

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

XIX CONVEGNO NAZIONALE
DI GEOTECNICA



IL MIGLIORAMENTO E IL RINFORZO
DEI TERRENI E DELLE ROCCE

Pavia, 19-21 Settembre 1995

ESTRATTO

VOLUME II

SULLA SCELTA DI ALCUNI PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL CONGELAMENTO ARTIFICIALE DEI TERRENI

L. LOCATELLI¹, G. GIODA²

¹ Rodio S.p.A. - Casalmaiocco (MI)

² Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano - Milano

SOMMARIO

Vengono presentati i risultati di uno studio parametrico, basato sul metodo degli elementi finiti, relativo all'avanzamento del fronte congelato in un terreno sabbioso saturo in presenza di una serie illimitata di sonde verticali. In particolare, viene esaminata l'influenza che tre parametri (il diametro delle sonde, il loro interasse e la temperatura del fluido congelante) hanno sul calore totale sottratto e sul tempo necessario a raggiungere una predefinita condizione di congelamento. Sulla base dei risultati delle analisi viene anche ricavata una semplice relazione che fornisce questo tempo in funzione dei tre parametri considerati.

1. INTRODUZIONE

Il congelamento artificiale dei terreni, basato sull'uso di sonde entro le quali viene fatto circolare fluido a bassa temperatura, rappresenta una delle tecniche utilizzate per il consolidamento di terreni saturi nell'esecuzione di gallerie o di scavi superficiali sotto falda [Andersland et al. 1989].

In considerazione dell'onere economico che questo tipo di trattamento comporta, appare utile valutare in fase progettuale l'influenza che alcuni parametri significativi hanno sul tempo richiesto dal trattamento e sul calore totale sottratto al terreno.

A questo fine e' stato condotto uno studio parametrico per evidenziare l'influenza sulle due grandezze sopra indicate di tre parametri che caratterizzano l'intervento, ed i cui valori vanno scelti durante la sua pianificazione. In particolare, come parametri significativi si sono considerati il diametro delle sonde, il loro interasse e la temperatura del fluido congelante.

La non linearita' del problema [Frikvik, 1980] legata, da un lato, alla dipendenza delle caratteristiche termiche del terreno dalla temperatura e, dall'altro, alla variazione nel tempo della geometria della zona congelata, suggerisce

di basare la soluzione su metodi di analisi di tipo numerico [Lewis, Morgan, 1983]. In particolare, tra questi e' stato scelto quello degli elementi finiti [Voller et al., 1990; Zabaras, Ruan, 1989].

Le analisi che verranno discusse nel seguito si riferiscono ad una sabbia satura gia' considerata in un precedente studio [Gioda, Locatelli, Gallavresi, 1992] che comprende una parte sperimentale, basata su di una serie di prove di congelamento in laboratorio, ed una numerica, nella quale i dati sperimentali vengono paragonati con i risultati di analisi ad elementi finiti. In detto studio vengono anche descritte le caratteristiche del programma ad elementi finiti sviluppato per studiare l'avanzamento del fronte congelato e la via seguita per determinare i parametri termici del terreno.

La sabbia utilizzata per le prove di congelamento in laboratorio ha contenuto d'acqua compreso tra 0.287 e 0.30, peso di volume secco tra 14.3 e 14.5 kN/m³ e porosita' tra 0.426 e 0.436. Nel citato lavoro sono riportati i valori delle caratteristiche termiche del terreno, in particolare della conducibilita' termica k , della capacita' termica c e del calore latente L . Sono anche presentate le relazioni, non riportate qui per brevi-

ta', introdotte per tener conto della variazione della conducibilita' termica con la temperatura, aspetto da non trascurarsi quando si opera a temperature sensibilmente inferiori a quella di congelamento.

2. SCHEMA DI CALCOLO

Le analisi ad elementi finiti si riferiscono ad una serie illimitata di sonde congelanti verticali, poste ad interasse costante "i" lungo una linea retta, ed aventi il medesimo diametro D e la medesima temperatura T.

Ritenendo la lunghezza delle sonde assai maggiore del loro diametro, e trascurando la variazione di temperatura del fluido congelante al loro interno, e' possibile studiare la propagazione del fronte congelato nel terreno saturo per mezzo di analisi bidimensionali condotte nel piano normale all'asse delle sonde stesse.

Una prima grandezza oggetto dello studio parametrico e' il tempo t richiesto per completare il trattamento di congelamento, e che viene sinteticamente indicato nel seguito come "tempo di congelamento". Esso e' definito come il tempo necessario perche' l'isoterma -5°C raggiunga la distanza di 50 cm dalla retta congiungente i centri delle sonde.

Questa definizione si basa sulla considerazione che il trattamento raggiunge la condizione "di regime" quando lo spessore di terreno congelato supera il metro, condizione ritenuta adeguata a garantire l'efficacia del trattamento in molti casi pratici.

La seconda grandezza oggetto dello studio parametrico e' il calore totale Q sottratto al terreno durante il tempo t, quantita' legata al "costo" in termini energetici richiesto per raggiungere la condizione di regime del trattamento.

Per determinare l'influenza che i parametri geometrici "i" e D, e la temperatura T, hanno sul tempo di congelamento t e sul calore sottratto Q, sono state eseguite 120 analisi ad elementi finiti. In esse vengono considerati 4 diversi diametri delle sonde, scelti tra quelli reperibili in commercio, 6 diversi interassi e 5 valori della temperatura del fluido congelante.

D [mm] = 60.3, 88.9, 114.3, 139.7
i [m] = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6

T [$^{\circ}\text{C}$] = -20, -30, -40, -80, -180

Le due temperature piu' basse si riferiscono all'uso di azoto liquido, a differente regolazione, come fluido congelante, mentre le restanti tre si riferiscono all'uso di salamoia.

La particolare geometria del problema in esame consente di discretizzare in elementi finiti solo un quarto dell'area compresa tra due sonde contigue nel piano orizzontale. La geometria dei reticoli predisposti dipende dai valori del diametro e dell'interasse delle sonde considerati nell'analisi.

Ai nodi appartenenti al perimetro della sonda viene imposta la temperatura T del fluido congelante. Il bordo del reticolo coincidente con la linea congiungente i centri delle sonde ed i due bordi ad esso normali sono considerati, per simmetria, impermeabili al flusso termico. Sul bordo esterno del reticolo, parallelo alla retta passante per i centri delle sonde e situato a 10 m da questa, e' imposta la temperatura ambiente di 20°C . La medesima temperatura e' assegnata, come condizione iniziale, a tutti i nodi del reticolo.

3. VALUTAZIONE DEL "TEMPO DI CONGELAMENTO" t

I risultati delle analisi svolte possono essere riassunti attraverso diagrammi che forniscono, per i valori della temperatura T e del diametro D considerati, il tempo di congelamento t in funzione dell'interasse "i" delle sonde. Questi diagrammi, che vengono mostrati in fig.1 per $D=114.3$ mm, risultano pressoché lineari se t viene riportato in scala logaritmica.

Si noti che il tempo di congelamento per interasse nullo delle sonde (cf. fig. 1), indicato nel seguito con t_0 , e' ottenuto da un'analisi monodimensionale dove la sonda di sezione circolare e' sostituita da una "trincea" congelante di spessore costante pari a D.

Se i risultati ottenuti per le varie temperature vengono rappresentati in forma adimensionale, dividendo il tempo t per il corrispondente valore di t_0 , essi possono essere interpolati per mezzo di un'unica retta la cui pendenza α risulta con accettabile approssimazione indipendente dal diametro D delle sonde (vedi fig.2a,b).

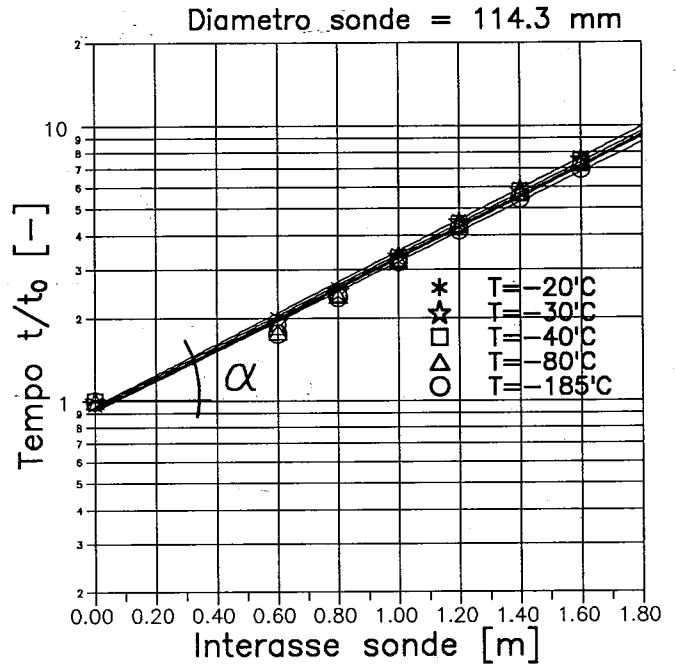
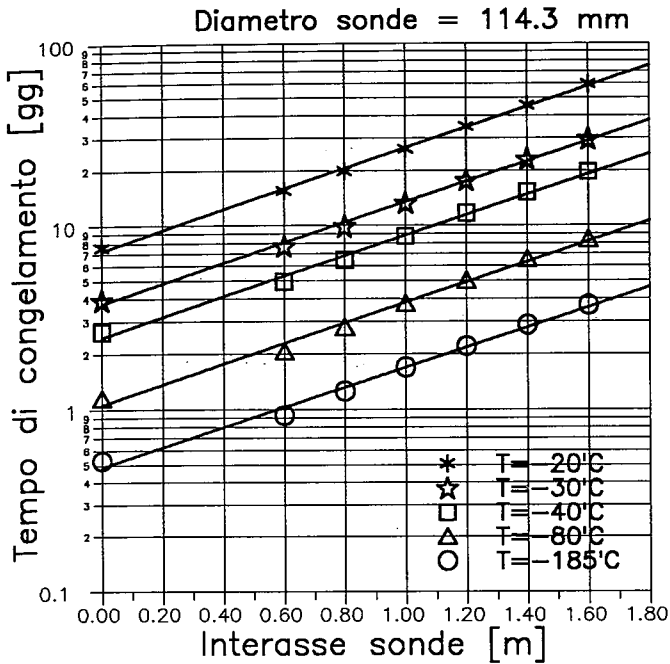


Fig. 1 Legame tra il "tempo di congelamento" e l'interasse delle sonde.

I risultati del calcolo sono quindi esprimibili tramite la seguente relazione che fornisce il tempo di congelamento t in funzione dell'interasse "i" delle sonde, della costante α e del tempo t_0 , dipendente dal diametro delle sonde D e dalla loro temperatura T ,

$$t = t_0(T, D) \cdot e^{\alpha i} \quad (1)$$

Per ricavare la funzione $t_0(T, D)$ e' opportuno diagrammare i valori di t in funzione del diametro D delle sonde che, si ricorda, coincide con lo spessore delle trincee continue introdotte nelle analisi monodimensionali dalle quali sono stati ricavati i valori di t .

Come mostrato in fig. 3 i dati sono rappresentabili con buona approssimazione attraverso un insieme di rette. Le intercette t_{00} sull'asse delle ordinate sono ottenibili tramite analisi monodimensionali nelle quali lo spessore della trincea congelante tende a zero e la temperatura T e' imposta direttamente sul bordo del reticolo di elementi finiti che coincide con la retta lungo la quale sono disposte le sonde.

Adimensionalizzando ogni diagramma in fig. 3 rispetto al corrispondente valore t_{00} , e' possibile raggruppare i dati su di un'unica retta di pendenza β come mostrato in fig. 4.

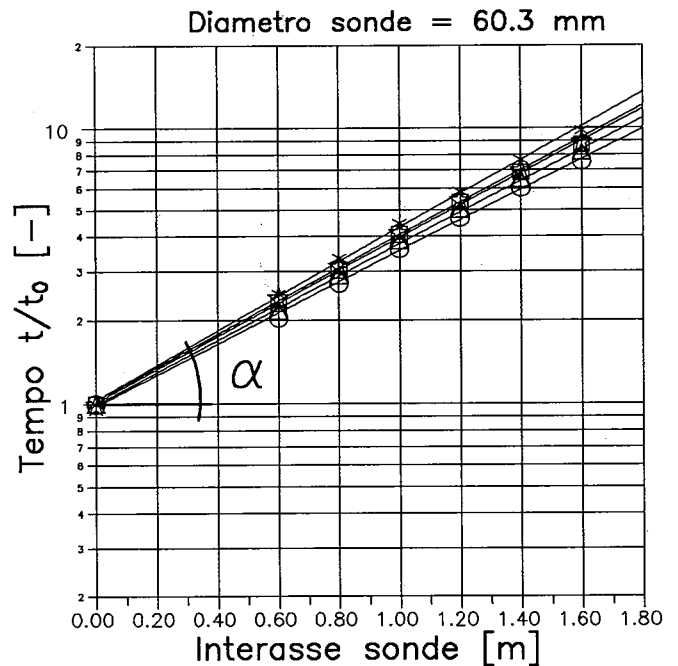


Fig. 2 Legame tra il "tempo di congelamento" adimensionalizzato e l'interasse delle sonde per due valori del diametro.

Il parametro β risulta indipendente dal diametro D delle sonde, dalla loro temperatura T e dal loro interasse "i", mentre t_{00} dipende dalla temperatura T .

Su questa base e' possibile introdurre la seguente espressione per t_0

$$t_0 = t_{00}(T) \cdot (1 - \beta D) \quad (2)$$

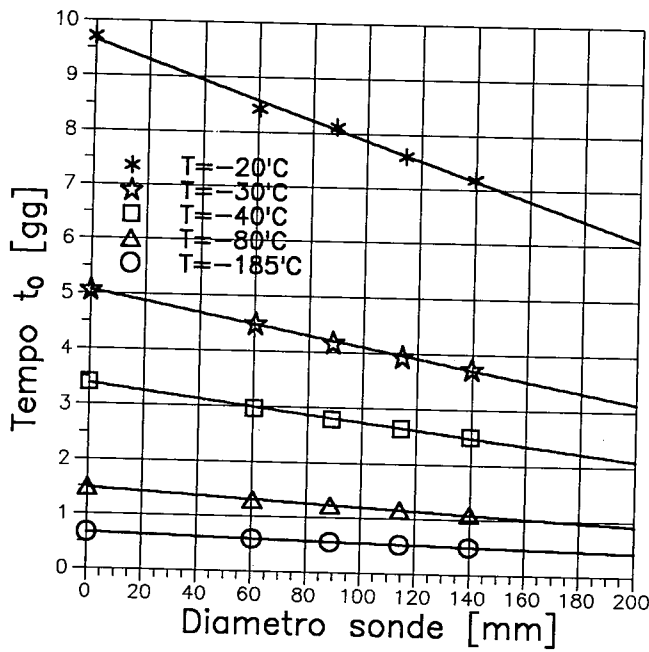


Fig. 3 Legame tra il "tempo di congelamento" per interasse nullo ed il diametro delle sonde.

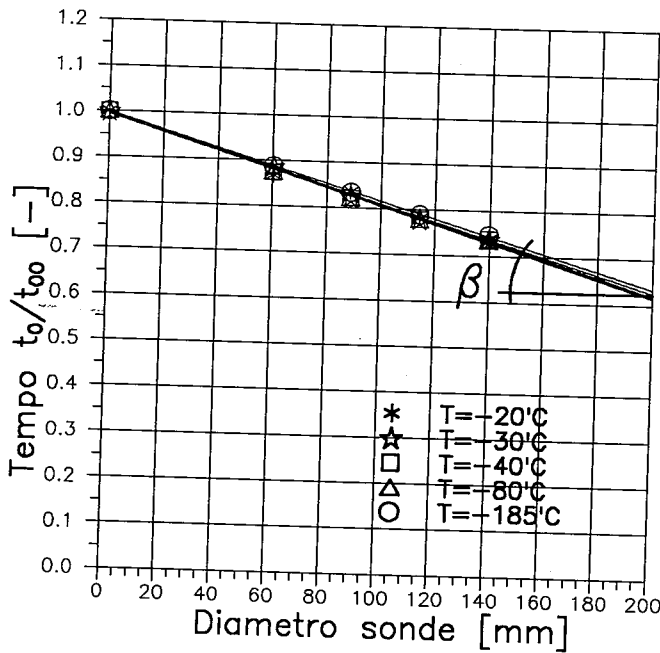


Fig. 4 Rappresentazione in forma adimensionale dei diagrammi in fig.3.

Infine, sostituendo l'eq.(2) nella (1), si ottiene una relazione approssimata che lega il tempo di congelamento t al diametro D e all'interasse " i " delle sonde, alla temperatura T del fluido congelante ed al tempo di congelamento $t_{00}(T)$, determinato per $D=i=0$,

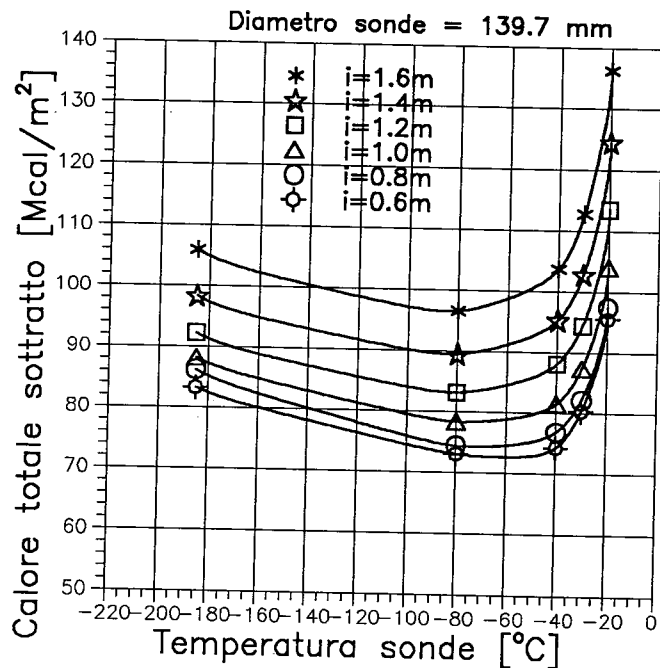


Fig. 5 Legame tra il calore totale sottratto durante il "tempo di congelamento" e la temperatura delle sonde.

$$t = t_{00}(T) \cdot (1 - \beta D) \cdot e^{\alpha i} \quad (3)$$

Si noti che i coefficienti α e β nella eq.(3) dipendono dalle caratteristiche termiche del terreno saturo, ma sono indipendenti dai parametri D , " i " e T specifici della procedura di congelamento utilizzata.

Da quanto esposto segue che le costanti α e β nell'eq.(3), ed il tempo $t_{00}(T)$, possono essere valutati attraverso tre analisi non lineari di congelamento.

La prima, bidimensionale piana, viene eseguita adottando valori di D , " i " e T all'interno del rispettivo campo di variazione. La seconda, monodimensionale, considera un trincea congelante continua ($i=0$) avente spessore e temperatura coincidenti con i valori di D e T prima considerati. Le due analisi consentono di definire due punti della retta in fig.2, e quindi la sua pendenza α .

Una terza analisi monodimensionale condotta per $D=0$ consente di definire il valore di $t_{00}(T)$ e della pendenza β della retta in fig.4.

Avendo determinato i coefficienti incogniti, e' ora possibile utilizzare l'eq.(3) per valutare il tempo di congelamento conseguente a differenti scelte di D ed " i ", senza ricorrere ad ulterio-

ri analisi non lineari di congelamento. Solo nel caso in cui si desideri ottenere t per un differente valore della temperatura T e' necessario condurre una ulteriore analisi monodimensionale con $D=i=0$, adottando il prescelto valore di T , per determinare il tempo $t(T)$.

Risulta che l'uso della relazione approssimata (3) comporta una sensibile riduzione del numero di analisi ad elementi finiti necessarie. Infatti le 120 analisi non lineari bidimensionali che sono state condotte nel caso in esame possono essere sostituite da 3 analisi iniziali (una bidimensionale e due monodimensionali) eseguite per un prescelto valore della temperatura T . Ad esse si aggiunge una sola analisi monodimensionale per ogni ulteriore valore della temperatura. Cioe', nel caso di 5 differenti temperature delle sonde, e' possibile ridurre il numero totale di calcoli non lineari a 6 analisi monodimensionali e ad 1 bidimensionale.

4. VALUTAZIONE DEL CALORE TOTALE Q SOTTRATTO NEL TEMPO t

Un secondo parametro considerato in questo studio e' rappresentato dal calore totale Q sottratto al terreno durante il tempo di congelamento t . Esso, come osservato in precedenza, e' legato al "costo" in termini energetici che e' necessario sostenere per portare il trattamento alla sua condizione di regime.

Rappresentando il calore sottratto Q in funzione della temperatura delle sonde T si osserva che esso dipende dall'interasse delle sonde e che, in particolare, esso cresce all'aumentare di tale interasse. A titolo di esempio in fig.5 sono mostrati i diagrammi ottenuti per $D=139.7$ mm.

Si nota anche che, per un definito diametro, le curve presentano un minimo in corrispondenza di una temperatura che non appare sensibilmente influenzata dall'interasse delle sonde.

Da cio' segue, ad esempio, che un trattamento a bassa temperatura basato su azoto liquido, pur riducendo sensibilmente il tempo di congelamento, non necessariamente comporta un consumo energetico inferiore a quello ottenibile adottando una salamoia a temperatura piu' elevata.

Questi risultati potrebbero quindi essere utilizzati nella scelta dell'in-

terasse e della temperatura che consentono di ridurre entro limiti opportuni il calore sottratto dal terreno durante la fase transitoria del trattamento, senza tuttavia incrementare eccessivamente il tempo richiesto per raggiungere la situazione di regime.

5. CONCLUSIONI

E' stata discussa una procedura semplificata, basata su di un numero contenuto di analisi numeriche, che puo' consentire durante la pianificazione di un intervento di congelamento artificiale di valutare l'influenza di alcuni parametri significativi sul tempo necessario per portare "a regime" il trattamento.

Su questa base si potrebbe tentare di definire una via per "ottimizzare" il trattamento dal punto di vista puramente tecnico, tenendo anche conto del consumo energetico richiesto nella sua fase transitoria.

Ovviamente altri fattori entrano nella definizione del costo globale dell'intervento, come quelli di natura economica (noleggio delle attrezzature, costi di trasporto e approvvigionamento, etc.) o quelli relativi alla durata complessiva del congelamento per consentire l'esecuzione dei lavori. I risultati di questo studio possono essere quindi visti solo come un contributo parziale, necessariamente limitato ad alcuni aspetti tecnici, verso la scelta dei parametri che entrano nella pianificazione degli interventi di congelamento artificiale dei terreni.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. F. Gallavresi per gli utili suggerimenti forniti durante l'impostazione dello studio parametrico.

BIBLIOGRAFIA

- Andersland O.B., Gallavresi F., Goto S., Saareleinen S., Slunga E. (1989) General report of the specialty session on ground freezing. Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol.4, 2657-2672.
- Frivik P.E. (1980) State-of-the-art report on ground freezing: thermal properties, modelling of processes

- and thermal design. Proc.2nd Int. Symp.on Ground Freezing, Trondheim, Vol.1, 354-373.
- Lewis R.W., Morgan K. (edts.) (1983) Numerical methods in thermal problems. Pineridge Press, Swansea, U.K.
- Voller V.R., Swaminathan C.R., Thomas B. G. (1990) Fixed grid techniques for phase change problems: a review. Int. J.Numerical Methods in Engineering, Vol.30, 875-898.
- Zabaras N., Ruan Y. (1989) A deforming finite element method analysis of inverse Stefan problem. Int.J.Numerical Methods in Engineering, Vol.28, 295-313.
- Gioda G., Locatelli L., Gallavresi F. (1992) Sul congelamento artificiale dei terreni, Rivista Italiana di Geotecnica, No.3, 173-184.