POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Il congelamento artificiale dei terreni: modellazione numerica di risultati sperimentali



Relatore

Prof.ssa Marina Pirulli

Correlatore

Ing. Giulia La Porta

CandidatoMarco De Duonni

Anno accademico 2021/2022

Sommario

Il Congelamento Artificiale del Terreno (AGF) è una tecnica di rinforzo utilizzata nell'ambito dell'Ingegneria Civile per l'impermeabilizzazione e il consolidamento temporaneo degli scavi sottofalda volti alla realizzazione di pozzi o gallerie. Nonostante si tratti di una tecnica ampiamente diffusa, restano ancora molti dubbi relativi al comportamento termo-idro-meccanico del terreno quando sottoposto al trattamento. In tale contesto, una maggiore comprensione del fenomeno può essere raggiunta mediante la realizzazione di prove sperimentali e la modellazione numerica. In tale contesto, l'Università di Roma Tor Vergata ha progettato un'apparecchiatura triassiale in controllo di temperatura (FROZEN), in cui i provini sono sottoposti a congelamento dall'interno verso l'esterno, cioè con la stessa modalità utilizzata in sito nell'applicazione dell'AGF. Oggetto del presente lavoro riproduzione del comportamento termo-idraulico che si osserva sperimentalmente durante il processo di congelamento di provini di terreno costituiti da sabbia pura e di miscele sabbia e caolino al 15%. I risultati ottenuti dallo studio numerico, confrontati con quelli sperimentali confermano l'efficacia del modello nel riprodurre l'andamento di temperatura nella parte inferiore del provino, zona soggetta a meno dispersione termica con l'ambiente circostante, mostrando comunque delle limitazioni nella riproduzione del campo di temperatura nella parte superiore del provino, zona soggetta a maggior dispersione termica, la quale non è considerata nella modellazione.

Abstract

Artificial Ground Freezing (AGF) is a technique used in Civil Engineering for waterproofing and temporary consolidation to support the excavation of tunnels or shaft under the water table. Although this is a widely used technique, many doubts still remain regarding the thermo-hydro-mechanical behavior of the soil when subjected to treatment. In this context, a better understanding of the phenomenon can be achieved by carrying out experimental tests and numerical modelling. In this context, the University of Rome Tor Vergata has patented a triaxial temperature-controlled apparatus (FROZEN), in which samples are frozen from the inside outwards, i.e., with the same method used on field in AGF applications. The object of this work is the reproduction of the thermo-hydraulic behavior observed experimentally during the freezing process of soil samples made up of pure sand and sand and 15% kaolin mixtures.

The results obtained from the numerical study, compared with the experimental ones, confirm the effectiveness of the model in reproducing the temperature field in the lower part of the sample, area subject to less heat dispersion with the surrounding environment, showing limitations in the reproduction of the temperature field in the upper part of the specimen, area subject to greater heat loss, which was not considered in the modeling.

Indice

ln	troduz	zione	1
1.	II co	ongelamento dei terreni	3
	1.1.	Terreni naturalmente congelati	4
	1.2.	Il congelamento artificiale dei terreni	10
	1.3.	Principali differenze tra il congelamento naturale e artificiale dei	
2.	II pı	rocesso di congelamento dei terreni	22
	2.1.	Acqua non congelata nei terreni congelati	24
	2.2.	Evoluzione del processo di congelamento	25
3.	l mo	odelli costitutivi dei terreni congelati	35
	3.1. porosi	La modellazione numerica accoppiata termo-idro-meccanica pe	
	3.1.	.1. Equazioni di bilancio	38
	3.1.	.2. Equazioni costitutive e restrizioni dell'equilibrio	40
	3.2.	La modellazione numerica accoppiata termo-idro-meccanica pe	
	3.2.		
	3.3.	I modelli costitutivi termo-idraulici dei terreni congelati	

Indice

	3.4.	Il modello costitutivo meccanico dei terreni congelati	53
	3.5.	Il codice di calcolo CODE_BRIGHT	58
4.	Asp	petti fondamentali del comportamento delle miscele sabbia-argilla	60
	4.1. sabbia	Influenza del contenuto di fine sul comportamento meccanico di misce	
	4.2. sabbia	Influenza del contenuto di fine sul comportamento termico di misce	
	4.3. sabbia	Influenza del contenuto di fine sul comportamento idraulico di misce	
5.	Cell	la triassiale in controllo di temperatura: FROZEN	70
	5.1.	Apparecchiatura di prova: FROZEN	70
	5.2.	Prove sperimentali	73
6.	Мос	dellazione numerica delle prove in FROZEN	78
	6.1.	Sviluppo del modello numerico	78
	6.2.	Calibrazione dei parametri del modello	82
	6.3.	Analisi numeriche	88
	6.3.	Schemi di imposizione della temperatura	88
	6.3.2	2. Discussione dei risultati	93
	6.4. della fa	Studio parametrico per la determinazione della conducibilità termi ase solida1	
	6.4.	Influenza della posizione delle termocoppie sulla temperatura 1	07
	6.5.	Comportamento idraulico del modello nella fase di congelamento 1	10
С	onclus	ioni1	16
В	ibliogra	afia1	20
Α	LLEGA	ATO A: Risultati della modellazione numerica1	36

Introduzione

Il Congelamento Artificiale del Terreno (AGF) è una tecnica di rinforzo utilizzata nell'ambito dell'Ingegneria Civile per la stabilizzazione e l'impermeabilizzazione temporanea degli scavi. Ad oggi, le applicazioni di tale tecnica sono innumerevoli, si tratta dunque di una tecnica ben nota e largamente collaudata. Malgrado la sua diffusione, restano ancora aperti molti dubbi relativi al comportamento termo-idromeccanico del terreno quando sottoposto al trattamento.

Il sistema trifasico che si forma durante il processo di congelamento, consistente di terreno, acqua e ghiaccio, vede dunque un'interazione complessa delle fasi, che include aspetti termici, idraulici e meccanici. La modellazione numerica, calibrata e validata sulla base di risultati sperimentali permette dunque di ampliarne la conoscenza. A tal proposito l'Università di Roma Tor Vergata ha sviluppato un'apparecchiatura triassiale in controllo di temperatura, *FROZEN*, in grado di simulare, in scala di laboratorio, l'applicazione della tecnica in sito.

Nella Tesi si affronta la modellazione del fenomeno, analizzandone principalmente l'interazione termica e idraulica delle fasi. L'obiettivo è la riproduzione del campo di temperatura che si osserva sperimentalmente durante il processo di congelamento di terreni costituiti da sabbia pura e sabbia con caolino. Lo strumento utilizzato per raggiungere tale obiettivo è un modello numerico termo-idraulico agli elementi finiti

La Tesi è suddivisa in sei capitoli.

Nel Capitolo 1 si introducono il congelamento naturale e il congelamento artificiale dei terreni, fornendo un quadro generale sulla descrizione della tecnologia e dei sistemi di congelamento utilizzati. Il confronto tra il congelamento naturale e

Introduzione 2

artificiale del terreno permette di analizzarne e comprenderne le principali differenze fenomenologiche.

Nel Capitolo 2 si analizzano i fenomeni fisici che avvengono durante il processo di congelamento all'interno della struttura porosa del terreno, quali la presenza di uno strato sottile di acqua non congelata, anche a temperature inferiori a 0°C, e alla presenza di forze capillari che veicolano le molecole acqua verso il fronte di congelamento favorendo la formazione delle cosiddette lenti di ghiaccio.

Nel capitolo 3, sono introdotte le equazioni generali della formulazione matematica termo-idro-meccanica per i mezzi porosi. Successivamente, la trattazione generale viene ridotta al caso dei terreni congelati, attraverso l'introduzione di opportuni modelli costitutivi. Infine, viene brevemente descritto il codice agli elementi finiti $CODE_BRIGHT$ utilizzato per le analisi termo-idrauliche.

Il Capitolo 4 affronta gli aspetti fondamentali del comportamento termo-idromeccanico di terreni a granulometria mista, studiandone l'influenza del contenuto di particelle fini sulla resistenza meccanica, permeabilità e caratteristiche termiche della matrice.

Nel capitolo 5 è presentata la cella triassiale in controllo di temperatura *FROZEN*, descrivendo brevemente l'attrezzatura e le modalità di prova. In questo capitolo sono presentate le prove triassiali eseguite in *FROZEN* su provini costituiti da sabbia e sabbia con argilla, durante una tesi di dottorato condotto da G. La Porta, le quali sono oggetto di studio della modellazione numerica.

Nel Capitolo 6, si descrive la modellazione numerica del comportamento termoidraulico delle prove in *FROZEN*. Una prima analisi è stata eseguita al fine di individuare le condizioni di temperatura da assegnare al modello per considerare la dispersione di calore che si osserva dai dati di temperatura. Nella fase successiva è stato eseguito uno studio parametrico per la determinazione della conducibilità termica della fase solida al fine di ottenere un modello numerico in grado di riprodurre con un certo grado di accuratezza i risultati sperimentali, presentando comunque le limitazioni che potranno essere superate in sviluppi futuri.

Il congelamento dei terreni

Lo studio dei terreni congelati ha subito un rapido sviluppo negli ultimi decenni. L'aumento delle attività ingegneristiche nelle "regioni fredde" ha spinto molti ricercatori ed ingegneri geotecnici a comprendere i processi di congelamento e scongelamento dei terreni al fine di ovviare i problemi legati soprattutto ai cedimenti da disgelo.

I terreni congelati con cui gli ingegneri devono interfacciarsi possono essere suddivisi in due diverse tipologie: 1) terreni congelati naturalmente (*natural frozen ground*), 2) terreni congelati artificialmente.

Da un lato, la crescita della domanda della società di materie prime ha portato all'estrazione delle stesse nelle aree *permafrost* e di conseguenza sono aumentate le costruzioni di strutture e infrastrutture, come autostrade, condotte e tunnel nelle "regioni fredde". D'altra parte, il congelamento artificiale del terreno sta trovando grande impiego grazie al progresso nella tecnologia del congelamento del terreno. In molti progetti sotterranei in aree densamente edificate si è fatto uso di questa tecnica per migliorare temporaneamente la resistenza del terreno e ridurne drasticamente la permeabilità. In questo ambito le sfide principali risiedono nel preservare l'integrità degli edifici circostanti, limitando il più possibile gli spostamenti verticali del terreno.

Trattare con il terreno congelato è dunque una nuova sfida a causa della complessa natura del terreno, una volta ghiacciato. Diventa quindi estremamente importante comprendere il comportamento di un terreno congelato e i processi fisici che avvengono in esso per sviluppare e fornire un approccio affidabile alla modellazione numerica. In questo capitolo si vogliono presentare gli aspetti rilevanti relativi al congelamento naturale dei terreni e alla tecnica di congelamento artificiale.

1.1. Terreni naturalmente congelati

Un qualsiasi terreno che rimane sotto la temperatura di 0°C per più di due anni consecutivi è definito *permafrost* o *perennially frozen ground* (Dobinski, 2011). La superficie coperta dal permafrost si estende in gran parte del Nord Europa, Asia centro-settentrionale, Alaska, Canada, parte meridionale del Sud America e Stati Uniti, coprendo 23 milioni di km². Queste zone sono definite "regioni fredde" o *cold regions*.

L'estensione spaziale e lo spessore del permafrost generalmente cambiano con il clima e dipendono da molti fattori che regolano i flussi di calore e di conseguenza la temperatura del terreno. Alcuni di questi fattori sono la posizione geografica e l'esposizione, le precipitazioni, la vegetazione e le proprietà dei materiali terrestri sotto la superficie del terreno.

La variabilità delle caratteristiche dei terreni perennemente ghiacciati permette di definire diverse tipologie di permafrost (figura 1.1). Il *permafrost continuo* comprende le aree ad alta latitudine in cui il 90% del terreno è ricoperto da permafrost raggiungendo centinaia di metri di profondità.



Figura 1.1: Estensione del permafrost nell'emisfero settentrionale (Fonte: United Nations Environment Program UNEP)

Il *permafrost discontinuo*, di poche decine di metri di profondità, si trova nelle regioni più calde dove la temperatura fluttua sopra i 0°C più frequentemente.

Dove la temperatura superficiale media annua raggiunge lo zero celsius, lo spessore del permafrost si estende in profondità per pochi metri fino a scomparire nelle aree più soggette a irraggiamento solare. In questo caso si parla di *permafrost sporadico*.

Analizzando la struttura del terreno, i terreni del permafrost sono caratterizzati da diversi strati: quello superiore, controllato dallo scambio termico stagionale con l'atmosfera e quello inferiore, controllato dal flusso geotermico.

Lo strato di terreno superficiale la cui temperatura fluttua sopra e al di sotto i 0°C si definisce strato attivo (figura 1.2) e rappresenta la zona superficiale di terreno che separa il permafrost dall'atmosfera. Lo strato attivo è soggetto a cicli annuali di congelamento e scongelamento (Andersland et al., 2003).

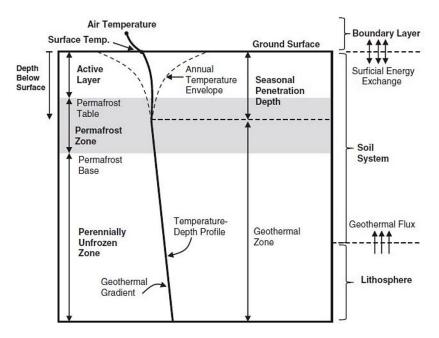


Figura 1.2: Struttura del terreno regolata dalla temperatura atmosferica e flusso termico. La zona grigia indica l'ampiezza del permafrost (Dobinski, 2011)

Al di sotto dello strato attivo, la sommità della parte gelata, detta *tetto del permafrost*, è il limite superiore del corpo del permafrost (figura 1.2) ed è governata dal flusso di calore convettivo e conduttivo. Sotto questa il terreno presenta temperature negative tutto l'anno.

La base del permafrost è il limite inferiore del corpo del permafrost (figura 1.2). Al di sotto di questo limite, il terreno resta non gelato tutto l'anno a causa del flusso di calore geotermico proveniente dall'interno della terra (Kurylyk et al., 2014).

Alcuni aspetti rilevanti che bisogna affrontare quando si tratta con i terreni congelati riguardano: il criosollevamento (*frost heave*), la compattazione e l'indebolimento da disgelo e il deterioramento del permafrost.

Criosollevamento (frost heave)

L'azione del gelo in un terreno coinvolge i cicli di gelo e disgelo dell'acqua interstiziale in esso presente. Questo fenomeno si verifica maggiormente nelle regioni caratterizzata da climi con gelate stagionali, dove la temperatura può scendere e salire al di sopra di zero gradi.

Uno dei fenomeni che derivano dal congelamento stagionale del terreno è il criosollevamento, in inglese noto come *frost heave*, ed è tipico delle aree soggette a formazione di permafrost. Con criosollevamento si intende il rigonfiamento che un terreno subisce a causa del processo di congelamento e non è correlato unicamente all'espansione volumetrica dell'acqua nel passaggio di stato in ghiaccio (Taber, 1929; 1930). Durante il processo di congelamento, la migrazione dell'acqua interstiziale lungo un gradiente di temperatura negativo (dal caldo verso il freddo) fino al fronte congelato favorisce la formazione delle cosiddette *ice lenses* (lenti di ghiaccio), ovvero strati di ghiaccio puro che si sviluppano perpendicolarmente al flusso di calore (figura 1.3).

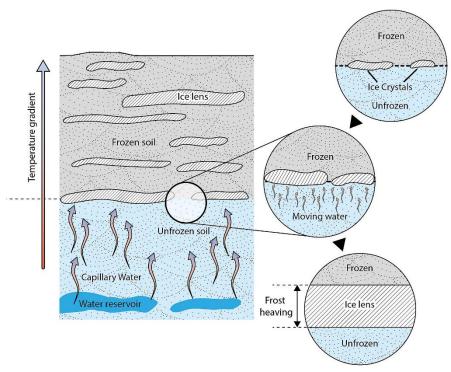


Figura 1.3: Rappresentazione schematica dei principi del criosollevamento (Deville, 2016)

La crescita di una o più lenti di ghiaccio può generare il sollevamento del terreno sovrastante. Grandi spostamenti si possono verificare come conseguenza di processi di congelamento lenti laddove l'acqua ha più tempo di migrare verso la zona congelata.

Dunque, il criosollevamento si manifesta se sono soddisfatte le tre condizioni seguenti: una temperatura inferiore a quella di inizio congelamento, un terreno suscettibile al congelamento e un costante afflusso di acqua al terreno.

Il criosollevamento è un fenomeno importante da considerare nel campo dell'ingegneria civile nelle *cold regions* in quanto rappresenta una delle principali cause dei danni provocati alle infrastrutture, come la rottura di cavi e condutture, fessurazione delle pavimentazioni stradali, sollevamento delle fondazioni, ribaltamenti delle strutture (strutture inclinate). Una profonda comprensione e previsione di questo fenomeno è ancora lontana dall'essere raggiunta.

Compattazione e cedimento da disgelo

Quando la temperatura si innalza nuovamente sopra i 0°C, le lenti di ghiaccio formatesi durante il processo di congelamento iniziano a sciogliersi. Lo scioglimento del ghiaccio contenuto nel terreno è accompagnato da una diminuzione di volume che, di conseguenza, può causare dei cedimenti, in quanto, in seguito alla scomparsa del ghiaccio, lo scheletro solido deve riadattarsi ad un nuovo equilibrio (Andersland et al., 2003). L'acqua in eccesso che si è sciolta dalle lenti di ghiaccio, non essendo più nelle condizioni di re-instaurare i preesistiteti legami con i grani solidi a causa della loro nuova posizione all'interno della struttura solida, defluisce sotto l'azione del peso proprio e/o dei carichi esterni, dando luogo al cosiddetto consolidamento da disgelo. La velocità di consolidamento da disgelo dipende sia dalla velocità di fusione del ghiaccio che dalla conducibilità idraulica del terreno (Zhang, 2014). In figura 1.4 è schematizzata la diminuzione di volume dovuta sia al cambiamento di stato sia al drenaggio dell'acqua di fusione dal terreno.

La linea \overline{bc} descrive il volume scongelato alla temperatura di 0°C. In un terreno fine, si verifica anche un consolidamento continuo dovuto al drenaggio di acqua dal terreno. Questo consolidamento avanza finché non si ristabilisce l'equilibrio dello scheletro solido per un carico esercitato dal peso proprio σ_0 più eventuali sovraccarichi $\Delta\sigma$ (Andersland et al., 2003). La somma di tutti questi cedimenti è chiamata cedimento da disgelo. Una volta completato il consolidamento, il

cedimento da disgelo potrebbe essere maggiore o minore degli spostamenti causati dal criosollevamento (Konrad, 1989).

Il cedimento dipende principalmente dalla storia di carico prima del congelamento (se il terreno sia normalconsolidato o sovraconsolidato) e dal numero di cicli di gelo-disgelo a cui è stato sottoposto il terreno. Il disgelo di un terreno normalconsolidato, al suo primo ciclo di gelo-disgelo, potrebbe causare un cedimento maggiore di quello indotto dal criosollevamento durante la fase di gelo. D'altra parte, nei terreni sovraconsolidati sottoposti al primo ciclo di gelo-disgelo, parte del rigonfiamento causato dal criosollevamento potrebbe permanere.

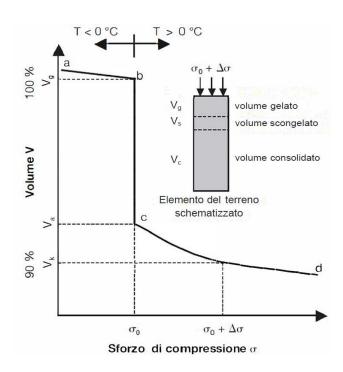


Figura 1.4: Relazione tra lo sforzo di compressione e la diminuzione di volume di un terreno che scongela (modificato da Andersland et al., 2003)

Il congelamento artificiale applicato alla costruzione in terreni teneri è un esempio in cui il terreno potrebbe essere sottoposto al suo primo ciclo di gelo e disgelo (Konrad, 1989; Zhou et al., 2013).

Indebolimento da disgelo

L'aumento stagionale di temperatura del permafrost determina la fusione del ghiaccio più superficiale e quindi la formazione di acqua. Se il deflusso di quest'acqua è impedito dalla presenza di strati di terreno sottostanti ancora ghiacciati, l'insorgere di sovrapressioni in eccesso riduce la resistenza al taglio del

terreno con conseguente perdita di capacità portante dello strato attivo. Questo processo è chiamato indebolimento da disgelo.

La probabilità che si verifichi un indebolimento da disgelo dipende dalla suscettibilità al gelo del terreno, dalla sua permeabilità, dallo strato sottostante, dalle condizioni di drenaggio e dalla velocità di disgelo (Dudeja, 2011).

L'indebolimento da disgelo influisce negativamente sulla stabilità delle pavimentazioni stradali, pendii e altre strutture ingegneristiche nelle regioni fredde. Ad esempio, il traffico sulle pavimentazioni stradali indebolite dal disgelo può causare danni permanenti in superficie come solchi, crepe e rottura della stessa.

Deterioramento del permafrost

Gli edifici costruiti sul permafrost sono riscaldati dall'interno e un isolamento mal realizzato spesso consente la fuoriuscita di calore con conseguente scioglimento del terreno ghiacciato sottostante.

Inoltre, essendo il permafrost un fenomeno di natura climatica, è evidente che esso sia fortemente sensibile ai cambiamenti climatici in atto; l'aumento della temperatura determina infatti uno scioglimento parziale del ghiaccio e una diminuzione dello spessore o dell'estensione areale del permafrost con conseguente perdita della resistenza interna. Molte regioni montuose europee a bassa latitudine sono solo pochi gradi al di sotto della temperatura favorevole alla formazione del permafrost e un piccolo innalzamento di temperatura può aumentare la profondità dello scongelamento estivo e, di conseguenza, causare il deterioramento del permafrost.

Il deterioramento del permafrost può dar origine a diversi effetti sulla superficie, come il suo cedimento (subsidenza) o la formazione di nuovi laghi, detti "termokarst", nelle zone di pianura. Nelle zone montane favorisce, invece, l'innesco di fenomeni di crollo, mentre lungo le coste dei mari artici si può avere l'erosione e l'arretramento del litorale.

Tali fenomeni possono causare conseguenze catastrofiche sulle infrastrutture esistenti quali strade, oleodotti, gasdotti, ferrovie e aeroporti. Queste strutture, infatti, possono rompersi o diventare impraticabili a causa dei cedimenti del terreno, spesso localizzati e di entità variabile.



Figura 1.5: Ferrovia costruita su permafrost vicino Strelna in Alaska danneggiata dal disgelo del permafrost (Fonte: U.S. Geological Survey)

1.2. Il congelamento artificiale dei terreni

Il congelamento artificiale del terreno (di seguito denominato: AGF, *Artificial Ground Freezing*) rappresenta una tecnica contemporanea di consolidamento e impermeabilizzazione utilizzata nella pratica dell'ingegneria geotecnica con riferimento, in genere, ad opere di non trascurabile rilevanza. Tale tecnica è adottata in diverse situazioni legate, in particolare, all'esecuzione di scavi superficiali, o di aperture sotterranee, in terreni granulari al di sotto del livello di falda (Andersland et al., 1989).

Il congelamento del terreno può essere applicato ogni qualvolta si verifica l'esigenza di asportare del terreno in sicurezza nei confronti del collasso e/o alla venuta d'acqua all'interno del foro praticato. La tecnica AGF rappresenta la scelta più appropriata, in particolare quando si opera in ambienti urbani, al fine di garantire il maggior livello di sicurezza possibile sia per le maestranze impegnate, sia per le infrastrutture esistenti in superficie.

Con il duplice effetto di stabilizzare e proteggere lo scavo dalle acque sotterranee, l'AGF risulta essere un'alternativa (quando non rappresenti l'unica soluzione possibile) efficace, affidabile e sicura ai tradizionali metodi di consolidamento e impermeabilizzazione del terreno.

Il metodo risponde in maniera eccellente a diverse necessità progettuali quali la stabilizzazione delle scarpate, realizzazione di trincee, scavo di pozzi e tunnel sotterranei, sostegno di fondazioni adiacenti ad uno scavo, etc. (figura 1.6).

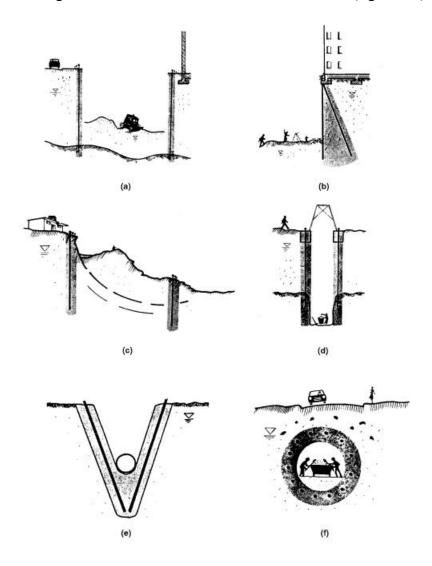


Figura 1.6: Alcuni esempi di applicazione della tecnica del congelamento artificiale del terreno: (a) scavi profondi; (b) rinforzo delle fondazioni; (c) stabilità dei pendii; (d) pozzi; (e) trincee profonde; (f) gallerie (Andersland et al., 2003)

Per congelare un terreno, è richiesto un continuo input di energia. Tale dispendio energetico limita la sua applicazione alle sole strutture temporanee. Uno scavo sarà sostenuto in maniera provvisoria dal terreno circostante congelato e, una volta messo in sicurezza mediante l'installazione di un supporto definitivo, il terreno verrà sottoposto ad una fase di scongelamento.

Data la natura provvisoria e l'assoluta reversibilità del metodo, l'AGF risulta essere un sistema sicuro ed eco-compatibile in quanto nessun tipo di prodotto viene iniettato o disperso nel terreno. L'acqua già naturalmente presente nel terreno, infatti, viene fatta congelare utilizzando fluidi refrigeranti che non vengono mai direttamente a contatto con il terreno stesso o con l'acqua di falda, escludendo pertanto possibili fenomeni di contaminazione o inquinamento delle falde idriche.

Un confronto delle varie tecniche di consolidamento in funzione della natura del terreno, granulometria e permeabilità fu presentato da J.S Harris (1995) ed è illustrato in figura 1.7; risulta immediatamente evidente la completa applicabilità del trattamento di congelamento che copre l'intera gamma dei terreni, da grana grossa a grana fine.

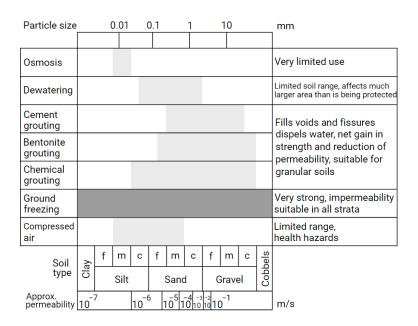


Figura 1.7: Fattibilità dei diversi metodi di consolidamento in relazione alla natura del terreno (Harris, 1995)

La prima applicazione documentata della tecnica del congelamento artificiale del terreno risale al 1862 nel campo dell'industria mineraria. Nella città di Swansea, nel Galles del sud, la tecnica del congelamento fu utilizzata per la realizzazione di pozzi minerari. Gli strati di terreno scadenti vennero consolidati grazie all'installazione di tubi in ferro all'interno dei quali circolava una soluzione salina che, una volta raffreddata per mezzo di macchine frigorifere, era in grado di congelare il terreno sottraendo calore ad esso (Harris, 1995). Tale tecnica fu successivamente brevettata dall'ingegnere minerario tedesco F.H. Poetsch nel 1863 in Germania ed è tuttora ancora in uso.

Da allora, il congelamento artificiale del terreno è stato utilizzato estensivamente per innumerevoli applicazioni di ingegneria civile e geotecnica, in particolare dagli anni '70 in poi, trovando largo impiego, specie nei Paesi del Nord Europa, come tecnica di consolidamento e impermeabilizzazione degli scavi sottofalda volti alla realizzazione di gallerie, pozzi e cunicoli di collegamento (Rocca, 2011).

L'evoluzione degli impianti di refrigerazione ha reso possibile da un lato il congelamento di grandi volumi di terreno e dall'altro una sufficiente rapidità di esecuzione; il tempo necessario a mettere in sicurezza il terreno può variare, a seconda della estensione e della tecnologia utilizzata, da poche ore a qualche settimana.

In Italia, la prima applicazione di tale tecnologia risale al 1937, per il recupero dell'Ara Pacis Augustea a Roma (figura 1.8); il congelamento permise il recupero di parti importanti dell'Ara, inglobate in un terreno argilloso parecchi metri sottofalda.

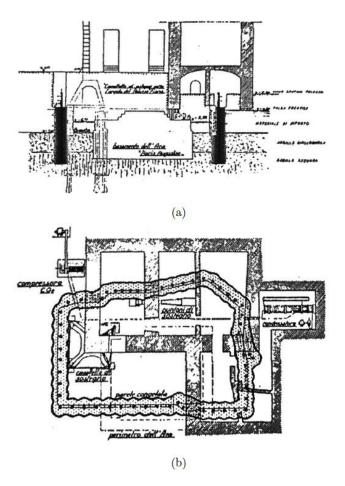


Figura 1.8: Congelamento del terreno per il recupero Ara Pacis Augustea: (a) Sezione; (b) Pianta (Rocca, 2011)

Tra le applicazioni più recenti, invece, si ricordano gli interventi per lo scavo di alcune stazioni della Linea 1 della Metropolitana di Napoli in terreni sciolti sotto elevato battente di falda (figura 1.9).



Figura 1.9: Fronte di terreno congelato. Stazione Garibaldi. Metropolitana di Napoli Linea 1 (Balossi Restelli et al, 2011)

Ad oggi, le applicazioni di tale tecnica sono innumerevoli, si tratta dunque di una tecnica ben nota e largamente collaudata. Malgrado la sua diffusione, tuttavia non si può certo dire che il congelamento sia altrettanto conosciuto nei principi fisici e nelle sue tecnologie applicative.

Tecniche di congelamento

Nel terreno che si intende consolidare vengono installati degli scambiatori di calore, detti *sonde congelatrici*, costituite da tubazioni di piccolo diametro, posizionate ad opportuna distanza l'una dall'altra, tale da realizzare un "muro di ghiaccio" secondo la geometria richiesta. Il congelamento avviene facendo circolare all'interno delle sonde un liquido a basse temperature che, estraendo calore dal terreno, determina un decremento della temperatura dell'acqua presente in esso sino ad un valore inferiore alla temperatura di congelamento della stessa.

Un processo di congelamento prevede tre fasi temporali distinte: (1) una fase di congelamento; (2) una fase di mantenimento e (3) una fase di scongelamento.

In figura 1.10 sono schematizzate le diverse fasi temporali che si susseguono durante l'interno processo di congelamento artificiale del terreno.

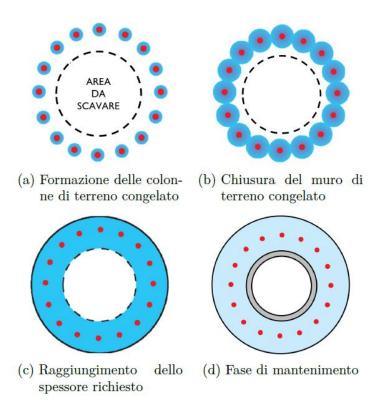


Figura 1.10: Schematizzazione del processo di congelamento per la formazione del "muro di ghiaccio" (Trevi S.p.a., 2013)

Quando le sonde congelatrici vengono infisse nel terreno, si dà avvio alla prima fase del congelamento (PFP "*Primary Freeze Period*"), ovvero quella in cui viene sottratto calore al terreno necessario alla formazione del cilindro di terreno congelato attorno alla sonda (figura 1.10a).

Le colonne di ghiaccio si accrescono gradualmente con il variare del tempo fino ad avvicinarsi ed infine a compenetrarsi (figura 1.10b) raggiungendo un volume congelato dello spessore richiesto (figura 1.10c). A questo punto il muro di ghiaccio è formato e si dà avvio alla fase successiva, esclusivamente di mantenimento (SFP "Secondary Freeze Phase") nella quale si dosa opportunamente l'assorbimento di calore in modo da non far progredire ulteriormente lo sviluppo del muro di terreno congelato (figura 1.10d).

Non appena si è giunti al termine della PFP, la corona di terreno ghiacciato è formata, il terreno è impermeabile e consolidato e si può procedere allo scavo e alla posa in opera del rivestimento definitivo; al termine dei lavori, quando lo scavo è

completamente protetto dalle acque profonde e stabilizzato grazie alle opere di sostegno definitive, si può procedere alla fase di scongelamento fino a garantire il ripristino delle condizioni preesistenti.

Le sonde congelatrici infisse nel terreno sono costituite da due tubi concentrici (figura 1.11) aventi le funzioni di:

- quello più interno, a fondo aperto, intercetta il fluido refrigerante dall'impianto di distribuzione e lo convoglia fino alla base della sonda;
- quello più esterno, a fondo chiuso e a diretto contatto con il terreno, accoglie
 il flusso in risalita lungo l'intercapedine tra i due tubi e permette lo scambio
 di calore tra il fluido e il terreno.

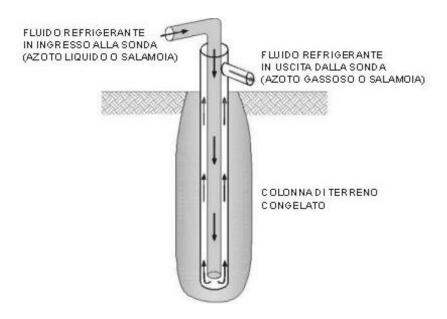


Figura 1.11: Schematizzazione di una sonda congelatrice verticale e del flusso di fluido refrigerante al suo interno (Rocca, 2011)

Questa configurazione dà luogo ad un elemento congelato della tipica forma a "pera" dovuta al fatto che il maggiore effetto refrigerante si ottiene alla base della sonda; il fluido, risalendo lungo il tubo esterno, acquista calore dal terreno diminuendo progressivamente il suo potere congelante.

Sistemi di congelamento

Un sistema di congelamento normalmente è costituito da un impianto primario di refrigerazione e un sistema secondario di distribuzione necessario alla circolazione del fluido termovettore all'interno delle sonde congelatrici per la sottrazione del calore dal terreno.

La tipologia dell'impianto di congelamento dipende dalla tipologia di fluido refrigerante utilizzato. A seconda del fluido utilizzato, il congelamento artificiale può essere condotto con tre diverse tecniche:

- Metodo Diretto (o Cryogenic Method), a ciclo aperto, consiste nel far circolare all'interno delle sonde congelatrici azoto liquido che, alla fine del ciclo, viene disperso in atmosfera;
- *Metodo Indiretto* (o *Brine Method*), con fluido termovettore costituito da salamoia, una soluzione di Cloruro di Calcio (CaCL₂) ed acqua;
- *Metodo Misto*, consiste nell'applicazione accoppiata dei suddetti metodi in cui la fase primaria è affidata all'azoto liquido mentre la fase di mantenimento è garantita dalla salamoia.

Ciascuna tecnica presenta dei vantaggi e degli svantaggi. Tuttavia, la scelta applicativa tra i vari metodi dipende dai requisiti richiesti dalla lavorazione ed è dettata principalmente da considerazioni di carattere tecnico, esecutivo ed economico, quali la resistenza meccanica da conferire al terreno congelato, le tempistiche richieste per la formazione del volume di terreno congelato, la durata della fase di mantenimento, costi e aspetti legati alla logistica e disponibilità di spazio in cantiere.

Sistema di congelamento a salamoia

Il sistema di congelamento a salamoia, detto anche *metodo indiretto*, utilizza la salamoia come fluido refrigerante, la quale viene raffreddata tramite impianti frigoriferi e fatta circolare attraverso le sonde congelatrici ritornando poi all'impianto stesso per essere raffreddata (sistema chiuso).

Il sistema di congelamento a salamoia (figura 1.12) è costituito da:

- impianto frigorifero di tipo industriale ed impianto di pompaggio della salamoia;
- sonde congelatrici in cui viene fatta circolare la salamoia;
- *sistema di distribuzione* che veicola il fluido refrigerante dall'impianto frigorifero alle sonde congelatrici e viceversa.

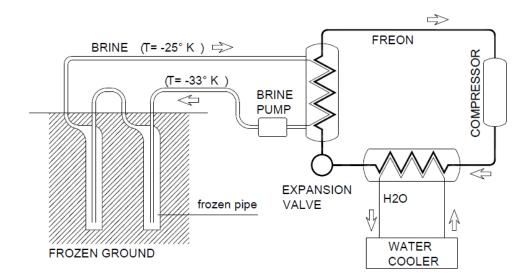


Figura 1.12: Schema di funzionamento del metodo indiretto per il congelamento artificiale del terreno (Colombo, 2010)

La salamoia viene raffreddata alla temperatura di esercizio, compresa tra -28°C e - 35°C, scambiando calore con il fluido termovettore contenuto all'interno dell'impianto frigorifero, prima di essere immessa nelle sonde congelatrici. Successivamente, la salamoia viene inviata nella linea di mandata e da questa giunge alle singole sonde congelatrici. All'uscita dalle sonde la salamoia, riscaldata per effetto dell'assorbimento di calore dal terreno, ritorna all'impianto frigorifero attraverso la linea di ritorno dove viene nuovamente raffreddata per un nuovo ciclo.

Il procedimento indiretto, a ciclo chiuso, comporta l'installazione di grandi macchinari ed anche il circuito di distribuzione risulta essere abbastanza complicato. Tale metodo è ideale per interventi di lunga durata e per volumi di terreno da congelare significativi (maggiore di 500 metri cubi).

Sistema di congelamento ad azoto

A differenza del sistema di congelamento a salamoia, il sistema ad azoto non necessita di nessun fluido refrigerante primario e secondario.

Il metodo è anche detto *metodo diretto* ed utilizza come unico refrigerante un gas molto comune in natura come l'azoto presente nell'atmosfera terrestre per il 79% dei suoi costituenti. Tale gas, alla pressione atmosferica, presenta una temperatura di ebollizione di -196°C, motivo per cui in atmosfera non è presente in forma liquida; comprimendo il gas ad alte pressioni lo si riesce a portare allo stato liquido con notevole guadagno in termini di volume occupato.

Il sistema ad azoto (figura 1.13) è costituito da:

- uno o più silos di stoccaggio a doppia parete e da un sistema integrato di vaporizzazione e messa in pressione dell'azoto liquido, che consente l'alimentazione delle sonde congelatrici senza l'utilizzo di impianti di pompaggio;
- sonde congelatrici in cui viene fatto circolare ed evaporare l'azoto liquido;
- *sistema di distribuzione* che veicola l'azoto liquido dal serbatoio alle sonde congelatrici e dopo la gassificazione all'interno delle sonde, da queste ultime direttamente allo scarico in atmosfera.

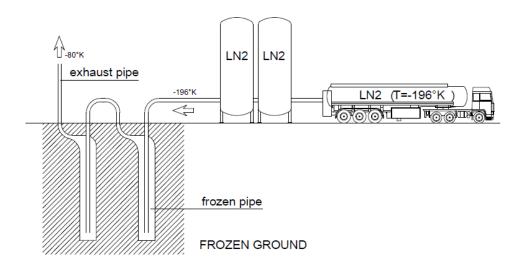


Figura 1.13: Schema di funzionamento del metodo diretto per il congelamento artificiale del terreno (Colombo, 2010)

Il metodo diretto, dunque, non necessita di un impianto di refrigerazione in quanto l'azoto liquido viene stoccato in silos a doppia parete per garantire un'elevata coibentazione termica. L'azoto allo stato liquido, ottenuto per mezzo della distillazione frazionata dell'aria, è trasportato in cantiere in apposite cisterne, in cui è mantenuto alla temperatura di -196°C. Attraverso un sistema di pressurizzazione automatico, sfruttando come spinta la pressione stessa formatasi all'interno dei serbatoi, l'azoto liquido viene inviato alla linea di distribuzione, e da questa distribuito a tutte le sonde congelatrici, suddivise in gruppi, in ciascuno dei quali sono collegate tra loro in serie. L'ultima sonda di ogni gruppo è dotata di uno scarico, attraverso il quale l'azoto riscaldato per effetto dell'assorbimento di calore

del terreno, termina il suo ciclo disperdendosi direttamente in atmosfera a temperature comprese tra i -80°C ed i -120°C (ciclo aperto).

Per massimizzare il rendimento del sistema ad azoto è importante che l'azoto conservi il suo stato liquido fino all'ingresso nell'intercapedine tra tubo interno e tubo esterno della sonda. (Rocca, 2011).

Contrariamente a quanto visto con il precedente metodo, il sistema ad azoto liquido presenta il notevole vantaggio della estrema semplicità della distribuzione. Un pregio preminente del sistema è la grande potenzialità di apporto di frigorie al terreno che consente sia la rapidissima costituzione di un muro continuo di terreno congelato (si impiegano dai 2 ai 7 giorni), sia di affrontare situazioni difficili di precaria stabilità. Il metodo, dunque, può risultare conveniente nel caso di interventi che richiedono brevi periodi di congelamento e per volumi modesti di terreno interessato dal processo (fino a qualche centinaio di metri cubi).

Le differenze principali tra i due metodi di congelamento presentati sono sintetizzate in tabella 1.1.

Tabella 1.1: Principali differenze tra i due metodi di congelamento (Rocca, 2011)

	Metodo a salamoia	Metodo ad azoto
Impianto	Complesso	Semplice
Temperatura di esercizio	-28 ± -35°C	-80 ± -120°C
Materiali per impianto	Acciai ad alta resilienza, HDPE	Materiali per uso criogenico (inox e rame)
Dimensioni dell'intervento	ldoneo per interventi di dimensioni medio-grandi	Idoneo per interventi di dimensioni contenute
Durata dell'intervento	Adatto a lunghe durate (da uno a più mesi)	Adatto per brevi durate (inferiori al mese)
Consumo medio per 1 m³ di terreno di congelato (w=30%)	Circa 50-150 kWh/m³	Circa 1000-2000 l/m³
Principali rischi	Ustioni da freddo	Incidenti per sotto- ossigenazione, ustioni da freddo

1.3. Principali differenze tra il congelamento naturale e artificiale dei terreni

In questa sezione sono discusse brevemente le differenze e le similarità dei terreni congelati naturalmente e dei terreni congelati artificialmente.

Nelle aree soggette a permafrost, il terreno al di sotto dello strato attivo si trova ad una temperatura costante oltre -15°C. La struttura del ghiaccio è dominata da lenti di ghiaccio orientate orizzontalmente e formatesi dall'avanzamento del fronte di congelamento naturale.

Contrariamente ai terreni congelati naturali, la temperatura dei terreni congelati artificialmente è caratterizzata da grandi gradienti con decrementi di temperatura fino a -160°C nelle zone adiacenti alle sonde congelatrici alimentate con azoto liquido e 0°C in corrispondenza del fronte di congelamento (Andersland et al., 2003; Harris, 1995).

Un'altra differenza tra i terreni congelati naturalmente e artificialmente è che il terreno congelato naturalmente può essere caratterizzato sia da un elevato contenuto di ghiaccio sia da un basso contenuto di ghiaccio. Le lenti di ghiaccio, inoltre, tendono ad assottigliarsi con la profondità, mentre nel congelamento artificiale, il congelamento avviene in maniere molto rapida, tale da non lasciare al terreno il tempo necessario per la formazione di lenti di ghiaccio.

Nel congelamento artificiale, la temperatura può essere ottimizzata in modo da raggiungere la resistenza desiderata in economicità mentre per il congelamento naturale la temperatura del terreno è definita e difficile da influenzare (Harris, 1995; Sayles, 1981).

Il processo di congelamento dei terreni

Quando la temperatura è prossima allo zero Celsius, al di sotto del punto di congelamento (*freezing point*), l'acqua è presente nel terreno sia allo stato liquido sia allo stato solido (ghiaccio). Il "*freezing point*" di un terreno è definito come il più alto valore di temperatura in corrispondenza del quale il ghiaccio può formarsi in quel terreno (Van Everdingen, 1976).

Al decrescere della temperatura del terreno si osserva un apprezzabile aumento di resistenza meccanica del terreno congelato, il quale acquisisce quelle proprietà e caratteristiche che spesso sono richieste per il supporto temporaneo di scavi sottofalda, quali bassa permeabilità e alta resistenza meccanica.

Il terreno congelato costituisce dunque un sistema multifase complesso, costituito da uno scheletro solido i cui vuoti sono occupati da ghiaccio, acqua liquida e gas in diverse frazioni. Questi componenti coesistono ed interagiscono tra di loro e possono cambiare stato a seconda delle condizioni a contorno.

Un fattore importante che influenza il comportamento di un terreno congelato è l'acqua e le sue proprietà. Acqua e ghiaccio, infatti, presentano delle caratteristiche distinte e la loro natura costituisce una base importante per la definizione delle proprietà dei terreni congelati.

L'acqua presente nel terreno non circola liberamente, ma la permanenza e gli spostamenti dipendono da forze fisiche esercitate sulle sue molecole, quali forze superficiali di adesione, di coesione, di tensione superficiale e forza gravitazionale. In funzione della distanza delle molecole d'acqua dalla superficie dei grani di terreno, si identificano nel terreno stesso diverse frazioni di acqua a diversa mobilità. L'acqua che si trova immediatamente a contatto con le particelle risulta fortemente legata ed è definita acqua igroscopica (o acqua adsorbita).

All'aumentare della distanza dalla superficie delle particelle la forza di legame diminuisce, incontrando dapprima l'acqua pellicolare (o acqua di adesione) debolmente legata, fino ad arrivare a molecole d'acqua che assumono le caratteristiche di acqua libera (o acqua interstiziale). Quest'ultime sono concentrate nelle zone centrali dei pori di maggiori dimensioni (figura 2.1) (Tsytovich, 1960).

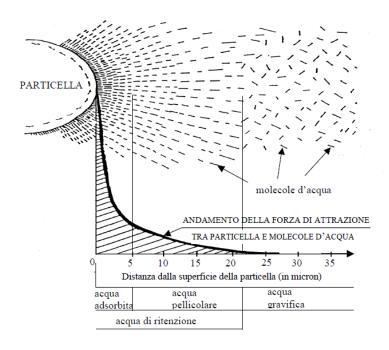


Figura 2.1: Andamento della forza di attrazione elettrica con la distanza tra particelle solide e molecole d'acqua (Tsytovich, 1960)

L'acqua adsorbita non congela; essa è attratta dalle particelle solide con una forza tale che, le sue molecole rimangono sempre allo stato liquido ad una qualsiasi temperatura inferiore allo zero Celsius (anche fino -50°C) (Tsytovich, 1960).

Anche le molecole di acqua pellicolare sono soggette a forze di attrazione, tuttavia più deboli. A qualsiasi temperatura sotto lo zero solo una parte dell'acqua pellicolare congela raggiungendo dunque una condizione di equilibrio tra le forze di cristallizzazione del ghiaccio e le forze di attrazione delle particelle di terreno. Tale acqua rappresenta l'aliquota maggiore di acqua che permane allo stato non congelato. Infine, l'acqua libera rappresenta la frazione idrica maggiore che congela quando la temperatura scende al di sotto della temperatura di congelamento.

2.1. Acqua non congelata nei terreni congelati

Le motivazioni principali che hanno portato allo studio dei terreni congelati derivavano dai problemi associati al fenomeno del criosollevamento o *frost heave* (Capitolo 1). Inizialmente, si pensava che le variazioni di volume osservate durante il processo di congelamento dei terreni fossero principalmente dovute all'espansione volumetrica dell'acqua in seguito al suo cambiamento di fase in ghiaccio. Tuttavia, l'espansione volumetrica osservata differiva notevolmente da quella attesa e il fenomeno del criosollevamento risultava più pronunciato in quei terreni che erano costantemente alimentati da una sorgente di acqua (Taber, 1929).

Taber (1929), con una serie di esperimenti, dimostrò che non tutta l'acqua interstiziale presente nel suolo congela quando la temperatura scende al di sotto del punto di congelamento ma un'aliquota d'acqua rimane allo stato liquido. L'acqua che non congela è stata definita da diversi autori "unfrozen water". La presenza di acqua non congelata è stata principalmente attribuita ad un'azione capillare che si esplicita nei pori del terreno.

Si assume che un terreno sia completamente saturo di acqua prima che inizi il processo di congelamento. Quando la temperatura scende sotto lo zero, lo spazio dei pori viene occupato dal ghiaccio e dall'acqua non congelata, quindi il grado di saturazione del ghiaccio S_i , si può determinare semplicemente come:

$$S_i = 1 - S_I \tag{2.1}$$

dove S_l è il grado di saturazione dell'acqua non congelata.

La quantificazione del contenuto di acqua allo stato non congelato in terreni di diversa natura è stata oggetto di studio di diversi autori.

Dal grafico in figura 2.2, si evince che raffreddando delle sabbie a delle argille al di sotto della temperatura di congelamento, il contenuto di acqua non congelata misurato varia da 0.2 a 2% e da 5 a 40%, rispettivamente. Inoltre, si vede che già a -5°C la quantità di acqua non congelata è intorno al 1-20% a seconda del tipo di sedimento considerato.

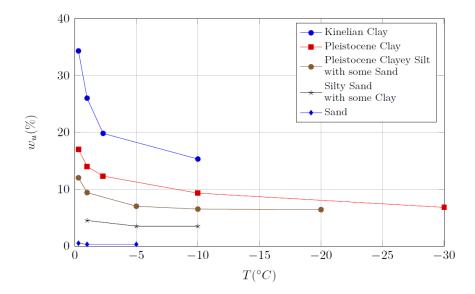


Figura 2.2: Andamento del contenuto di acqua non gelato w_u in funzione della temperatura T per diverse tipologie di terreno (modificata da Tsytovich, 1960)

Data la grandezza dei valori misurati, soprattutto per terreni argillosi, diventa necessario prendere in considerazione l'esistenza di una quantità di acqua non congelata, in particolare nella determinazione delle proprietà fisiche e termiche dei terreni congelati, in quanto essa è largamente presente in un terreno congelato (Tsytovich, 1960).

2.2. Evoluzione del processo di congelamento

Nei terreni non coesivi con una superficie specifica ridotta, la temperatura di congelamento T_f è poco inferiore a 0°C, mentre per i terreni a grana fine (limi e argille) l'abbassamento della temperatura, ΔT , rispetto allo zero Celsius può raggiungere anche 5°C (Andersland et al., 2003).

Quando la temperatura del terreno scende di qualche grado al di sotto dello zero Celsius, il processo di congelamento del terreno inizia con la formazione dei primi nuclei di ghiaccio: le molecole di acqua libere nella parte più centrale dei pori di maggiori dimensioni iniziano a congelare formando dei centri di nucleazione di ghiaccio, che successivamente agiscono come nuclei di aggregazione, attirando altre molecole d'acqua che migrano e vanno ad accrescere le aree ghiacciate portando, se la velocità di congelamento è sufficientemente lenta, alla formazione delle cosiddette *ice lenses* (lenti di ghiaccio).

Con riferimento alla figura 2.3, è possibile distinguere tre diverse zone che si formano in un terreno durante il congelamento:

- i. la zona congelata, dove il terreno è completamente congelato e completamente saturato con ghiaccio.
- ii. La zona non congelata, in cui il terreno è completamente allo stato non congelato.
- iii. La frangia congelata (*frozen fringe*), ovvero la zona in cui l'acqua allo stato liquido esiste anche a temperatura al di sotto dello zero celsius.

Alla sommità della zona non congelata la temperatura è ipotizzata uguale a 0°C. Durante il congelamento, l'acqua interstiziale migra per capillarità, attraverso i pori del terreni, verso la zona di congelamento. La forze di suzione capillare, risultante dalla pressione negativa che si forma in un terreno congelato, è nota come suzione criogenica (o criosuzione) (Thomas, 2009; Wettlaufer et al., 2006; Zhou et al., 2013) ed è discussa nel dettaglio nei successivi paragrafi.

Raggiunto il fronte di congelamento, l'acqua congela in corrispondenza di esso, portando ad un accumulo di ghiaccio. Valori alti di suzione si raggiungono anche nel terreno congelato ma, in pratica, non c'è flusso di acqua a causa dell'estrema riduzione della permeabilità con il contenuto di ghiaccio.

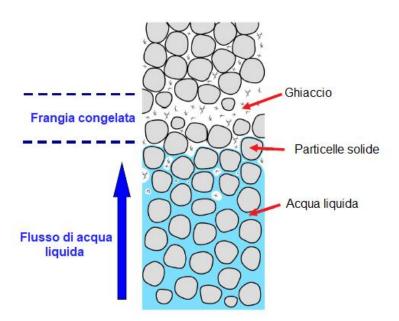


Figura 2.3: Fenomeno di congelamento del terreno con formazione della frangia congelata (Gens, 2010)

In figura 2.4 è illustrata una rappresentazione schematica delle distribuzioni di temperatura, pressioni e grado di saturazione liquido in un terreno congelato.

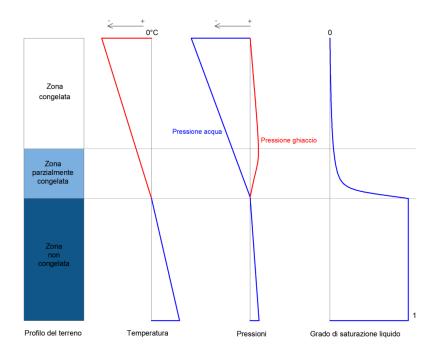


Figura 2.4: Rappresentazione schematica di un profilo di terreno congelato (modificato da Gens, 2010)

La temperatura ha un andamento lineare con la profondità raggiungendo il valore più basso in superficie. La distribuzione della pressione liquida e del ghiaccio è dovuta ad un equilibrio termodinamico piuttosto che ad una distribuzione idrostatica di pressioni (Gens, 2010). La pressione del ghiaccio in superficie è ipotizzata nulla e la corrispondente pressione liquida è calcolata utilizzando l'equazione di Clausius-Clapeyron (Henry, 2000), argomento che verrà affrontato in seguito (capitolo 3.2).

La pressione dell'acqua si riduce linearmente sino a zero dalla sommità dello strato congelato fino allo strato non congelato, raggiungendo valori negativi nella porzione di terreno congelata; i valori di pressione negativa sono dovuti alla suzione capillare che agisce come forza di richiamo dell'acqua verso il fronte congelato. Il grado di saturazione del ghiaccio è calcolato a partire della pressione dell'acqua, del ghiaccio e in funzione della temperatura attraverso la curva di ritenzione che mette in relazione il grado di saturazione dell'acqua liquida con la suzione criogenica. Diverse forme della curva di ritenzione sono introdotte nel capitolo 3.2.

Effetto della temperatura

In condizioni normali, l'acqua pura congela a 0°C. La temperatura che induce il cambiamento di fase nella parte fluida di un sedimento, che viene quindi identificata come *freezing point* del terreno stesso, è qualche grado al di sotto di 0°C, anche considerando come fluido interstiziale l'acqua pura. Questo è dovuto al fatto che l'acqua è dispersa in tantissimi micropori, dove risente delle forze di attrazione generate dalle particelle solide e dall'interazione elettrica tra grani solidi e molecole d'acqua, che abbassano il punto di congelamento del sistema trifasico costituito da matrice solida, aria ed acqua interstiziale. Questo fenomeno è noto come *freezing point depression* (Bing et al., 2011).

Per un dato terreno, l'abbassamento della temperatura di congelamento è influenzato principalmente dal contenuto d'acqua, dal contenuto e dalla tipologia dei sali disciolti nel fluido, dallo stato di compattazione e dal carico imposto (Van Everdingen, 1976).

A seconda delle variazioni di temperatura che avvengono all'interno del terreno, il processo di congelamento può essere suddiviso in tre fasi (Bing et al., 2011), come schematizzato in figura 2.5:

- i. fase precedente alla nucleazione spontanea ($T < T_{sn}$): l'acqua all'interno dei pori non comincia a ghiacciare fino a che non viene raggiunta la temperatura di nucleazione spontanea T_{sn} . Al suo raggiungimento, inizia la formazione di nuclei di ghiaccio che inizialmente coinvolgono solo poche molecole. In questo stadio il sistema terreno-acqua interstiziale si trova ad una temperatura di pochi gradi inferiore alla temperatura di congelamento T_f e l'acqua è *supercooled* (cioè raffreddata a temperature inferiori a quella di congelamento) in una condizione di equilibrio instabile. Tali condizioni inducono, in questa fase, alla formazione dei primi nuclei di ghiaccio;
- ii. fase di nucleazione spontanea con rilascio di calore latente: durante la formazione dei primi nuclei di ghiaccio viene rilasciato il calore latente che innalza la temperatura del sistema velocemente sino al raggiungimento della temperatura di congelamento T_f , la quale si mantiene costante per un certo tempo, durante il quale il processo di congelamento dell'acqua libera nei pori si sviluppa in modo stabile. In questa fase, l'acqua interstiziale congela gradualmente continuando a rilasciare calore latente;

iii. decremento graduale della temperatura: al procedere della sottrazione di calore dal terreno, una volta che tutta l'acqua libera ha effettuato il cambiamento di fase, il processo di raffreddamento e congelamento procede coinvolgendo anche l'acqua debolmente legata e in fasi successive quella appartenente a gusci sempre più interni alla struttura del doppio strato elettrico, pur sempre mantenendo la presenza di una specifica quantità di acqua non congelata attorno alle particelle solide.

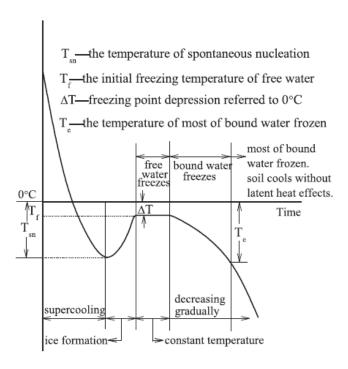


Figura 2.5: Curva di raffreddamento del sistema terreno-acqua interstiziale (Bing et al., 2011)

In questa ultima fase, finché la temperatura viene mantenuta costantemente sotto lo zero, le lenti di ghiaccio agiscono come nuclei di aggregazione attraendo altre molecole di acqua, cominciando da quelle più disponibili a lasciare il precedente legame elettrico con le particelle solide. Si instaura quindi una sorta di migrazione di molecole d'acqua verso i nuclei di congelamento, in risposta al gradiente termico e idraulico, che produce l'accrescimento delle dimensioni delle lenti di ghiaccio. La migrazione delle molecole d'acqua verso la zona di congelamento è conseguenza della suzione capillare risultante dal gradiente di pressione che si forma in un terreno congelato: la *criosuzione*.

Meccanismi di pre-fusione

Come anticipato, in un terreno soggetto ad un processo di congelamento parte dell'acqua interstiziale solidifica (acqua libera) mentre l'acqua adsorbita che si trova in prossimità delle particelle solide, forma dei legami forti con esse e un sottile film liquido permane anche a temperature al di sotto della temperatura di congelamento.

Secondo la teoria della "dinamica della pre-fusione" (*premelting dynamic*) di Wettlaufer et al. (2006), esistono due tipi di meccanismi termodinamici che controllano il comportamento di un terreno congelato. Questi due meccanismi, noti in letteratura come, *curvature-induced premelting* e *interfacial premelting*.

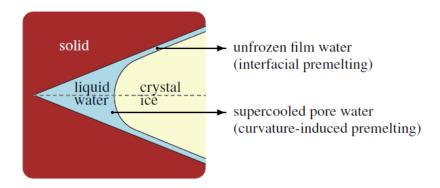


Figura 2.6: Illustrazione del fenomeno di curvature-induced premelting e interfacial premelting durante l'intrusione di ghiaccio in un solido bagnato a forma di cuneo (Zhou et al., 2013)

In figura 2.6 sono illustrati i meccanismi di *curvature-induced premelting* e *interfacial premelting*. Dalla figura si osservano due regioni distinte: la prima (interfacial premelting) in cui la presenza di un film liquido di acqua separa i granuli di terreno dal ghiaccio nei punti in cui le loro superfici sono vicine; la seconda (curvature-induced premelting) caratterizzata da un elevato raggio di curvatura tale che l'interfaccia ghiaccio-liquido è relativamente distante dalle particelle di terreno.

Il meccanismo di *curvature-induced premelting*, conseguenza delle tensioni superficiali dell'acqua intrappolata tra i grani, genera acqua *supercooled*, secondo la legge di Gibbs-Thomson, che produce un effetto simile alla suzione capillare. I pori molto minuti avranno una curvatura maggiore e ciò risulta in una pressione più elevata permettendo all'acqua di esistere allo stato liquido anche a temperature di alcuni gradi al di sotto della temperatura di congelamento.

D'altra parte, il fenomeno di *interfacial premelting* genera un film di acqua liquida che separa il ghiaccio dai grani di terreno. Un ampio divario tra i grani implica meno punti di contatto tra i grani stessi e di conseguenza una minor resistenza meccanica del terreno. La presenza di questo film di acqua è legata ad un bilancio energetico: l'energia superficiale delle interfacce particelle solide-acqua liquida e acqua liquida-ghiaccio è minore dell'energia superficiale dell'interfaccia particelle solide-ghiaccio, pertanto, i granuli di terreno, essendo idrofili, tendono a creare contatti con l'acqua liquida piuttosto che con il ghiaccio. Lo spessore di questi film liquidi dipende dalla temperatura, in particolare diminuisce al decrescere della temperatura (Wettlaufer et al., 2006).

L'esistenza di questo film di acqua è un prerequisito fondamentale per l'interpretazione del meccanismo della criosuzione e della formazione delle lenti di ghiaccio. Tali meccanismi sono presentati e discussi di seguito.

Criosuzione

Nel punto in cui avrà luogo la nucleazione spontanea del ghiaccio, si instaura un disequilibrio locale tra le forze di coesione intergranulare tra particelle contigue che vengono sovrastate dalle forze dette "dissocianti" *disjoining pressures* (Henry, 1988). La componente più significativa di tali forze è costituita dalla forza di repulsione elettrica prodotta tra ioni caratterizzati dalla medesima carica elettrica; esse sono proporzionali all'inverso della pressione idrostatica all'interno dei film liquidi: una diminuzione dello spessore del film liquido porta ad un aumento delle forze disgreganti tra le particelle solide.

La figura 2.7 mostra un ingrandimento della frangia congelata in corrispondenza della quale sta avvenendo la transizione di fase dell'acqua liquida in ghiaccio. A causa del meccanismo di *interfacial premelting*, un film di spessore sottile di acqua non congelata separa la particella di terreno da quella del ghiaccio.

Assumendo che la regione in alto sia più "fredda" rispetto quella in basso, si instaura un gradiente termico (∇T) diretto verso la zona "calda". Il film liquido che circonda il grano di terreno, dunque, sarà caratterizzato da uno spessore maggiore in prossimità della regione più "calda" e di conseguenza da una diminuzione della forza dissociante, nota anche come pressione termo-molecolare p_T (Rempel et al., 2001).

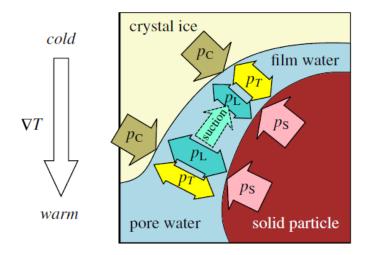


Figura 2.7: Schematizzazione del processo di criosuzione (Zhou et al., 2013)

La pressione esterna agente sul cristallo di ghiaccio p_C , identica a quella agente sulle particelle solide p_S , per equilibrio, devono eguagliare la somma della pressione termo-molecolare p_T e della pressione idrodinamica del film liquido p_L , secondo la relazione:

$$\Delta P = p_S - p_C = p_T + p_L \tag{2.2}$$

se la pressione esterna viene mantenuta costante, l'equilibrio dell'equazione (2.2), richiede che la pressione idrodinamica p_L diminuisca in corrispondenza del lato "freddo".

Alla variazione di spessore del film liquido è accompagnata una corrispondente variazione di pressione del film stesso p_L , che genera dunque un gradiente idraulico (∇P) , parallelo ma in direzione opposta al gradiente termico (∇T) . Tale differenza di pressione agisce come forza di richiamo realizzando una sorta di migrazione di molecole d'acqua dalla zona "calda" verso la regione più fredda. Questo fenomeno è denominato *criosuzione*, ed è stato identificato come fattore scatenante il fenomeno di criosollevamento osservato nei terreni suscettibili al gelo (Thomas, 2009). La migrazione delle molecole d'acqua verso il fronte congelato continua fino a che si mantengono le condizioni di disequilibrio, accrescendo le dimensioni dell'area ghiacciata.

Formazione e accrescimento delle lenti di ghiaccio

Il ghiaccio si estende nei pori formando progressivamente una rete connessa. Infatti, sono questi, tra loro interconnessi, che costituiscono il mezzo attraverso cui le molecole d'acqua migrano verso i nuclei di congelamento garantendo la mobilità delle molecole di acqua e lo sviluppo del processo, anche nei terreni già parzialmente ghiacciati dove la parte centrale dei pori è già occupata dal ghiaccio (Henry, 1988).

In figura 2.8a è rappresentata una particella di terreno separata dal ghiaccio dal film di acqua non congelata. Lo spessore del film liquido dipende solo dalla temperatura e, assumendo un gradiente di temperatura costante, lo spessore del film, durante la migrazione delle molecole d'acqua verso le aree a temperatura minore, resterà inalterato e sarà minore nelle zone a temperatura minore.

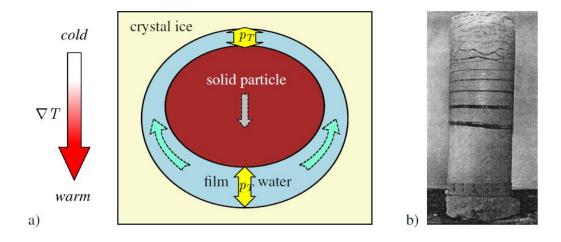


Figura 2.8: a) Schematizzazione del ricongelamento termico (Zhou et al., 2013); b) Fotografia del criosollevamento di un provino di terreno congelato causato dalla formazione di strati alternati di lenti di ghiaccio (Taber, 1929)

La migrazione delle molecole d'acqua per effetto della suzione criogenica, fa si che l'acqua si accumuli e congeli nelle zone più fredde, forzando la particella di terreno a muoversi verso le zone a temperatura maggiore, con una certa velocità. L'esistenza della *disjoining pressure* (forza di repulsione) è essenziale affinché le particelle di terreno vengano allontanate dalla zona di congelamento consentendo la formazione di lenti di ghiaccio.

L'acqua richiamata verso il fronte di congelamento si muove attraverso il film di acqua non congelata che circonda i grani, si ricongela e provoca l'accrescimento

della lente di ghiaccio, questo fenomeno è chiamato ricongelamento termico (in inglese "Thermal regelation").

Man mano che le particelle vengono spinte verso il basso, si forma uno strato di ghiaccio via via sempre più isolato. Nel momento in cui il ghiaccio inizia a connettersi nei pori si ha la formazione di una lente di ghiaccio, la quale accresce man mano che le altre molecole di acqua richiamate dalle lenti di ghiaccio subiscono in corrispondenza di esse il cambiamento di fase.

L'aumento di volume di una lente di ghiaccio continua fino a che permane la disponibilità di acqua per accrescerla; una possibile sorgente d'acqua è quella proveniente dalla falda, dove la temperatura è costantemente al di sopra del punto di congelamento. Il fenomeno si interrompe dunque quando il flusso di molecole d'acqua diventa insufficiente in conseguenza alla riduzione progressiva di permeabilità del terreno stesso dovuta dalla presenza del ghiaccio nei pori, oppure quando le condizioni di temperatura necessarie alla formazione dei nuclei di ghiaccio non sono più garantite a causa del rilascio di calore latente che innalza la temperatura del terreno al di sopra della temperatura di nucleazione spontanea.

Quando ciò avviene, la *frozen fringe* si stabilizza ad un livello più profondo interrompendo il flusso d'acqua alla lente di ghiaccio superiore. Qui si realizzano le condizioni necessarie per instaurare nuovamente il fenomeno di formazione delle lenti di ghiaccio.

I modelli costitutivi dei terreni congelati

Negli ultimi decenni, la modellazione termo-idro-meccanica (THM) è cominciata ad essere utilizzata nell'ambito del congelamento dei terreni, al fine di predire l'evoluzione del processo di congelamento del terreno e a controllare il regime di congelamento. Alcune delle applicazioni THM nel campo della geo-meccanica a basso regime di temperatura includono: la predizione del criosollevamento, l'analisi di condotte interrate nel permafrost, il congelamento artificiale del terreno e la previsione dei cedimenti delle fondazioni costruite nelle regioni fredde.

In tali scenari, è inevitabile che il campo termico, meccanico e idraulico si influenzino a vicenda. In figura 3.1 sono illustrati schematicamente i principali fenomeni, e le loro mutue interazioni, che entrano in gioco in un mezzo poroso soggetto a perturbazioni termo-idro-meccaniche simultanee.

I processi termo-idro-meccanici indotti dal congelamento e dallo scongelamento dell'acqua di porosità in un terreno saturo sono complessi e accoppiati (Nishimura et al., 2009). Al diminuire della temperatura, il contenuto di ghiaccio all'interno del terreno aumenta; al contenuto crescente di ghiaccio si accompagnano un aumento di resistenza e modifiche della pressione interstiziale e dello stato di sforzo efficace che agisce sullo scheletro solido, che a loro volta, inducono deformazioni meccaniche. Allo stesso tempo, eventuali variazioni delle condizioni idrauliche e meccaniche al contorno possono condizionare i processi di convezione termica e la formazione di ghiaccio nel terreno (Gens, 2010).

Una conseguenza inevitabile di tutti quei fenomeni che interagiscono simultaneamente è la necessità di effettuare analisi THM accoppiate in cui tutti gli aspetti principali del problema possano essere considerati in modo integrato.

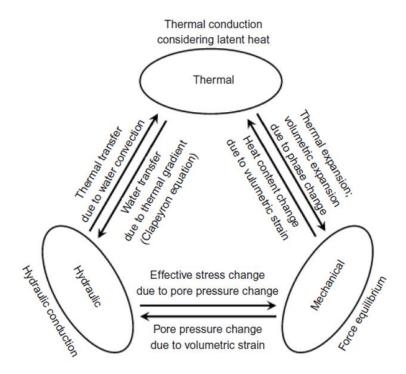


Figura 3.1: Interazioni termo-idro-meccaniche in terreni congelati (Thomas, 2009)

La formulazione generale del problema THM nei mezzi porosi, il codice di calcolo utilizzato e l'estensione della formulazione generale per l'applicazione ai terreni congelati sono presentati nei prossimi paragrafi.

3.1. La modellazione numerica accoppiata termo-idromeccanica per i mezzi porosi

Il modello matematico completo necessario per simulare il comportamento termoidro-meccanico (THM) di mezzi porosi completamente e/o parzialmente saturi è stato presentato da Olivella et al., (1994) per la modellazione THM del trasporto multifase di salamoia e gas attraverso terreni salini. La formulazione generale è descritta brevemente nei paragrafi che seguono. Nel paragrafo 3.2, la formulazione viene ridotta al caso dei terreni congelati in cui la fase gassosa viene sostituita da una nuova fase solida (ghiaccio).

Gli aspetti termo-idro-meccanici sono presi in considerazione includendo l'accoppiamento tra di loro in tutte le possibili direzioni. Come illustrato in figura 3.2 il problema è formulato con un approccio multifase e multispecie.

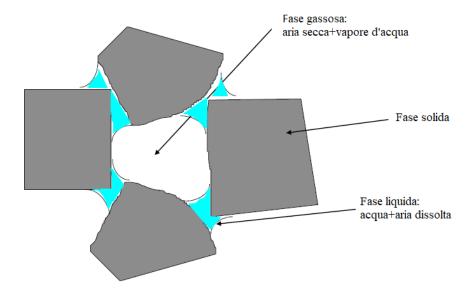


Figura 3.2: Rappresentazione schematica di un materiale poroso parzialmente saturo (DIT-UPC, 2022)

Le tre fasi sono:

- la fase solida (s);
- la fase liquida (l): acqua + aria dissolta + soluto;
- la fase gassosa (g): miscela di aria secca e vapore d'acqua.

Le specie sono:

- solido (—): minerale;
- acqua (w): come liquido o fase gassosa evaporata;
- aria (a): aria secca, come gas dissolto o come gas dissolto nella fase liquida.

La formulazione matematica utilizza un approccio macroscopico sviluppato nel contesto della teoria del continuo per mezzi porosi tenendo conto dei seguenti principali fenomeni:

- trasporto di calore: conduzione del calore; avvezione di calore (acqua liquida e vapore acqueo); cambiamenti di fase;
- flusso di acqua: avvezione in fase liquida; diffusione del vapore acqueo;
- flusso d'aria: fase gassosa; soluzione di aria in acqua; diffusione dell'aria dissolta;

 comportamento meccanico: dilatazione termica dei materiali; comportamento dei terreni e delle rocce dipendente dallo stato tensionale, suzione e temperatura.

Questi fenomeni THM sono stati incorporati in una formulazione accoppiata costituita da tre gruppi principali di equazioni (Olivella et al., 1994):

- Equazioni di bilancio;
- Equazioni costitutive;
- Restrizioni dell'equilibrio.

3.1.1. Equazioni di bilancio

Le equazioni di bilancio della massa sono sviluppate seguendo un approccio composizionale. Questo approccio consiste nel bilanciare le specie (minerale, acqua e aria) piuttosto che bilanciare le fasi (solida, liquida e gassosa). Per specie si intende uno specifico composto presente in una o più fasi o un gruppo di composti con caratteristiche medie.

Le equazioni di bilancio sono formulate per ogni fase α e per ogni specie o componente i. Nella notazione, il pedice viene utilizzato per identificare la fase (s per solido, l per liquido e g per gas) e l'apice indica la specie: "w" per acqua e "a" per aria. Nessun simbolo è attribuito alla specie minerale, perché si ipotizza che coincida con la fase solida.

Equazione di bilancio della massa d'acqua

In un mezzo poroso l'acqua è presente sia nella fase liquida sia in quella gassosa. Il bilancio totale della massa di acqua è espresso dall'equazione (3.1):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi \right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w \right) = f^w \tag{3.1}$$

dove:

- θ_l^w frazione di massa di acqua nella fase liquida;
- θ_a^w frazione di massa di acqua nella fase gassosa;
- φ porosità;

- S_{α} frazione del volume dei pori occupato dalla fase alpha ($\alpha = l, g$);
- \mathbf{j}_{I}^{w} flusso totale di acqua nella fase liquida;
- \mathbf{j}_{a}^{w} flusso totale di acqua nella fase gassosa;
- $-f^{w}$ approvvigionamento esterno di massa di acqua per unità di volume.

I termini che compaiono nell'equazione (3.1) hanno il seguente significato: il primo termine rappresenta l'accumulo della specie i in fase α , dovuta a cambi di pressione, temperatura, composizione; il secondo termine tiene conto delle variazioni di massa di i dovute al moto medio; l'ultimo termine rappresenta un apporto esterno della specie i.

Equazione di bilancio della massa d'aria

Analogamente, il bilancio totale della massa di aria è espresso dall'equazione (3.2):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi \right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a \right) = f^a \tag{3.2}$$

dove:

- θ_l^a frazione di massa di aria nella fase liquida;
- θ_a^a frazione di massa di aria nella fase gassosa;
- \mathbf{j}_{l}^{a} flusso totale di aria nella fase liquida;
- \mathbf{j}_{q}^{a} flusso totale di aria nella fase gassosa;
- $-f^a$ approvvigionamento esterno di massa di aria per unità di volume.

Si noti che l'aria secca è considerata come una singola specie nonostante sia una miscela di gas. La fase gassosa è assunta come una miscela di aria e vapore acqueo.

Equazione di bilancio della massa solida

L'equazione di bilancio della massa della fase solida si scrive come:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s (1 - \phi)) + \nabla \cdot (\rho_s (1 - \phi) \dot{\mathbf{u}}) = 0 \tag{3.3}$$

dove $\dot{\mathbf{u}}$ è il vettore velocità della fase solida e ρ_s la densità dello scheletro solido. La variazione delle porosità in termini di variazione di densità della fase solida e

della deformazione volumetrica dello scheletro del suolo si ottengono dall'equazione (3.3).

Equazione di bilancio dell'energia interna

L'equazione di bilancio dell'energia interna per il mezzo poroso viene definita considerando l'energia interna specifica di ciascuna fase (e_s, e_l, e_a) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[e_s \rho_s (1 - \phi) + e_l \rho_l S_l \phi + e_g \rho_g S_g \phi \right] + \nabla \cdot \left(\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{es} + \mathbf{j}_{el} + \mathbf{j}_{eg} \right) = f^e \quad (3.4)$$

dove:

- e_{α} energia interna specifica della fase α ;
- ρ_{α} densità della fase α ;
- f^e approvvigionamento esterno di energia unità di volume del mezzo;
- i_c flusso di calore per conduzione;
- $\mathbf{j}_{e\alpha}$ flusso di energia dovuto al moto della fase α .

I processi più importanti di trasferimento di energia in un mezzo poroso sono stati considerati nell'equazione (3.4); essi sono: conduzione, avvezione e cambiamento di fase. Si ipotizza un equilibrio termico tra le fasi, quindi la temperatura è la stessa in ogni fase. Sulla base di questa assunzione, è richiesta una singola equazione dell'energia totale.

3.1.2. Equazioni costitutive e restrizioni dell'equilibrio

Associate a questa formulazione c'è un insieme di leggi costitutive e di equilibrio. In tabella 3.1 sono riassunte le leggi costitutive e le restrizioni dell'equilibrio che possono essere incorporate nella formulazione generale. Sono incluse anche le variabili dipendenti ricavate da ciascuna legge.

Le equazioni costitutive stabiliscono il legame tra le incognite e le variabili dipendenti. Esistono diverse categorie di variabili dipendenti a seconda della complessità con cui sono correlate alle incognite.

Tabella 3.1: Leggi costitutive e restrizioni all'equilibrio (Olivella et al., 1996)

Equazioni	Nome della variabile
Equazioni costitutive	
Legge di Darcy	Flusso additivo del gas e del liquido (la conducibilità dipende dalla porosità, contenuto d'acqua e temperatura)
Legge di Fick	Flusso del vapore e dell'aria non additivo; flusso del soluto non additivo (di fusione + dispersione)
Legge di Fourier	Flusso di calore (la conducibilità termica dipende dalla porosità, il contenuto d'acqua e la temperatura)
Curva di ritenzione	Fase liquida grado di saturazione
Modelli costitutivi	Tensore delle tensioni. Modelli per terreni in condizioni di parziale saturazione
Densità del liquido	Dipende dalla pressione, temperatura e concentrazione del soluto
Legge dei gas	Densità del gas. Legge ideale dei gas per le miscele di vapore e aria secca. Restrizioni dell'equilibrio
Restrizioni dell'equilibrio	
Legge di Henry	Frazione della massa di aria dissolta
Legge psicrometrica	Frazione della massa di vapore funzione della temperatura e della pressione capillare

Introducendo le equazioni costitutive nelle equazioni di bilancio è possibile scrivere le equazioni di governo in termini di incognite. Le leggi costitutive di base sono divise in tre gruppi principali, vale a dire: termico, idraulico e meccanico. Nonostante questa distinzione tra le tre componenti fondamentali del problema, le equazioni costitutive forniscono infatti i legami che accoppiano i vari fenomeni termo-idro-meccanici considerati nella formulazione.

Un altro tipo di equazioni che legano le variabili dipendenti alle incognite del problema sono le equazioni di restrizioni dell'equilibrio. Nella formulazione si assume che i cambiamenti di fase siano rapidi rispetto ai fenomeni di trasporto che avvengono nei mezzi porosi. Pertanto, i cambiamenti di fase possono essere considerati in equilibrio locale, dando origine a una serie di restrizioni dell'equilibrio che devono essere soddisfatte in ogni istante temporale. Le restrizioni dell'equilibrio si ottengono ipotizzando un equilibrio chimico per la concentrazione di vapore acquea nella fase gassosa e per la concentrazione di aria dissolta nella fase liquida.

3.2. La modellazione numerica accoppiata termo-idromeccanica per i terreni congelati

La formulazione matematica termo-idro-meccanica presentata nel precedente paragrafo si basa sulla modellazione THM formulata da Olivella et al., (1994, 1996) e Gens et al. (1998) per problemi caratterizzate da elevate temperature e che includono una fase gassosa. I problemi a bassa temperatura possono essere considerati con la stessa struttura globale presentata nel paragrafo 3.1, se la fase gassosa viene sostituita da una nuova fase solida che rappresenta il ghiaccio (Nishimura et al., 2009).

3.2.1. Equazioni di bilancio

Utilizzando come variabili primarie il vettore degli spostamenti \boldsymbol{u} , la pressione dell'acqua liquida p_l e il campo di temperatura T, il comportamento termo-idromeccanico accoppiato di un mezzo poroso durante il congelamento può essere descritto dalle corrispondenti equazioni di bilancio, le quali formano un insieme di equazioni differenziali da essere risolte per via numerica utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM).

formulazione delle equazioni di bilancio del presente modello si assume che il volume dei pori ad ogni istante sia completamente saturo e, occupato in parte dal ghiaccio e in parte dall'acqua porosa che rimane in forma liquida.

Equazione di bilancio della massa solida

L'equazione di bilancio della massa della fase solida si scrive come:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_s (1 - \phi)) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_s) = 0 \tag{3.5}$$

Equazione di conservazione della massa d'acqua

In un mezzo poroso multifase, considerando la possibile transizione di fase tra l'acqua liquida e il ghiaccio, l'equazione di conservazione della massa relativa ad ogni fase può essere scritta come:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_l^w S_l \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^w) = f^w \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_i^w S_i \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_i^w) = f^w \tag{3.7}$$

Sommando le equazioni (3.6) e (3.7), l'equazione di conservazione della massa di acqua per la fase liquida (acqua) e per la fase solida (ghiaccio) diventa:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(\theta_l^w S_l \phi + \theta_i^w S_i \phi) \right] + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_i^w) = f^w$$
(3.8)

dove:

- θ_i^w frazione di massa di acqua nella fase ghiaccio;
- S_i frazione del volume dei pori occupato dalla fase ghiaccio;
- \mathbf{j}_{i}^{w} flusso totale di acqua nella fase ghiaccio;

Nell'equazione (3.8) la riduzione della densità quando l'acqua si trasforma in ghiaccio deve essere considerata. Al termine del passaggio di stato, la densità del ghiaccio è 916.2 kg/m³ e aumenta lievemente al decrescere della temperatura (ad esempio 918.9 kg/m³ a -10°C e 925.7 kg/m³ a -100°C).

In generale, il flusso di ghiaccio nei pori rispetto allo scheletro solido è molto più lento rispetto al flusso di acqua, pertanto nella formulazione si è assunto un flusso nullo del ghiaccio rispetto la fase solida ($\mathbf{j}_i^w = \mathbf{j}_s$).

Equazione di conservazione dell'energia

Le modalità secondo le quali avviene la trasmissione del calore sono la convezione, la conduzione e l'irraggiamento (quest'ultimo viene in genere trascurato, poiché costituisce una piccola percentuale del calore scambiato).

L'equazione di conservazione dell'energia può essere scritta, tenendo conto di entrambi i processi di trasferimento di calore e del termine legato all'accumulo di energia in regime transitorio, come:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[e_s \rho_s (1 - \phi) + e_l \rho_l S_l \phi + e_i \rho_i S_i \phi \right] + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{es} + \mathbf{j}_{el} + \mathbf{j}_{ei}) = f^e \tag{3.9}$$

Le energie interna specifiche e_s , e_l e e_i sono date da:

$$e_s = c_s T;$$
 $e_l = c_l T;$ $e_i = -L + c_i T$ (3.10)

dove c_s , c_l e c_i sono la capacità termica specifica delle particelle solide, acqua liquida e ghiaccio, rispettivamente; L è il calore latente di fusione. Il calore specifico del ghiaccio (2.05 kJ/kg K a 0°C) è significativamente minore di quello dell'acqua liquida (4.18 kJ/kg K a 25°C).

Si può notare che l'energia interna specifica del ghiaccio contiene un termine aggiuntivo che rappresenta il termine di calore latente. Le conseguenze termiche dei cambiamenti di fase che si verificano a causa del congelamento/scioglimento dell'acqua vengono quindi prese in considerazione in modo semplice.

Il flusso di calore comprende diversi meccanismi. Il meccanismo di trasporto di calore più importante, in problemi non isotermi, è la conduzione \mathbf{i}_c , ma per completezza nell'equazione (3.9) sono stati inclusi anche i contributi avvettivi dovuti al movimento della fase solida, liquida e del ghiaccio.

Equazioni di conservazione del momento

Trascurando il termine delle forze d'inerzia, l'equazione di conservazione del momento si riduce all'equazione di equilibrio:

$$\nabla \cdot \mathbf{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \tag{3.11}$$

dove:

- σ indica il tensore delle tensioni totali;
- ρ indica la densità del mezzo poroso;
- g indica il vettore dell'accelerazione gravitazionale.

La densità del mezzo poroso è espressa come:

$$\rho = (1 - \phi)\rho_s + \phi S_l \rho_l + \phi S_i \rho_i \tag{3.12}$$

in cui ϕ è la porosità, S_l e S_i sono rispettivamente il grado di saturazione dell'acqua e del ghiaccio.

3.3. I modelli costitutivi termo-idraulici dei terreni congelati

In letteratura, ormai è noto che esiste una forte analogia tra il comportamento di un terreno parzialmente saturo e un terreno congelato. 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 in cui i vuoti sono occupati dalla fase liquida rappresentata dall'acqua e dalla fase gassosa rappresentata dall'aria. La suzione di matrice che si forma tra le fasi acqua e aria nei terreni insaturi può essere sostituita dalla suzione criogenica che si verifica nei terreni ghiacciati.

La schematizzazione delle fasi presenti in un terreno congelato è illustrata in figura 3.3; il terreno congelato è modellato come un mezzo trifase, costituito da particelle solide (grani), fase liquida (acqua) e fase solida (ghiaccio).

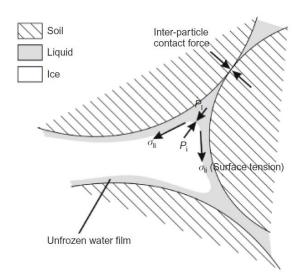


Figura 3.3: Schematizzazione delle fasi presenti nei terreni congelati (Nishimura et al., 2009)

Sia nel caso di terreni parzialmente saturi che congelati si sviluppano delle tensioni superficiali di interfaccia, σ_{ij} , lungo le superfici che delimitano le due fasi, al diminuire della temperatura. Queste tensioni superficiali devono essere bilanciate dalla differenza di pressioni tra le due fasi stesse. Nel caso dei terreni congelati la differenza di pressione del ghiaccio e la pressione dell'acqua prende nome di suzione criogenica o criosuzione, s, ed è definita come:

$$s = \max(p_i - p_l; 0) \tag{3.13}$$

nella quale p_i è la pressione del ghiaccio e p_l è la pressione dell'acqua.

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

Come già discusso nel capitolo 2, il passaggio di stato dell'acqua interstiziale avviene quando la temperatura del terreno scende al di sotto del punto di congelamento dello stesso; a questo punto avviene il rilascio di calore latente di solidificazione. L'espansione volumetrica dell'acqua in seguito al passaggio di stato (in ghiaccio) causa un incremento della pressione interstiziale nei pori non congelati. All'interfaccia acqua-ghiaccio, il gradiente di suzione criogenica, che si instaura in risposta al gradiente termico, regola la migrazione dell'acqua verso il fronte congelato. L'interazione tra il trasferimento di calore e la migrazione dell'acqua interstiziale è descritta dalla curva di ritenzione del ghiaccio (Anderson et al., 1972; Nishimura et al., 2009; Van Genuchten et al., 1980) che mette in relazione il grado di saturazione dell'acqua liquida con la temperatura, e dall'equazione di equazione di Clausius-Clapeyron, la quale stabilisce il legame tra la pressione dell'acqua liquida e la pressione del ghiaccio per un dato valore di temperatura (Henry, 2000).

Nei paragrafi che seguono vengono descritti i tipici modelli costitutivi utilizzati per descrivere la capacità dei terreni congelati di trattenere l'acqua non congelata all'interno dei pori e i modelli utilizzati per descrivere il flusso di acqua non congelata nei terreni.

Curva di ritenzione del ghiaccio

Uno degli aspetti principali da considerate per descrivere il comportamento dei terreni congelati è la curva di ritenzione del ghiaccio (SFSS, in inglese "Soil Freezing Characteristic Curve"), che mette in relazione il grado di saturazione dell'acqua liquida, S_l con le proprietà termodinamiche del terreno.

Il meccanismo che lega la variazione di volume della fase liquida in relazione al ghiaccio è definito in funzione delle proprietà termodinamiche dell'acqua. L'equilibrio termodinamico per un sistema bifasico, che si ottiene se risultano soddisfatte le condizioni di equilibrio meccanico, termico e chimico, è espresso dall'equazione di Clausius-Clapeyron:

$$dp_i = \frac{\rho_i}{\rho_l} dP_l - \frac{\rho_l L}{T} dT \tag{3.14}$$

in cui L è il calore latente di fusione (333.7 kJ/kg), p_i e p_l sono la pressione del ghiaccio e la pressione dell'acqua, ρ_i e ρ_l sono rispettivamente la densità dell'acqua ghiacciata e dell'acqua, liquida, e T è la temperatura misurata in scala termodinamica. Questa forma differenziale può essere integrata utilizzando la pressione atmosferica e la temperatura T=273.15 K come valori di riferimento, per ottenere:

$$p_{i} = \frac{\rho_{i}}{\rho_{l}} p_{l} - \rho_{i} L \ln \left(\frac{T}{273.15 \text{ K}} \right)$$
 (3.15)

da cui è possibile ricavare la criosuzione, come segue:

$$s = p_i - p_l = \left(\frac{\rho_i}{\rho_l} - 1\right) p_i - \rho_i L \ln\left(\frac{T}{273.15 \text{ K}}\right)$$
 (3.16)

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. Il processo di migrazione dell'acqua verso il fronte congelato dovuto al gradiente di pressione e al gradiente di temperatura è detto suzione criogenica. Alla crescita in suzione è correlata la diminuzione dell'acqua liquida contenuta nel terreno e, quindi, del grado di saturazione.

Molti ricercatori hanno sviluppato curve di ritenzione del ghiaccio attraverso l'analogia con i modelli di ritenzione idrica sviluppati per descrivere il comportamento di imbibizione e asciugatura dei terreni parzialmente saturi, in cui la fase liquida e la fase gassosa coesistono nei vuoti interstiziali (Nishimura et al., 2009).

Uno dei primi modelli proposti per tenere conto della quantità di acqua non congelata nei terreni congelati è stato proposto da Tice et al., (1976). Il modello di Tice lega il grado di saturazione dell'acqua liquida S_l alla temperatura di congelamento T_0 attraverso la seguente equazione:

$$S_l = [1 - (T - T_0)]^{\alpha}$$
(3.17)

dove T è la temperatura, T_0 è la temperatura di congelamento alla pressione di riferimento (in condizioni atmosferiche è uguale a 273.15 K) e α è un parametro che dipende dalla dimensione dei pori (Tice et al., 1976).

La variazione del grado di saturazione dell'acqua non congelata in funzione della temperatura, per diversi valori di α , ottenuti dall'equazione (3.17) è presentata in figura 3.4. Il più basso valore di α fa riferimento ad un terreno a grana fine in cui la quantità di acqua non congelata è alta anche per bassi valori di temperatura.

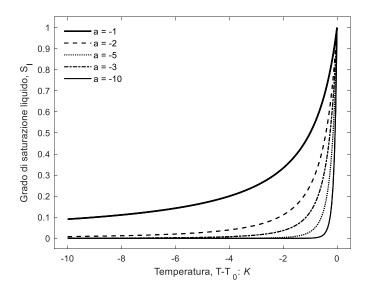


Figura 3.4: Relazione tra il grado di saturazione e la temperatura secondo il modello di Tice (1976) (modificato da Thomas(2009))

Un approccio alternativo per determinare la quantità di acqua non congelata è stato suggerito da Nishimura et al. (2009). Dall'analogia tra terreni congelati e terreni parzialmente saturi, è lecito assumere che la curva di ritenzione, per il terreno congelato e parzialmente saturo, può essere espressa da un'equazione avente la stessa forma, fatta eccezione di sostituire la pressione della fase gassosa con la pressione del ghiaccio. Utilizzando il modello di Van Genuchten (1980), essa può essere espressa in termini di grado di saturazione efficace e suzione criogenica come segue:

$$S_e = \left[1 + \left(\frac{p_i - p_l}{P} \right)^{\frac{1}{1 - m}} \right]^{-m}$$
 (3.18)

dove $S_e = (S_l - S_{res})/(1 - S_{res})$ è il grado di saturazione efficace, S_l il grado di saturazione dell'acqua liquida e S_{res} il grado di saturazione residuo, m è un parametro del materiale e P è il valore della pressione di ingresso del ghiaccio, legato al valore d'ingresso d'aria da $P = P_a \, \sigma_{li}/\sigma_{la}$, in cui σ_{li} e σ_{la} sono rispettivamente la tensione superficiale all'interfaccia tra acqua liquida e ghiaccio e all'interfaccia tra acqua liquida e aria. L'equazione (3.18) rappresenta la relazione

tra la pressione del ghiaccio p_i , la pressione dell'acqua p_l e il grado di saturazione della fase liquida S_l .

Sostituendo l'equazione (3.15) nella (3.18) la curva di ritenzione del ghiaccio può essere scritta mettendo in relazione il grado di saturazione efficace S_e con la temperatura T:

$$S_e = \left\{ 1 + \left[\frac{\left(\frac{\rho_i}{\rho_w} - 1 \right) p_l - \rho_i L \ln \left(\frac{T}{273.15 \text{ K}} \right)}{P} \right]^{\frac{1}{1-\text{m}}} \right\}^{-\text{m}}$$
(3.19)

L'influenza della pressione dell'acqua sul processo di congelamento è trascurabile in quanto il rapporto ρ_i/ρ_l è prossimo al valore di 1.

In analogia ai terreni parzialmente saturi, *P* ha un significato fisico chiaro; esso corrisponde al valore della pressione di ingresso del ghiaccio per cui ad una piccola variazione di suzione corrisponde un significativo incremento del contenuto di ghiaccio. Il valore di ingresso del ghiaccio è legato al fenomeno del *freezing point depression* (Konrad et al., 1980) per il quale la transizione di fase avviene in corrispondenza di una temperatura inferiore a zero gradi.

La figura 3.5 mostra una curva di ritenzione tipica per diversi valori dei parametri P (figura 3.5a) e m (figura 3.5b).

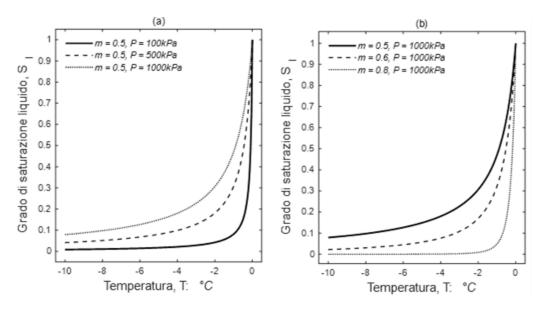


Figura 3.5: Curve di ritenzione secondo il modello di Van Genuchten (1980): (a) influenza del parametro P; (b) influenza del parametro m.

Legge di Darcy

Il flusso della sola fase liquida nel mezzo poroso è descritto solitamente dalla legge di Darcy, la quale esprime la dipendenza del campo di velocità di Darcy con il gradiente del carico totale.

La legge di Darcy generalizzata, espressa secondo le proprietà intrinseche del mezzo poroso e del fluido assume la seguente forma:

$$\mathbf{q}_{l} = -\frac{\mathbf{k} \, k_{rel}}{\mu_{l}} \, \left(\nabla p_{l} - \rho_{l} \mathbf{g} \right) \tag{3.20}$$

con:

- q₁ indica il vettore velocità di Darcy (m/s);
- **k** indica il tensore di permeabilità intrinseca (m²);
- k_{rel} indica la permeabilità relativa (adimensionale);
- μ_l indica il coefficiente di viscosità dinamica dell'acqua liquida (Pa·s);
- p_l indica la pressione dell'acqua (Pa);
- **g** indica il vettore dell'accelerazione gravitazionale (m/s²);
- ρ_l indica la densità dell'acqua (kg/m³).

La migrazione dell'acqua interstiziale verso il fronte di congelamento è governata dalla combinazione di due meccanismi:

- gradiente idraulico;
- gradiente termico.

Il primo meccanismo è descritto dalla legge di Darcy (3.20). Seguendo l'approccio presentato da Nakano (1990) che, la pressione e la temperatura sono due meccanismi indipendenti per il movimento dell'acqua interstiziale, il flusso di acqua nei terreni congelati può essere espresso come:

$$\mathbf{q}_{l} = -\frac{\mathbf{k} \, k_{rel}}{u_{l}} \left[(\nabla p_{l} - \rho_{l} \mathbf{g}) + \nabla s \right]$$
(3.21)

Sostituendo la (3.16) nella (3.21) la velocità di Darcy per un terreno congelato può essere riscritta come:

$$\mathbf{q_l} = -\frac{\mathbf{k} \, k_{rel}}{\mu_l} \left[(\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}) - \frac{\rho_i L}{T} \nabla T \right]$$
(3.22)

Il secondo termine nell'equazione (3.22) che rappresenta la suzione criogenica è stato derivato da considerazioni di equilibrio termodinamico mediante l'equazione di Clausius-Clapeyron.

La permeabilità intrinseca, **k** (comunemente utilizzata quando la legge di Darcy è espressa in termini di quota geometrica) e la conducibilità idraulica, **K**, del mezzo poroso sono correlate tra di loro dalla seguente relazione:

$$\mathbf{K} = \frac{\rho_l \, g}{\mu_l(T)} \, \mathbf{k} \tag{3.23}$$

La conducibilità idraulica **K** esprime la capacità di un mezzo poroso di essere attraversato dai fluidi; essa dipende dalle proprietà del mezzo poroso in cui avviene il flusso (granulometria, forma dei grani, distribuzione e forma dei pori), dalle proprietà del fluido che scorre (viscosità, densità) e il grado di saturazione del mezzo poroso.

La permeabilità intrinseca di un terreno congelato può essere stimata dalla permeabilità intrinseca del terreno non congelato (\mathbf{k}_0), determinata alla porosità di riferimento (ϕ_0), secondo il modello generalizzato di Kozeny-Carman:

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \frac{(1 - \phi_0)^2}{{\phi_0}^3}$$
 (3.24)

Infine, la viscosità dinamica μ_l è legata alla temperatura secondo l'espressione:

$$\mu_l = 2.1 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{1808.5}{273.15 + T}\right)$$
 (3.25)

dove la temperatura T è espressa in ${}^{\circ}C$ e la viscosità in MPa s.

Permeabilità relativa

Quando il terreno raggiunge un valore del grado di saturazione prossimo al grado di saturazione residuo, esso sviluppa una continuità della fase solida rappresentante il ghiaccio mentre la fase liquida diventa discontinua nei pori.

Data la difficoltà di effettuare misure dirette di permeabilità dei terreni congelati, la permeabilità effettiva di un terreno congelato può essere determinata analiticamente a partire dalla curva di ritenzione del ghiaccio, moltiplicando la permeabilità intrinseca con la permeabilità relativa. Analogamente ai terreni parzialmente saturi la permeabilità relativa di una fase dipende dal grado di saturazione della fase stessa. La permeabilità relativa derivata secondo il modello di Van Genuchten, espressa in funzione del grado di saturazione efficace, S_e , è data dall'equazione:

$$k_{rel} = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$
 (3.26)

In alternativa, essa può essere calcolata utilizzando la legge di potenza come:

$$k_{rel} = AS_e^{\beta} \tag{3.27}$$

in cui A e β sono parametri del modello.

Poiché la permeabilità relativa è legata al grado di saturazione, nei terreni a grana grossa si sviluppa uno strato impermeabile in minor tempo rispetto i terreni a grana fine.

Legge di Fourier

La conduzione è il meccanismo principale di trasferimento di energia termica che si manifesta quando due corpi a diversa temperatura entrano in contatto tra di loro senza movimento macroscopico di materia. Il trasferimento di energia richiede quindi la presenza di un gradiente termico negativo. La proprietà del terreno che controlla lo scambio termico per conduzione è la conducibilità termica λ .

Il flusso termico per conduzione è descritto dalla legge di Fourier come segue:

$$\mathbf{i}_{c} = -\lambda \, \nabla T$$

in cui:

- \mathbf{i}_c indica flusso termico trasferito per conduzione (W/m²);
- λ indica la conducibilità termica del mezzo poroso (W/m·K);
- T indica il campo scalare delle temperature funzione del tempo e dello spazio, all'interno del volume di terreno considerato.

La legge di Fourier esprime la diretta dipendenza tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura all'interno di un corpo: maggiore il gradiente, maggiore la quantità di calore che fluirà dalle regioni a temperatura maggiore verso quelle a temperatura minore.

Quando si parla di conducibilità termica nei terreni, si deve tenere presente che il postulato di Fourier ha come assunzione alla base di essere in un corpo omogeneo, nel caso invece di un corpo eterogeneo, si parla di conducibilità termica equivalente. Per questa ragione nel tempo sono state formulate diverse leggi empiriche per stimare il valore della conducibilità termica di un terreno (Chen, 2008; Johansen, 1977; Lu et al., 2007; Zhang et al., 2015); una di queste è quella proposta da Côté e Konrad (2005) in cui la conducibilità termica equivalente del terreno è calcolata come media geometrica delle conducibilità termiche delle diverse fasi costituenti il terreno:

$$\lambda = \lambda_S^{(1-\phi)} \lambda_l^{\phi S_l} \lambda_i^{\phi S_l} \tag{3.28}$$

dove:

- $-\lambda_s$ indica la conducibilità termica dello scheletro solido;
- λ_l indica la conducibilità termica dell'acqua liquida;
- λ_i indica la conducibilità termica del ghiaccio;
- $-S_l$ indica il grado di saturazione della fase liquida.
- S_i indica il grado di saturazione del ghiaccio ($S_l + S_i = 1$).

La conducibilità termica dell'acqua (0.6 W/m°C a 25°C) è significativamente più bassa di quella del ghiaccio (2.22 W/m°C a 0°C). La conducibilità termica delle particelle solide λ_s , generalmente, varia tra 1 a 5 W/m°C (Côté et al., 2005).

3.4. Il modello costitutivo meccanico dei terreni congelati

La presenza della fase ghiaccio, la quale è in grado di resistere non solo a sforzi isotropici di compressione e trazione ma anche a sforzi di taglio, fa sì che l'uso della sola tensione efficace, come variabile tensionale, non sia in grado di riprodurre in modo appropriato la risposta di un terreno congelato, come ad esempio l'elevata resistenza al taglio a breve termine che si osserva in terreni sciolti ad alto contenuto

di ghiaccio (Nishimura et al., 2009). Pertanto, al fine di poter catturare il comportamento meccanico osservato sperimentalmente, è necessario introdurre un'ulteriore variabile tensionale che sia in grado di considerare il contributo meccanico della presenza di ghiaccio.

Dalla stretta analogia tra la fisica dei terreni saturi congelati e dei terreni insaturi non congelati, nel modello proposto da Nishimura et al., (2009), la seconda variabile tensionale utilizzata è la suzione criogenica, definita come la differenza di pressione tra ghiaccio e acqua liquida. Pertanto, la suzione di matrice che si forma tra le fasi acqua e aria nei terreni insaturi può essere sostituita dalla suzione criogenica che si verifica nei terreni ghiacciati.

In questo modo, Nishimura et al., (2009) hanno esteso il "*Barcelona Basic Model*" (Alonso et al., 1990), sviluppato per i terreni parzialmente saturi, ai terreni congelati. Ulteriori sviluppi del modello sono stati effettuati da Ghoreishian et al., (2016).

Il Barcelona Basic Model (BBM) dei terreni congelati

Utilizzando il modello Cam-Clay modificato (Roscoe et al., 1968; Schofield et al., 1968) come riferimento per la condizione di terreno non congelato, in modo analogo come al BBM per terreni insaturi (Alonso et al., 1990), nel modello proposto da Nishimura et al., (2009) le due variabili di tensione utilizzate nella formulazione sono: la pressione netta media p_n (definita come l'eccesso della tensione totale rispetto la pressione del ghiaccio) e la suzione criogenica s.

$$p_n = \sigma - \max(p_l, p_i); \qquad s = \max(p_i - p_l, 0)$$
 (3.29)

dove σ è la tensione totale. La suzione, usata come seconda variabile tensionale, è stata scelta per considerare l'effetto del contenuto di ghiaccio e della variazione di temperatura e per descrivere l'evoluzione della superficie di snervamento con la variazione del grado di saturazione.

L'incremento di deformazione può essere scritto come somma dei vari contributi:

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}_p{}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}_s{}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}_p{}^p + d\boldsymbol{\varepsilon}_s{}^p$$

dove $d\boldsymbol{\varepsilon}_p{}^e$, $d\boldsymbol{\varepsilon}_p{}^p$ rappresentano l'incremento di deformazione elastica e plastica causato da una variazione della pressione netta media p_n ; $d\boldsymbol{\varepsilon}_s{}^e$, $d\boldsymbol{\varepsilon}_s{}^p$ rappresentano

l'incremento di deformazione elastica e plastica causato da una variazione di suzione criogenica s.

Allo stato congelato, l'effetto del meccanismo di *curvature-induced premelting* è descritto definendo un criterio di snervamento che considera l'espansione della superficie di snervamento all'aumentare della suzione criogenica.

Tale superficie è denominata, nell'ambito del BBM, curva di *Loading-Collapse* (LC) e la sua variazione con la pressione netta p_n è espressa come:

$$\mathcal{F}^{LC} = \left[p_n - \left(\frac{p_{n0} - ks}{2} \right) \right]^2 + \frac{q^2}{M^2} - \left(\frac{p_{n0} + ks}{2} \right)^2 = 0$$
 (3.30)

dove

$$p_{n0} = p^c \left(\frac{p_{n0}^*}{p^c}\right)^{\frac{\lambda_0 - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \tag{3.31}$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r] \tag{3.32}$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij} \cdot s_{ij})}, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$$
(3.33)

e q è la tensione deviatorica, k e M sono parametri del materiale e descrivono rispettivamente l'incremento della coesione apparente con la suzione criogenica e la pendenza della linea di stato critico (CSL), p^c indica la pressione di riferimento e p_{n0} la pressione netta di preconsolidazione.

Inoltre, p_{n0}^* e λ_0 sono rispettivamente la pressione di preconsolidazione e il coefficiente di compressibilità elasto-plastico allo stato non congelato (s = 0), κ indica il coefficiente di rigonfiamento nel dominio elastico; r è una costante legata alla massima rigidezza del terreno (per suzione criogenica infinita) e β è un parametro che controlla la rapidità con cui la rigidezza aumenta con la suzione.

La legge di flusso è dettata dall'equazione (3.34):

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s + p_0)}$$
 (3.34)

dove α è un parametro legato alla legge di flusso non associativa.

In coerenza con il modello Cam-Clay modificato, adottando un dipendenza lineare tra il volume specifico v e $\ln p_n$, le deformazioni volumetriche plastiche ε_{vp}^p prodotte da un incremento della pressione netta p_n sono calcolate attraverso l'equazione (3.35):

$$\frac{dp_{n0}^*}{p_{n0}^*} = \frac{1+e}{\lambda_0 - \kappa} d\varepsilon_{vp}^p$$
 (3.35)

con e indice dei vuoti.

Nel modello proposto da Nishimura et al., (2009) alcune delle caratteristiche del BBM originale non sono prese in considerazione, quali l'influenza della suzione sul coefficiente di rigonfiamento κ , le deformazioni volumetriche elastiche causate da variazioni di s e la superficie di snervamento Suction-Increase (SI) o Grain Segregation (GS).

Ghoreishian et al., (2016) riformularono il modello di Nishimura et al., (2009) e proposero un modello in grado di rappresentare gli aspetti fondamentali del comportamento osservato nei terreni congelati, includendo il fenomeno della segregazione del ghiaccio.

L'effetto del meccanismo di *curvature premelting*, discusso nel capitolo 2.2, si traduce in una maggior resistenza del terreno ottenuta legando insieme tra loro i granuli solidi; il ghiaccio lega i granuli di terreno conferendo resistenza a compressione. La corrispondente deformazione di compressione si ritiene che costituisca la parte elastica della deformazione dovuta alla variazione di suzione. D'altra parte, l'aumento di suzione porterà, ad un certo punto, alla segregazione dei grani e alla formazione delle lenti di ghiaccio con conseguente espansione del terreno. Questo fenomeno è controllato principalmente dall'*interfacial premelting* e tiene conto delle deformazioni irreversibili e quindi della parte plastica della deformazione (Ghoreishian et al., 2016).

Dunque, si assume un secondo criterio di snervamento dipendente dalla suzione per descrivere tale fenomeno. Tale criterio è definito *Grain-Segregation* (GS) (Ghoreishian et al., 2016) e ha equazione:

$$\mathcal{F}^{GS} = s - s_{seg} = 0 \tag{3.36}$$

dove s_{seg} è il valore di soglia della suzione superato il quale si innescherà il fenomeno della segregazione del ghiaccio.

La superficie di snervamento, nello spazio $p_n - q - s$, definita dalle equazioni (3.30), (3.36) è illustrata nella figura 3.6.

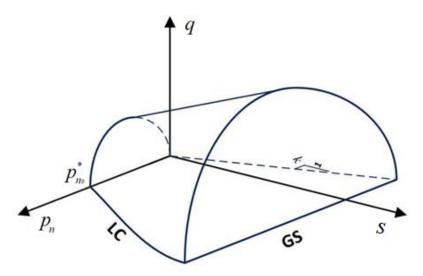


Figura 3.6: Vista tridimensionale della superficie di snervamento del modello costitutivo per i terreni congelati (modificato da Ghoreishian et al., (2016))

Una dilatazione plastica dovuta al verificarsi della segregazione del ghiaccio fa sì che la superficie di snervamento GS si sposti verso l'alto. Questa dilatazione plastica si traduce in un comportamento di *softening* del terreno, quindi, deve essere considerato anche una contrazione della superficie di snervamento LC (figura 3.7b).

La componente plastica della deformazione ε_{vp}^{p} prodotta da un incremento della pressione netta p_n è calcolata con la (3.35). Assumendo un espressione simile per la deformazione plastica ε_{vs}^{p} dovuta alla variazione della suzione criogenica s, la legge di incrudimento per la superficie LC è data da:

$$\frac{dp_{n0}^*}{p_{n0}^*} = \frac{1+e}{\lambda_0 - \kappa} \left(d\varepsilon_{vp}^p + d\varepsilon_{vs}^p \right) \tag{3.37}$$

Assumendo le stesse ipotesi per il comportamento nel piano $v - \ln(s + p_{at})$, e considerando il comportamento contraente e dilatante del terreno rispetto ai meccanismi di *curvature induced* e *interfacial premelting*, l'evoluzione della superficie di snervamento GS può essere considerata come (Ghoreishian et al., 2016):

$$\frac{ds_{seg}}{s_{seg} + p_{at}} = -\frac{1+e}{\lambda(s) - \kappa(s)} \left(d\varepsilon_{vp}^{\ p} + d\varepsilon_{vs}^{\ p} \right) \tag{3.38}$$

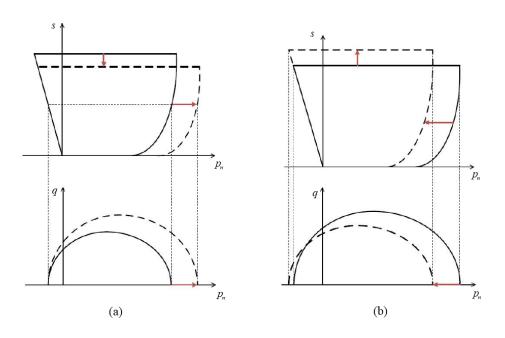


Figura 3.7: Curve di snervamento LC e GS: (a) Compressione plastica causata dalla variazione di pressione netta; (b) espansione plastica causata dalla segregazione del ghiaccio (Ghoreishian et al., 2016)

3.5. Il codice di calcolo CODE_BRIGHT

Il risolutore numerico che integra i tre gruppi di equazioni presentate nei paragrafi precedenti è il codice *CODE_BRIGHT*, un programma ad elementi finiti per le analisi Termo–Idro–Meccaniche (THM) dei mezzi porosi, sviluppato alla UPC (Università Politecnica della Catalogna) (Olivella, et al., 1994; 1996).

A ciascuna equazione di bilancio è associata un'incognita (variabile di stato). Le variabili di stato (incognite) sono: gli spostamenti u (nelle tre direzioni spaziali); la pressione del liquido, P_l ; la pressione del gas P_g ; e la temperatura, T. Il bilancio del momento per il mezzo continuo è ricondotto all'equazione di equilibrio delle tensioni con un modello costitutivo che lega tensioni e deformazioni. Le deformazioni sono definite in termini di spostamento. Per la deformazione della fase solida si assume l'ipotesi di piccoli spostamenti. I termini additivi dovuti agli spostamenti della fase solida vengono eliminati se si trasforma la formulazione in

termini di derivate materiali. In questo modo le deformazioni di volume sono correttamente considerate (Olivella et al., 1994).

Le equazioni che il *CODE_BRIGHT* risolve sono: il bilancio di massa del solido, il bilancio di massa d'acqua e aria, l'equilibrio del momento, il bilancio dell'energia interna e il bilancio di massa dei soluti.

Le equazioni costitutive stabiliscono il collegamento tra le variabili indipendenti (o incognite) e le variabili dipendenti. Le equazioni sono scritte in funzione delle incognite quando le equazioni costitutive sono sostituite nelle equazioni di bilancio. Le incognite del problema si ottengono risolvendo numericamente il sistema di Equazioni Differenziali Parziale in maniera accoppiata.

L'approccio numerico può essere suddiviso in due parti: discretizzazione temporale e spaziale. Il metodo ad elementi finiti è utilizzato per la discretizzazione spaziale mentre il metodo alle differenze finite è utilizzato per la discretizzazione temporale. La discretizzazione del tempo è lineare e lo schema implicito utilizza due punti intermedi, $t^{k+\varepsilon}$ (per i termini non lineari) e $t^{k+\theta}$ (per i termini di gradiente) tra i tempi iniziale t^k e finale t^{k+1} . Per risolvere lo schema iterativo è utilizzato il metodo di Newton-Raphson (Zienkiewicz et al., 1898).

Il codice adotta uno schema per la discretizzazione automatica del tempo. La riduzione dell'incremento temporale può essere causata da un'eccessiva variazione delle incognite ad ogni iterazione o da un numero eccessivo di iterazioni per raggiungere la convergenza o se l'errore residuo è maggiore rispetto all'iterazione precedente. I criteri di convergenza sono stabiliti in termini di forze o flussi e di variabili di stato.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno del problema meccanico, le forze e la velocità di spostamento possono essere applicate in qualsiasi direzione spaziale e in qualsiasi nodo. Nel problema idraulico, la portata massica di acqua e gas secco può essere prescritta a qualsiasi nodo così come la pressione del liquido/gas. Per il problema termico, il flusso di calore e la temperatura possono essere imposto in qualsiasi nodo della mesh. Il *CODE_BRIGHT* utilizza il software GID (gidhome.com, 2014) come preprocessore per la creazione del modello e come post-processore per la visualizzazione dei risultati numerici.

Questo codice di calcolo è stato ampiamente utilizzato nella simulazione di complesse applicazioni geomeccaniche accoppiate ed è stato validato in numerosi progetti (Gens et al., 2009; Sanchez et al., 2008).

Aspetti fondamentali del comportamento di miscele sabbia-argilla

Nel seguente capitolo sono descritti gli aspetti fondamentali del comportamento meccanico, idraulico e termico di terreni a granulometria mista, sia a temperatura ambiente sia quando soggetti a congelamento. L'interesse è posto principalmente nella comprensione dell'influenza del contenuto di fine di miscele a matrice sabbiosa con argilla. Le analisi sperimentali del comportamento di miscele sabbia-argilla sottoposte a congelamento, effettuate in La Porta et al., (2022), sono presentate nel capitolo 5.

Generalmente, i terreni naturali presentano una granulometria mista per cui non sempre possono essere considerati come un materiale monogranulare. Questi tipi di terreni sono frequentemente utilizzati nelle applicazioni di ingegneria civile sia come terreni di fondazione per strutture o opere in terra, sia come materiali di riempimento. Risulta utile, quindi, caratterizzare i terreni eterogenei, in modo da comprenderne quali siano le interazioni con le strutture ad essi adiacenti.

Un terreno intermedio è costituito da un materiale granulare con particelle grossolane (ad esempio, ghiaia, sabbia) e un materiale con particelle più fini (limo, argilla). Il comportamento meccanico, idraulico e termico di tali terreni è fortemente influenzato del rapporto tra le particelle fini e quelle più grossolane (Simpson et al., 2015).

Nei successivi paragrafi vengono descritti i fattori principali che influenzano il comportamento meccanico, termico ed idraulico di terreni intermedi, in particolare di miscele di sabbia e argilla.

4.1. Influenza del contenuto di fine sul comportamento meccanico di miscele sabbia-argilla

Negli ultimi decenni, vari autori hanno condotto numerose sperimentazioni su terreni eterogenei, in particolare su miscele di sabbia e argilla in diverse proporzioni, per comprendere l'influenza del contenuto di fine sul comportamento del terreno.

Miller et al., (1958) furono i primi a studiare gli effetti della variazione delle proporzioni di particelle grosse e fini sulla resistenza al taglio della miscela risultante. In particolare, hanno eseguito delle prove triassiali consolidate non drenate su campioni costituiti da miscele di sabbia e argilla che variavano dal 100% di sabbia al 100% di argilla. Gli autori hanno scoperto che la coesione e l'angolo di attrito aumentano con la densità; la densità maggiore è raggiunta dal 26% di argille e dal 74% di sabbia in peso. Ciò potrebbe suggerire che fino ad una frazione di argilla del 26%, l'argilla riempie gradualmente i vuoti tra i granelli di sabbia; oltre questa percentuale, non vi è più il contatto tra i granelli di sabbia che si vengono a trovare immersi in una matrice di argilla.

Dalle osservazioni fatte in precedenza, è chiaro che una miscela sabbia-argilla si comporta come una sabbia per basso contenuto di argilla e come un'argilla per alto contenuto di argilla. La conoscenza del comportamento della frazione di fine è essenziale per comprendere il comportamento di terreni eterogenei contenenti una frazione argillosa significativa.

In figura 4.1 sono schematizzate le diverse configurazioni che può assumere la struttura di una miscela sabbia-argilla in funzione della frazione di materiale fine. Quando una piccola quantità di argilla viene aggiunta alla sabbia, le particelle di argilla occuperanno una parte dei pori lasciati dalle particelle più grossolane (figura 4.1b). Aggiungendo altra argilla alla matrice sabbiosa, si passa allo stato rappresentato in figura 4.1c, in cui lo spazio vuoto tra i granelli di sabbia è interamente occupato dalle particelle di argilla. Per tale contenuto di argilla (figura 4.1c) si è raggiunta la condizione di indice dei vuoti minimo della miscela; tra i granelli di sabbia non rimane ulteriore spazio per poter ospitare altra. Pertanto, se viene aggiunta più argilla oltre la condizione di indice dei vuoti minimo (figura 4.1d), l'unico modo per contenere questo volume aggiuntivo di argilla richiede che i granelli di sabbia si separino in modo da creare più spazio per accoglierla. In questo caso, i granelli di sabbia vengono a trovarsi immersi in una matrice argillosa

e la componente fine diventa dominante nella miscela risultante (figura 4.1e) argilla (Vallejo et al., 2000).

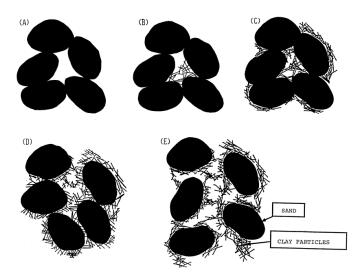


Figura 4.1: Variazione della struttura di una miscela sabbia-argilla (Vallejo et al., 2000)

In figura 4.2 è illustrata l'evoluzione dell'indice dei vuoti e della struttura della miscela al variare del contenuto di fine, in cui il punto *B* corrisponde al contenuto di fine per cui si raggiunge la condizioni di indice dei vuoti minimo.

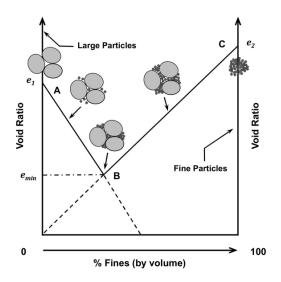


Figura 4.2: Schematizzazione della configurazione delle particelle di sabbia e argilla in una miscela sabbia-argilla, in funzione dell'indice dei vuoti e contenuto di (Yin et al., 2021)

I test di laboratorio condotti su miscele sabbia-caolino indicano che il loro comportamento meccanico dipende dalla proporzione relativa tra le particelle grossolane e quelle più fini (Reiffsteck et al., 2005). Se la percentuale in peso di

argilla (C) è minore di un valore "critico" C_r , la frazione fine ha poco impatto sul comportamento della miscela e il comportamento meccanico della miscela è legato alle caratteristiche della sola matrice grossolana. Viceversa, se la percentuale di fine raggiunge valori dell'ordine del 70%-80%, la resistenza al taglio della miscela è governata dalle caratteristiche meccaniche del materiale argilloso. Il valore critico della percentuale di fine, C_r , varia tra il 20% e il 30% (Reiffsteck et al., 2005).

Per valori di frazione fine intermedi, la resistenza al taglio è parzialmente controllata da entrambi i materiali costituenti la miscela. Diminuisce gradualmente a partire dalla resistenza al taglio fornita dalla sabbia pura a quella offerta dall'argilla pura. Pertanto, esiste una zona di transizione che separa il comportamento meccanico della miscela sabbia-argilla controllato dalla sabbia e da quello controllato dall'argilla (Yin et al., 2021).

Reiffstech et al., (2005) hanno studiato l'influenza della proporzione delle particelle fini e grossolane sul comportamento meccanico delle miscele sabbia-caolino. Diverse miscele di sabbia, contenente diverse percentuali di caolino (0%, 30%, 50%, 70%, 100%) sono state testate mediante prove triassiali non drenate. I risultati ottenuti sono illustrati in figura 4.3 in termini di tensione deviatorica (figura 4.3a) e pressione dei pori (figura 4.3b). Per la sabbia pura (0% di caolino), si osserva un incremento del deviatore fino al valore di picco per poi raggiungere un valore asintotico più basso. Anche la pressione interstiziale raggiunge un valore massimo per poi decrescere rapidamente.

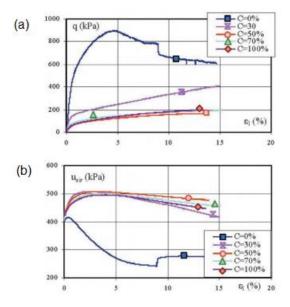


Figura 4.3: Relazione tra sforzo deviatorico e pressione interstiziale con la deformazione assiale delle miscele per una pressione di confinamento di 200 MPa (Reiffsteck et al., 2005)

4.2. Influenza del contenuto di fine sul comportamento termico di miscele sabbia-argilla

Vari autori hanno studiato gli effetti di diversi parametri sulla conduttività termica dei terreni, il contenuto d'acqua (Nguyen et al., 2017; Sepaskhah et al., 1979; Smits et al., 2010; Tarnawski et al., 2000), la densità secca (Tang et al., 2008), la mineralogia (Côté et al., 2005) e il contenuto di fine (Yu et al., 2016; Zhang et al., 2015). Questi effetti sono direttamente correlati non solo alle proprietà termiche di ciascun componente, ma anche alla disposizione delle particelle di terreno.

Yu et al., (2016) hanno studiato l'influenza della densità, del contenuto d'acqua e di argilla sulla conducibilità termica del terreno. La sperimentazione è stata effettuata su miscele di sabbia-caolino con diverso contenuto di caolino (0%, 5%, 10% e 20%), contenuto d'acqua (0%, 3%, 5% e 7%) e densità secca (1.55, 1.60 e 1.65 g/cm³). Dai risultati sperimentali è emerso che la conducibilità termica della miscela sabbia-caolino aumenta con il contenuto d'acqua in tutti i campioni testati. Ciò è dovuto, principalmente, alla conducibilità termica dell'acqua più elevata di quella dell'aria all'interno dei pori. In aggiunta, a parità di contenuto d'acqua, l'incremento della densità secca (diminuzione della porosità) del terreno porta ad un maggiore numero di contatti fisici tra le particelle solide, alla riduzione della resistenza termica tra le particelle di terreno e quindi ad un miglioramento della conducibilità termica. Tuttavia, l'influenza della densità secca è meno rilevante rispetto quella del contenuto d'acqua (Yu et al., 2016).

Per quanto riguarda, invece, l'influenza del contenuto di caolino, le evidenze sperimentali hanno mostrato una tendenza opposta tra le miscele in condizioni asciutte (w = 0) e le miscele in condizioni umide.

Le prime, sono caratterizzate da un incremento di conducibilità termica all'aumentare del contenuto di fine (figura 4.4a). In particolare, per contenuto di fine del 10% si ha un cambio di pendenza: la conducibilità termica continua ad aumentare con il contenuto di fine ma in maniera meno marcata.

In condizioni umide, il trend è opposto: la conducibilità termica diminuisce al crescere del contenuto di caolino (figura 4.4b, figura 4.4c e figura 4.4d). Anche in questo caso l'andamento è bilineare con punto di inflessione osservato ad una percentuale di fine del 10%. La conducibilità termica decresce linearmente con il contenuto di fine (c), con una variazione più marcata nella prima regione (c < 10%) e meno marcata nella seconda regione (c > 10%).

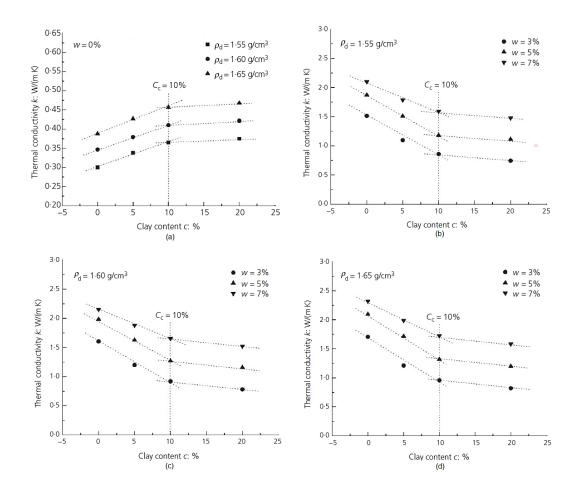


Figura 4.4: Conducibilità termica in funzione del contenuto di argilla: (a) condizioni asciutte; (b) $\rho_d = 1.55 \text{g/cm}^3$; (c) $\rho_d = 1.60 \text{g/cm}^3$; (d) $\rho_d = 1.65 \text{g/cm}^3$ (Yu et al., 2016)

Negli ultimi anni, un notevole sforzo è stato compiuto nella determinazione della conduttività termica dei terreni congelati (Tian et al., 2017; Zhang et al., 2018). Questi studi hanno anche dimostrato l'influenza di vari parametri sulla conduttività termica dei terreni congelati. La presenza di ghiaccio modifica le proprietà termiche delle fasi costituenti e anche la disposizione delle particelle solide. Di conseguenza, il rapporto tra ghiaccio e acqua non congelata influisce fortemente sulla conduzione del calore nei terreni. Inoltre, la quantità di acqua non congelata o di ghiaccio in un terreno congelati dipende notevolmente dalla natura delle particelle fini e dalla loro frazione (Vu, 2022).

Lo studio dell'influenza della percentuale di fine sulla conducibilità termica di miscele sabbia-argilla è stato condotto sperimentalmente da Vu et al., (2022) su terreni costituiti da sabbia di Fontainebleau mescolata con caolino Speswhite in diverse proporzioni, materiali analoghi alle prove oggetto della modellazione della presente tesi (da La Porta et al., 2022). I risultati ottenuti evidenziano una

conduttività termica del terreno allo stato congelato superiore a quella relativa allo stato non congelato. Tale differenza, indotta dal cambiamento di fase dell'acqua, può essere spiegata dal fatto che la conducibilità del ghiaccio (λ_i) è circa quattro volte superiore a quella dell'acqua liquida (λ_l). Inoltre, al crescere del contenuto di caolino, si è osservato un aumento della conducibilità termica allo stato non congelato e una tendenza quasi opposta allo stato congelato.

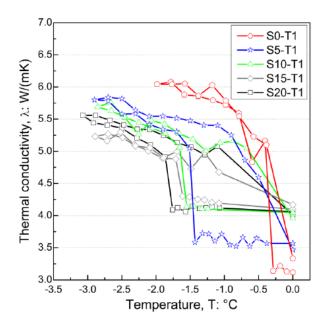


Figura 4.5 Relazione tra conducibilità termica e temperatura al variare della percentuale di caolino in miscele sabbia-caolino (Vu, 2022)

Secondo la scelta degli autori di mantenere l'indice dei vuoti della frazione grossolana costante, valutando l'influenza del contenuto di fine nei pori della matrice, l'aggiunta di particelle fini va ad occupare gli spazi interstiziali tra le particelle di sabbia riducendo così lo spazio disponibile per l'acqua. La sostituzione di acqua con un materiale a maggiore conduttività termica, porta ad un aumento di conduttività termica del terreno allo stato non congelato. Allo stato congelato, si osserva quasi una tendenza opposta a causa della trasformazione dell'acqua liquida in ghiaccio. Per alto contenuto di fine, la quantità di acqua che permane allo stato non congelato è maggiore. Confrontando questi due casi, è chiaro che l'aggiunta di fine in un terreno non solo diminuisce il volume disponibile per il ghiaccio, ma aumenta anche il contenuto di acqua non congelata allo stato congelato. Di conseguenza, un terreno con una frazione di fine più bassa avrà una conducibilità termica minore allo stato non congelato e maggiore allo stato congelato.

4.3. Influenza del contenuto di fine sul comportamento idraulico di miscele sabbia-argilla

Vu (2022) nel suo lavoro di Tesi ha investigato l'effetto del contenuto di fine sulla conducibilità idraulica satura di diversi miscele di sabbia-caolino a temperatura ambiente. I risultati ottenuti sono mostrati nella figura 4.6.

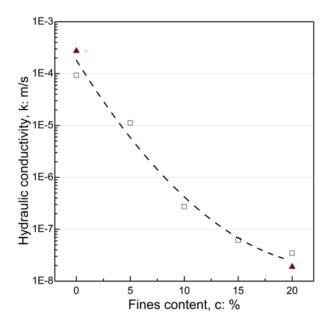


Figura 4.6: Conducibilità idraulica di miscele sabbia-caolino al variare della percentuale di particelle fini (Vu, 2022)

Da quanto si osserva nel grafico in figura 4.6, la conducibilità idraulica diminuisce significativamente da 10⁻⁴ a 3.10⁻⁷ m/s all'aumentare della frazione di caolino da 0 al 10%. Per contenuto di fine compreso tra il 10% e il 20%, la conducibilità idraulica diminuisce più lentamente da 3.10⁻⁷ a 4.10⁻⁸ m/s.

Allo stato saturo, il terreno con minor contenuto di caolino evidenzia dunque un'elevata conducibilità idraulica a causa del maggior numero dei pori all'interno dei quali il volume d'acqua può permeare.

Al fine di studiare l'effetto del contenuto di particelle fini sulla conducibilità idraulica di terreni insaturi, Chiu et al., (1998) hanno misurato la conducibilità idraulica insatura di miscele compattate di sabbia e caolino, con diverse frazioni di fine (0, 5, 10 e 30% di caolino). Il tipico andamento della conducibilità idraulica è stato osservato, come mostrato nella figura 4.7.

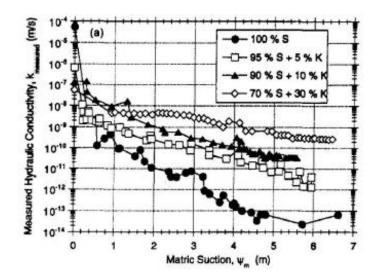


Figura 4.7: Conducibilità idraulica insatura di miscele sabbia-caolino compattate a vari contenuti di materiale fine (Chiu et al., 1998)

L'aumento della suzione matriciale induce una forte riduzione della conducibilità idraulica insatura. Il tasso di diminuzione della conducibilità idraulica con la suzione matriciale, generalmente, diminuisce con l'aumento del contenuto di caolino. Quindi, maggiore è il contenuto di particelle fini, minore sarà l'intervallo di conducibilità idraulica.

Vu et., al (2022) hanno condotto una serie di prove di laboratorio su miscele sabbiaargilla al fine di determinare sperimentalmente le curve di ritenzione SFCC al
variare della percentuale di argilla (0, 5, 10, 15 e 20%). Le prove consistono nel
riporre i provini, precedentemente saturati e compattati, in una cella rigida e
sottoporli ad un ciclo di congelamento e scongelamento durante il quale vengono
misurate sia la temperatura del terreno sia il contenuto volumetrico di acqua al fine
di determinare la curva di ritenzione del ghiaccio. La figura 4.8 mostra l'andamento
del grado di saturazione con la temperatura di tutte le miscele studiate. Inizialmente,
il terreno, quando la temperatura scende al di sotto di 0°C, mantiene lo stato di
saturazione iniziale con acqua non congelata. Quando la temperatura raggiunge la
temperatura di nucleazione spontanea (capitolo 2.2), il processo di congelamento
ha inizio e induce una riduzione significativa del grado di saturazione dell'acqua
liquida. Successivamente, si osserva una diminuzione più lieve del contenuto di
acqua al procedere del congelamento sino al valore residuo.

Durante il percorso di scongelamento (frecce in alto nella figura 4.8), il grado di saturazione dell'acqua non congelata aumenta gradualmente con la temperatura e,

per ciascun terreno testato, il rapporto tra queste due quantità è significativamente diverso rispetto quello relativo al percorso di congelamento (frecce in basso nella figura 4.8).

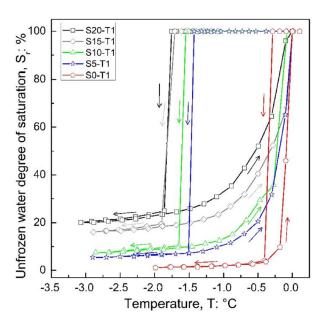


Figura 4.8: Curva di ritenzione del ghiaccio (grado di saturazione liquido vs. temperatura) delle diverse miscele sabbia-argilla (Vu et al., 2022)

I risultati evidenziano (figura 4.8), dunque, come la curva di ritenzione sia fortemente dipendente dal contenuto di fine: all'aumentare della percentuale di fine si nota un abbassamento della temperatura di nucleazione spontanea e un aumento del contenuto volumetrico di acqua residuo.

Cella triassiale in controllo di temperatura: FROZEN

L'obiettivo del presente lavoro è la modellazione termo-idraulica di prove di laboratorio effettuate in precedenza, durante un progetto di dottorato condotto da G. La Porta, che vengono di seguito brevemente descritte al fine di introdurre le condizioni imposte ed utilizzate nel modello, nonché la complessità della distribuzione di temperatura all'interno dei provini stessi.

Il presente capitolo si compone di due parti. Nella prima parte viene brevemente descritto il sistema triassiale per eseguire prove in controllo di temperatura. Il sistema è stato sviluppato presso il DICII (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica) dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata (in collaborazione con l'Università Politecnica della Catalogna UPC) per studiare sperimentalmente il comportamento termo-idro-meccanico di terreni soggetti a congelamento e scongelamento.

Nella seconda parte sono presentate le prove sperimentali eseguite con l'apparecchiatura *FROZEN* su provini di sabbia e sabbia-caolino, effettuate durante un progetto di dottorato condotto da G. La Porta (La Porta et al., 2022).

5.1. Apparecchiatura di prova: FROZEN

FROZEN (Bartoli et al., 2018) è un sistema triassiale, per l'esecuzione di prove in controllo di temperatura, realizzato dall'Università di Roma Tor Vergata. Il dispositivo è costituito da tre componenti principali: (1) una pressa meccanica; (2) una cella triassiale, che costituisce l'elemento principale del sistema; (3) un sistema di circolazione del fluido refrigerante (figura 5.1). Il raffreddamento del provino

avviene attraverso lo scorrimento di un fluido refrigerante a bassa temperatura all'interno di un tubo di rame posizionato al centro del campione. Il carico termico è applicato, dunque, dal centro del provino verso l'esterno, in direzione radiale. Ciò consente la riproduzione delle condizioni di congelamento con la stessa modalità utilizzata in sito, quando la tecnica del congelamento artificiale è applicata per il consolidamento e impermeabilizzazione del terreno durante lo scavo di pozzi o gallerie.

Il provino ha diametro teorico di 100 mm ed un'altezza di 200 mm. Il diametro del tubo di rame all'interno del provino è di 1 cm.

In figura 5.1 è schematizzata l'apparecchiatura triassiale in controllo di temperatura.

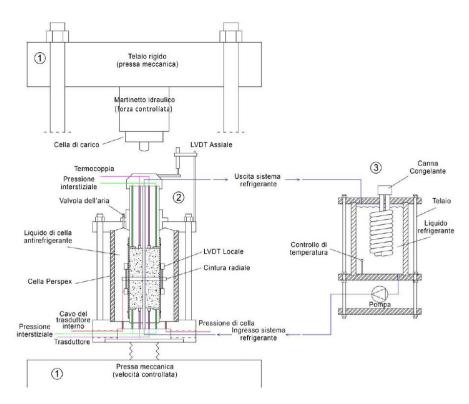


Figura 5.1: Schema della cella triassiale in controllo di temperatura FROZEN (Bartoli et al., 2018)

Rispetto alle prove triassiali standard, le prove oggetto di studio prevedono una fase aggiuntiva, il congelamento, successiva alla fase di consolidazione.

Tabella 5.1: Confronto tra le fasi della prova triassiale standard con quelle della prova effettuata con la cella triassiale in controllo di temperatura, *FROZEN* (La Porta et al., 2022)

Prova triassiale standard	Prova in FROZEN
Saturazione	Saturazione
Consolidamento	Consolidazione
Rottura	Congelamento
	Rottura

Le fasi di saturazione, consolidamento e congelamento vengono effettuate in condizioni di carico isotrope.

Preparazione dei provini

Il campione viene preparato in quattro strati di spessore di 5 cm. Al termine della preparazione e compattazione di ciascuno strato, vengono inserite delle termocoppie per la misura della temperatura nel provino. Le termocoppie sono inserite anche alla base e in testa al provino, come schematizzato nella figura 5.2 e figura 5.3.

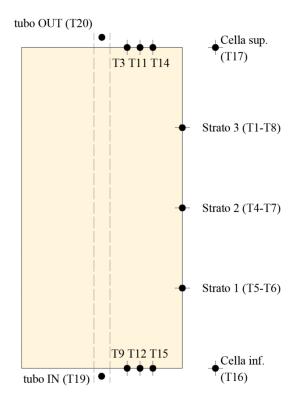


Figura 5.2: Rappresentazione schematica della posizione delle termocoppie (1/2) (modificato da Bartoli (2019))

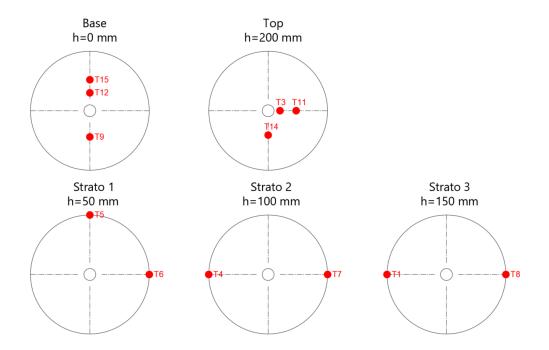


Figura 5.3: Rappresentazione schematica della posizione delle termocoppie (2/2) (modificato da Bartoli (2019))

5.2. Prove sperimentali

Le prove sperimentali eseguite in apparecchiatura *FROZEN*, presso il laboratorio dell'Università di Roma Tor Vergata, durante un progetto di dottorato condotto da G. La Porta, sono costituite da prove triassiali consolidate drenate TXCD a differente pressione di consolidazione, per ciascun materiale utilizzato: sabbia pura e sabbia con aggiunta del 15% di argilla. I materiali utilizzati nella sperimentazione sono una sabbia monogranulare proveniente da Fontainebleau (al centro-nord della Francia) e il caolino Speswhite, un'argilla non attiva a ridotta plasticità.

Ciascuna prova è identificata con la sigla SXKYEffZ; in cui S indica la sabbia seguita dalla sua presenza in percentuale X; K indica il caolino e Y la sua percentuale; Eff Z indica il valore della pressione di consolidazione a cui è stato sottoposto il provino. Per esempio, la prova S85K15Eff800 indica un provino costituito dall'85% di sabbia e 15% di caolino e soggetto ad una pressione efficace di consolidamento di 800 kPa.

Le prove considerate per la modellazione oggetto del presente lavoro sono riportate nella tabella 5.2.

Nome prova	Percentuale di argilla: FC: %	Pressione di consolidazione p: kPa	Indice dei vuoti medio (*): e: (-)
S100K0Eff50	0	50	0.685
S100K0Eff200	0	200	0.705
S100K0Eff800	0	800	0.720
S85K15Eff800	15	800	0.600

Tabella 5.2: Prove in FROZEN considerate per la modellazione oggetto della presente Tesi

(*) riferito all'inizio della fase di congelamento

Terminata la fase di saturazione, ha inizio la fase di consolidazione isotropa durante la quale il provino viene raffreddato per mezzo del fluido di cella. Il controllo della temperatura del liquido di cella permette di raffreddare il provino e portarlo ad una temperatura omogenea prima dell'inizio della fase di congelamento.

Successivamente ha inizio il congelamento. I provini sono raffreddati con liquido refrigerante a circa -20°C. Il processo di congelamento ha una durata di circa dieci ore. Alla base del provino, prima zona soggetta a raffreddamento, la temperatura è dunque più bassa rispetto alla parte alta, alla cui altezza il liquido refrigerante perde calore per diffusione termica causata dalla temperatura ambiente non controllata.

I circuiti di drenaggio, posti in prossimità della parete esterna del provino, consentono l'ingresso o la fuoriuscita d'acqua dal provino, sino al congelamento degli stessi.

Nella modellazione numerica effettuata si le fasi utilizzate sono: il raffreddamento durante la consolidazione e il congelamento. L'indice due vuoti al termine del processo di consolidazione, nel modello termo-idraulico è considerato come indice dei vuoti medio in quanto non si è affrontato l'aspetto meccanico/deformativo.

Distribuzione della temperatura all'interno del provino

Si riportano di seguito i grafici degli andamenti di temperatura registrata dalle termocoppie durante la frase di congelamento relativi alla prova S100K0Eff200 (da figura 5.4 a figura 5.7).

La figura 5.4, mostra l'evoluzione temporale della temperatura delle termocoppie posizionate in ingresso (T19) e in uscita (T20) dal tubo refrigerante e delle termocoppie collocate nella zone inferiore (T16) e superiore (T17) del liquido di cella. Dalla figura, si osserva un discostamento sia tra la temperatura delle due

termocoppie poste nel tubo sia tra le due termocoppie situate nel liquido di cella. Nello specifico, le curve delle termocoppie T17 e T20 sono traslate verso valori di temperatura maggiori, e si discostano dalle temperature delle termocoppie inferiori T16 e T19 di circa 1.5° C. Questa differenza di temperatura tra le termocoppie inferiori e quelle superiori si riscontra anche nelle altre prove effettuate. Ciò è dovuto, come anticipato, alla dispersione di calore nel fluido refrigerante e nel liquido di cella a causa del non completo isolamento termico dell'apparecchiatura di prova dall'ambiente esterno.

I grafici da figura 5.5 a figura 5.7 mostrano l'evoluzione nel tempo, durante la fase di congelamento, della temperatura delle termocoppie posizionate all'interno del provino, situate rispettivamente alla base (figura 5.5), in testa (figura 5.6) e lungo l'altezza (figura 5.7) del provino stesso. Dai grafici, si osserva un campo di temperatura asimmetrico tra la parte inferiore e superiore del provino: il provino risulta essere più "freddo" nella parte inferiore e più "caldo" nella parte sommitale, in corrispondenza della quale il campo di temperatura del provino è maggiormente influenzato dal trasporto di calore per dispersione termica.

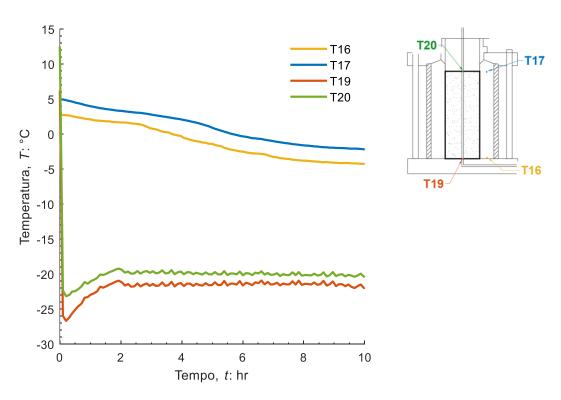


Figura 5.4: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T16, T17, T19 e T20 per la prova S100K0Eff200

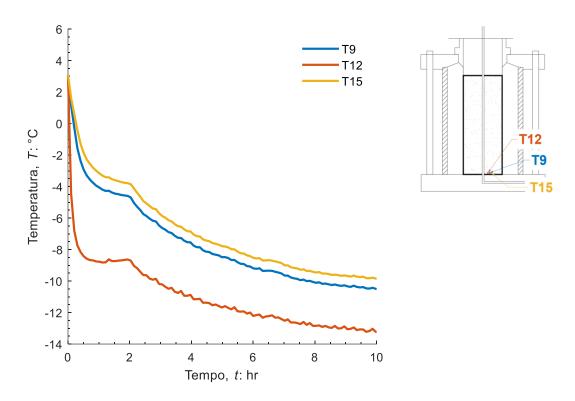


Figura 5.5: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T9, T12 e T15 posizionate alla base del provino per la prova S100K0Eff200

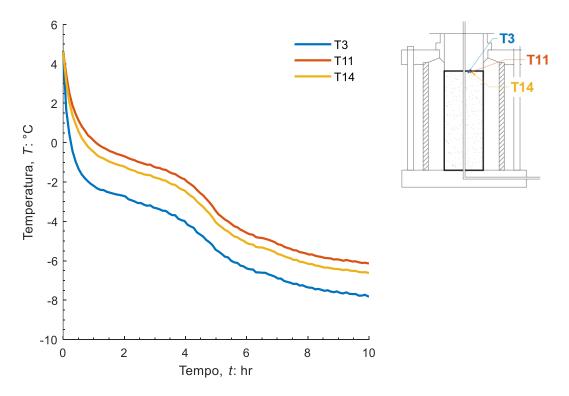


Figura 5.6: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T3, T11 e T14 posizionate in testa al provino per la prova S100K0Eff200

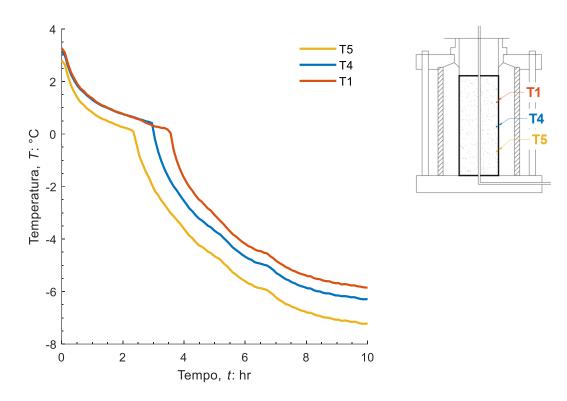


Figura 5.7: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T5, T14 e T11 posizionate lungo l'altezza del provino per la prova S100K0Eff200

Modellazione numerica delle prove in FROZEN

Nel presente capitolo verrà presentata l'analisi numerica che è stata svolta al fine di riprodurre l'evoluzione temporale di temperatura osservata sperimentalmente nel corso della fase di congelamento delle prove triassiali in controllo di temperatura, su strumentazione descritta nel capitolo 4, effettuate da La Porta et al.(2022).

La complessità di riproduzione delle condizioni di temperatura data la sua distribuzione non omogenea all'interno dei provini, causata da fenomeni di dispersione del calore, ha portato allo sviluppo di un modello dalla geometria di imposizione di temperatura studiata al fine di riprodurre l'eterogeneità del campo termico.

La modellazione numerica è concentrata sulla risoluzione del problema termoidraulico, analizzando la fase di congelamento a cui sono soggetti i provini di sabbia e sabbia-caolino durante lo svolgimento delle prove in cella triassiale *FROZEN*.

L'obiettivo numerico è la riproduzione della distribuzione della temperatura nella zona inferiore e lungo gli strati del provino, laddove il campo di temperatura è meno influenzato dalla dispersione di calore. Le analisi sono state svolte utilizzando il codice numerico *CODE BRIGHT*, descritto nel capitolo 3.

6.1. Sviluppo del modello numerico

I dati di temperatura misurati dalle termocoppie per le prove sperimentali S100K0Eff50, S100K0Eff200, S100K0Eff800 e S85K15Eff800, presentate nel capitolo 6 e riportati in Allegato A, sono stati utilizzati per calibrare il modello numerico termo-idraulico nella simulazione della fase di congelamento. Di seguito

sono presentate e discusse le diverse fasi che hanno portato alla realizzazione del modello numerico.

Geometria del modello e condizioni iniziali

Le analisi numeriche sono state eseguite in condizioni di assialsimmetria. Sfruttando la simmetria rispetto all'asse verticale del campione, è stato modellato solo metà provino avente altezza 20 cm e diametro 4.5 cm.

È fondamentale notare come l'accuratezza dei risultati dell'analisi numerica sia strettamente legata alle caratteristiche della mesh e che tale aspetto sia di primaria importanza laddove si necessiti di informazioni dettagliate. A tal fine, si è scelto di infittire la discretizzazione in corrispondenza delle condizioni più critiche del modello e dove si vorranno estrapolare risultati più precisi della simulazione. La discretizzazione del modello è stata effettuata per mezzo di una mesh regolare a elementi quadrangolari. La geometria del modello numerico e la relativa mesh sono rappresentati in figura 6.1.

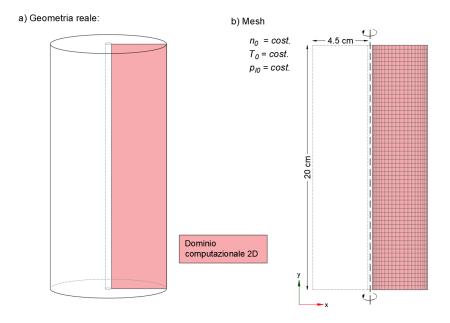


Figura 6.1: Geometria del problema, (a) geometria reale; (b) modello numerico 2D: mesh e condizioni iniziali di temperatura T_0 , pressione liquida p_l e porosità n_0

Il bordo sinistro del modello rappresenta la zona interna del provino a contatto con il tubo refrigerante mentre il bordo destro rappresenta il lato di separazione tra il provino e il liquido di cella. Si ricorda che quest'ultimo non è contatto diretto con il terreno in quanto è separato dalla membrana impermeabile.

Le condizioni iniziali imposte sono la porosità $n = n_0 = cost.$, la temperatura media $T = T_0 = cost.$ e la pressione dell'acqua $p_l = p_{l0} = cost.$ su tutto il provino (figura 6.1a). La temperatura iniziale T_0 si riferisce al valore di temperatura medio del provino all'inizio della fase di raffreddamento.

La porosità iniziale è stata estrapolata dal valore dall'indice dei vuoti medio del provino al termine della fase di consolidazione. Nella modellazione, il valore dell'indice dei vuoti è stato considerato come valore medio in quanto non è stato affrontato il problema deformativo.

Condizioni al contorno

Trattandosi di analisi numeriche accoppiate termo-idrauliche, le condizioni al contorno adottate possono essere distinte tra condizioni al contorno termiche (figura 6.2a) e idrauliche (figura 6.2b).

La temperatura ai bordi laterali del modello non è costante e varia in base all'andamento nel tempo della simulazione. Le condizioni al contorno termiche prevedono l'assegnazione di un valore di temperatura noto. In particolare:

- per quanto riguarda la parte del provino posta a contatto con il tubo in rame, l'effetto del fluido refrigerante che scorre al suo interno è considerato assegnando al bordo interno del modello un andamento di temperatura noto. Tale andamento è stato definito con riferimento alle temperature misurate dalle termocoppie T19 e T20 poste, rispettivamente, nel punto di ingresso e in uscita del tubo stesso (capitolo 4, figura 5.2);
- al bordo laterale che separa il provino dal liquido di cella è imposto un andamento di temperatura noto, determinato in riferimento ai valori di temperatura rilevati dalle termocoppie T16 e T17, le quali sono esterne al provino, in quanto posizionate nella zona inferiore e superiore all'interno del fluido di cella (capitolo 4, figura 5.2).

Tuttavia, la dispersione di calore che avviene nei due fluidi, causata dal contatto del macchinario con la temperatura ambiente non controllata, rende l'analisi termica di notevole complessità, in quanto influenza in modo significativo la distribuzione di temperatura all'interno del provino. Nelle analisi numeriche, questa dispersione termica è stata considerata assegnando delle condizioni di temperatura variabili lungo l'altezza del modello. Nello specifico, sono state eseguite delle analisi numeriche adottando diversi schemi di imposizione della temperatura da assegnare

ai bordi del modello, al fine di individuare uno schema che sia in grado di riprodurre l'andamento di temperatura osservato sperimentalmente tenendo conto della dispersione di calore nei due fluidi. I diversi schemi di imposizione di temperatura sono presentati nei prossimi paragrafi.

Passando al problema idraulico, le condizioni al contorno adottate sono condizioni di pressione liquida nota e flusso noto, in particolare:

- al fine di garantire il drenaggio nella parte superiore e inferiore del provino, è stata imposta una pressione liquida $p_l = 0$ MPa. L'incremento di pressione idrostatica lungo il provino è stato trascurato date le dimensioni ridotte del provino stesso;
- i bordi laterali del modello sono impermeabili per cui è assegnata la condizione di flusso nullo $(q_l = 0)$.

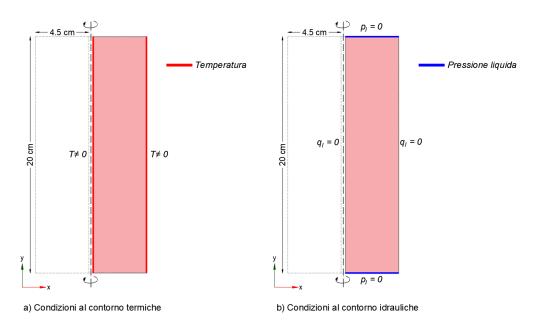


Figura 6.2: Condizioni al contorno termiche (a) ed idrauliche (b) utilizzate nella simulazione

Fasi di calcolo

L'analisi numerica è eseguita in diverse fasi di calcolo (denominate *time intervals*), in funzione dei differenti percorsi di carico termico individuati (tabella 6.1).

Le simulazioni sono state suddivise in quattro intervalli di tempo: (1) inizialmente sono state applicate al provino le condizioni iniziali di temperatura e pressione liquida; (2) nel secondo intervallo, ha inizio la fase di raffreddamento. In questa fase si impone un evoluzione temporale di temperatura in corrispondenza del lato

destro, per simulare la sottrazione di calore dal provino in seguito allo scambio termico con il fluido di cella al fine di giungere ad una condizione di temperatura di inizio fase congelamento confrontabile con le prove eseguite; (3) nel terzo intervallo, ha inizio la fase di congelamento. In questa fase si impone una rampa di temperatura anche al bordo interno del provino per simulare la sottrazione di calore da parte del fluido refrigerante che scorre nel tubo interno (4) infine, nell'ultimo intervallo sono state mantenute costanti le condizioni di temperatura al fine di raggiungere un equilibrio in condizioni stazionarie.

Tabella 6.1: Stages di calcolo del modello numerico

Fasi di calcolo	Descrizione delle fasi di calcolo
"Time Interval 1"	Condizioni iniziali
"Time Interval 2"	Inizio fase di raffreddamento
"Time Interval 3"	Inizio fase di congelamento
"Time Interval 4"	Raggiungimento delle condizioni stazionarie

6.2. Calibrazione dei parametri del modello

Un risultato corretto e affidabile della simulazione numerica è sicuramente legato alla scelta dei parametri di input, la cui determinazione è generalmente legata alle prove di laboratorio. Laddove, le prove sperimentali non sono disponibili si può far riferimento a valori medi di letteratura.

Nel presente lavoro, per la scelta dei parametri idraulici relativi alla sabbia pura e alla sabbia con 15% di caolino si fa riferimento a risultati sperimentali di letteratura ottenuti su miscele sabbia-caolino (Vu et al., 2022). Per quanto riguarda i parametri termici dell'acqua e del ghiaccio si sono considerati valori standard.

Parametri idraulici

Le equazioni idrauliche da definire per la risoluzione del problema in esame sono:

- Curva di ritenzione del ghiaccio (SFCC).
- Permeabilità intrinseca.
- Permeabilità relativa della fase liquida.

Il modello di Van Genuchten è utilizzato come legge idraulica per descrivere la variazione del grado di saturazione dell'acqua liquida con la suzione criogenica (equazione (3.18)). I parametri di input m e P sono stati determinati attraverso un best-fitting con le curve caratteristiche del ghiaccio sperimentali relative a miscele sabbia-caolino (Vu et al., 2022).

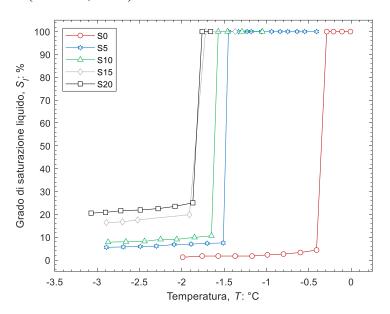


Figura 6.3: Curva di ritenzione del ghiaccio (grado di saturazione liquido vs. temperatura) delle diverse miscele sabbia-argilla. La lettera *S* si riferisce alla matrice sabbiosa; il numero che segue riporta la percentuale di caolino nella miscela (Vu et al., 2022)

Nel grafico in figura 6.3 sono rappresentate le curve di ritenzione del ghiaccio di miscele sabbia-caolino per diversi contenuti di caolino. Per la calibrazione dei parametri della SFCC, ai fini della presente modellazione numerica, sono state considerate solamente la curva S0 (relativa alla sabbia pura) e la curva S15 (relativa alla sabbia con 15% di caolino).

Le curve di ritenzione del ghiaccio utilizzate per le analisi numeriche delle prove S100K0 e S85K15 sono mostrate in figura 6.4. Dai grafici delle suddette figure, si osserva una buona corrispondenza tra le curve di ritenzione calibrate attraverso il modello di Van Genuchten e quelle sperimentali. I parametri del modello Van Genuchten ottenuti dalla calibrazione sono riportati nella tabella 6.2.

Tabella 6.2: Parametri delle curva di ritenzione del ghiaccio adottata

Modello	m	P (kPa)	S _{res}	S _{I, sat}
S100K0	0.900	380	0.01	1.00
S85K15	0.950	2000	0.15	1.00

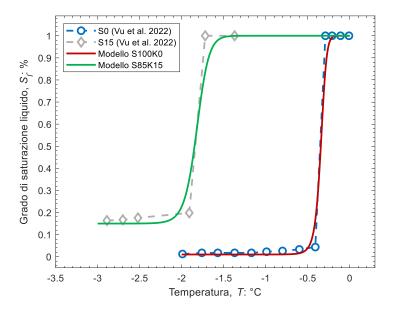


Figura 6.4: Curve di ritenzione del ghiaccio adottate nelle analisi numeriche per la sabbia pura (S100K0) e sabbia con caolino (S85K15): confronto tra curva sperimentale e analitica

In *CODE_BRIGHT* la conducibilità idraulica di un materiale è considerata per mezzo della permeabilità intrinseca. La relazione che lega la permeabilità intrinseca **k** alla conducibilità idraulica **K** è stata presentata nel capitolo 3 (equazione (3.23)), ed è richiamata qui di seguito:

$$\mathbf{K} = \frac{\rho_l \ g}{\mu_l(T)} \ \mathbf{k}$$

I valori di conducibilità idraulica satura adottati nella modellazione derivano dallo studio sperimentale condotto da Vu et al., (2022) su miscele di sabbia e caolino a temperatura ambiente (figura 6.5).

I valori di conducibilità idraulica e permeabilità intrinseca considerati per i provini di sabbia pura S100K0 e sabbia-caolino S85K15 sono riportati nella tabella 6.3.

Tabella 6.3: Valori di permeabilità intrinseca adottati

Modello	K (m/s)	<i>k</i> (m²)	
S100K0	1E-04	1E-11	
S85K15	8.4E-08	8.7E-15	

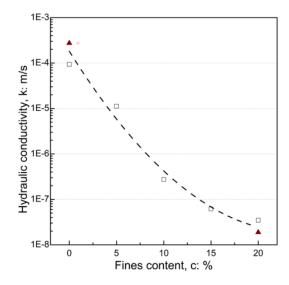


Figura 6.5: Conducibilità idraulica satura di miscele sabbia-caolino a temperatura ambiente, al variare della percentuale di particelle fini (Vu, 2022)

Definite la curva di ritenzione del ghiaccio e la permeabilità intrinseca, un altro parametro fondamentale da definire è la conducibilità idraulica del terreno congelato. Essa è calcolata a partire dalla permeabilità relativa utilizzando il modello di Van Genuchten (equazione (3.26)). Il parametro m dell'equazione (3.26) è una constante del materiale che in principio coincide con quello utilizzato nella curva di ritenzione del ghiaccio (Nishimura et al., 2009). Pertanto, si è adottato lo stesso valore utilizzato per la curva di ritenzione (tabella 6.4).

Tabella 6.4: Parametri della funzione di permeabilità relativa adottata

Modello	т
S100K0	0.900
S85K15	0.950

Parametri termici

Un altro gruppo di parametri da definire sono le proprietà termiche del terreno quali il calore specifico e la conducibilità termica delle singole fasi presenti in esso.

Il calore specifico della fase solida di una miscela sabbia-argilla può essere calcolato attraverso una media aritmetica pesata sulle rispettive percentuali, come:

$$C_{solid} = \left(\frac{V_s}{V_s + V_k}\right) C_s + \left(\frac{V_k}{V_s + V_k}\right) C_k \tag{6.1}$$

dove $C_s = 733$ J/kg K è il calore specifico per la sabbia Fontainebleau (Aljundi et al., 2019) e $C_k = 945$ J/kg K è il calore specifico per il caolino Speswhite (Michot et al., 2008).

In $CODE_BRIGHT$ la conducibilità termica λ può essere definita secondo due modalità:

- 1) introducendo i valori di conducibilità del terreno congelato λ_{frozen} e del terreno nello stato non congelato $\lambda_{unfrozen}$, misurati in laboratorio;
- 2) assegnando un valore di conducibilità termica delle singole fasi costituenti il terreno, λ_s , λ_l e λ_i dove i pedici s, l e i si riferiscono rispettivamente alle particelle solide, acqua liquida e ghiaccio. In questo caso, la conducibilità termica del terreno congelato λ_{frozen} e del terreno non congelato $\lambda_{unfrozen}$ è calcolata in funzione della porosità e del grado di saturazione dell'acqua liquida e del ghiaccio mediante media geometrica:

$$\lambda = \lambda_{unfrozen}^{S_l} \lambda_{frozen}^{(1-S_l)} \tag{6.2}$$

con:

$$\lambda_{unfrozen} = \lambda_s^{(1-\phi)} \lambda_l^{\phi}, \quad \lambda_{frozen} = \lambda_s^{(1-\phi)} \lambda_i^{\phi}$$
 (6.3)

dove ϕ è la porosità del terreno e S_l è il grado di saturazione dell'acqua liquida.

Nella modellazione, non avendo a disposizione dati di laboratorio relativi alla conducibilità termica dei terreni allo stato congelato e non congelato, si è proceduto secondo la modalità 2) che prevede quindi l'assegnazione della conducibilità termica delle singole fasi.

Per quanto riguarda la conducibilità termica e il calore specifico dell'acqua e del ghiaccio, tali valori sono pressoché standard (tabella 6.5).

Tabella 6.5:	Parametri	termici del	l'acqua d	el ghiaccio	adottati ı	nelle analisi

	Parametro	Descrizione	Valore
A	$c_{s,l}$	Calore specifico [J/kg K]	4190
Acqua	λ_l	Conducibilità termica [W/m K]	0.60
01-11-	$c_{s,i}$	Calore specifico [J/kg K]	2095
Ghiaccio	λ_i	Conducibilità termica [W/m K]	2.20

Ciò non vale per le proprietà termiche delle particelle di terreno in quanto queste ultime dipendono dalla composizione mineralogica, contenuto d'acqua e densità del terreno stesso (Aljundi et al., 2019). Pertanto, devono essere determinate considerando ogni singolo caso.

Nel presente lavoro, si è assunto inizialmente, per la sabbia pura, un valore di conducibilità termica noto. Successivamente, al fine di calibrare il modello, il parametro è stato variato, in un range osservato in letteratura (Casini et al., 2023; Nishimura et al., 2009).

Riepilogo dei parametri utilizzati nelle analisi numeriche

Nella tabella 6.6 sono riassunti i parametri fisici, termici ed idraulici utilizzati nelle analisi numeriche, relativi alle prove S100K0 e alla prova S85K15.

Tabella 6.6: Riepilogo dei parametri termici e idraulici utilizzati nelle analisi numeriche

Parametro	S100K0	S85K15
Termico		
Conducibilità termica della particelle solide, λ_s : W/m K	0.5(*)	0.9(*)
Conducibilità termica dell'acqua liquida, λ_l : W/m K	0.6	0.6
Conducibilità termica del ghiaccio, λ_i : W/m K	2.2	2.2
Calore specifico delle particelle solide, c_s : J/kg K	733	875
Calore specifico dell'acqua liquida, c_l : J/kg K	4190	4190
Calore specifico del ghiaccio, c_i : J/kg K	2095	2095
Idraulico		
Curva di ritenzione del ghiaccio:		
P: MPa	0.38	2.05
m	0.90	0.95
Permeabilità intrinseca, k: m²	10 ⁻¹¹	$8.7\times10^{\text{-}15}$
Permeabilità relativa, m	0.90	0.95

^(*) ottenuto da studio parametrico (vedi paragrafi successivi)

6.3. Analisi numeriche

Nella prima fase della modellazione numerica, si è posta l'attenzione alla ricerca di un metodo di imposizione delle condizioni al contorno di temperatura che fosse in grado di considerare la variazione di temperatura lungo l'altezza del provino causata della dispersione del calore nel fluido refrigerante e di cella.

A tal fine, sono stati studiati diversi schemi di imposizione della temperatura. Lo scopo di queste analisi preliminari è stato dunque quello di individuare lo schema più adatto a riprodurre le temperature misurate nella fase stazionaria.

Nella fase successiva, si è cercato di riprodurre l'andamento della temperatura anche nella fase transitoria, attraverso uno studio parametrico condotto sulla conducibilità termica della sabbia pura (S100K=) e della sabbia con il 15% di caolino (S85K15).

6.3.1. Schemi di imposizione della temperatura

In questo paragrafo sono descritti gli schemi utilizzati per costruire un profilo di temperatura variabile lungo l'altezza del modello da assegnare come condizione al contorno per l'analisi termica.

Nella simulazione della fase di congelamento, ai bordi laterali del modello è assegnata una condizione al contorno di temperatura variabile in funzione del tempo della simulazione. Ad un dato istante temporale t, la temperatura misurata nel provino non è costante, ma varia lungo l'altezza del provino stesso. Al fine di considerare tale variazione di temperatura, i bordi laterali del modello sono stati discretizzati in un certo numero di segmenti e, ad ognuno di essi è stato assegnato un valore di temperatura che evolve lungo l'altezza del modello.

Data la complessità dell'analisi termica, sono stati considerati per ciascuna prova, quattro schemi differenti di imposizione delle condizioni al contorno di temperatura.

Per la definizione delle condizioni al contorno di temperatura, si fa riferimento:

- alle termocoppie T19 e T20, per il bordo interno del modello (lato tubo interno, con circolazione di fluido refrigerante);
- alle termocoppie T16 e T17, per il bordo esterno del modello (lato liquido di cella).

Nel seguito ci si riferisce al singolo schema con la sigla Mx, dove x indica il numero dello schema (da 1 a 4). Pertanto, il nome della prova è seguito dalla sigla che ne identifica lo schema utilizzato per l'imposizione di temperatura. Ad esempio, la sigla S100K0Eff200-M01 si riferisce al modello numerico della prova S100K0Eff200 con imposizione di temperatura secondo lo schema 1.

Schema M01

In figura 6.6 è schematizzata la procedura seguita per la determinazione delle condizioni di temperatura da imporre al bordo interno (sinistro) e al bordo esterno (destro) del provino, a partire dai valori di temperatura delle termocoppie *T*19-*T*20 e *T*16-*T*17, rispettivamente.

I due bordi laterali del modello sono stati discretizzati in cinque segmenti. Nella figura 6.6a, i nodi sono identificati da un valore numerico (1, 2, 3, ...) mentre ciascun segmento è identificato con una lettera alfabetica (a, b, c, ...).

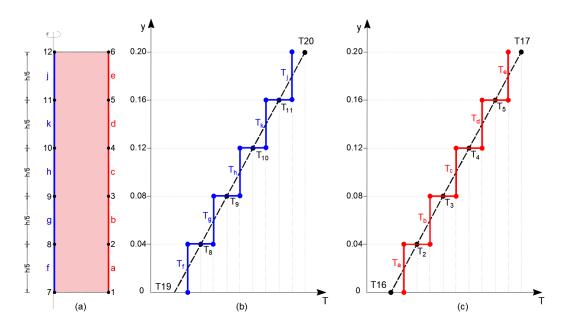


Figura 6.6: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M01: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)

Considerando una variazione lineare tra la temperatura T19 (nodo 7) e la temperatura T20 (nodo 12), si determina il valore di temperatura ai nodi intermedi (8, 9, 10, 11) posti alle altezze h di 4 cm, 8 cm, 12 cm e 16 cm dalla base del provino (figura 6.6b, linea nera tratteggiata).

Successivamente, per ciascun segmento si calcola il valore di temperatura medio tra le temperature nei punti estremi. Ad esempio, per il segmento h individuato dai nodi 9 e 10, è stata assegnata una temperatura T_h ottenuta dalla media delle temperature T_9 e T_{10} . In questo modo si determina il profilo di temperatura da assegnare al bordo interno del modello (figura 6.6b, andamento in blu).

Si procede in maniera del tutto analoga per quanto riguarda la determinazione del profilo di temperatura da assegnare come condizione al contorno al bordo esterno del modello numerico (figura 6.6c, andamento in rosso).

Schema M02

Come nello schema precedente, i bordi laterali sono divisi in cinque segmenti di lunghezza costante (figura 6.7a).

Per la determinazione delle condizioni al contorno di temperatura da assegnare al bordo sinistro, in questo caso, si considera una variazione lineare di temperatura tra $T19 \pmod{7}$ e $\overline{T} \pmod{12}$, con \overline{T} temperatura media tra la temperatura T19 e T20. La procedura poi è analoga a quanto detto in precedenza: si determina prima il valore di temperatura ai nodi intermedi (linea nera tratteggiata in figura 6.7b); successivamente, per ciascun segmento si determina il valore di temperatura medio tra la temperatura ai nodi estremi (figura 6.7d, andamento in blu).

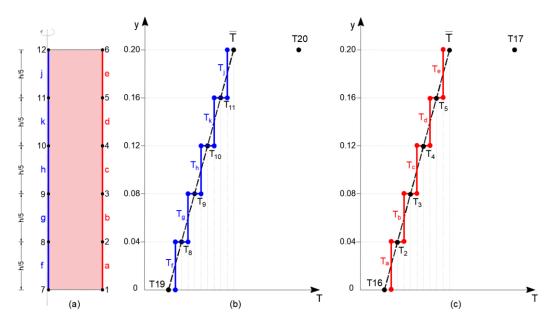


Figura 6.7: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M02: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)

Si ripete il procedimento per la determinazione del profilo di temperatura da imporre al lato esterno del provino, considerando una variazione lineare di temperatura tra T16 (nodo 1) e \overline{T} . In questo caso \overline{T} rappresenta la temperatura media tra T16 e T17 (figura 6.7c, andamento in rosso).

Schema M03

In questo schema, i bordi laterali del modello sono discretizzati in cinque tratti, di cui: i segmenti intermedi hanno lunghezza 5 cm; i tratti iniziale e finale sono ridotti ad una lunghezza di 2.5 cm (figura 6.8a). In questo modo, i punti in prossimità del bordo esterno, alle altezze 5, 10, 15 cm (punti in cui sono posizionate le termocoppie nei vari strati) ricadono nella mezzeria di ciascun tratto e dunque il risultato numerico in tali punti non risente del salto di temperatura che si verifica nei punti estremi di ciascun segmento.

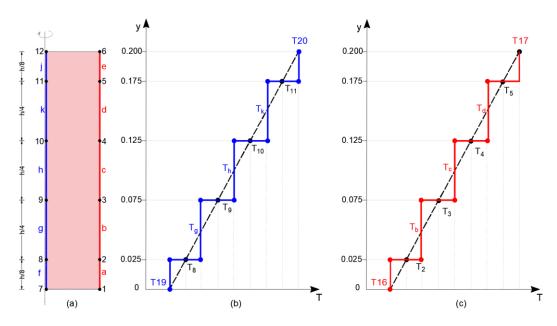


Figura 6.8: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M03: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso).

Considerando una variazione lineare tra la temperatura T19 (nodo 7) e la temperatura T20 (nodo 12), si determina il valore di temperatura ai nodi intermedi (8, 9, 10, 11) posti alle altezze h di 2.5 cm, 7.5 cm, 12.5 cm e 17.5 cm dalla base del provino (figura 6.8b, linea nera tratteggiata).

In seguito, ai segmenti intermedi si assegna un valore di temperatura medio tra i valori di temperatura nei punti estremi. Ad esempio, per il segmento h individuato dai nodi 9 e 10, è stata assegnata una temperatura T_h ottenuta dalla media delle temperature T_9 e T_{10} . Mentre al tratto iniziale (f) e a quello finale (j) sono assegnate le temperature T_{10} e T_{10} , rispettivamente (figura 6.8b, andamento in rosso). Procedendo in maniera analoga per il bordo esterno, si ricava il profilo di temperatura come in figura 6.8c (andamento in rosso).

Schema M04

La geometria dei bordi laterali è mantenuta identica a quella dello schema M03 (figura 6.9a).

Il procedimento per la definizione delle condizioni al contorno di temperatura da assegnare al bordo interno (figura 6.9b, andamento in blu) ed esterno (figura 6.9c, andamento in rosso) è uguale allo schema M02.

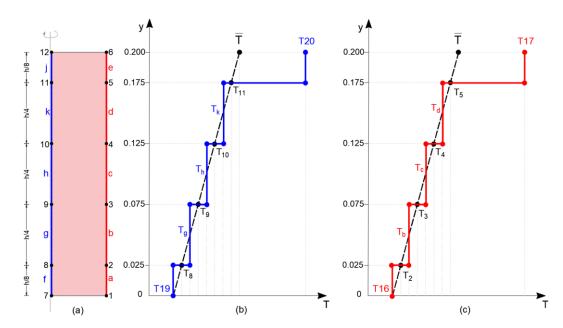


Figura 6.9: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M04: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)

A titolo di esempio, in figura 6.10 sono rappresentati gli andamenti temporali delle condizioni al contorno di temperatura applicate ai segmenti che costituiscono il bordo sinistro (figura 6.10a) e il bordo destro (figura 6.10b) del modello. I grafici si riferiscono al modello numerico della prova S100K0Eff200 e allo schema M01.

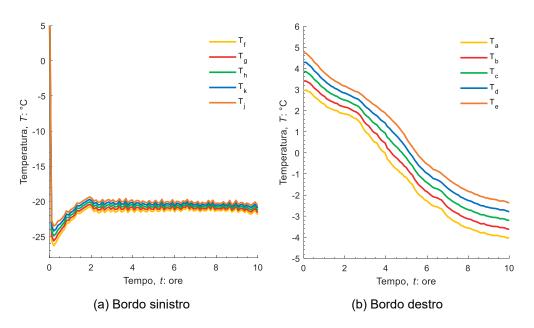


Figura 6.10: Andamento temporale delle condizioni al contorno applicate ai segmenti dei bordi esterno del modello per la prova S100K0Eff200

6.3.2. Discussione dei risultati

Quattro schemi differenti (M01, M02, M03 e M04) sono stati utilizzati per imporre un profilo di temperatura variabile lungo l'asse y ai due bordi laterali del modello.

In questa fase iniziale dello studio numerico l'obiettivo è stato quello di valutare la capacità di ciascuno schema di riprodurre le condizioni di temperatura all'interno del provino che si raggiungono all'equilibrio, sia al termine della fase di raffreddamento sia al completamento della fase di congelamento. Pertanto, in questa fase, ci si è focalizzati maggiormente sugli aspetti che influenzano il regime stazionario, quali le condizioni al contorno di temperatura imposte.

La simulazione della fase di raffreddamento ha il solo fine di portare il modello numerico, al termine della suddetta fase, ad una condizione di temperatura che rappresenti la distribuzione di temperatura iniziale all'istante di inizio della fase di congelamento. I risultati numerici sono stati confrontati con quelli sperimentali in termini di evoluzione temporale di temperatura in corrispondenza dei punti in cui sono posizionate le termocoppie. Le coordinate dei punti del modello corrispondenti alla posizione delle termocoppie e da cui si estraggono i risultati numerici sono riportati in figura 6.11.

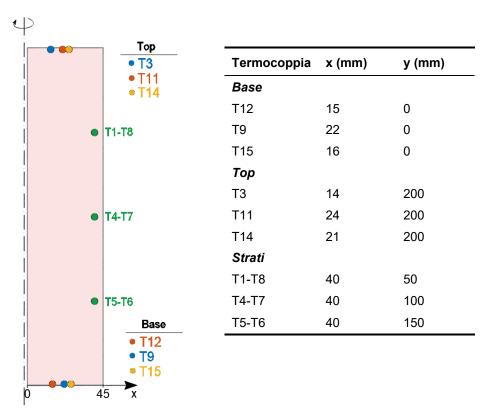


Figura 6.11: Coordinate dei punti del modello corrispondenti alla posizione delle termocoppie

In Allegato A, sono riportati i risultati delle simulazioni di tutti i modelli numerici. Di seguito sono presentati i risultati numerici ritenuti più significativi al fine di evidenziare le differenze di temperatura che derivano dall'utilizzo dei quattro diversi schemi di imposizione di temperatura. I risultati qui presentati sono relativi alle prove \$100K0Eff200 e \$85K15Eff800.

Per quanto riguarda la simulazione della fase di raffreddamento, tutti gli schemi sono in grado di riprodurre con buona accuratezza le temperature delle termocoppie posizionate alla base del provino (figura 6.12).

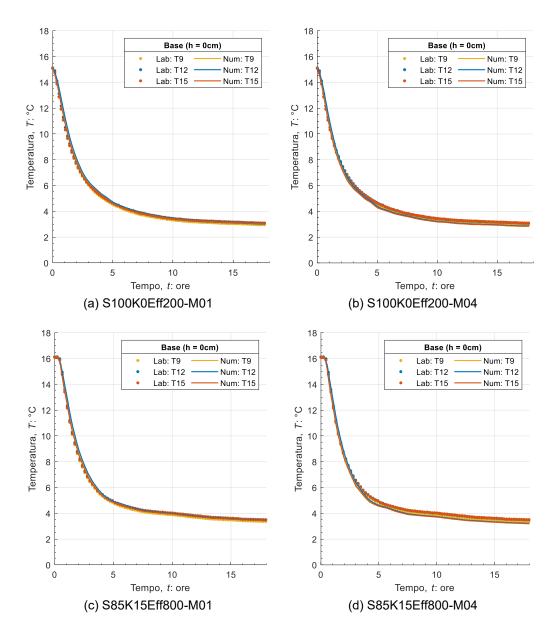


Figura 6.12: Evoluzione temporale della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie T9, T12 e T15: risultati numerici (Num) e sperimentali (Lab)

In riferimento alle termocoppie distribuite lungo l'altezza del provino, con gli schemi M01 e M03 il modello numerico sovrastima la temperatura. Lo scostamento maggiore dalla curva sperimentale si osserva in corrispondenza delle termocoppie poste allo strato 3 (figura 6.13a e figura 6.13c). Al contrario, gli schemi M02 e M04 captano molto bene le temperature negli strati inferiori del modello. In corrispondenza dello strato 3 si osserva una piccola sovrastima della temperatura, meno importante rispetto ai casi precedenti (figura 6.13b e figura 6.13d).

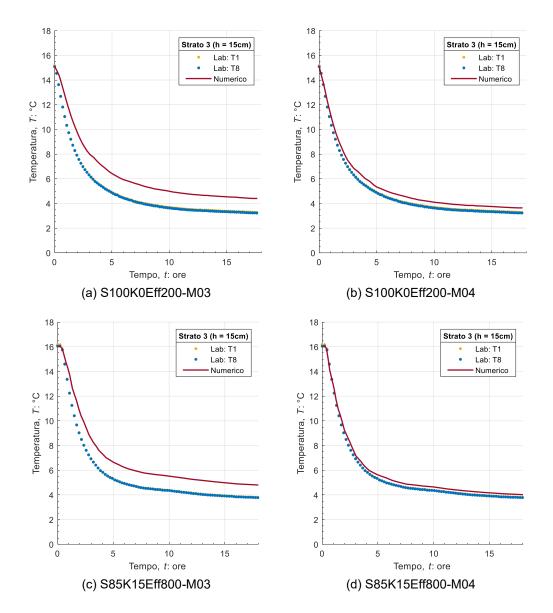


Figura 6.13: Evoluzione temporale della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie T1 e T8: risultati numerici (Num) e sperimentali (Lab)

Nella zona superiore del modello, lo schema M02 sottostima la temperatura (figura 6.14a e figura 6.14c), mentre tutti gli altri schemi (M01, M03 e M04) riproducono molto bene i dati delle rispettive termocoppie, come si evince dalla figura 6.14b e figura 6.14d, le quali si riferiscono allo schema M04.

In conclusione, si può affermare che lo schema M04 riproduce fedelmente la temperatura delle prove sperimentali e permette di ovviare la difficoltà iniziale circa la dispersione di calore nel fluido di cella. Dunque, per la fase di raffreddamento si è deciso di adottare lo schema M04, al fine di ottenere una distribuzione di temperatura eterogenea all'istante iniziale della successiva fase di congelamento.

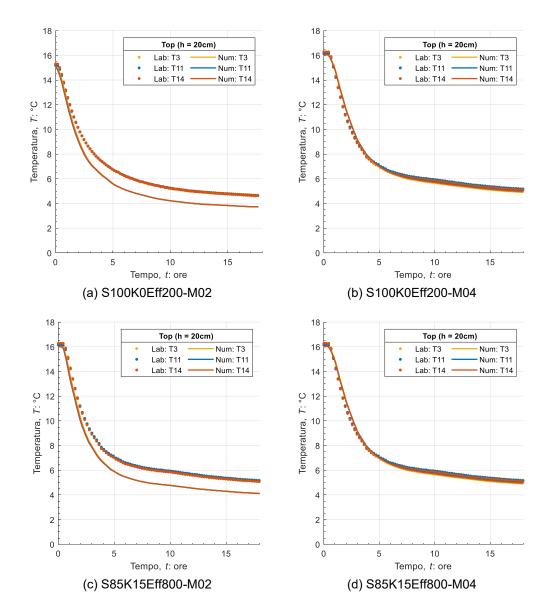


Figura 6.14: Evoluzione temporale della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie T3, T11 e T14: risultati numerici e sperimentali

Per quando concerne la fase di congelamento, si è ritenuto più opportuno rappresentare i risultati numerici in termini di differenza di temperatura ΔT allo stazionario, tra il valore numerico e il valore di temperatura della termocoppia di confronto. La differenza di temperatura ΔT è assunta positiva quando il modello numerico sovrastima la temperatura rispetto a quanto misurato nel modello fisico (risultato numerico di temperatura maggiore di quello sperimentale), e negativa se il modello numerico sottostima il valore di temperatura (risultato numerico di temperatura minore di quello sperimentale).

I valori del ΔT sono rappresentati in figura 6.15, figura 6.16 e figura 6.17.

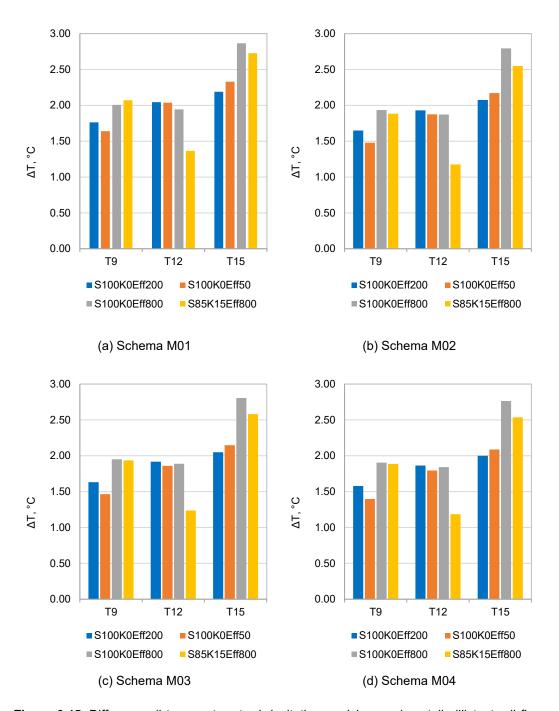


Figura 6.15: Differenza di temperatura tra i risultati numerici e sperimentali all'istante di fine congelamento per le termocoppie alla base del provino T9, T12 e T15

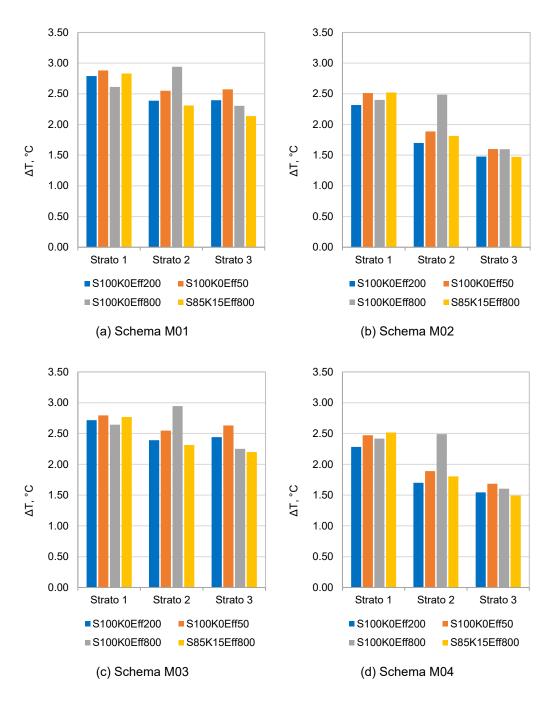


Figura 6.16: Differenza di temperatura tra i risultati numerici e sperimentali all'istante di fine congelamento per le termocoppie posizionate nei tre strati lungo l'altezza del provino

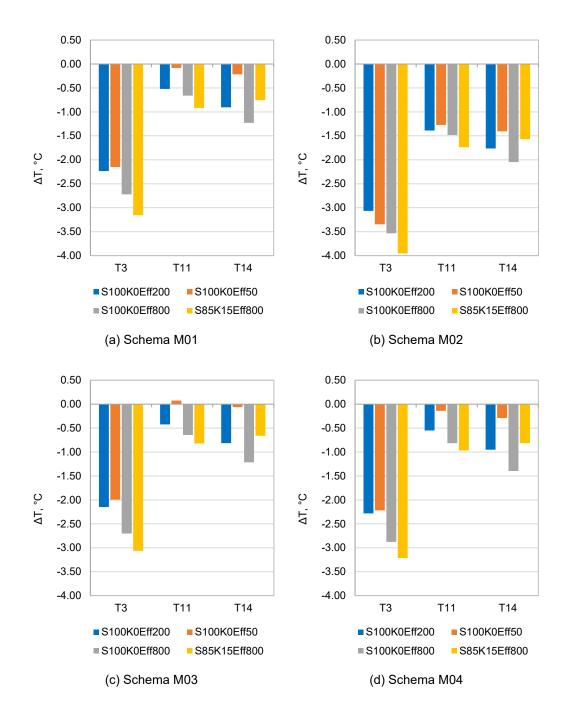


Figura 6.17: Differenza di temperatura tra i risultati numerici e sperimentali all'istante di fine congelamento per le termocoppie in testa al provino T3, T11 e T14

Come si evince dai grafici in figura 6.15, figura 6.16 e figura 6.17, la differenza di temperatura, ΔT , è positiva in corrispondenza delle termocoppie posizionate alla base e lungo i tre strati del provino (a 5, 10, 15 cm dalla base). Tra lo strato 3 e il bordo superiore del provino, il ΔT si inverte assumendo un valore negativo. Questa

tendenza si osserva in ogni schema considerato (M01, M02, M03 e M04) e in tutti i modelli (S100K0 e S85K15).

Per un dato modello, al variare dello schema, il ΔT che si osserva per le tre termocoppie alla base si mantiene pressoché costante. Tuttavia, il suo valore è diverso per ciascuna prova (figura 6.15).

Con riferimento alle termocoppie nei vari strati, dai grafici in figura 6.16 si osserva un ΔT variabile lungo l'altezza del provino. In generale il ΔT è maggiore allo strato 1 (5 cm dalla base) e si riduce in corrispondenza dello strato 3 (15 cm dalla base). Analizzando i risultati più nel dettaglio, si osserva che per gli schemi M01 e M03 il ΔT varia con l'altezza del provino in un intervallo ristretto compreso tra 2.25 e 2.75°C. D'altra parte, per gli schemi M02 e M04, la variazione del ΔT lungo l'altezza del provino è più pronunciata e mostra un trend pressoché lineare, da un valore di circa 2.50°C allo strato 1 a 1.60 °C allo strato 3.

Infine, in testa al provino, il ΔT si inverte e assume valore negativo (figura 6.17). Il modello numerico risulta essere più freddo di quello fisico, in quanto la temperatura del modello è sottostimata rispetto a quella del provino. Il valore di ΔT maggiore si osserva per lo schema M02. Tutti gli schemi mostrano valori simili di differenza di temperatura tra numerico e sperimentale. Tuttavia, il valore di ΔT minore si ottiene dallo schema M03 (figura 6.17c).

In conclusione, nella simulazione della fase di congelamento, si può affermare che nessuno schema è in grado di captare il campo di temperatura reale in quanto vi è sempre una differenza di temperatura ΔT tra il risultato numerico e quello sperimentale, soprattutto in prossimità degli strati lungo l'altezza del provino. Il tentativo di adottare diversi schemi, dunque, non è sufficiente per riprodurre la distribuzione di temperatura osservata all'interno dei provini.

Dai risultati mostrati in questo paragrafo, è evidente che nella parte superiore del provino, la dispersione di calore diventa importante, in quanto il ΔT si inverte, rispetto alla restante parte del provino. Alla base e lungo gli strati, invece, la temperatura del modello è maggiore rispetto quella del modello fisico (ΔT positivo). La presenza del valore di ΔT positivo è attribuibile al riferirsi in input a termocoppie esterne al provino (T16 e T17) che misurano una temperatura più elevata rispetto a quella del provino stesso.

Nel presente lavoro ci si è focalizzati nella riproduzione della temperatura che si osserva nella parte bassa del provino, non soggetta a dispersione. A tal fine, si è

scelto di utilizzare lo schema M03 come riferimento per l'imposizione delle condizioni al contorno, in quanto permette di captare meglio la distribuzione di temperatura nella parte inferiore del provino e di riprodurre in modo migliore la dispersione lungo l'altezza del provino stesso (ΔT pressoché costante lungo l'altezza del provino) e nella parte superiore, rispetto a quanto osservato adottando gli altri schemi.

Pertanto, si è deciso di modificare le condizioni di temperatura imposte al bordo esterno del modello sottraendo alle temperature assegnate ad ogni segmento un valore di temperatura $\Delta \overline{T}$, calcolato come valore medio dei ΔT osservati nello strato 1 (a 5 cm dalla base) nelle diverse prove (figura 6.16c). I suddetti valori sono riportati nella tabella 6.7, dai quali si ottiene un $\Delta \overline{T}$ medio di 2.70°C.

Tabella 6.7: Valori di ∆T in corrispondenza delle termocoppie nello Strato 1 (a 5 cm dalla base)

Modello	ΔT (°C) – Strato 1	
S100K0Eff50-M03	2.72	
S100K0Eff2000-M03	2.80	
S100K0Eff800-M03	2.64	
S85K15Eff800-M03	2.77	

Tale scelta, consente quindi di ottenere un modello numerico in grado di riprodurre in modo accurato l'andamento di temperatura nella parte inferiore del provino.

I grafici in figura 6.18 si riferiscono all'analisi numerica della prova S100K0Eff200-M03, in seguito alla sottrazione di 2.7°C dai valori di temperatura imposti ai segmenti del bordo esterno (lato liquido di cella). Nei grafici, sono confrontate le curve di temperatura sperimentali (Lab) con le curve di temperatura numeriche (Num).

Come si evince dalla figura 6.18, l'applicazione del $\Delta \bar{T}$ consente di captare molto bene l'andamento della temperatura all'equilibrio stazionario, sia negli strati sia alla base. Nella parte superiore del modello si nota un delta di temperatura importante dovuto ad ulteriori dispersioni di calore che avvengono nel provino, le quali non vengono modellate nel presente lavoro.

Nella fase successiva della modellazione numerica, si è cercato di riprodurre l'andamento di temperatura nel transitorio variando la conducibilità termica della fase solida. Lo studio parametrico è presentato nel prossimo paragrafo e, sulla base di quanto detto in precedenza, ci si è focalizzati maggiormente sulla capacità del

modello di predire l'evoluzione della temperatura nel transitorio in corrispondenza della base e nei vari strati del modello.

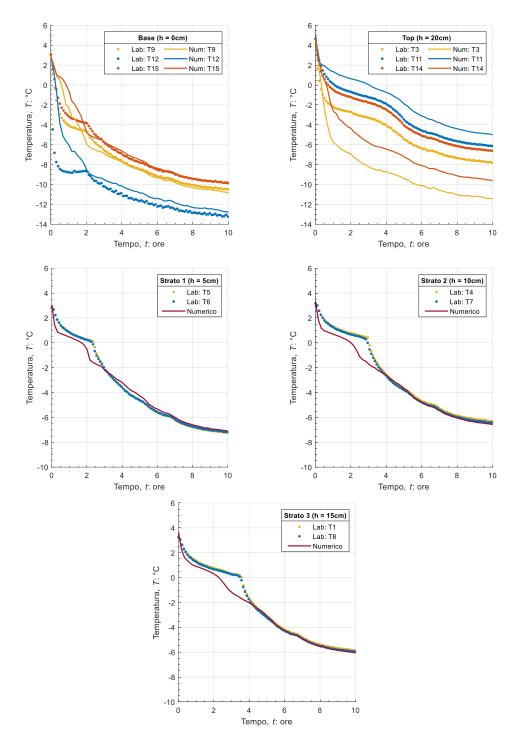


Figura 6.18: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M03 con correzione $\Delta \bar{T}$: risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num)

6.4. Studio parametrico per la determinazione della conducibilità termica della fase solida

Come anticipato, in questo paragrafo si presentano i risultati dello studio parametrico effettuato sulla conducibilità termica della fase solida, la quale ci permette di captare meglio l'andamento di temperatura nella fase transitoria.

Il range di variabilità della conducibilità termica considerato è 0.30 - 1.5 W/m K per la sabbia e 0.5 - 1.5 W/mK per la miscela sabbia-caolino. La scelta di tali range di variazione della conducibilità termica è basata su valori teorici di letteratura e sperimentali di conducibilità (Casini et al., 2023; Nishimura et al., 2009).

A partire dall'analisi AN1 (tabella 6.8) sono state eseguite 8 analisi (4 per la sabbia pura S100K0 e 4 per la sabbia con caolino S85K15) mantenendo fissi i valori di conducibilità termica dell'acqua e del ghiaccio, e variando solo quello relativo alla fase solida.

Nella tabella 6.8 sono schematizzate le analisi parametriche effettuate e i parametri di conducibilità termica adottati nelle simulazioni.

Tabella 6.8: Parametri di conducibilità termica delle fasi solida utilizzati nelle analisi numeriche per la miscela sabbia-caolino S85K15

Analisi	λ _s (W	//m K)
numerica	S100K0	S85K15
AN1	0.3	0.5
AN2	0.5	0.8
AN3	1.0	1.0
AN4	1.5	1.5

I grafici da figura 6.19 a figura 6.20 mostrano i risultati di temperatura, ottenuti dallo studio parametrico, in corrispondenza delle termocoppie nei vari strati (a 5, 10 e 15 cm dalla base del provino).

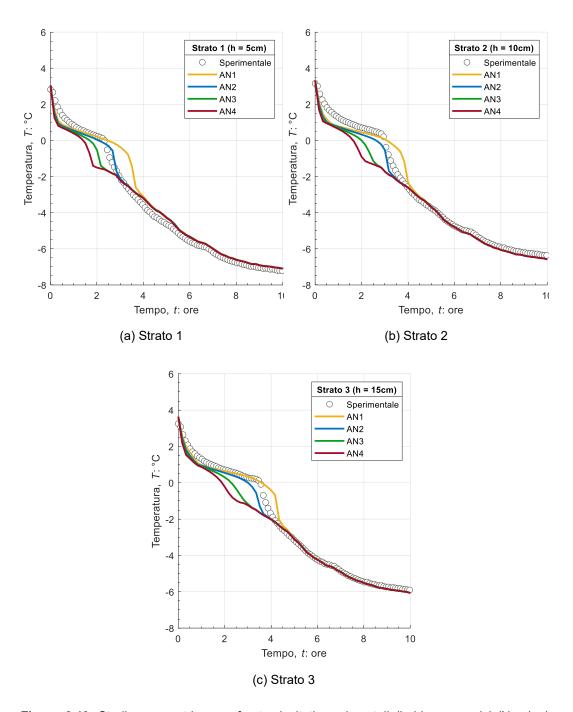


Figura 6.19: Studio parametrico: confronto risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num) al variare della conducibilità termica della fase solida – Prova S100K0Eff50-M03

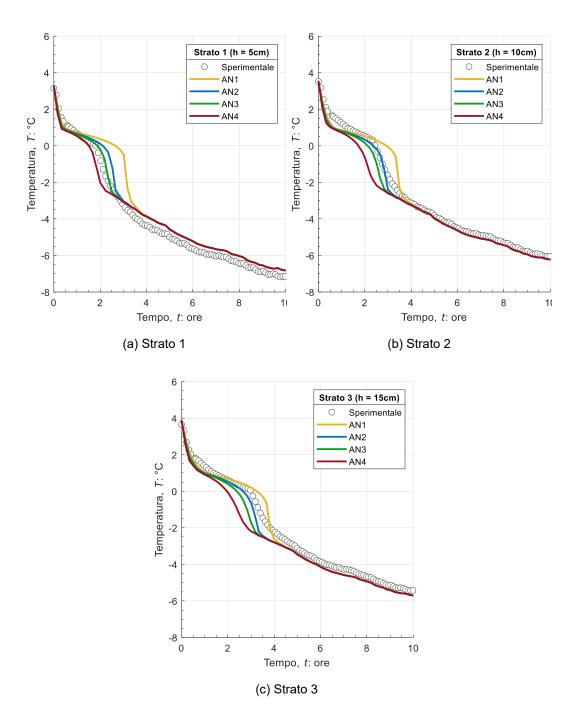


Figura 6.20: Studio parametrico: confronto risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num) al variare della conducibilità termica della fase solida – Prova S85K15Eff800-M03

I grafici mostrano che, all'aumentare del valore di conducibilità termica della fase solida, le curve di temperatura traslano verso sinistra; ciò si traduce in un tempo minore affinché inizi il processo di congelamento. Ciò, chiaramente è dovuto ad una maggior attitudine del provino a ridurre la sua temperatura con velocità maggiori, all'aumentare del valore di conducibilità.

Come si osserva dai grafici in figura 6.17, relativi alla prova S100K0Eff200, la curva di temperatura che meglio riproduce la curva sperimentale è quella relativa all'analisi numerica AN2, in cui si assume un valore di conducibilità termica pari a 0.50 W/mK.

La figura 6.20 si riferisce alla miscela di sabbia con 15% di caolino. In questo caso, le curve relative alle analisi numeriche AN2 e AN3 a cui corrispondono i valori di conducibilità termica di 0.80 e 1.0 W/mK sono quelle che più si avvicinano alla curva sperimentale. Pertanto, sulla base dei risultati presentati, si considera per la miscela S85K15 un valore di conducibilità intermedio pari a 0.90 W/mK.

6.4.1. Influenza della posizione delle termocoppie sulla temperatura

I parametri di conducibilità termica ottenuti dallo studio parametrico consentono di riprodurre fedelmente l'andamento della temperatura lungo gli strati del provino, nella fase transitoria. Alla base e nella parte superiore del modello, l'andamento delle curve di temperatura risulta essere maggiormente influenzato dalla posizione in cui si considerano installate le termocoppie all'interno del provino. Dal momento che, le termocoppie inserite nel provino possono piegarsi e spostarsi facilmente sia durante la preparazione dei provini sia durante l'esecuzione della prova, una loro variazione nel posizionamento all'interno del provino, può avere influenza sulla misura della temperatura.

In questo paragrafo, si analizza la variabilità del risultato numerico in funzione del posizionamento delle termocoppie. A tal fine si è considerato una variazione nel posizionamento di ± 5 mm.

Nei grafici in figura 6.21 e figura 6.22 sono riportati i valori di temperatura delle termocoppie (Lab) alle posizioni indicate nella figura 6.11 e le corrispondenti curve numeriche (Num). Le bande colorate rappresentano la variazione di ± 5 mm dalla posizione originaria delle termocoppie.

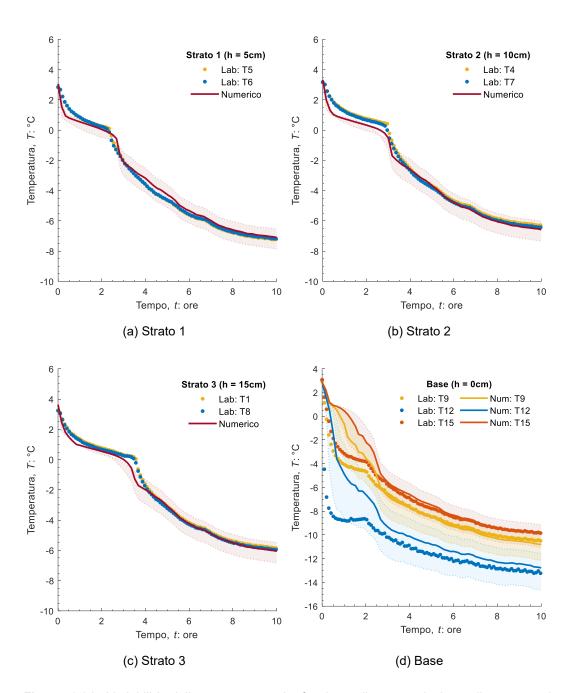


Figura 6.21: Variabilità della temperatura in funzione di una variazione di ±5mm nel posizionamento delle termocoppie – Prova S100K0Eff200-M03

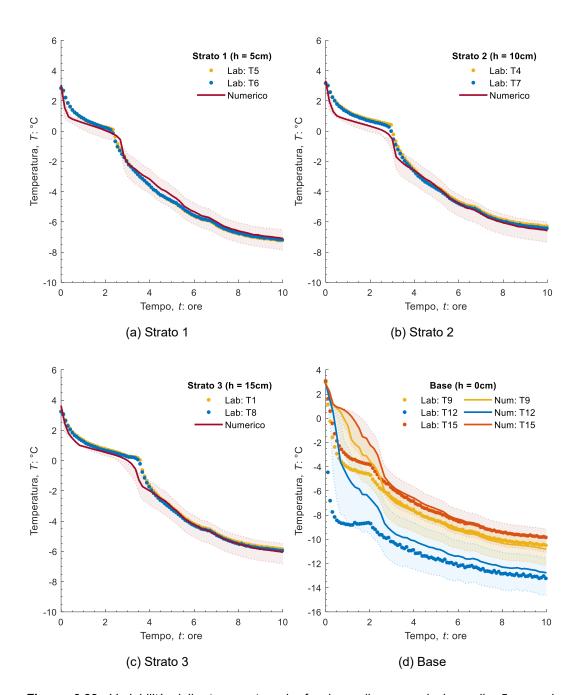


Figura 6.22: Variabilità della temperatura in funzione di una variazione di ±5mm nel posizionamento delle termocoppie – Prova S85K15Eff800-M03

Dai grafici (figura 6.21 e figura 6.22) si possono dedurre le seguenti considerazioni:

- tutte le prove riproducono fedelmente l'andamento di temperatura nei vari strati. Inoltre, si può osservare come una piccola variazione nel posizionamento dello strumento ha maggiore influenza sul risultato di temperatura allo stazionario, con una variazione media di temperatura di ±0.5°C. Nella fase transitoria, invece, la temperatura risente meno della variazione nel posizionamento delle termocoppie.
- L'andamento della temperatura alla base e al top, nel transitorio, è fortemente influenzato dalla posizione delle termocoppie.

In conclusione, si è osservato che il modello è meno fedele nella riproduzione dell'andamento di temperatura alla base e in testa al provino. Tuttavia, nel presente paragrafo, si è mostrato come una leggera variazione nel posizionamento delle termocoppie conduce ad una variazione del risultato numerico non trascurabile.

6.5. Comportamento idraulico del modello nella fase di congelamento

Successivamente si è analizzato il comportamento idraulico del modello numerico, attraverso la quantificazione del volume d'acqua espulso dal provino nel corso del congelamento della sabbia pura (S100K0).

Durante il congelamento, il movimento dell'acqua all'interno dei pori è dovuto a due fattori: l'aumento di volume della stessa, in seguito al passaggio di stato in ghiaccio, e la suzione criogenica. La prima componente causa una forza di espulsione dell'acqua dal provino conseguente all'aumento di volume, che avviene dal fronte di congelamento verso le zone non congelate. La seconda componente, la suzione criogenica, provoca una forza di richiamo dell'acqua verso il fronte congelato. I risultati sperimentali delle prove *FROZEN* condotte sul campione costituito unicamente da sabbia (S100K0) non mostrano variazione di indice dei vuoti: l'acqua dei pori si espande al passaggio di stato, sul fronte di congelamento, provocando l'espulsione dell'acqua non ancora congelata verso l'esterno del provino. Il volume totale di acqua espulso dal provino misurato al termine della fase di congelamento è di circa 60 ml (La Porta et al., 2022).

Nel modello numerico, i volumi d'acqua espulsi sono stati determinati a partire dalla velocità di uscita dell'acqua dai bordi esterni superiore ed inferiore del modello, in cui è consentito il drenaggio. La procedura di calcolo è suddivisa nei seguenti step:

1) determinazione dell'andamento temporale della velocità dell'acqua q_{li} nei punti medi degli elementi della mesh che discretizzano i bordi estremi del modello. Il generico elemento *i*-esimo della mesh è individuato dal raggio interno r_i e dal raggio esterno R_i (figura 6.23);

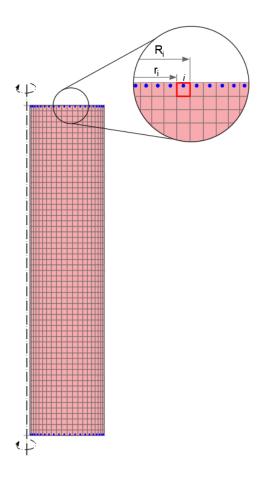


Figura 6.23: Rappresentazione dei punti medi degli elementi della mesh e indicazione del raggio interno ed esterno dell'elemento i-esimo

2) noto l'andamento di velocità, si determina la portata d'acqua Q_{li} in uscita dall'elemento i-esimo, moltiplicando la velocità per l'area della sezione trasversale di spessore pari alla larghezza dell'elemento i-esimo:

$$Q_{li} = q_{li} A_i = q_{li} \cdot \pi (R_i^2 - r_i^2) \qquad (m^3/s)$$
(6.4)

3) successivamente, si calcola il volume in uscita dall'elemento *i*-esimo, $V_{out,i}$, calcolando l'area sottesa alla curva dell'andamento temporale della portata d'acqua Q_{li} :

$$V_{out,i} = \sum_{k} q_{li} \, \Delta t \tag{6.5}$$

4) infine, il volume totale si ottiene sommando i volumi d'acqua in uscita da ogni elemento:

$$V_{out} = \sum_{k} (V_{out}^{sup} + V_{out}^{inf})$$
 (6.6)

In figura 6.24 e figura 6.25 sono illustrati i profili della velocità d'acqua in testa e alla base del provino, rispettivamente. I valori positivi di velocità si riferiscono ad un movimento di acqua verso l'alto (y positive) mentre i valori negativi indicano un movimento di acqua verso il basso (y negative).

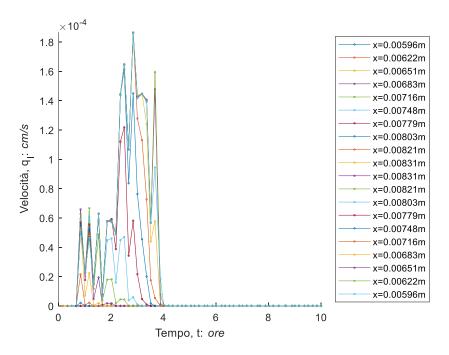


Figura 6.24: Evoluzione temporale della velocità dell'acqua in corrispondenza del bordo superiore del modello – S100K0Eff200-M03

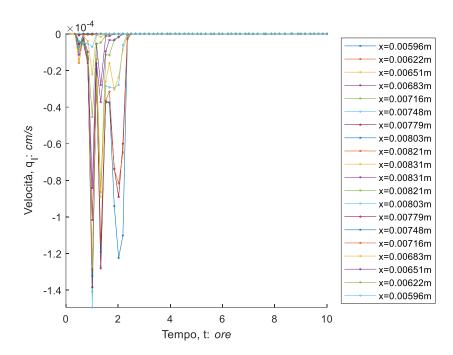


Figura 6.25: Evoluzione temporale della velocità dell'acqua in corrispondenza del bordo inferiore del modello – S100K0Eff200-M03

Con riferimento ai profili di velocità, dai grafici (figura 6.24 e figura 6.25) si notano dei valori maggiori di velocità in testa a provino, la quale si annulla dopo 4 ore dall'inizio del congelamento. Alla base, la velocità si annulla trascorse 2 ore, in quanto questa zona rappresenta la prima regione del provino a congelare.

Questo andamento viene confermato anche dai grafici in figura 6.26, in cui le barre blu rappresentano il volume in uscita dal drenaggio inferiore e le barre arancioni quello in uscita dal drenaggio superiore. Il segno positivo, indica il movimento di acqua verso il drenaggio superiore mentre il segno negativo si riferisce al movimento di acqua verso il drenaggio inferiore.

Inoltre, si osservano dei volumi in uscita quasi nulli nella metà del modello più vicina al tubo refrigerante, in quanto il drenaggio è immediatamente bloccato dall'avanzamento del fronte di congelamento. In questa zona, nella figura 6.26b e figura 6.26c, si nota un movimento d'acqua nella direzione opposta alla direzione di drenaggio dovuto al richiamo d'acqua verso il fronte di congelamento per suzione criogenica. Ad esempio, con riferimento alla figura 6.26c, alla distanza r di 0.015 m, si osserva: alla base un volume con segno positivo, il che indica un movimento d'acqua verso l'alto e dunque all'interno del provino; al top, il volume assume segno negativo; dunque, l'acqua è richiamata a muoversi dalla zona superiore del modello verso l'interno del modello stesso.

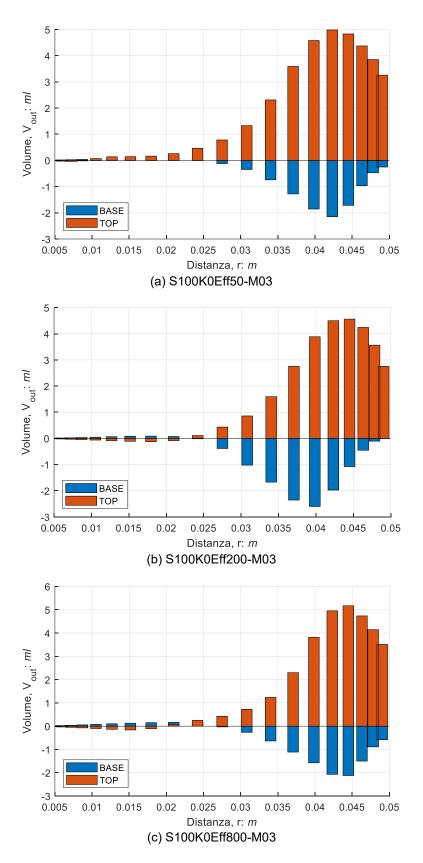


Figura 6.26: Volume d'acqua in uscita lungo il bordo inferiore (BASE) e superiore (TOP) del modello

I volumi totali in uscita sono riportati nella tabella 6.9.

Tabella 6.9: Volumi d'acqua in uscita dal modello

Modello	V _{out} (ml) - Base	V _{out} (ml) - Top	V _{out} (ml) - Totale
S100K0Eff50-M03	10	34	44
S100K0Eff200-M03	11	29	40
S100K0Eff800-M03	10	31	41

Il volume complessivo medio in uscita (42 ml), dunque, risulta sottostimato rispetto a quanto misurato sperimentalmente (60 ml). Questa differenza può essere spiegata dal fatto che il modello numerico in corrispondenza del drenaggio superiore sottostima le temperature e di conseguenza, il congelamento avviene prima riducendo il tempo disponibile di fuoriuscita d'acqua.

La presente Tesi di laurea magistrale affronta la modellazione del fenomeno del congelamento, analizzandone principalmente l'interazione termica e idraulica delle fasi. L'obiettivo è la riproduzione del campo di temperatura osservato sperimentalmente nelle prove in cella *FROZEN*, precedentemente realizzate, durante il processo di congelamento di terreni costituiti da sabbia pura e sabbia con 15% di caolino. La complessità nel riprodurre numericamente l'andamento di temperatura all'interno dei provini, influenzata sia da fenomeni di dispersione di calore, causati dalla temperatura ambiente non controllata, e dal posizionamento delle termocoppie utilizzate per i dati di input del modello (e.g. termocoppie all'interno del liquido di cella), ha condotto il seguente studio numerico a svilupparsi in diversi step successivi.

La prima fase della modellazione numerica si è focalizzata sulla ricerca di un metodo per la determinazione delle condizioni al contorno di temperatura da imporre ai bordi laterali del modello. Quattro diversi schemi di imposizione delle condizioni al contorno di temperatura sono stati utilizzati per considerare la variazione della temperatura lungo l'altezza del provino (M01, M02, M03 e M04).

I risultati numerici sono stati confrontati con quelli sperimentali in termini di evoluzione temporale di temperatura in corrispondenza dei punti in cui sono posizionate le termocoppie di confronto (termocoppie all'interno del provino), da cui si traggono le seguenti conclusioni:

 La fase di raffreddamento è riprodotta fedelmente, imponendo al bordo destro del modello una condizione al contorno di temperatura, con valori variabili in modo lineare lungo l'altezza, fra la temperatura riscontrata alla

base ed un valore medio fra la temperatura di base e la temperatura della parte superiore del fluido di cella. La finalità della simulazione di tale fase è quella di giungere alla distribuzione iniziale di temperatura della fase di congelamento;

- Nella simulazione della fase di congelamento, all'equilibrio, si osserva una differenza di temperatura ΔT tra il risultato numerico e il risultato sperimentale, in ogni schema utilizzato per l'imposizione delle condizioni di temperatura.
- La differenza di temperatura ΔT tra il risultato numerico e sperimentale, assume valore positivo (risultato numerico di temperatura maggiore di quello sperimentale) alla base e lungo gli strati (a 5, 10 e 15 cm dalla base) del modello, per cui la temperatura del modello risulta sovrastimata rispetto a quella del provino. Nella zona superiore del modello, si ha una tendenza opposta, il ΔT si inverte e assume valori negativi, evidenziando dunque una sottostima della temperatura del modello numerico (risultato numerico di temperatura minore di quello sperimentale). La presenza di questo ΔT è attribuibile a due fattori: il riferirsi in input a termocoppie esterne al provino (T16 e T17), che misurano una temperatura più elevata rispetto a quella del provino stesso; la dispersione di calore che si osserva essere predominante nella parte superiore del provino (non modellata durante il progetto di Tesi).

Il presente lavoro si è focalizzato sulla riproduzione della temperatura che si osserva nella parte bassa del provino, non soggetta a dispersione. A tal fine, nella simulazione della fase di congelamento, al bordo destro e sinistro del modello si definiscono delle condizioni al contorno di temperatura con valori in evoluzione lineare lungo l'altezza, fra la temperatura riscontrata alla base e la temperatura misurata nella parte superiore del fluido di cella e del fluido refrigerante, rispettivamente. Dal confronto tra i risultati numerici e sperimentali, tale scelta circa l'imposizione delle condizioni al contorno di temperatura, consente:

- di captare in maniera più accurata la distribuzione di temperatura nella parte inferiore del provino;
- riprodurre in modo migliore la dispersione lungo l'altezza del provino stesso (il ΔT si mantiene pressoché costante lungo l'altezza del provino) e nella parte superiore rispetto a quanto osservato adottando gli altri schemi.

Individuato lo schema di imposizione delle condizioni al contorno di temperatura, lo studio numerico è proseguito con la finalità di riprodurre l'andamento della temperatura nella parte bassa del provino, non modellando dunque la dispersione termica. A tal fine si è deciso di modificare le condizioni di temperatura al bordo esterno del modello, sottraendo, alle temperature imposte ai segmenti che discretizzano il bordo stesso, un delta di temperatura medio $\Delta \bar{T}$. Il $\Delta \bar{T}$ è stato calcolato come valore medio dei ΔT osservati nello strato 1 (a 5 cm dalla base del provino) nelle diverse prove.

I risultati dell'analisi numerica, in seguito alla modifica delle condizioni al contorno di temperatura (applicazione del $\Delta \overline{T}$), evidenziano:

- una riproduzione fedele della temperatura negli strati e alla base del provino, all'equilibrio;
- una sottostima della temperatura in testa al provino in cui la dispersione di calore è importante e non è considerata nel modello. Pertanto, il modello numerico sottostima i valori di temperatura nella parte superiore rispetto ai valori di temperatura misurati nel modello fisico.

Lo studio parametrico sulla conducibilità termica della fase solida per la sabbia pura S100K0 e sabbia con caolino S85K15, ha permesso di riprodurre con buona approssimazione l'andamento di temperatura nella fase transitoria nei diversi strati e alla base del provino, evidenziando comunque un'influenza della variazione del posizionamento delle termocoppie sull'andamento della temperatura nel transitorio.

Lo studio numerico è stato ultimato con lo studio del comportamento idraulico del modello nella fase di congelamento attraverso la quantificazione del volume d'acqua espulso dal modello durante il processo di congelamento.

Il volume complessivo medio in uscita risulta sottostimato rispetto a quanto misurato sperimentalmente. Questa differenza può essere causata dal fatto che il modello numerico in corrispondenza del drenaggio superiore, è caratterizzato da una temperatura inferiore rispetto alla temperatura osservata nel provino reale. Di conseguenza, il congelamento del drenaggio avviene prima riducendo il tempo disponibile di fuoriuscita d'acqua.

Riassumendo, si può concludere che il modello numerico generato è in grado di riprodurre fedelmente l'andamento di temperatura lungo l'altezza e alla base del provino. Tuttavia, esso risulta inefficace nel riprodurre le condizioni di temperatura nella zona compresa tra lo strato 3 (15 cm dalla base) e il bordo superiore del

modello, in quanto non è stata considerata la dispersione. Sarà necessario dunque implementare il modello, per successivi sviluppi, per considerare anche la dispersione di calore del provino con l'ambiente esterno e migliorare la capacità del modello nel predire la distribuzione di temperatura lungo il provino.

Bibliografia

- Aljundi, K., Vieria, A., Maranha, J., Lapa, J., & Figueiredo, A. (2019). Some aspects of measurement of sand thermal conductivity from laboratory tests. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Alonso, E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Géotechnique*, 405-430.
- Andersland, B. O., & Ladanyi, B. (2003). Frozen Ground Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Andersland, O., & Gallavresi, F. (1989). General report of the speciality session on the ground freezing. *Proceedings of the XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (p. 2657-2673). Rio de Janeiro.
- Anderson, D. M., & Tice, A. R. (1972). Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. *Highway Research Record*, 393, 12-18.
- Balossi Restelli, A. (1995). Il congelamento del terreno può risolvere situazioni difficili di scavo sotto battente di falda. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 179-199.
- Balossi Restelli, A., Cavagna, B., & Pettinaroli, A. (2011). Metropolitana di Napoli
 Linea 1 Trattamento di congelamento di pozzo Garibaldi. *Atti del XXIV*Convegno Nazionale di Geotecnica, (p. 325-333). Napoli.

Bibliografia 121

Bartoli, M. (2019). Comportamento termo-idro-meccanico dei terreni artificialmente congelati: studio sperimentale e numerico [Master Thesis]. Roma: Università di Tor Vergata.

- Bartoli, M., Raparelli, S., Casini, F., & Viggiani, G. B. (2018). Un'attrezzatura avanzata per prove su terreni artificialmente congelati. *IARG*, (p. 1-6). Genova.
- Bates, R., & Bilello, M. (1966). Defining the cold regions of the Northern Hemisphere. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Technical Report, 178.
- Bing, H., & Wei, M. (2011). Laboratory investigation of freezing point of saline soil. *Cold Regions Science and Technology*, 79-88.
- Burt, T. P., & Williams, P. J. (1976). Hydraulic conductivity in frozen soils. *Earth Surface Processes*, 349-360.
- Casini, F., Guida, G., Restaini, A., & Celot, A. (2023). Water Retention Curve based design method for the Artificial Ground Freezing: the case study of Isarco River Underpass Tunnels within the Brenner Base Tunnel Project.

 Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 149(3), 16.
- Chamberlain, E., Groves, C., & Perham, R. (1972). The mechanical behaviour of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions. *Géotechnique*, 22(3), 469-483.
- Chen, S. X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and Mass Transfer*, 44, 1241-1246.
- Chiu, T. F., & Shackelford, C. D. (1998). Unsaturated Hydraulic Conductivity of Compacted Sand-Kaolin Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2), 160-170.
- Colombo, G. (2010). Il congelamento artificiale del terreno negli scavi della metropolitana di Napoli: valutazioni teoriche e risultati sperimentali. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 42-62.
- Côté, J., & Konrad, J.-M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 443-458.

Bibliografía 122

Crippa, C., & Manassero, V. (2006). Artificial Ground Freezing at Sophiaspoortunnel (The Netherlands). Freezing Parameters: Data Acquisition and Processing., (p. 1-6).

- Deville, S. (2016). Schematic representation of the principles of frost heave. Tratto da Permafrost Young Researchers Network (PYRN): https://pyrn.arcticportal.org/
- DIT-UPC. (2022). *Code_Bright User's Guide*. Polytechnical University of Catalonia.
- Dobinski, W. (2011). Permafrost. Earth Science Reviews, 108(3-4), 158-169.
- Dudeja, D. (2011). Thaw Weakening. In *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (p. 1155-1156). Springer Netherlands, Dordrecht.
- Freitag, D. R., & McFadden, T. T. (1997). *Introduction to Cold Regions Engineering*. New York: ASCE Press.
- Gallavresi, F. (1991). Il congelamento artificiale del terreno. *Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo*, (p. 401-416). Milano.
- Gens, A. (2010). Soil-environment interaction in geotechnical engineering. *Geotechnique*, 3-74.
- Gens, A., Sánchez, M., Guimarães, L., Lloret, A., Olivella, S., & Alonso, E. (2009). A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observations, analysis and interpretation. *Géotechnique*, 59(4), 377-399.
- Ghoreishian, A., Seyed, A., & Grimstad, G. (2016). Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 1646-1657.
- Gilpin, R. R. (1980). A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils. *Water Resources Research*, 16(5), 918-930.
- Hansson, K., Simunek, J., Mizoguchi, M., Lundin, L. C., & Van Genuchten, M. (2004). Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze-thaw applications. *Vadose Zone Journal*, 3, 693-704.
- Harlan, R. L. (1973). Analysis of coupled heat-fluid transport in frozen soil. *Water Resources Research*, *9*(5), 1314-1323.
- Harris, J. S. (1995). *Ground Freezing in Practice*. London: Thomas Telford.

Bibliografia 123

Henry, K. (1988). Chemical aspects of soil freezing. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (U.S.).

- Henry, K. (2000). A Review of the Thermodynamics of Frost Heave.
- Johansen, O. (1977). *Thermal Conductivity of Soils*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, NH.
- Konrad, J.-M. (1989). Effect of freeze–thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios. *Canadian Geotechnical Journal*, 217-226.
- Konrad, J.-M., & Morgenstern, N. (1980). A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 17, 473-486.
- Konrad, J.-M., & Morgenstern, N. (1981). The segregation potential of a freezing soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 17, 482-491.
- Konrad, J.-M., & Morgenstern, N. (1984). Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(1), 100-115.
- Kurylyk, B. L., MacQuarrie, K. T., & McKenzie, J. M. (2014). Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. *Earth-Science Reviews*, *138*, 313-334.
- La Porta, G., Casini, F., Pirulli, M., & Scavia, C. (2022). Analisi sperimentale del comportamento di terreni a matrice grossolana sottoposti a congelamento artificiale. *IARG*, (p. 1-6). Caserta.
- Liu, Z., & Yu, X. (2011). Coupled thermo-hydro-mechanical model for porous materials under frost action: Theory and implementation. *Acta Geotechnica*, 6, 51-63.
- Lu, S., Ren, T., Gong, Y., & Horton, R. (2007). An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1).
- McFadden, T. T., & Bennett, L. F. (1991). *Construction in Cold Regions*. New York: John Wiley & Sons.

Bibliografía 124

McKenzie, J. M., Clifford, I. V., & Donald, I. S. (2007). Groundwater flow with energy transport and water–ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs. *Advances in Water Resources*, 966-983.

- Michot, A., Smith, D., Degot, S., & Gault, C. (2008). Thermal Conductivity and Specific Heat of Kaolinite: Evolution with Thermal Treatment. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 2639-2644.
- Miller, E., & Sowers, G. F. (1958). The strength characteristics of soil-aggregate mixtures & discussion. *Highway research board bulletin*(183).
- Miller, R. D. (1978). Frost heaving in non-colloidal soils. *Proc. 3rd Int. Conf. on Permafrost, Edmonton*, 708-713.
- Nakano, Y. (1990). Quasi-steady problems in freezing soils: 1. Analysis on the steady growth of an ice layer. *Cold Regions Science and Technology*, 207-226.
- Nguyen, V., Heindl, H., Pereira, J. M., Tang, A. M., & Frost, J. (2017). Water retention and thermal conductivity of a natural unsaturated loess. *Géotechnique Letters*, 7(4), 286-291.
- Nishimura, S., Olivella, S., & Jardine, R. (2009). THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Geotechnique*, 159-171.
- Nixon, J. F. (1991). Discrete ice lens theory for frost heave in soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 843-859.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A., & Alonso, E. (1994). Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in Porous Media*, 15, 271-293.
- Olivella, S., Gens, A., Ramirez, J., & Alonso, E. (1996). Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGHT) for coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*, 13, 87-112.
- O'Neill, K., & Miller, R. D. (1985). Exploration of a Rigid Ice Model of Frost Heave. *Water Resources Research*, 21, 281-296.
- Parameswaran, V. R. (1980). Deformation behaviour and strength of frozen sand. Canadian Geotechnical Journal, 17(1), 74-88.

Bibliografía 125

Reiffsteck, P., & Pham, P. T. (2005). Influence of particle size distribution on mechanical behavior of a soil. *Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (p. 583-586).

- Rempel, A. W. (2010). Frost Heave. Journal of Glaciology, 1122-1128.
- Rempel, A. W., Wettlaufer, J. S., & Worster, M. G. (2001). Interfacial Premelting and the Thermomolecular Force: Thermodynamic Buoyancy. *Physical Review Letter*, 87, 088501.
- Rocca, O. (2011). Congelamento artificiale del terreno. Benevento: Hevelius Edizioni.
- Roscoe, K. H., & Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay. *Engineering Plasticity*, 535-609.
- Sanchez, M., Gens, A., Guimarães, L., & Olivella, S. (2008). Implementation algorithm of a generalised plasticity model for swelling clays. *Computers and Geotechnics*, 35(6), 860-871.
- Sayles, F. H. (1981). Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight. *Engineering Geology*, 55-66.
- Schofield, A., & Wroth, P. (1968). *Critical state soil mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- Sepaskhah, A. R., & Boersma, L. (1979). Thermal Conductivity of Soils as a Function of Temperature and Water Content. *Soil Science Society of America Journal*, 43(3), 439-444.
- Simpson, D., & Evand, T. (2015). Behavioral Thresholds in Mixtures of Sand and Kaolinite Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015073.
- Smits, K., Sakaki, T., Limsuwat, A., & Illangasekare, T. (2010). Thermal Conductivity of Sands under Varying Moisture and Porosity in Drainage—Wetting Cycles. *Vadose Zone Journal*, *9*(1), 172.
- Studio Balossi. (1995). Studio Balossi Restelli e Associati} Metropolitana di Milano linea 3 Tratta Crocetta Porta Romana. Tratto da www.balossirestelliassociati.it/progetti/metropolitana-di-milano-linea-3-tratta-crocetta-porta-romana

Bibliografia 126

Studio Balossi. (2011). *Metropolitana di Napoli linea 1 – stazione Garibaldi*. Tratto da www.balossirestelliassociati.it/progetti/metropolitana-di-napoli-linea-1-stazione-garibaldi

- Taber, S. (1929). Frost Heaving. The Journal of Geology, 428-461.
- Taber, S. (1930). The Mechanics of Frost Heaving. *The Journal of Geology*, 303-317.
- Tang, A. M., Cui, Y. J., & Le, T. T. (2008). A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. *Applied Clay Science*, 41(3-4), 181-189.
- Tanzini, M. (2006). *Gallerie. Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Tarnawski, V. R., & Leong, W. H. (2000). Thermal Conductivity of Soils at Very Low Moisture Content and Moderate Temperatures. *Transport in Porous Media*, 41(2), 137-147.
- Thomas, H. R. (2009). Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Géotechnique*, 173-184.
- Tian, Z., Ren, T., Kojima, Y., Lu, Y., Horton, R., & Joshua, L. H. (2017). An improved thermo-time domain reflectometry method for determination of ice contents in partially frozen soils. *Journal of Hydrology*, 555, 786-796.
- Tice, A. R., Anderson, D. M., & Banin, A. (1976). The prediction of unfrozen water contents in frozen soils from liquid limit determinations. *CRREL*, *US Army Corps of Engineers*.
- Ting, J. M., & Martin, R. T. (1983). Mechanisms of Strength for Frozen Sand. Journal of Geotechnical Engineering, 1286-1302.
- Trevi S.p.a. (2013). *Congelamento artificiale dei terreni*. Tratto da www.trevispa.com
- Tsytovich, N. (1960). *Bases and Foundations on Frozen Soil*. Highway Research Board.
- Vallejo, L. E., & Mawby, R. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material—clay mixtures. *Engineering Geology*, 58(2), 125-136.
- Van Everdingen, R. (1976). Geocryological terminology. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 862-867.

Bibliografía 127

Van Genuchten, M., & al., e. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*.

- Vu, Q. H. (2022). Effect of fines content on hydro-thermal behaviour of sandy soil in the context of artificial ground freezing. École doctorale N° 531 Sciences, Ingénierie et Environnement SIE.
- Vu, Q. H., Pereira, J.-M., & Tang, A. M. (2022). Effect of fines content on soil freezing characteristic curve of sandy soils. *Acta Geotechnica*, 17, 4921-4933.
- Wettlaufer, J., & Worster, M. G. (2006). Premelting Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 427-452.
- Williams, P. J. (1964). Unfrozen Water Content of Frozen Soils and Soil Moisture Suction. *Géotechnique*, 14(3), 231-246.
- Yin, K., Fauchille, A.-L., Di Filippo, E., Kotronis, P., & Sciarra, G. (2021). A Review of Sand–Clay Mixture and Soil–Structure Interface Direct Shear Test. *Geotechnics*, 1(2), 260-306.
- Yu, X., Zhang, N., Pradhan, A., & Puppala, A. (2016). Thermal conductivity of sand-kaolin clay mixtures. *Environmental Geotechnics*, 3(4), 190-202.
- Zhang, M., Lu, J., Lai, Y., & Zhang, X. (2018). Variation of the thermal conductivity of a silty clay during a freezing-thawing process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 1059-1067.
- Zhang, N., Yu, X., Pradhan, A., & Puppala, A. (2015). Thermal Conductivity of Quartz Sands by Thermo-Time Domain Reflectometry Probe and Model Prediction. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 27.
- Zhang, Y. (2014). Thermal-hydro-mechanical model for freezing and thawing soils. *Doctoral Thesis*. University of Michigan.
- Zhou, M., & Meschke, G. (2013). A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils}. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3173-3193.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1898). *The Finite Element Method* (Forth ed.). McGraw-Hill.

Indice delle figure

Figura 1.1: Estensione del permafrost nell'emisfero settentrionale (Fonte: United Nations Environment Program UNEP)4
Figura 1.2: Struttura del terreno regolata dalla temperatura atmosferica e flusso termico. La zona grigia indica l'ampiezza del permafrost (Dobinski, 2011)5
Figura 1.3: Rappresentazione schematica dei principi del criosollevamento (Deville, 2016)
Figura 1.4: Relazione tra lo sforzo di compressione e la diminuzione di volume di un terreno che scongela (modificato da Andersland et al., 2003)8
Figura 1.5: Ferrovia costruita su permafrost vicino Strelna in Alaska danneggiata dal disgelo del permafrost (Fonte: U.S. Geological Survey)
Figura 1.6: Alcuni esempi di applicazione della tecnica del congelamento artificiale del terreno: (a) scavi profondi; (b) rinforzo delle fondazioni; (c) stabilità dei pendii; (d) pozzi; (e) trincee profonde; (f) gallerie (Andersland et al., 2003)
Figura 1.7: Fattibilità dei diversi metodi di consolidamento in relazione alla natura del terreno (Harris, 1995)12
Figura 1.8: Congelamento del terreno per il recupero Ara Pacis Augustea: (a) Sezione; (b) Pianta (Rocca, 2011)13
Figura 1.9: Fronte di terreno congelato. Stazione Garibaldi. Metropolitana di Napoli Linea 1 (Balossi Restelli et al, 2011)14
Figura 1.10: Schematizzazione del processo di congelamento per la formazione del "muro di ghiaccio" (Trevi S.p.a., 2013)
Figura 1.11: Schematizzazione di una sonda congelatrice verticale e del flusso di fluido refrigerante al suo interno (Rocca, 2011)
Figura 1.12: Schema di funzionamento del metodo indiretto per il congelamento artificiale del terreno (Colombo, 2010)

Figura 1.13: Schema di funzionamento del metodo diretto per il congelamento artificiale del terreno (Colombo, 2010)
Figura 2.1: Andamento della forza di attrazione elettrica con la distanza tra particelle solide e molecole d'acqua (Tsytovich, 1960)
<i>Figura 2.2:</i> Andamento del contenuto di acqua non gelato w _u in funzione della temperatura T per diverse tipologie di terreno (modificata da Tsytovich, 1960)25
Figura 2.3: Fenomeno di congelamento del terreno con formazione della frangia congelata (Gens, 2010)
Figura 2.4: Rappresentazione schematica di un profilo di terreno congelato (modificato da Gens, 2010)
Figura 2.5: Curva di raffreddamento del sistema terreno-acqua interstiziale (Bing et al., 2011)
Figura 2.6: Illustrazione del fenomeno di curvature-induced premelting e interfacial premelting durante l'intrusione di ghiaccio in un solido bagnato a forma di cuneo (Zhou et al., 2013)
Figura 2.7: Schematizzazione del processo di criosuzione (Zhou et al., 2013) . 32
Figura 2.8: a) Schematizzazione del ricongelamento termico (Zhou et al., 2013); b) Fotografia del criosollevamento di un provino di terreno congelato causato dalla formazione di strati alternati di lenti di ghiaccio (Taber, 1929)33
Figura 3.1: Interazioni termo-idro-meccaniche in terreni congelati (Thomas, 2009)
Figura 3.2: Rappresentazione schematica di un materiale poroso parzialmente saturo (DIT-UPC, 2022)
Figura 3.3: Schematizzazione delle fasi presenti nei terreni congelati (Nishimura et al., 2009)
Figura 3.4: Relazione tra il grado di saturazione e la temperatura secondo il modello di Tice (1976) (modificato da Thomas(2009))48
Figura 3.5: Curve di ritenzione secondo il modello di Van Genuchten (1980): (a) influenza del parametro P ; (b) influenza del parametro m
Figura 3.6: Vista tridimensionale della superficie di snervamento del modello costitutivo per i terreni congelati (modificato da Ghoreishian et al., (2016))57
Figura 3.7: Curve di snervamento LC e GS: (a) Compressione plastica causata dalla variazione di pressione netta; (b) espansione plastica causata dalla segregazione del ghiaccio (Ghoreishian et al., 2016)
Figura 4.1: Variazione della struttura di una miscela sabbia-argilla (Vallejo et al., 2000)

Figura 4.2: Schematizzazione della configurazione delle particelle di sabbia e argilla in una miscela sabbia-argilla, in funzione dell'indice dei vuoti e contenuto di (Yin et al., 2021)
Figura 4.3: Relazione tra sforzo deviatorico e pressione interstiziale con la deformazione assiale delle miscele per una pressione di confinamento di 200 MPa (Reiffsteck et al., 2005)
Figura 4.4: Conducibilità termica in funzione del contenuto di argilla: (a) condizioni asciutte; (b) ρd = 1.55g/cm³; (c) ρd = 1.60g/cm³; (d) ρd = 1.65g/cm³ (Yu et al., 2016)
Figura 4.5 Relazione tra conducibilità termica e temperatura al variare della percentuale di caolino in miscele sabbia-caolino (Vu, 2022)
Figura 4.6: Conducibilità idraulica di miscele sabbia-caolino al variare della percentuale di particelle fini (Vu, 2022)
Figura 4.7: Conducibilità idraulica insatura di miscele sabbia-caolino compattate a vari contenuti di materiale fine (Chiu et al., 1998)
Figura 4.8: Curva di ritenzione del ghiaccio (grado di saturazione liquido vs. temperatura) delle diverse miscele sabbia-argilla (Vu et al., 2022)
Figura 5.1: Schema della cella triassiale in controllo di temperatura FROZEN (Bartoli et al., 2018)
Figura 5.2: Rappresentazione schematica della posizione delle termocoppie (1/2) (modificato da Bartoli (2019))
Figura 5.3: Rappresentazione schematica della posizione delle termocoppie (2/2) (modificato da Bartoli (2019))
<i>Figura 5.4:</i> Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T16, T17, T19 e T20 per la prova S100K0Eff200 75
Figura 5.5: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T9, T12 e T15 posizionate alla base del provino per la prova S100K0Eff200
Figura 5.6: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T3, T11 e T14 posizionate in testa al provino per la prova S100K0Eff200
Figura 5.7: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento misurata dalle termocoppie T5, T14 e T11 posizionate lungo l'altezza del provino per la prova S100K0Eff200
Figura 6.1: Geometria del problema, (a) geometria reale; (b) modello numerico 2D: mesh e condizioni iniziali di temperatura $T0$, pressione liquida pl e porosità $n0$

Figura 6.2: Condizioni al contorno termiche (a) ed idrauliche (b) utilizzate nella simulazione
Figura 6.3: Curva di ritenzione del ghiaccio (grado di saturazione liquido vs. temperatura) delle diverse miscele sabbia-argilla. La lettera S si riferisce alla matrice sabbiosa; il numero che segue riporta la percentuale di caolino nella miscela (Vu et al., 2022)
Figura 6.4: Curve di ritenzione del ghiaccio adottate nelle analisi numeriche per la sabbia pura (S100K0) e sabbia con caolino (S85K15): confronto tra curva sperimentale e analitica
<i>Figura 6.5:</i> Conducibilità idraulica satura di miscele sabbia-caolino a temperatura ambiente, al variare della percentuale di particelle fini (Vu, 2022)85
Figura 6.6: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M01: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)
Figura 6.7: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M02: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)
Figura 6.8: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M03: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)
Figura 6.9: Condizioni al contorno di temperatura – Schema M04: (a) discretizzazione dei bordi laterali del modello; (b) profilo di temperatura per il bordo interno (andamento in blu); (c) profilo di temperatura per il bordo esterno (andamento in rosso)
Figura 6.10: Andamento temporale delle condizioni al contorno applicate ai segmenti dei bordi esterno del modello per la prova S100K0Eff20093
Figura 6.11: Coordinate dei punti del modello corrispondenti alla posizione delle termocoppie
Figura 6.12: Evoluzione temporale della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie T9, T12 e T15: risultati numerici (Num) e sperimentali (Lab)
Figura 6.13: Evoluzione temporale della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie T1 e T8: risultati numerici (Num) e sperimentali (Lab)

Figura A. 1: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M01: risultati sperimentali e numerici . 137

Indice delle figure 133

Figura A. 2: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M01: risultati sperimentali e numerici . 138

- *Figura A. 3:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M02: risultati sperimentali e numerici . 139
- *Figura A. 4:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M02: risultati sperimentali e numerici . 140
- *Figura A. 5:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M03: risultati sperimentali e numerici . 141
- *Figura A. 6:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M03: risultati sperimentali e numerici . 142
- *Figura A. 7:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M04: risultati sperimentali e numerici . 143
- *Figura A. 8:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M04: risultati sperimentali e numerici . 144
- *Figura A. 9:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M01: risultati sperimentali e numerici145
- *Figura A. 10:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M01: risultati sperimentali e numerici146
- *Figura A. 11:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M02: risultati sperimentali e numerici147
- *Figura A. 12:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M02: risultati sperimentali e numerici148
- *Figura A. 13:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M03: risultati sperimentali e numerici149
- *Figura A. 14:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M03: risultati sperimentali e numerici150
- *Figura A. 15:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M04: risultati sperimentali e numerici151
- *Figura A. 16:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M04: risultati sperimentali e numerici152
- *Figura A. 17:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M01: risultati sperimentali e numerici153
- *Figura A. 18:* Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M01: risultati sperimentali e numerici154
- *Figura A. 19:* Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M02: risultati sperimentali e numerici155

<i>Figura A. 20:</i> Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M02: risultati sperimentali e numerici156
<i>Figura A. 21:</i> Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M03: risultati sperimentali e numerici157
<i>Figura A. 22:</i> Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M03: risultati sperimentali e numerici158
<i>Figura A. 23:</i> Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M04: risultati sperimentali e numerici159
Figura A. 24: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M04: risultati sperimentali e numerici160
Figura A. 25: Studio parametrico: confronto risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num) al variare della conducibilità termica della fase solida – Prova S100K0Eff50-M03161
Figura A. 26: Studio parametrico: confronto risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num) al variare della conducibilità termica della fase solida – Prova S100K0Eff800-M03
Figura A. 27: Variabilità della temperatura in funzione di una variazione di ±5mm nel posizionamento delle termocoppie – Prova S100K0Eff50-M03163
Figura A. 28: Variabilità della temperatura in funzione di una variazione di ±5mm nel posizionamento delle termocoppie – Prova S100K0Eff800-M03164

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Principali dillerenze tra i due metodi di congetamento (Rocca, 2011)
Tabella 3.1: Leggi costitutive e restrizioni all'equilibrio (Olivella et al., 1996)41
Tabella 5.1:Confronto tra le fasi della prova triassiale standard con quelle dellaprova effettuata con la cella triassiale in controllo di temperatura, FROZEN (LaPorta et al., 2022)72
Tabella 5.2: Prove in FROZEN considerate per la modellazione oggetto della presente Tesi 74
Tabella 6.1: Stages di calcolo del modello numerico 82
Tabella 6.2: Parametri delle curva di ritenzione del ghiaccio adottata 83
Tabella 6.3: Valori di permeabilità intrinseca adottati 84
Tabella 6.4: Parametri della funzione di permeabilità relativa adottata
Tabella 6.5: Parametri termici dell'acqua del ghiaccio adottati nelle analisi 86
Tabella 6.6: Riepilogo dei parametri termici e idraulici utilizzati nelle analisi numeriche
Tabella 6.7: Valori di ∆T in corrispondenza delle termocoppie nello Strato 1 (a 5 cm dalla base) 102
Tabella 6.8: Parametri di conducibilità termica delle fasi solida utilizzati nelle analisi numeriche per la miscela sabbia-caolino S85K15104
Tabella 6.9: Volumi d'acqua in uscita dal modello

ALLEGATO A:

Risultati della modellazione numerica

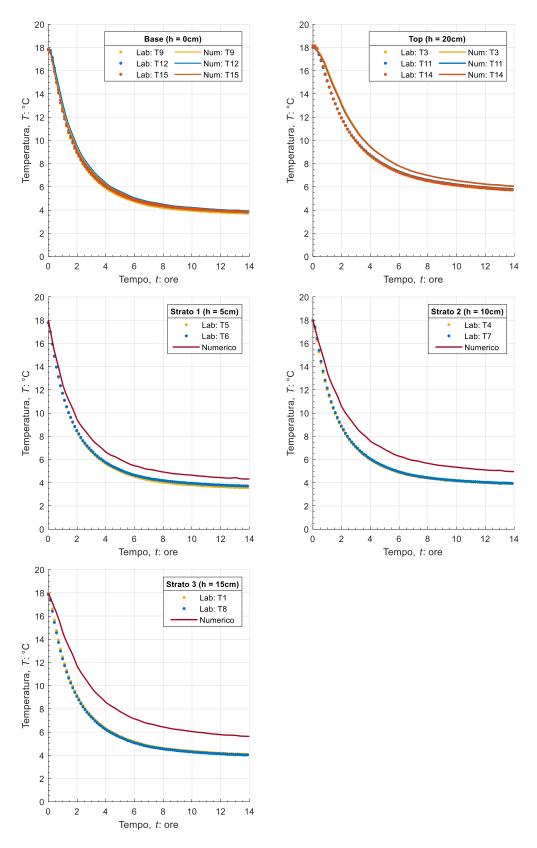


Figura A. 1: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M01: risultati sperimentali e numerici

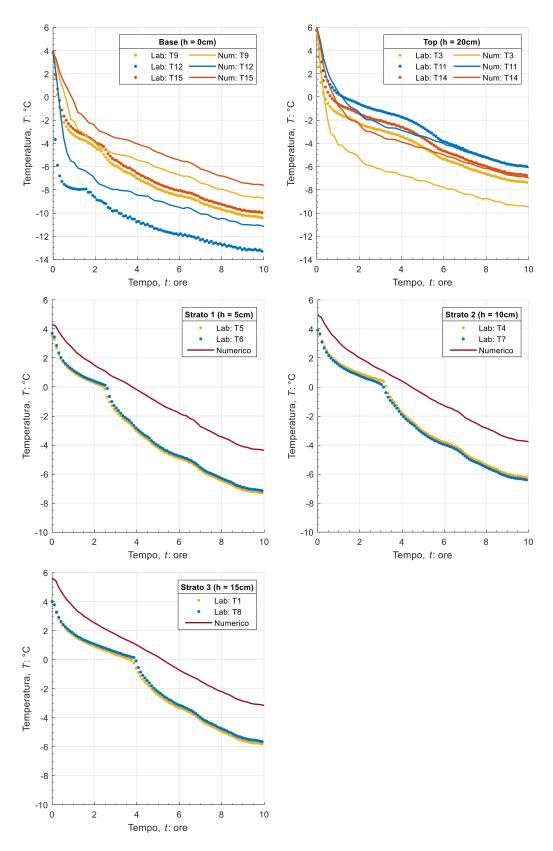


Figura A. 2: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M01: risultati sperimentali e numerici

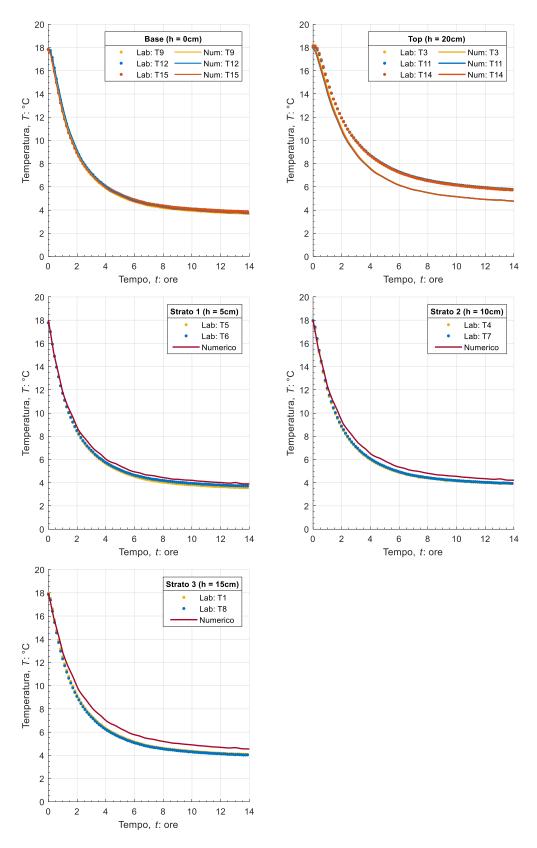


Figura A. 3: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M02: risultati sperimentali e numerici

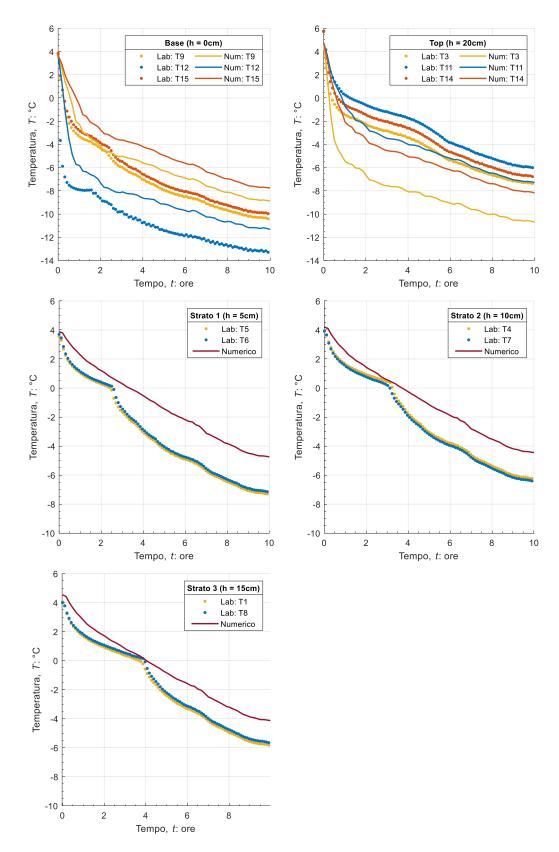


Figura A. 4: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M02: risultati sperimentali e numerici

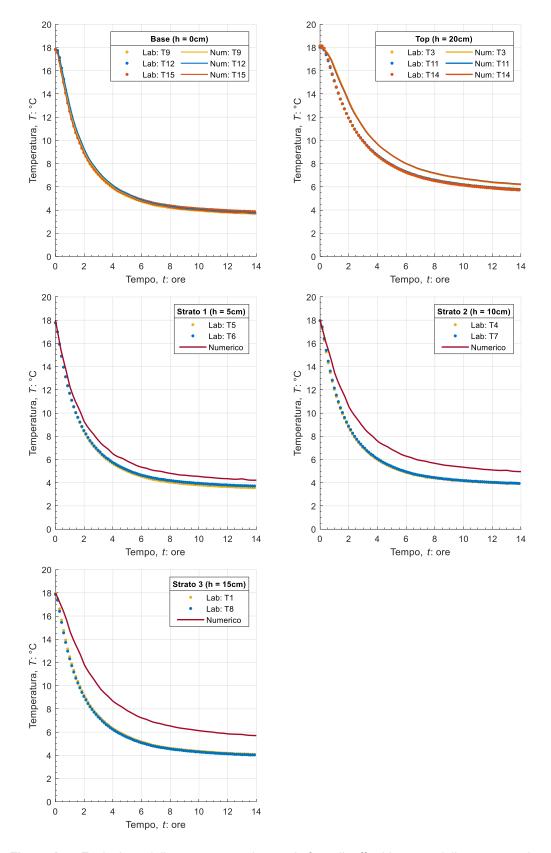


Figura A. 5: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M03: risultati sperimentali e numerici

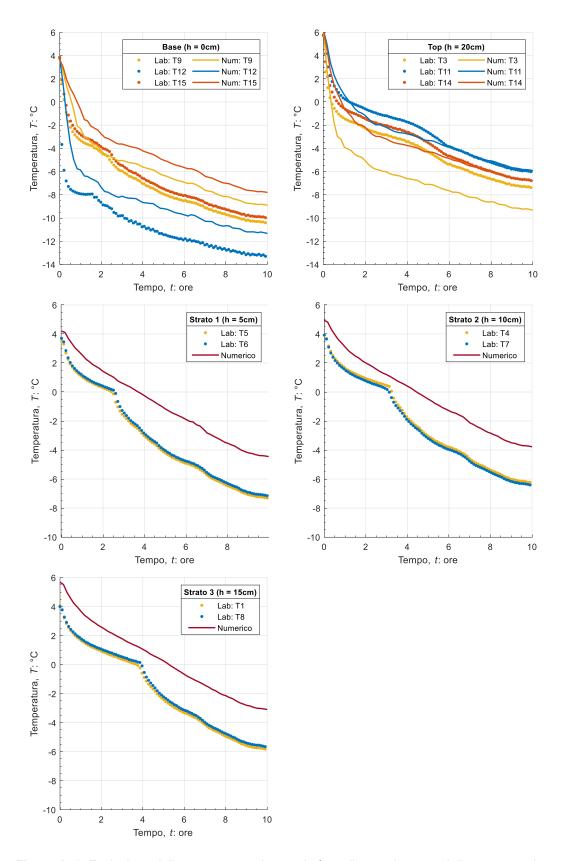


Figura A. 6: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M03: risultati sperimentali e numerici

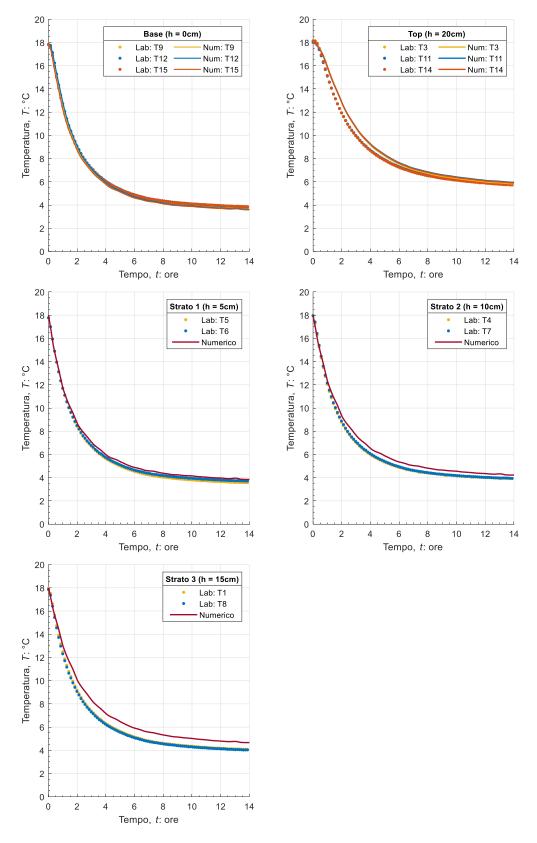


Figura A. 7: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M04: risultati sperimentali e numerici

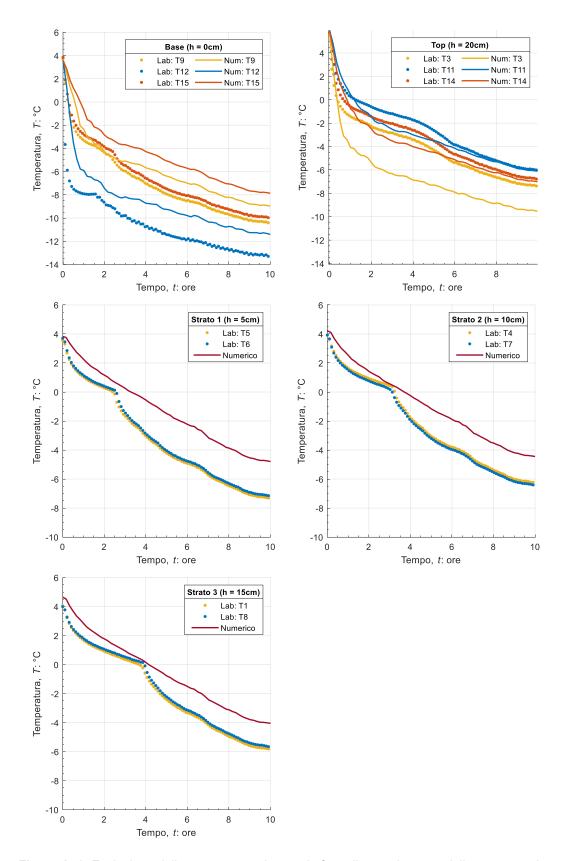


Figura A. 8: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff50-M04: risultati sperimentali e numerici

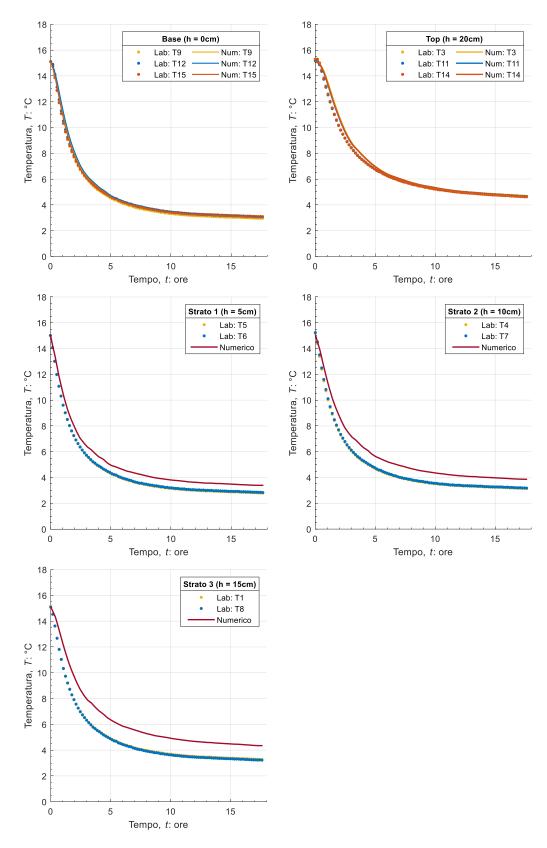


Figura A. 9: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M01: risultati sperimentali e numerici

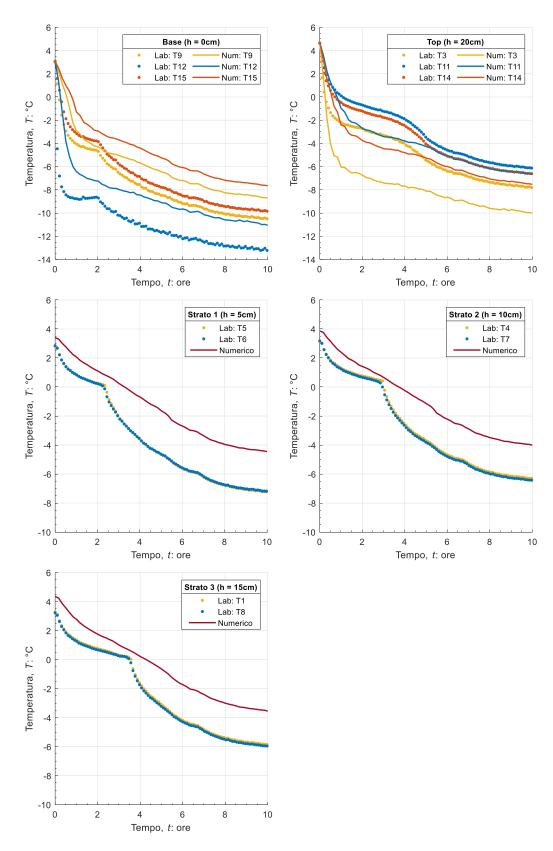


Figura A. 10: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M01: risultati sperimentali e numerici

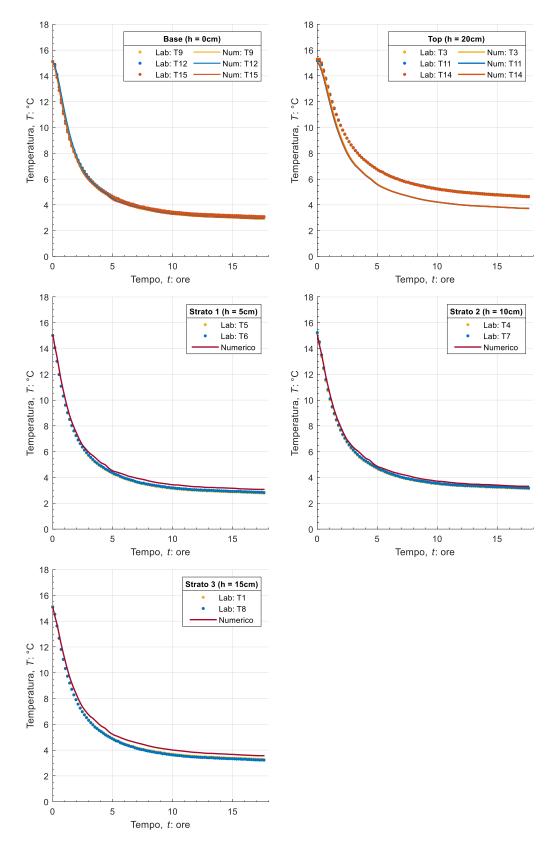


Figura A. 11: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M02: risultati sperimentali e numerici

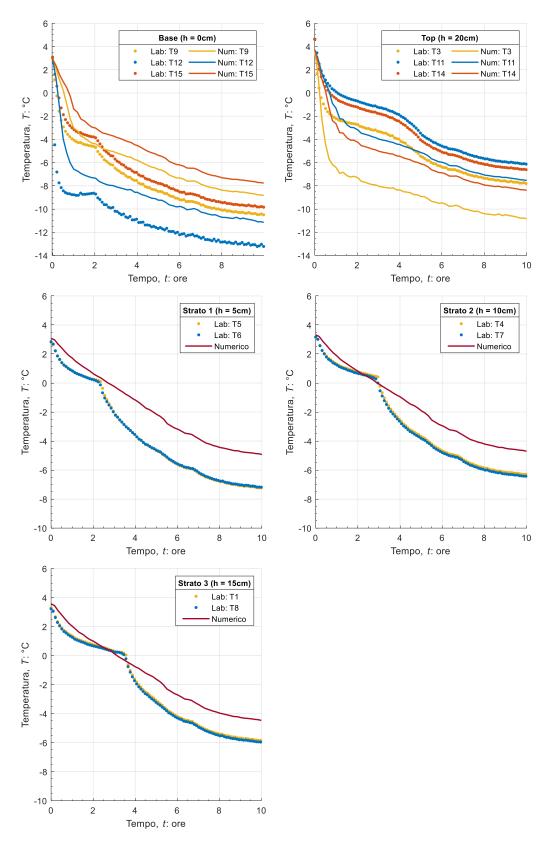


Figura A. 12: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M02: risultati sperimentali e numerici

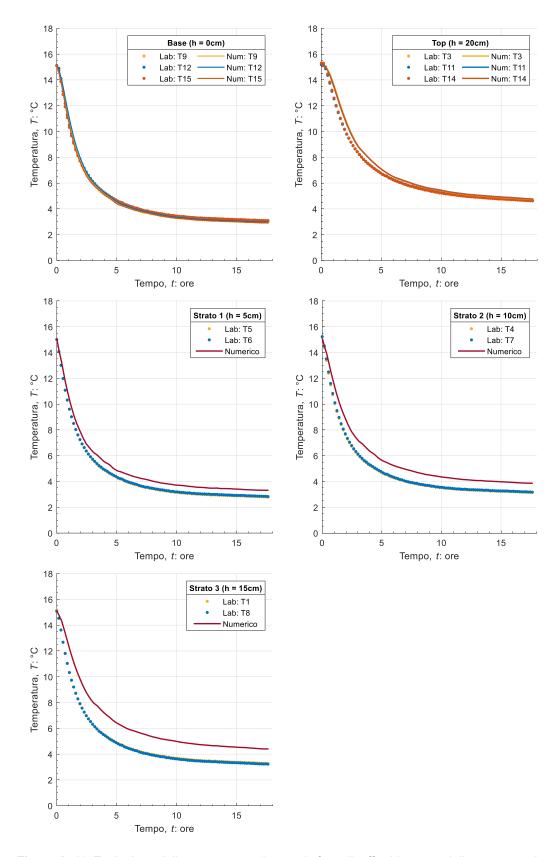


Figura A. 13: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M03: risultati sperimentali e numerici

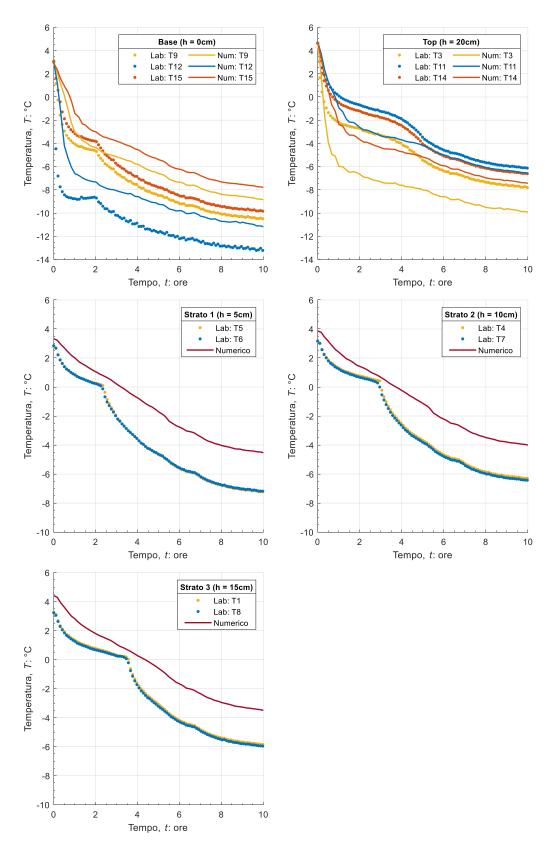


Figura A. 14: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M03: risultati sperimentali e numerici

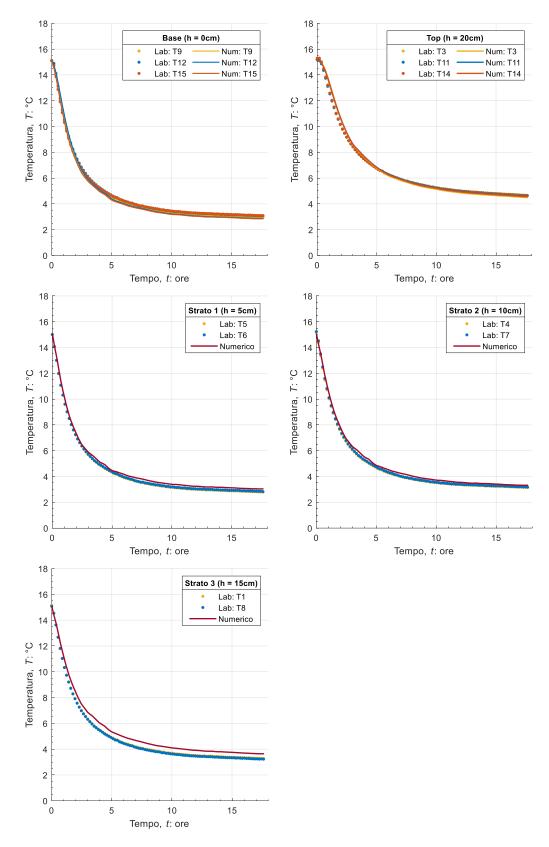


Figura A. 15: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M04: risultati sperimentali e numerici

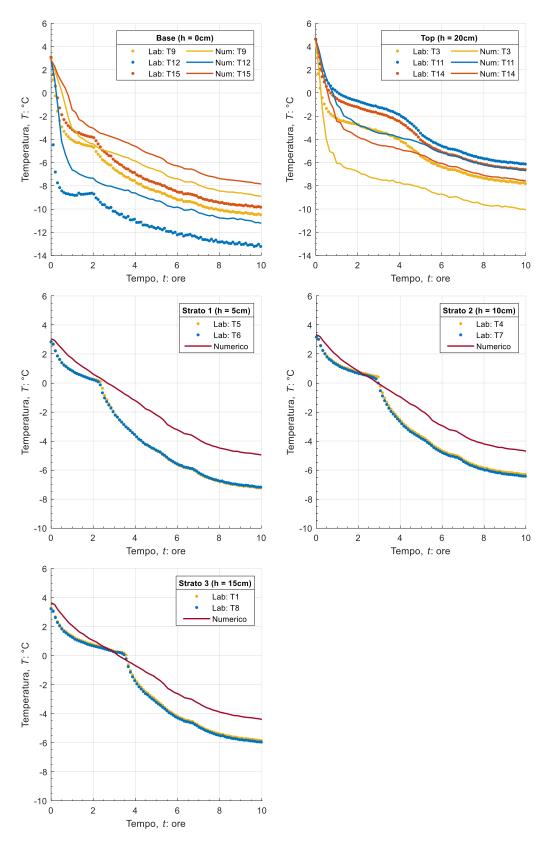


Figura A. 16: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S100K0Eff200-M04: risultati sperimentali e numerici

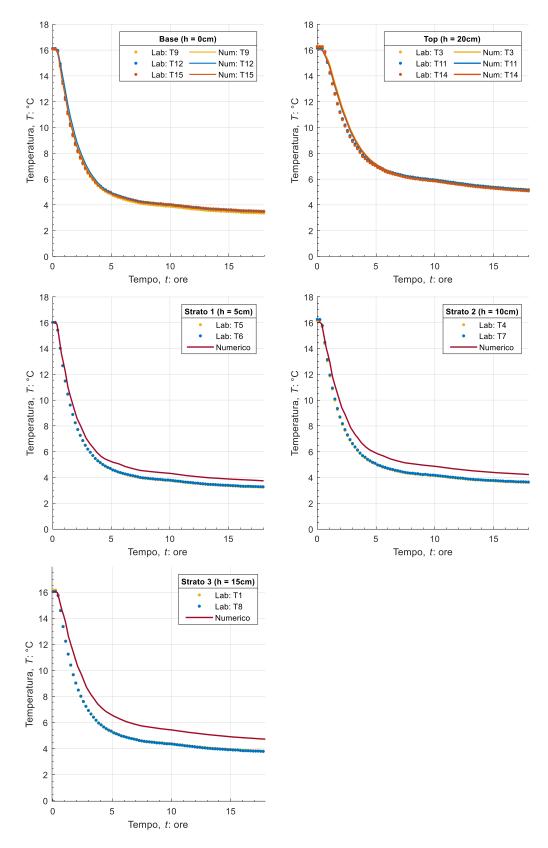


Figura A. 17: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M01: risultati sperimentali e numerici

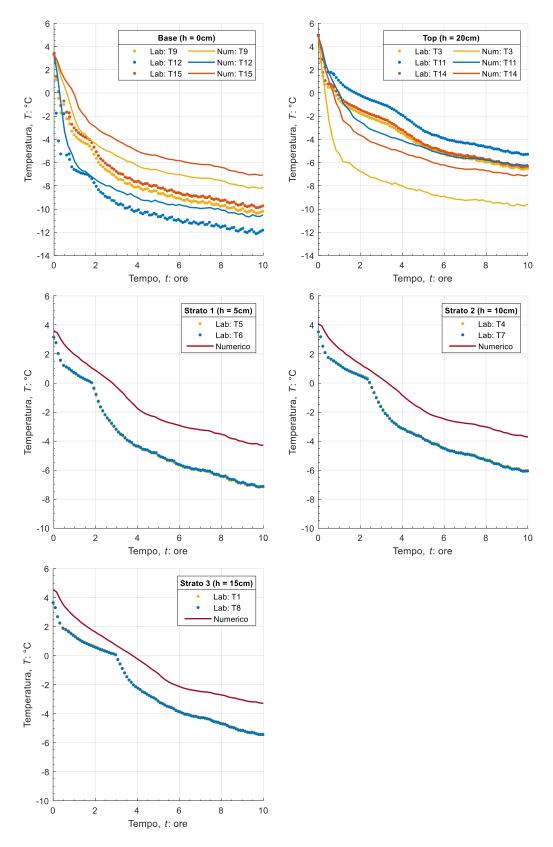


Figura A. 18: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M01: risultati sperimentali e numerici

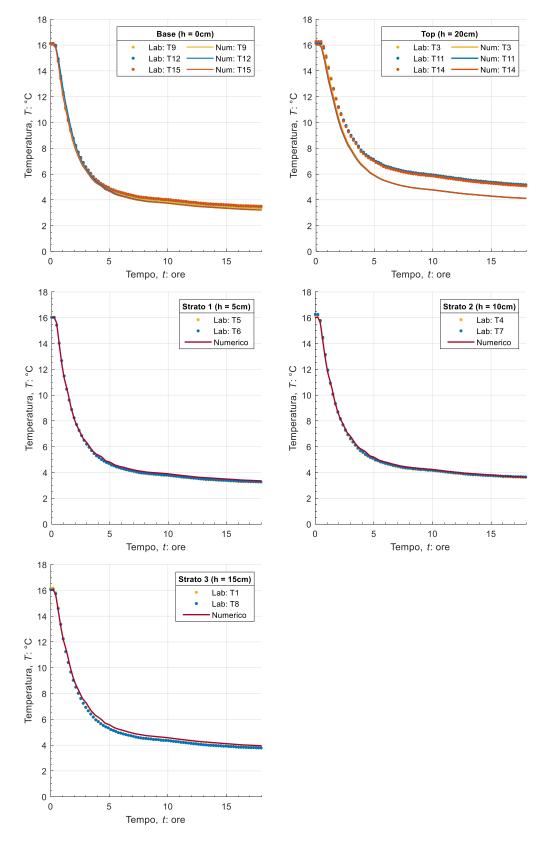


Figura A. 19: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M02: risultati sperimentali e numerici

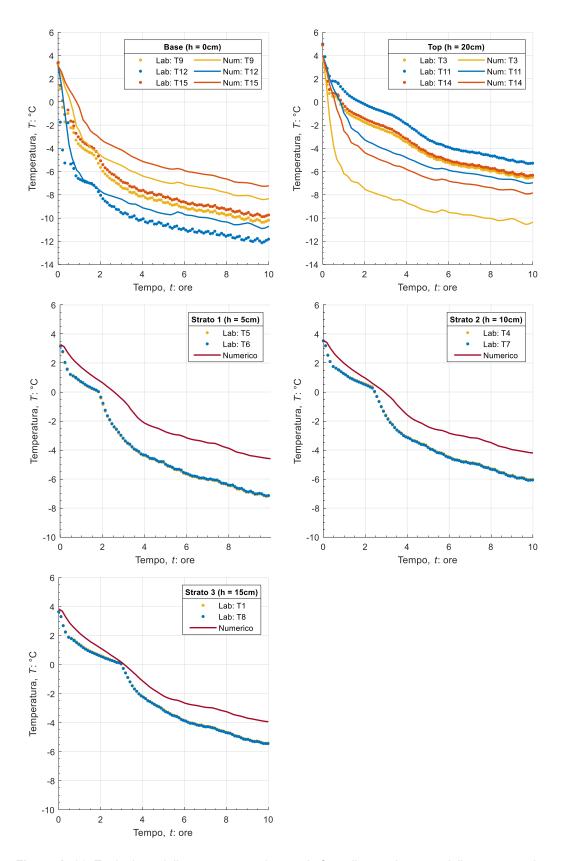


Figura A. 20: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M02: risultati sperimentali e numerici

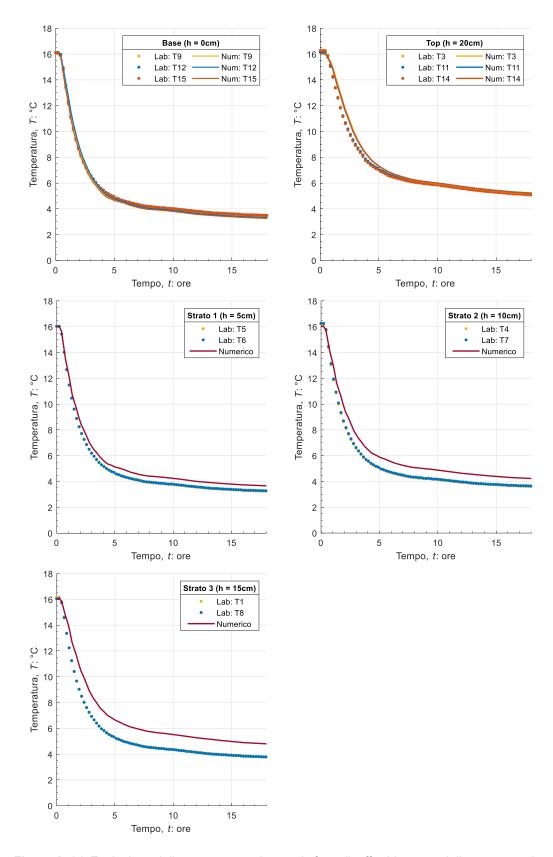


Figura A. 21: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M03: risultati sperimentali e numerici

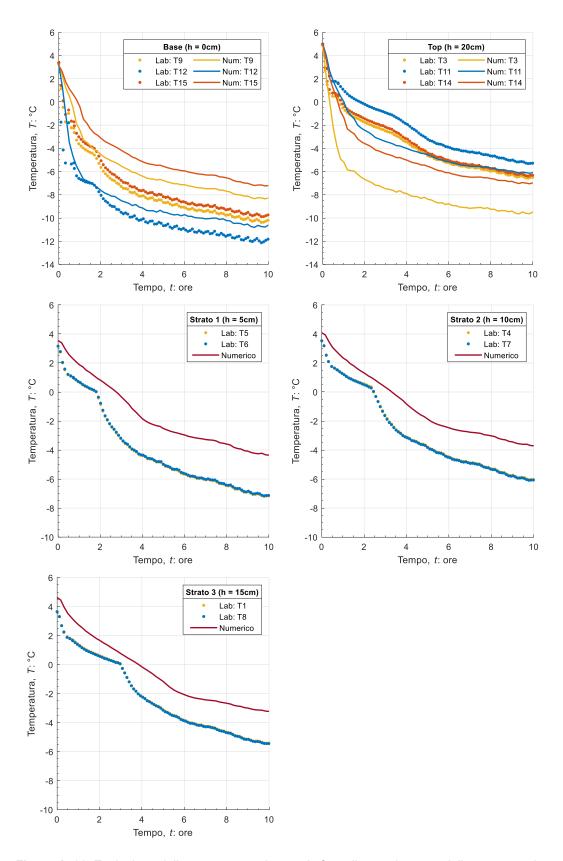


Figura A. 22: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M03: risultati sperimentali e numerici

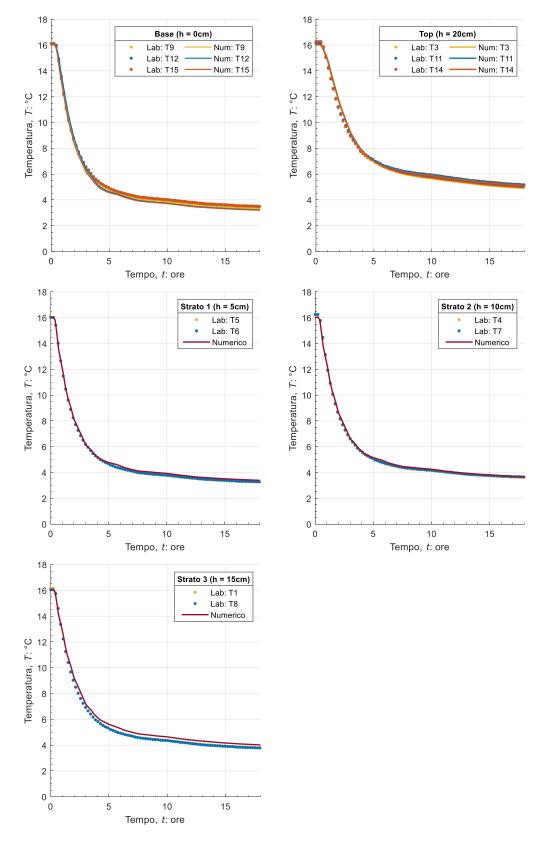


Figura A. 23: Evoluzione della temperatura durante la fase di raffreddamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M04: risultati sperimentali e numerici

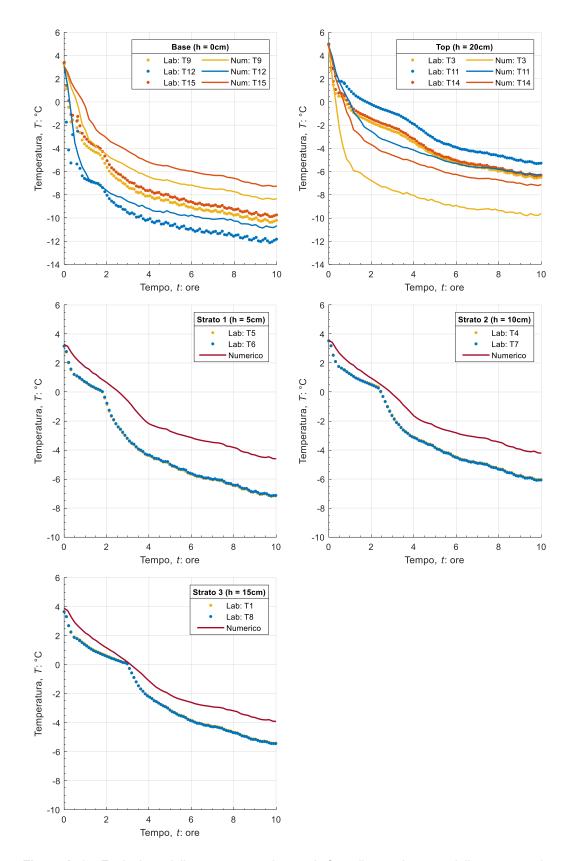


Figura A. 24: Evoluzione della temperatura durante la fase di congelamento delle termocoppie per la prova S85K15Eff800-M04: risultati sperimentali e numerici

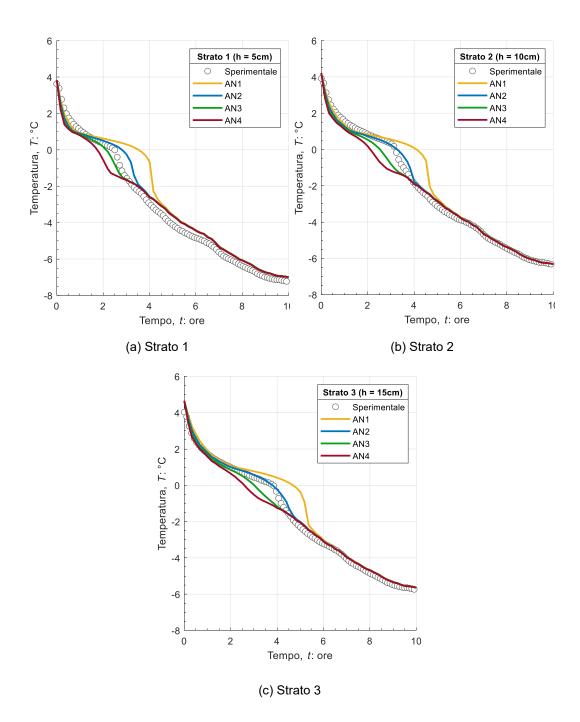


Figura A. 25: Studio parametrico: confronto risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num) al variare della conducibilità termica della fase solida – Prova S100K0Eff50-M03

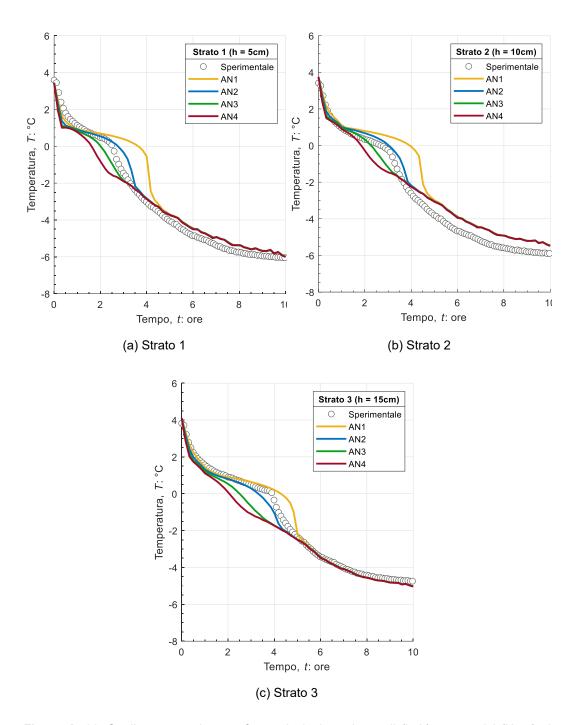


Figura A. 26: Studio parametrico: confronto risultati sperimentali (Lab) e numerici (Num) al variare della conducibilità termica della fase solida – Prova S100K0Eff800-M03

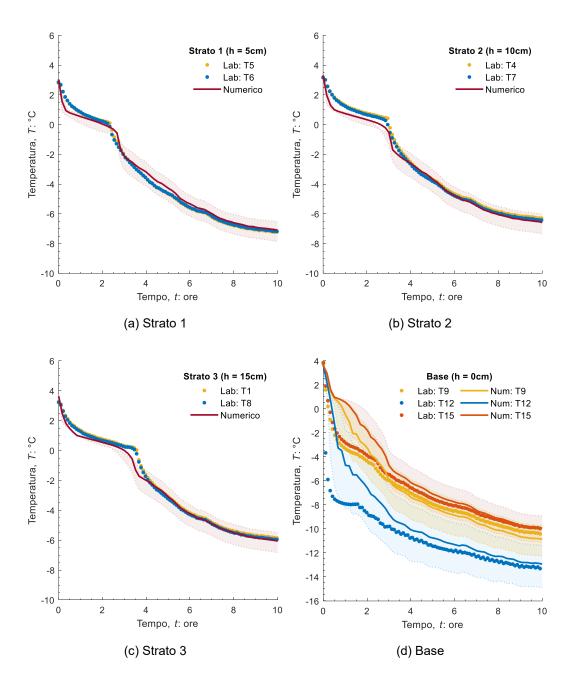


Figura A. 27: Variabilità della temperatura in funzione di una variazione di ±5mm nel posizionamento delle termocoppie – Prova S100K0Eff50-M03

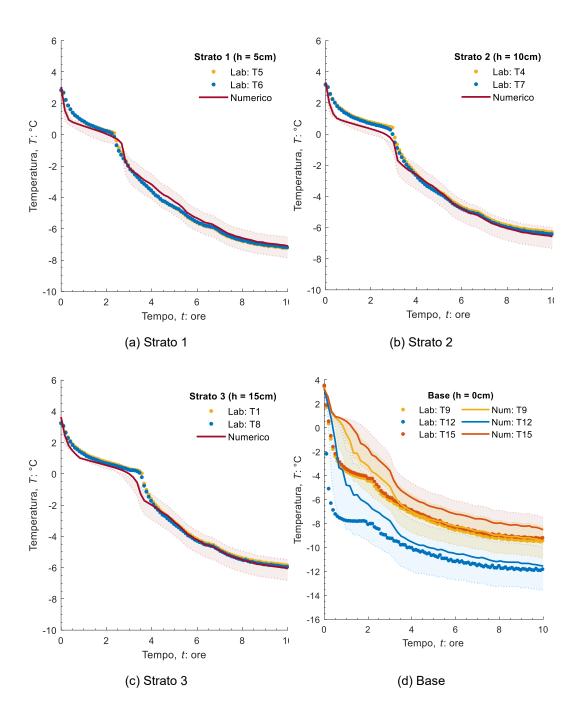


Figura A. 28: Variabilità della temperatura in funzione di una variazione di ±5mm nel posizionamento delle termocoppie – Prova S100K0Eff800-M03