} = 22^{\circ}\text{C}$ (Figura 2.c). Per semplificare il modello numerico del campo prova "Piazza Venezia" si assume per ipotesi un perfetto isolamento. Nei tratti attivi delle sonde congelatrici la temperatura assume un valore di circa -70°C . Le sonde laterali presentano una lunghezza attiva di 18m necessaria a realizzare le "pareti del muro congelato", mentre le sonde centrali presentano due tratti attivi di spessore 2.50m a partire dalle profondità -45.50m e -61m e un tratto coibentato lungo 13m a partire da -48m , per realizzare l'arco rovescio e la calotta della sagoma esterna della galleria.

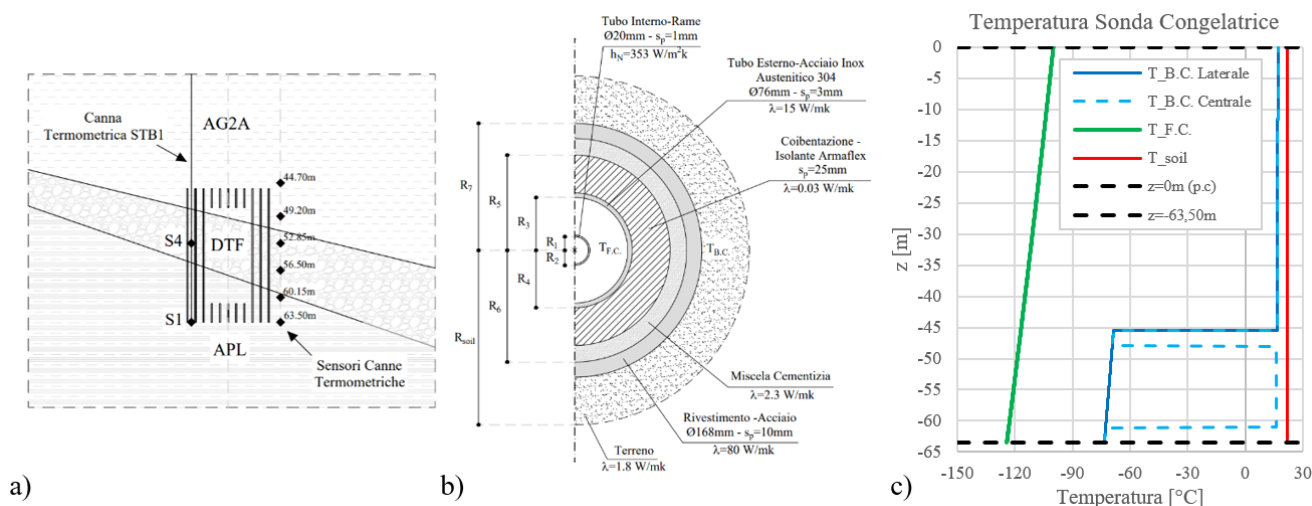


Figura 2. (a) Schema del modello 2D verticale, con la posizione dei sensori S1 e S4 della canna STB1; (b) Sezione trasversale della canna congelatrice con tutti gli strati considerati nel calcolo della trasmissione del calore; (c) Profilo delle temperature del fluido refrigerante nel tubo esterno della sonda congelatrice e all'interfaccia con il terreno per le sonde laterali e centrali.

Figura 3.a mostra il *contour* delle temperature dopo un tempo di simulazione di 16 giorni. Si osserva come lo strato centrale (Dtf) presenta una maggiore dispersione della temperatura rispetto agli strati Ag2a e Apl. Questo risultato è dovuto al fatto che la maggiore conducibilità termica e idraulica dello strato di Dtf permettono un più rapido processo di trasmissione del calore nel terreno.

Le Figure 3.b e 3.c mostrano il confronto tra le temperature simulate dal modello 2D verticale, dal modello "3D equivalente" applicando la funzione di scala α , e le temperature monitorate della canna termometrica STB1

(Trevi S.p.A., 2020) nel sensore alla profondità -63.50m (strato Apl) e -52.85m (strato Dtf) rispettivamente. Si osserva come il modello 2D verticale, non tenendo in conto della tridimensionalità del processo, sottostimi sistematicamente i valori delle temperature in confronto ai dati di monitoraggio, specialmente partire dal giorno 5. L'applicazione della funzione di scala α nel modello 3D equivalente consente invece un migliore accordo tra le previsioni di modello e le temperature monitorate in sito. La minore conducibilità termica e idraulica dello strato di Apl, da un lato rende il processo di trasmissione del calore più lento rispetto al Dtf, d'altro canto permette di raggiungere temperature minori ($T < -50^{\circ}\text{C}$). Un'ulteriore differenza tra i dati di monitoraggio e le simulazioni numeriche si ha nell'evoluzione temporale delle temperature a partire dal giorno 9. Nelle simulazioni si osserva il raggiungimento di un equilibrio termico, mentre nei dati di monitoraggio si osserva un generale incremento delle temperature dovuto a una riduzione della portata circolante di azoto liquido all'interno delle sonde congelatrici. In questa prima versione del modello non è stato tenuto in conto delle variazioni di portata del fluido refrigerante.

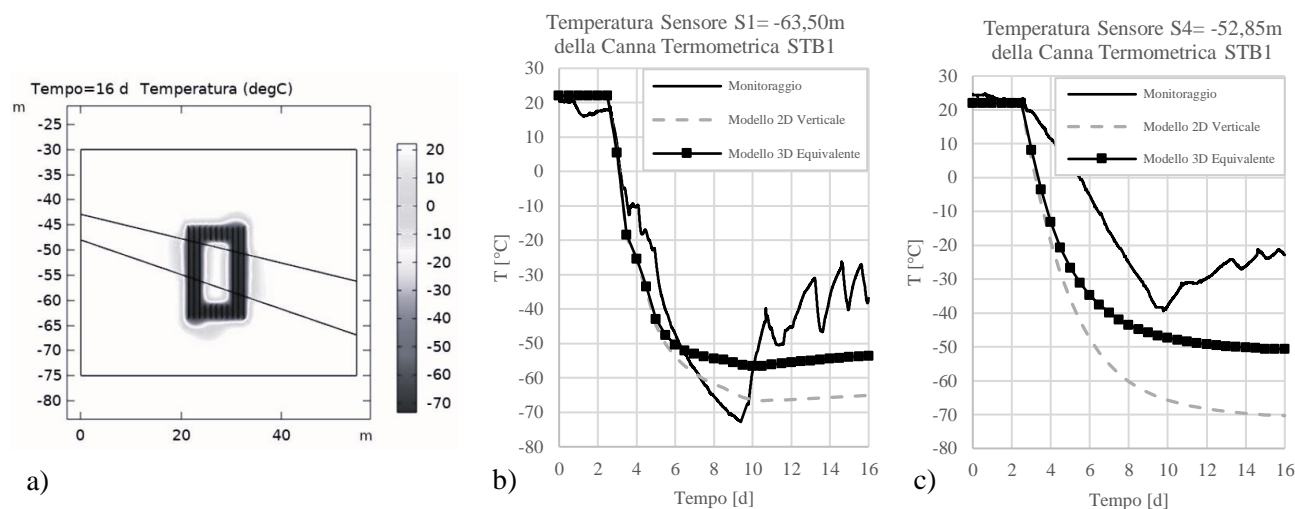


Figura 3. (a) Contour della temperatura del modello 2D verticale ad un tempo di simulazione $t=16d$; (b) Confronto temperature monitorate e temperature simulate: modello 2D verticale, 3D equivalente del sensore S1; (c) Confronto temperature monitorate e temperature simulate: modello 2D verticale, 3D equivalente del sensore S4.

4. CONCLUSIONI

La risoluzione del problema termico di convezione e conduzione ha permesso di individuare un andamento della temperatura lungo la lunghezza della sonda congelatrice da applicare come condizione al contorno termica nella simulazione numerica del campo prova di "Piazza Venezia". L'interpretazione dei dati di monitoraggio ha permesso di sviluppare un modello termo-idraulico accoppiato in grado di simulare il processo di congelamento artificiale dei terreni durante la fase di attivazione ad azoto liquido in buono accordo con i dati di monitoraggio delle temperature a disposizione.

5. BIBLIOGRAFIA

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003). Frozen ground engineering. John Wiley & Sons
 Colombo, G. (2010) Il congelamento artificiale del terreno negli scavi della metropolitana di Napoli: valutazioni teoriche e risultati sperimentali.
 Harris, J. S. (1995). Ground freezing in practice. Thomas Telford.
 Schillaci, L. (2023). Interpretazione dei dati di monitoraggio del campo prova "Piazza Venezia": analisi termo-idrauliche con filtrazione. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Roma Tor Vergata.
 Trevi S.p.A. (2020). Allegati relativi al progetto del campo prova del congelamento artificiale "Piazza Venezia".
 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.