

**UNIVERSITAS STUDII PADUANI - UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

FACOLTA' DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

ICEA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale.

**VARIAZIONI DEI PARAMETRI GEOTECNICI INDOTTE DA CICLI DI  
GELO E DISGELO IN UN TERRENO COESIVO D'INTERFACCIA  
CON PALI ENERGETICI.**

**Relatore:** Prof.ssa Simonetta Cola

**Correlatore:** Dott.ssa Giorgia Dalla Santa

**Laureando:** Andrea Fanton

Anno Accademico 2014/15



## INDICE

INDICE DELLE FIGURE .....	3
INDICE DELLE TABELLE .....	5
1. INTRODUZIONE .....	6
2. IL PROBLEMA ENERGETICO, LA GEOTERMIA E I PALI ENERGETICI.....	7
2.1 Il problema energetico .....	7
2.2 La Geotermia, una fonte di energia non convenzionale .....	11
2.3 Ground Source Heat Pump - GSHP.....	13
2.4 Il fluido termovettore e l'influenza sulla temperatura del terreno. ....	15
2.6 Obiettivi .....	17
2.5 Esempi di realizzazione.....	18
3. PIANIFICAZIONE E FINALITA' DELLE PROVE.....	19
4. CARATTERIZZAZIONE.....	21
5. STRUMENTAZIONE .....	25
5.1 Cella Edometrica.....	25
5.2 Macchina di Taglio Diretto .....	26
5.3 Cella Triassiale .....	27
5.4 Cella termostata .....	28
6. PREPARAZIONE DEI PROVINI.....	30
6.1 Preparazione del Terreno.....	30
6.2 Preparazione dei Provini per Prova Edometrica .....	30
6.3 Preparazione dei Provini per Prova di Taglio Diretto .....	30
6.4 Preparazione dei Provini per Prove Triassiali Consolidate Non Drenate, Tx-CU.....	30
7. LE PROVE .....	33
7.1 Cicli di Gelo-Disgelo .....	33
7.2 La Prova Edometrica.....	34
7.3 La Prova di Taglio.....	35
7.4 La Prova Triassiale .....	38
8. DISCUSSIONE DEI RISULTATI .....	41
8.1 Acqua Interstiziale e Acqua Adsorbita .....	41
8.2 Cicli di Gelo-Disgelo .....	42
8.2.1 Analisi dei cicli di gelo-disgelo su provino con $\sigma_v=40$ KPa.....	43
8.2.2 Analisi dei cicli di gelo-disgelo su provino con $\sigma_v=200$ KPa.....	48

8.2.3 Confronto tra gli Effetti di Cicli di Gelo-disgelo nei due Provini .....	50
8.3 Prova Edometrica .....	53
8.3.1 Indici di compressione, ricomprensione e rigonfiamento e OCR.....	53
8.3.2 Modulo Edometrico $E_d$ .....	60
8.3.3 Permeabilità.....	63
8.4 Prova di Taglio Diretto .....	67
8.5 Prova Triassiale Consolidata non Drenata Tx-CU .....	72
8.5.1 Tx-CU su terreno non soggetto a cicli di gelo-disgelo. ....	72
8.5.2 Tx-CU su terreno soggetto a cicli di gelo-disgelo.....	75
8.5.3 Confronto dei risultati della prova Tx-CU sui due terreni. ....	79
9. CONCLUSIONI .....	82
9.1 Variazioni delle proprietà e dei parametri geotecnici del terreno .....	82
9.2 Note per la progettazione di pali energetici.....	83
9. BIBLIOGRAFIA .....	86
10. SITOGRAFIA.....	87

## INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1: Consumo mondiale di Energia attuale e stima della crescita della domanda suddivisa per macroregioni.</i>	7
<i>Figura 2: Suddivisione percentuale delle fonti di produzione dell'Energia attuale e stima di quella futura.</i>	8
<i>Figura 3: Impieghi finali di Energia per settore – Anno 2011.</i>	9
<i>Figura 4: Consumi percentuali finali di Energia anno 2011.</i>	10
<i>Figura 5: Profili di temperatura del terreno in funzione della profondità in località con T media annua pari a 10 °C.</i>	11
<i>Figura 6: Ripartizione delle capacità installata nei tre sotto settori della geotermia in Europa nel 2012.</i>	13
<i>Figura 7: Dock Midfield dell'aeroporto di Zurigo.</i>	18
<i>Figura 8: Scuola elementare di Fully, nel Vallese (Svizzera).</i>	18
<i>Figura 9: Ortofoto della zona di Tessaera in scala 1:100 000.</i>	21
<i>Figura 10: Stratigrafia del carotaggio.</i>	23
<i>Figura 11: Cassetta catalogatrice da 15-20 m.</i>	24
<i>Figura 12: Classificazione del terreno SJ1 e SJ1A.</i>	24
<i>Figura 13: Struttura di carico, cella edometrica e consolidometro.</i>	25
<i>Figura 14: Macchina di taglio e cella di taglio.</i>	26
<i>Figura 15: Cella triassiale e una delle fasi della preparazione della prova.</i>	27
<i>Figura 16: Cella termostata.</i>	29
<i>Figura 17: Consolidometro in fase di consolidazione, a sinistra, e di scongelamento, a destra.</i>	31
<i>Figura 18: Taglio del terreno dopo la consolidazione nel consolidometro e preparazione del provino per prova triassiale.</i>	32
<i>Figura 19: Schema di montaggio (a) e di inserimento del provino (b) nella scatola di taglio.</i>	35
<i>Figura 20: Curva consolidazione a 40 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.</i>	36
<i>Figura 21: Curva consolidazione a 80 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.</i>	36
<i>Figura 22: Curva consolidazione a 160 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.</i>	37
<i>Figura 23: Curva consolidazione a 40 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.</i>	39
<i>Figura 24: Curva consolidazione a 80 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.</i>	39
<i>Figura 25: Curva consolidazione a 320 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.</i>	40
<i>Figura 26: Schematizzazione acqua interstiziale e acqua libera.</i>	41
<i>Figura 27: tempo-altezza, tempo-temperatura primo ciclo gelo-disgelo per <math>\sigma'_{vp}=40</math> kPa.</i>	42
<i>Figura 28: deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per <math>\sigma'_{vp} = 40</math> kPa.</i>	44
<i>Figura 29: Cicli di gelo-disgelo a 40 kPa per prova edometrica.</i>	45
<i>Figura 30: Cicli di gelo-disgelo a 80 kPa per prova edometrica.</i>	45
<i>Figura 31: deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per <math>\sigma'_{vp}=200</math> kPa.</i>	48
<i>Figura 32: confronto percentuali di deformazione per ciclo.</i>	50
<i>Figura 33: Altezza provini dopo ogni ciclo.</i>	51
<i>Figura 34: Percentuale di variazione dell'altezza dei provini per consolidazione da carico e termica.</i>	51
<i>Figura 35: Curve edometriche dei tre provini.</i>	53
<i>Figura 36: Curva edometrica del provino ghiacciato a 40 kPa.</i>	56
<i>Figura 37: Curva edometrica del provino ghiacciato a 200 kPa.</i>	58
<i>Figura 38: OCR dei due provini soggetti a cicli di gelo-disgelo.</i>	59

<i>Figura 39: Modulo edometrico dei tre provini</i> .....	60
<i>Figura 40: Ed per ogni step di carico nel grafico di Janbu</i> .....	61
<i>Figura 41: Differenza percentuale di Ed tra i tre provini</i> .....	62
<i>Figura 42: Grafico carico assiale-permeabilità dei tre provini</i> .....	64
<i>Figura 43: Grafico indice dei vuoti-permeabilità dei tre provini</i> .....	64
<i>Figura 44: Grafico indice dei vuoti-permeabilità in scala logaritmica dei tre provini</i> .....	65
<i>Figura 45: Grafico deformazione-taglio con <math>\sigma'_{vp}=40</math> kPa</i> .....	67
<i>Figura 46: Grafico deformazione-taglio con <math>\sigma'_{vp}=80</math> kPa</i> .....	68
<i>Figura 47: Grafico deformazione-taglio con <math>\sigma'_{vp}=160</math> kPa</i> .....	68
<i>Figura 48: valori <math>\sigma' - \tau_{max}</math> delle prove di taglio diretto</i> .....	69
<i>Figura 49: Cicli di gelo-disgelo a 40 kPa per prova di taglio</i> .....	71
<i>Figura 50: Cicli di gelo-disgelo a 80 kPa per prova di taglio</i> .....	71
<i>Figura 51: Grafico deformazione assiale-tensione deviatorica dei tre provini "unfrozen".</i> .....	72
<i>Figura 52: Grafico deformazione assiale-pressione neutra dei tre provini "unfrozen".</i> .....	73
<i>Figura 53: Grafico tensione media efficace-tensione deviatorica dei tre provini "unfrozen".</i> .....	73
<i>Figura 54: Cerchi di Mohr e retta di Stato Critico di Mohr-Coulomb per terreno "unfrozen".</i> .....	75
<i>Figura 55: Grafico deformazione assiale-tensione deviatorica dei tre provini "frozen".</i> .....	75
<i>Figura 56: Grafico deformazione assiale-pressione neutra dei tre provini "frozen".</i> .....	76
<i>Figura 57: Grafico tensione media efficace-tensione deviatorica dei tre provini "frozen".</i> .....	76
<i>Figura 58: Cerchi di Mohr e retta di Stato Critico di Mohr-Coulomb per terreno "frozen".</i> .....	78
<i>Figura 59: Confronto rette di Mohr-Coulomb tra i due provini</i> .....	79
<i>Figura 60: Tensione deviatorica dei provini</i> .....	80
<i>Figura 61: Differenze percentuali tra la variazione di pressione deviatorica tra i tre provini.</i> .....	81
<i>Figura 62: Differenze percentuali di pressione deviatorica tra provino non ghiacciato e provino ghiacciato.</i> .....	81

## INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1: Consumi finali di energia 2011, % sui consumi totali.</i>	9
<i>Tabella 2: <math>\Delta s</math> a rottura per prove di taglio</i>	36
<i>Tabella 3: <math>t_{100}</math></i>	37
<i>Tabella 4: <math>v</math> di taglio diretto</i>	37
<i>Tabella 5: <math>t_{100}</math> e <math>v</math> di rottura.</i>	40
<i>Tabella 6: cedimenti e deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per <math>\sigma'_{vp}=40</math> kPa</i>	44
<i>Tabella 7: tempi e velocità di swelling dovuto a gelo</i>	46
<i>Tabella 8: cedimenti e deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per <math>\sigma'_{vp}=200</math> kPa</i>	48
<i>Tabella 9: Tempi e velocità di swelling</i>	49
<i>Tabella 10: percentuali di deformazione per ciclo.</i>	50
<i>Tabella 11: Percentuale di variazione dell'altezza per consolidazione da carico e termica (calcolata rispetto all'altezza iniziale del provino)</i>	52
<i>Tabella 12: Indice dei vuoti e carico assiale dei tre provini</i>	54
<i>Tabella 13: Indice di rigonfiamento per provino soggetto a gelo-disgelo con carico assiale di 40 kPa</i>	55
<i>Tabella 14: Indice di rigonfiamento per provino soggetto a gelo-disgelo con carico assiale di 200 kPa</i>	57
<i>Tabella 15: <math>C_r</math>, <math>C_c</math>, <math>C_s</math> dei tre provini e differenze percentuali</i>	58
<i>Tabella 16: Modulo edometrico dei tre provini</i>	60
<i>Tabella 17: Differenza percentuale di <math>E_d</math> tra i provini</i>	61
<i>Tabella 18: <math>e</math>, <math>k</math> del provino "unfrozen" e di quello "frozen" con <math>\sigma'_{vp}=40</math> kPa</i>	65
<i>Tabella 19: <math>e</math>, <math>k</math> del provino "frozen" con <math>\sigma'_{vp}=200</math> kPa</i>	65
<i>Tabella 20: <math>e</math>, <math>k</math> e differenze percentuali del provino "frozen" a <math>\sigma'_{vp}=40</math> kPa e di quello "unfrozen".</i>	66
<i>Tabella 21: <math>k</math> e differenze percentuali dei tre provini.</i>	66
<i>Tabella 22: valori e differenze percentuali valori di taglio</i>	69
<i>Tabella 23: <math>\sigma'_1</math> e <math>\sigma'_3</math> dei tre provini non soggetti a gelo-disgelo</i>	73
<i>Tabella 24: Coordinate cerchi di Mohr per provini non ghiacciati</i>	74
<i>Tabella 25: valori medi pesati di <math>\phi'</math> e <math>c'</math>.</i>	74
<i>Tabella 26: <math>\sigma'_1</math> e <math>\sigma'_3</math> dei tre provini "frozen".</i>	77
<i>Tabella 27: Coordinate cerchi di Mohr per provini "frozen".</i>	77
<i>Tabella 28: valori medi pesati di <math>\phi'</math> e <math>c'</math>.</i>	77
<i>Tabella 29: Valori e differenze <math>c'</math> e <math>\phi'</math> terreno non ghiacciato e terreno ghiacciato</i>	79

## 1. INTRODUZIONE

Cambiamenti climatici, inquinamento ambientale, aumento dei consumi, crescita demografica e il problema energetico sono i principali motivi che portano alla necessità di modificare il modello di sviluppo economico nato e sviluppatosi in seguito alla rivoluzione industriale e a tutt'oggi dominante. I grandi avanzamenti nel campo delle conoscenze energetiche, la fortissima evoluzione tecnologica, la nascita di nuove tecnologie e materiali, la continua ricerca in settori sempre più specifici dell'energia determinano un grandissimo potenziale di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di inquinanti in tutti i settori di consumo. Analizzando il consumo di energia in Italia si nota come l'energia necessaria alla produzione di calore, inteso come uso di energia ai fini di riscaldamento e raffrescamento, rappresenta circa il 45% del consumo totale di energia. A fronte di questo dato è evidente come sia di primaria importanza la pianificazione di interventi che abbiano come fine la diminuzione dei consumi di energia per la produzione di calore.

In questo ambito si inseriscono le fonti di energia rinnovabili, tra le quali l'energia geotermica. Un'importante applicazione nello sfruttamento dell'energia geotermica è rappresentata dai sistemi a bassa entalpia che sfruttano fonti di calore a temperatura inferiore ai 100 °C. Questi sistemi sono rivolti alla sola produzione di energia termica attraverso lo sfruttamento dell'elevata inerzia termica del terreno che già a basse profondità risente poco delle fluttuazione giornaliere e stagionali di temperatura esterne. Esistono dei sistemi geotermici a bassa entalpia, chiamati GSHP (Ground Source Heat Pump), che, scambiando calore con il terreno, riscaldano gli edifici in periodi freddi e li raffrescano in periodi caldi. Un problema che può sorgere nelle GSHP in fase di riscaldamento, in particolar modo in zone con climi rigidi, è la necessità di estrarre maggior calore dalla fonte geotermica attraverso l'utilizzo di fluidi termovettori con temperature inferiori a 0 °C (soluzioni di glicole che solitamente vengono immessi nel circuito a -10 °C).

Nel caso quindi, di utilizzo di glicole come fluido termovettore, il terreno attorno alla sonda gela nel periodo di utilizzo della GSHP mentre scongela nei periodi in cui la GSHP non viene utilizzata o viene utilizzata in modalità raffrescante. Il terreno attorno alla sonda è quindi soggetto a cicli di gelo-disgelo.

La presente tesi ha lo scopo di analizzare le variazioni dei parametri geotecnici di un terreno silto-argilloso in seguito a cicli di gelo-disgelo. Verranno studiate in particolare le variazioni di quei parametri necessari alla progettazione dei pali energetici. Infatti, a differenza delle altre tipologie di GSHP che hanno esclusivamente finalità energetiche, i pali energetici hanno anche, e prima di tutto, finalità strutturali. E' quindi indispensabile per una buona progettazione saper valutare la variazione dei parametri geotecnici e del comportamento di un terreno soggetto a cicli di gelo e disgelo.

## 2. IL PROBLEMA ENERGETICO, LA GEOTERMIA E I PALI ENERGETICI

### 2.1 Il problema energetico

Uno dei maggiori problemi del XXI secolo che l'umanità si trova a dover affrontare è il problema energetico e il conseguente problema dell'inquinamento ambientale. L'energia è indispensabile alla vita sulla terra e costituisce l'elemento principe per lo sviluppo sociale ed economico dell'umanità. Il modello di sviluppo industriale fin qui seguito ha condotto però ad un abuso delle risorse energetiche fossili. Fin dalla rivoluzione industriale infatti, si è creduto che l'unico modello di sviluppo possibile fosse quello legato ad un continuo incremento di produzione e di consumo di energia.

Questo modello si è rivelato insufficiente per due ragioni:

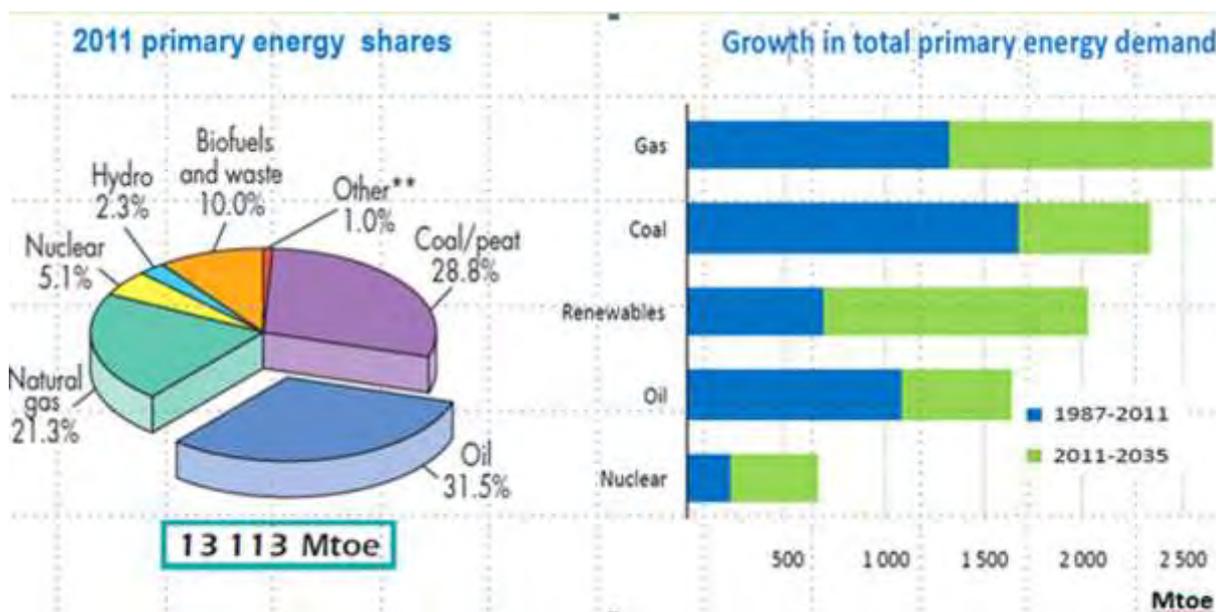
1. La limitatezza delle risorse energetiche presenti sulla terra e sinora sfruttate più intensamente;
2. Il crescente inquinamento ambientale legato alla produzione e al consumo di energia.

E' quindi necessario modificare il modello di sviluppo sinora seguito.

Il WEO2013 (World Energy Outlook 2013) presentato a Londra dall'International Energy Agency (IEA) 12 Novembre 2013 presenta il rapporto che fa il quadro su come evolverà il sistema energetico mondiale fino al 2035, come si vede in **Figura 1**. La IEA prevede consumi di energia primaria in crescita di un terzo tra il 2011 ed il 2035, aumento imputabile in gran parte ai paesi in via di sviluppo, i consumi elettrici cresceranno invece di due terzi nello stesso periodo.



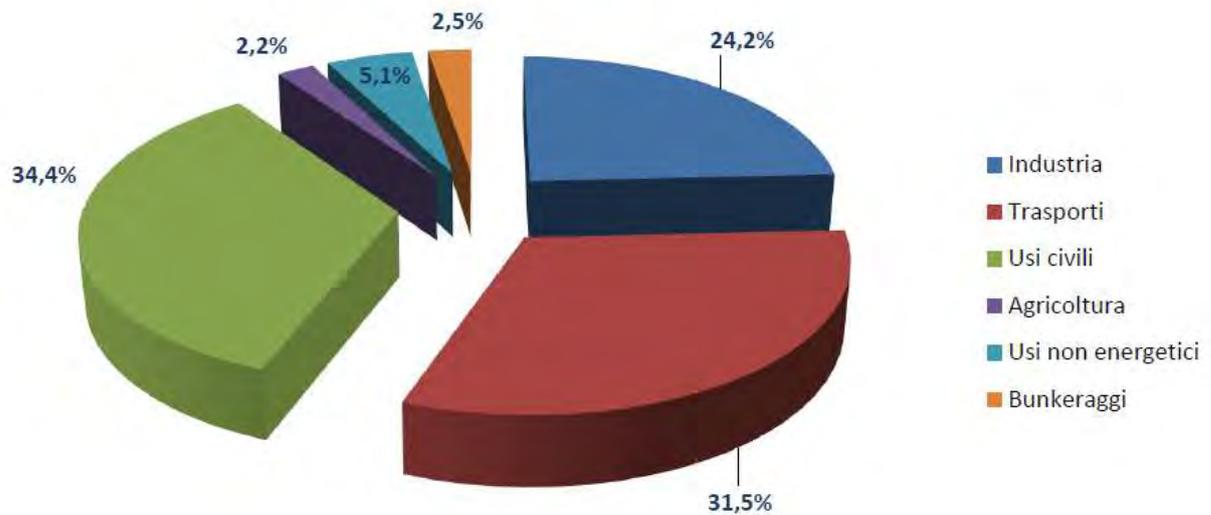
**Figura 1:** Consumo mondiale di Energia attuale e stima della crescita della domanda suddivisa per macroregioni.



**Figura 2:** Suddivisione percentuale delle fonti di produzione dell'Energia attuale e stima di quella futura.

Nel documento si sottolinea l'importanza di muoversi verso politiche di contenimento delle emissioni di gas serra. Secondo lo WEO2013 ci sarà una crescita delle rinnovabili, **Figura 2**, ma anche una crescita dell'uso dei combustibili fossili che renderà difficile il raggiungimento dell'obiettivo concordato tra le nazioni di contenere l'aumento della temperatura media del pianeta sotto i 2° C. Il WEO2013 considera probabile che si arrivi ad un aumento nel lungo periodo compreso tra i 3.6 - 5.3°C, allineandosi ai peggiori scenari del rapporto IPCC 20132. Un aumento non trascurabile se confrontato con la variazione di 6-8 gradi centigradi che separa le temperature medie dei periodi glaciali freddi da quelli interglaciali caldi. Il WEO2013 mostra l'insufficienza delle politiche adottate per risolvere il problema climatico come anche dimostrato dal rapporto IEA: "Tracking Clean Energy progress 2013", in cui si rileva che le tonnellate di CO<sub>2</sub> emesse per unità di energia prodotta (da combustibili fossili, rinnovabili e nucleare) non sono cambiate negli ultimi 20 anni. (Fonte: Agienergia)

Se si guarda alla ripartizione dell'utilizzo di energia nei vari settori in Italia si nota come l'incidenza maggiore sia dovuta a quello relativo agli usi civili. Nel 2011 il settore civile aveva una quota pari al 34,4%, seguono il settore dei trasporti con il 31,5%, l'industria con il 24,2% e agricoltura, usi non energetici e bunkeraggi, **Figura 3** *Figura 3: Impieghi finali di Energia per settore – Anno 2011.* (Fonte: RAEE – Rapporto Annuale Efficienza Energetica).

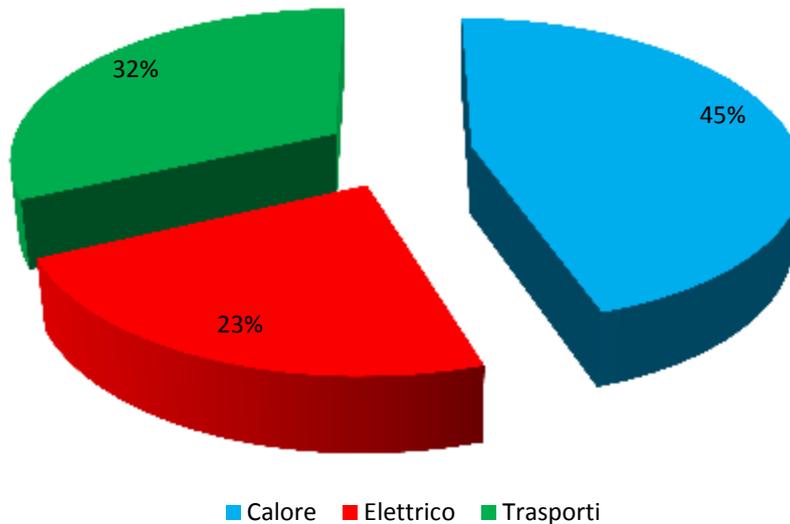


**Figura 3:** Impieghi finali di Energia per settore – Anno 2011.

Nel 2011, il consumo finale di energia in Italia è pari a 128,1 Mtep. Di questi il calore (inteso come uso finale di energia ai fini di riscaldamento e raffrescamento) rappresenta circa il 45%, seguito da quelli dei trasporti, circa 32%, e infine da quelli elettrici 23%, suddiviso nei settori residenziale, industriale, dei servizi, dei trasporti e della Pubblica Amministrazione (Fonte: RAEE 2011), come rappresentato in **Tabella 1** e **Figura 4**.

% su consumi totali	Elettrico	Calore	Trasporti	Tot
<b>Residenziale</b>	5%	18%		23%
<b>Industria</b>	9%	17%		26%
<b>Servizi</b>	5%	8%		13%
<b>Trasporti</b>			32%	32%
<b>Pa</b>	1%	1%		2%
<b>Altro</b>	3%	1%		4%
	23%	45%	32%	

**Tabella 1:** Consumi finali di energia 2011, % sui consumi totali.



**Figura 4:** Consumi percentuali finali di Energia anno 2011

Oltre i 2/3 del potenziale di risparmio energetico individuato dai PAEE (Piano di Azione per l'Efficienza Energetica) è relativo ad interventi da realizzarsi nel settore del residenziale e del terziario. In particolare il calore risulta la tipologia d'uso principale su cui agire per conseguire miglioramenti dell'efficienza energetica.

Queste considerazioni e la sensibilizzazione dell'opinione pubblica sul riscaldamento globale e i problemi di inquinamento ambientale hanno aperto ampi scenari nel settore dell'edilizia sostenibile, incoraggiando lo sviluppo di nuovi metodi rinnovabili per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici.

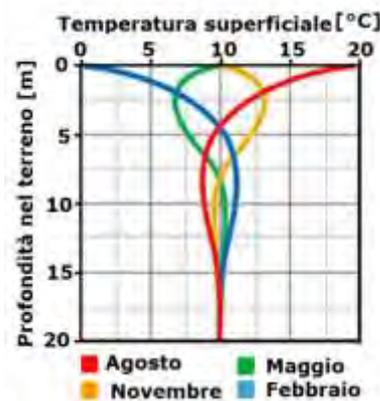
Tra questi hanno avuto forte diffusione le pompe di calore reversibili, macchine termodinamiche in grado di sottrarre calore dall'edificio per cederlo all'ambiente in periodi freddi e viceversa in periodi caldi.

## 2.2 La Geotermia, una fonte di energia non convenzionale

Il termine “*Geotermia*” deriva dal greco “*geos*”, terra e “*thermos*”, calore; quindi significa letteralmente “Calore della Terra”. Per energia geotermica si intende dunque quell’energia presente nel sottosuolo sotto forma di calore, la cui unica manifestazione è la temperatura.

Il gradiente geotermico è influenzato fino ad una profondità di 15-20 m dalle variazioni di temperatura stagionale. Subito al di sotto di tale profondità si riscontra una zona di omotermia dove la temperatura è pressoché costante durante tutto l’anno per effetto del bilanciamento termico tra il flusso di calore proveniente dalla superficie (dovuto all’energia solare e influenzato da fattori meteorologici) e quello proveniente dal nucleo, dal mantello e in alcuni casi da flussi di acqua sotterranee. In questa fascia la temperatura è circa uguale alla media delle temperature annue dell’aria del posto.

Al di sotto della zona di omotermia la temperatura aumenta con un gradiente geotermico di circa 3° C ogni 100 m (si tratta di valori medi. In effetti, in alcune zone è possibile trovare gradienti molto maggiori o minori).



**Figura 5:** Profili di temperatura del terreno in funzione della profondità in località con  $T$  media annua pari a 10 °C.

In **Figura 5** è possibile osservare i profili di temperatura stagionale in funzione della profondità. Nella maggior parte delle regioni italiane la temperatura disponibile è compresa tra i 12° e i 16°.

Esistono poi delle zone di anomalia termica, zone cioè dove il gradiente è sensibilmente diverso. Zone di anomalia termica si riscontrano ad esempio in prossimità di fratture tettoniche dove la crosta terrestre è meno spessa oppure in zone dove si hanno risalite di acque (o gas) da grande profondità o, ancora, in prossimità di zone vulcaniche. In queste zone, fluidi o gas ad elevata temperatura si trovano a modeste profondità, confinati in serbatoi di roccia o, addirittura, risalgono fino alla superficie generando fenomeni geotermali quali geysir, sorgenti termali e fumarole.

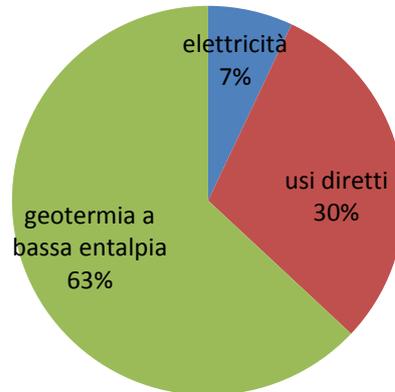
La geotermia è quindi una preziosa fonte di energia rinnovabile che è possibile utilizzare.

A seconda della temperatura della fonte di calore che viene utilizzata i *sistemi geotermici* vengono suddivisi in due principali categorie:

1. *Sistemi ad alta entalpia*: sono sistemi che sfruttano una fonte di energia geotermica con temperatura superiore ai 150 °C. Questi sistemi prevedono un alto sfruttamento del calore proveniente dagli strati profondi della crosta terrestre attraverso un serbatoio in cui il calore si propaga per convezione dei moti convettivi che possono essere ad acqua dominante (con contenuto energetico inferiore) o a vapore dominante (con contenuto energetico maggiore). Il vantaggio dei sistemi ad alta entalpia è quello di avere un altissimo potenziale energetico, per questo sono utilizzati nella produzione di energia, un esempio ne è la centrale di Larderello in Toscana.
2. *Sistemi a bassa entalpia*: sono sistemi che sfruttano una fonte di energia geotermica con temperatura inferiore a 100 °C. Questi sistemi sono rivolti alla sola produzione di energia termica sfruttando l'elevata inerzia termica del terreno che, come già detto, già a basse profondità risente poco delle fluttuazione giornaliere e stagionali di temperatura esterne. Inoltre, anche a minor profondità della zona di omotermia il minimo e il massimo della temperatura del terreno hanno una traslazione temporale rispetto a quelle dell'aria; ciò determina che la temperatura più sfavorevole vi sarà non in corrispondenza del picco di richiesta, ma in un periodo dell'anno in cui il fabbisogno termico è meno rilevante. Inoltre ci sono anche altri vantaggi di carattere pratico nello sfruttamento del terreno piuttosto che dell'aria: minor impatto estetico e minore rumorosità. L'energia termica prodotta dai sistemi a bassa entalpia è principalmente utilizzata per la climatizzazione degli edifici o per lavorazioni industriali che utilizzino temperature medie ( $\cong 50$  °C). Il sistemi a bassa entalpia hanno tre principali vantaggi:
  - I. Sono ubiquitari, ovvero possono essere sfruttati ovunque;
  - II. Sfruttano una risorsa rinnovabile e, se ben progettati, non hanno alcun impatto sull'ambiente;
  - III. Sono economicamente ed energeticamente convenienti;

Attualmente in Europa la geotermia a bassa entalpia è il settore che utilizza maggiormente la geotermia con il 63% rispetto al 7% del settore elettrico e del 30% dell'utilizzo diretto, vedi **Figura 6** (Fonte: Antics, Bertani, Sanner (2013): Summary of ECG 2013 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe).

### Ripartizione Utilizzo Geotermia



**Figura 6:** Ripartizione delle capacità installata nei tre sotto settori della geotermia in Europa nel 2012.

### 2.3 Ground Source Heat Pump - GSHP

I sistemi a bassa entalpia sono essenzialmente di due tipi:

1. Sistemi a *circuito aperto*: utilizzano come fluido termovettore direttamente l'acqua di falda (prevedono quindi un prelievo di acqua) che viene poi reimpressa nella falda stessa o nel reticolo idrografico superficiale. Queste soluzioni necessitano di condizioni di falda particolari (portata, temperatura, pressione, altezza ecc.) sia per il prelievo che per la reimmissione potendo determinare, nel caso di cattiva progettazione, un eccessivo prelievo di acqua e un conseguente abbassamento della falda con relativi problemi di subsidenza e capacità portante del terreno. Un altro problema, sempre più attuale, legato all'utilizzo di sistemi a circuito aperto è l'inquinamento. L'acqua prelevata, essendo poi reimpressa in falda, non deve infatti subire alcuna modificazione chimica che possa, in qualsiasi modo, inquinare o modificare le caratteristiche chimiche e reologiche della falda stessa.
2. Sistemi a *circuito chiuso*: utilizzano un fluido termovettore che compie un circuito chiuso e non entra in contatto con il terreno. Questo permette l'utilizzo di miscele di glicole che, come vedremo in seguito comporta dei vantaggi e degli svantaggi.

I sistemi utilizzati nella climatizzazione degli edifici sono chiamati GSHP (Ground Source Heat Pump). Questi sono sistemi termici che prevedono l'utilizzo di una pompa di calore reversibile abbinata a tubazioni inserite nel terreno (le sonde) che fungono da scambiatori termici. Le GSHP sono generalmente sistemi a circuito chiuso.

Le GSHP possono essere utilizzate, a seconda delle esigenze, in modo bilanciato o meno:

- a. Nel caso di *utilizzo bilanciato*, le GSHP vengono utilizzate sia in riscaldamento, ovvero estraendo calore dal terreno per cederlo all'ambiente da riscaldare, in periodi freddi, sia in raffrescamento, ovvero estraendo calore dall'ambiente esterno e cedendolo al terreno, in periodi caldi. L'uso bilanciato delle GSHP utilizza quindi il terreno come una sorta di batteria e permette di avere ottime performance.
- b. Nel caso di *uso sbilanciato* invece, le GSHP vengono utilizzate solo in una direzione, ovvero solo in riscaldamento o solo in raffrescamento. Ad esempio in climi particolarmente rigidi, dove non si raggiungono mai temperature sufficientemente alte da necessitare dell'utilizzo di raffrescamento, un GSHP verrà utilizzato solo in riscaldamento così come, nel caso opposto di climi particolarmente caldi, l'impianto verrà utilizzato solo in raffrescamento. Un utilizzo sbilanciato determina generalmente minori rendimenti dell'impianto. Ci sono tuttavia particolari condizioni quali alti flussi di acque sotterranee o abbondanti precipitazioni che favoriscono una "rigenerazione" termica del terreno.

Le GSHP a circuito chiuso si dividono essenzialmente in tre categorie:

- 1- Le *sonde geotermiche verticali*: sono sonde verticali (possono essere a doppia U o coassiali) che scambiano calore con il terreno e hanno lunghezze tipiche da 50 a 150 m. Queste sonde, avendo la maggior parte della superficie in zona omotermica hanno alti rendimenti;
- 2- Le *sonde geotermiche orizzontali*: sono sonde elicoidali disposte in maglie che si sviluppano orizzontalmente poste a circa 2 m di profondità in terreni generalmente sciolti. Queste sonde, essendo a profondità modeste, subiscono l'influenza della temperatura superficiale ed hanno generalmente minori costi di installazione ma minori rendimenti;
- 3- I *pali energetici*, sono elementi di fondazione strutturali in cui vengono integrate delle sonde scambiatrici di calore, hanno una profondità tipica di alcune decine di metri.  
I pali energetici sono una tecnologia ancora poco diffusa a livello nazionale ma che ha riscontrato un grande sviluppo in paesi europei vicini al nostro, come Svizzera, Austria e Germania.

## 2.4 Il fluido termovettore e l'influenza sulla temperatura del terreno.

Un problema che si pone è l'utilizzo dei GSHP in fase di riscaldamento quando ci sia la necessità di estrarre maggior calore. In questo caso si rende necessario lo sfruttamento della fonte geotermica attraverso l'utilizzo di fluidi termovettori con temperature inferiori a 0 °C.

Questa eventualità si presenta nei seguenti casi:

1. Zone con climi rigidi. Infatti, mentre nei climi caldi il fluido termovettore che circola all'interno delle sonde può essere semplicemente l'acqua, nei climi freddi può essere necessario l'utilizzo di una miscela di acqua e glicole etilenico. Miscele di acqua e glicole hanno temperature di solidificazione che possono raggiungere varie decine di gradi sotto lo 0 °C. E' così possibile immettere nel ciclo il fluido termovettore a temperature inferiori a 0 °C (solitamente -10 °C) in modo tale da aver un flusso termico specifico sufficientemente elevato da garantire un COP positivo (Coefficient of Performance) della pompa di calore.
2. L'impianto è sottodimensionato;
3. Cambio di destinazione d'uso dell'edificio con richiesta di maggiori temperature;
4. Ampliamento dell'edificio;
5. Uso sbilanciato del sistema in solo riscaldamento che comporta una diminuzione della temperatura del terreno;
6. Diminuzione della temperatura del terreno per varie cause (variazione flusso di acque sotterranee, abbassamento della falda, diminuzione temperature medie esterne ecc.).

L'utilizzo della miscela di acqua e glicole ha vantaggi e svantaggi, sarà quindi necessario esaminare di caso in caso il suo utilizzo o meno.

I vantaggi nell'utilizzo della miscela sono:

1. maggior delta termico tra fluido e terreno nella fase di estrazione del calore: si può far circolare il fluido a temperature inferiori a 0°C. Questo determina un flusso termico specifico più elevato e la possibilità di soddisfare i carichi invernali;
2. Lo scambiatore "sonda geotermica" è di dimensioni minori con minor onere economico.

Gli svantaggi sono:

1. Il COP della pompa di calore, essendo maggiore il delta termico tra fluido lato edificio e fluido lato sonde diminuisce;

2. La miscela con glicole, rispetto all'acqua pura, diminuisce lo scambio termico convettivo sia in sonda che nella pompa di calore. A parità di calore scambiato è quindi necessario un maggior flusso di miscela;
3. Essendo il glicole corrosivo ed inquinante, esiste un potenziale rischio di inquinamento ambientale nel caso di perdite della sonda;
4. Maggiori costi dovuti sia al costo della miscela stessa sia ai costi di manutenzione sia al fatto che, essendo il glicole corrosivo ed inquinante, richiede soluzioni impiantistiche più complesse;

Nel caso quindi di utilizzo di glicole come fluido termovettore, il terreno attorno alla sonda gela nel periodo di utilizzo della GSHP mentre fonde nei periodi in cui la GSHP non viene utilizzata o viene utilizzata in modalità raffrescante. Il terreno attorno alla sonda è quindi soggetto a cicli di gelo-disgelo.

## 2.6 Obiettivi

La presente tesi ha lo scopo di analizzare le variazioni dei parametri geotecnici di un terreno silto-argilloso in seguito a cicli di gelo-disgelo. E' noto infatti da letteratura che un terreno soggetto a temperature inferiori a 0 °C subisce processi di congelamento che cambiano le sue proprietà meccaniche e la sua tessitura in modo irreversibile. L'effetto è predominante in terreno coesivi la cui struttura è fortemente influenzata dalla presenza dell'acqua.

Verranno studiati in particolare la variazione di quei parametri necessari alla progettazione dei pali energetici. Infatti, a differenza delle altre tipologie di GSHP che hanno esclusivamente finalità energetiche, i pali energetici hanno anche, e prima di tutto, finalità strutturali. E' quindi indispensabile per una buona progettazione saper valutare la variazione dei parametri geotecnici e del comportamento di un terreno soggetto a cicli di gelo e disgelo.

I parametri geotecnici analizzati sono stati suddivisi in due categorie: la prima riguarda i parametri di deformabilità quali:

- Deformazione indotta da cicli di gelo-disgelo;
- Modulo Edometrico:  $E_d$ ;
- Indici di compressione, rigonfiamento e ricomprensione:  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $C_r$ ;
- Permeabilità:  $k$ .

La seconda quelli di resistenza, secondo il principio di Mohr-Coulomb:

- Angolo di resistenza al taglio o di attrito interno:  $\phi'$ ;
- Coesione:  $c'$ .

Per quanto riguarda i parametri di resistenza è stato scelto di prendere in considerazione i parametri "efficaci" poiché questi sono parametri che descrivono il principio delle tensioni efficaci, principio al quale i terreni sono sempre soggetti, al contrario invece, la resistenza a taglio non drenata ( $C_u$ ) non è un vero e proprio parametro, ma piuttosto un artificio matematico che è valido solo nella fase transitoria prima del drenaggio.

## 2.5 Esempi di realizzazione

Una realizzazione prestigiosa nell'utilizzo dei pali energetici è il Dock Midfield dell'aeroporto di Zurigo, **Figura 7**. E' un edificio di 500 m di lunghezza e 30 m di larghezza che poggia su 440 pali di fondazione gettati in loco con un diametro di 0,9-1,5 m ed una profondità di circa 30 m. Di questi, 315 sono equipaggiati a pali energetici che soddisfano circa il 75% del fabbisogno totale annuale (quindi sia in riscaldamento, nella stagione invernale, che in raffrescamento, nella stagione estiva) di energia termica per la climatizzazione del terminal dell'aeroporto.



**Figura 7:** Dock Midfield dell'aeroporto di Zurigo.

Un altro esempio è l'edificio scolastico di Fully, nel Vallese (Svizzera), in **Figura 8**. L'edificio ha una superficie di 2365 m<sup>2</sup> e un volume di 7018 m<sup>3</sup>, è stato ultimato nel Febbraio del 2000. Ha un totale di 41 pali equipaggiati a pali energetici con tubo a doppia U, per una profondità media di 32 metri. Il sistema di pali energetici, abbinato ad un sistema di riscaldamento a bassa temperatura, permettono una totale copertura del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione annuale.



**Figura 8:** Scuola elementare di Fully, nel Vallese (Svizzera).

### 3. PIANIFICAZIONE E FINALITA' DELLE PROVE

Lo studio dell'influenza di cicli di gelo e disgelo su terreni coesivi è stato condotto presso il laboratorio di geotecnica nella sede del dipartimento ICEA dell'Università degli Studi di Padova. Si è dapprima caratterizzato il terreno, si sono poi eseguite tutte le prove programmate per la determinazione dei parametri d'interesse.

Al fine di analizzare le differenze tra terreni coesivi che hanno subito cicli di gelo-disgelo e terreni che non hanno subito i cicli tutte le prove sono state eseguite su:

- provini "unfrozen" (non soggetti a cicli di gelo-disgelo);
- provini "frozen" (soggetti a 9 cicli di gelo-disgelo).

Al fine di determinare i parametri di deformabilità sono state eseguite prove edometriche e cicli di gelo-disgelo, i parametri di resistenza sono invece stati determinati attraverso prove di taglio diretto e prove triassiali Tx-CU.

Le prove sono state pensate e pianificate cercando di ricreare probabili e significativi condizioni cui un terreno coesivo a contatto con la superficie di un palo energetico potrebbe essere soggetto. Tutti i test prendono in considerazione terreni sottofalda, condizione che esiste nel sito in cui il terreno è stato prelevato e, più in generale, condizione spesso rispettata già a modeste profondità. Inoltre, tutti i provini soggetti a cicli di gelo-disgelo sono stati testati in un sistema aperto, cioè un sistema libero di drenare le eventuali sovrappressioni neutrali che si potrebbero verificare per effetto del gelo e disgelo del terreno e dell'acqua in esso contenuto. I test edometrici sono stati svolti su campioni normalconsolidati ad una pressione di 40 e 200 kPa; ipotizzando quindi la condizione del terreno coesivo esaminato ad una profondità sotto falda rispettivamente di circa 4 e 20 metri.

I test di taglio diretto sono stati eseguiti su provini normalconsolidati a pressioni di 40, 80 e 160 kPa, quindi, ipotizzando il terreno sottofalda a profondità di circa 4, 8 e 16 metri.

I cicli di gelo-disgelo pianificati sono:

1. 9 ciclo di gelo-disgelo su provino normalconsolidato a 40 kPa su cella edometrica;
2. 9 ciclo di gelo-disgelo su provino normalconsolidato a 200 kPa su cella edometrica;

Le prove edometriche pianificate sono:

1. prova edometrica su campione normalconsolidato a 40 kPa con il seguente schema di carico-scarico e test di permeabilità a consolidazione avvenuta ai carichi indicati con \*:

- a. carico: 20, 40\*, 80, 160\* kPa,
  - b. scarico: 80, 20 kPa,
  - c. ri-carico: 40, 80, 160, 320, 640, 1280\*, 2560 kPa,
  - d. scarico: 1280, 320, 80, 20 kPa;
2. prova edometrica su campione "frozen" normalconsolidato a 40 kPa con il seguente schema di carico e test di permeabilità a consolidazione avvenuta ai carichi indicati con \*:
- a. carico: 40\*, 80, 160\*, 320, 640, 1280\*, 2560 kPa,
  - b. scarico: 1280, 320, 80, 40 kPa;
3. prova edometrica su campione "frozen" normalconsolidato a 200 kPa con il seguente schema di carico e test di permeabilità a consolidazione avvenuta ai carichi indicati con \*;
- a. carico: 200\*, 320, 640\*, 1280\*, 2560 kPa,
  - b. scarico: 1280, 320, 160, 40 kPa;
4. consolidazione su edometro a 40 kPa per un periodo di 2 settimane (stesso periodo necessario a compiere 9 cicli di gelo e disgelo);
5. consolidazione su edometro a 200 kPa per un periodo di 2 settimane;

Le prove di taglio diretto pianificate sono:

1. prova di taglio su provino normalconsolidato a 40 kPa;
2. 2 prove di taglio su provini "frozen" normalconsolidati a 40 kPa;
3. 2 prove di taglio su provini normalconsolidati a 80 kPa;
4. prova di taglio su provino "frozen" normalconsolidato a 80 kPa;
5. prova di taglio su provino normalconsolidato a 160 kPa;
6. *prova di taglio su provino "frozen" normalconsolidato a 160 kPa.*

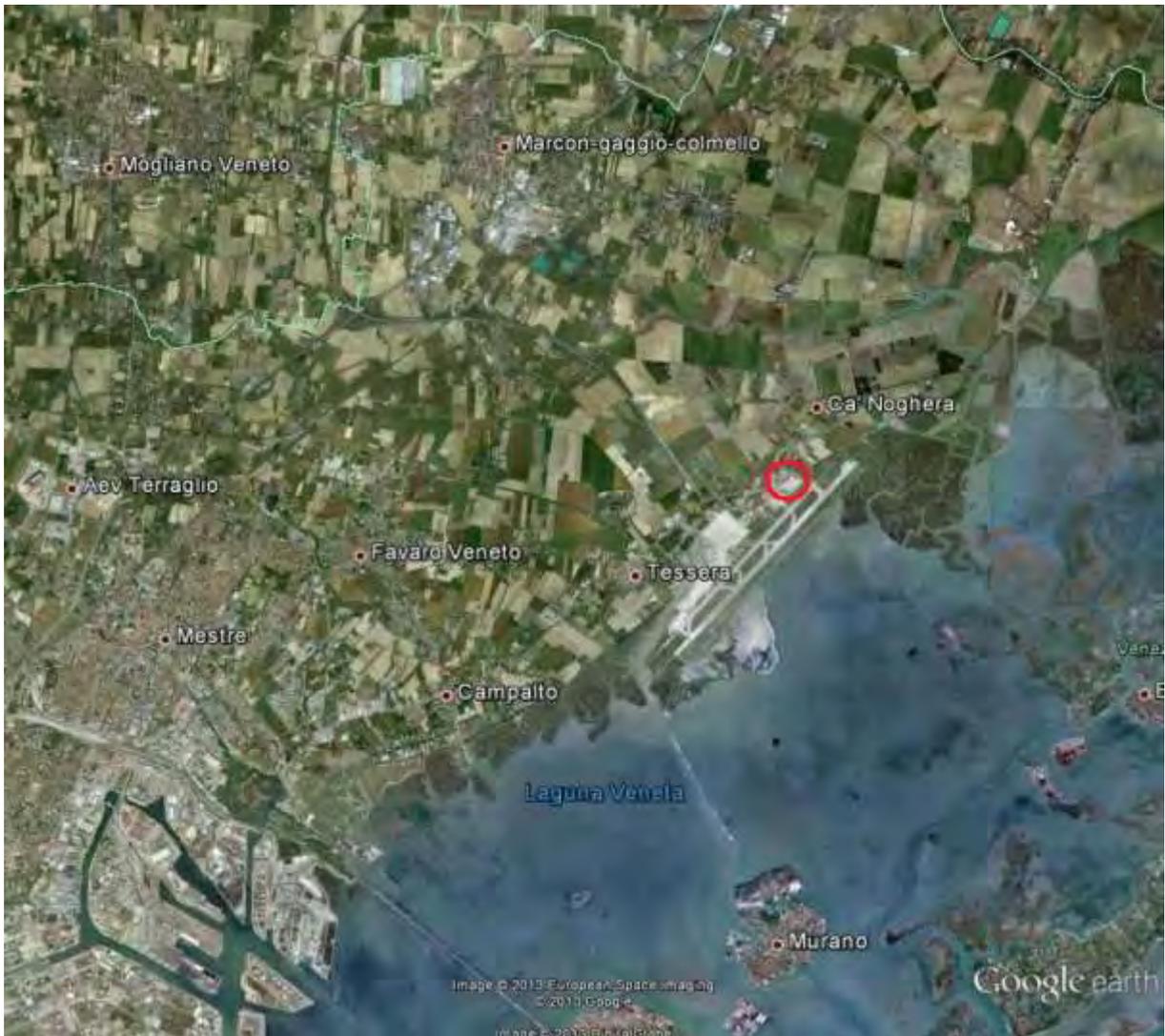
La sesta prova non è stata realizzata per i motivi che verranno riportati in seguito.

Le prove triassiali Tx-CU sono state eseguite su un terreno normalconsolidato a 80 kPa:

1. Prova eseguita con pressione di cella pari a 40 kPa;
2. Prova eseguita con pressione di cella pari a 80 kPa;
3. Prova eseguita con pressione di cella pari a 320 kPa;
4. Prova eseguita su campione "frozen" con pressione di cella pari a 40 kPa;
5. Prova eseguita su campione "frozen" con pressione di cella pari a 80 kPa;
6. Prova eseguita su campione "frozen" con pressione di cella pari a 320 kPa;

#### 4. CARATTERIZZAZIONE

Le prove sono state eseguite su un terreno argillo-limoso. Il terreno è stato prelevato da un carotaggio a rotazione continua effettuato nell'hangar D dell'Aeroporto Marco Polo a Tessera, **Figura 9.**



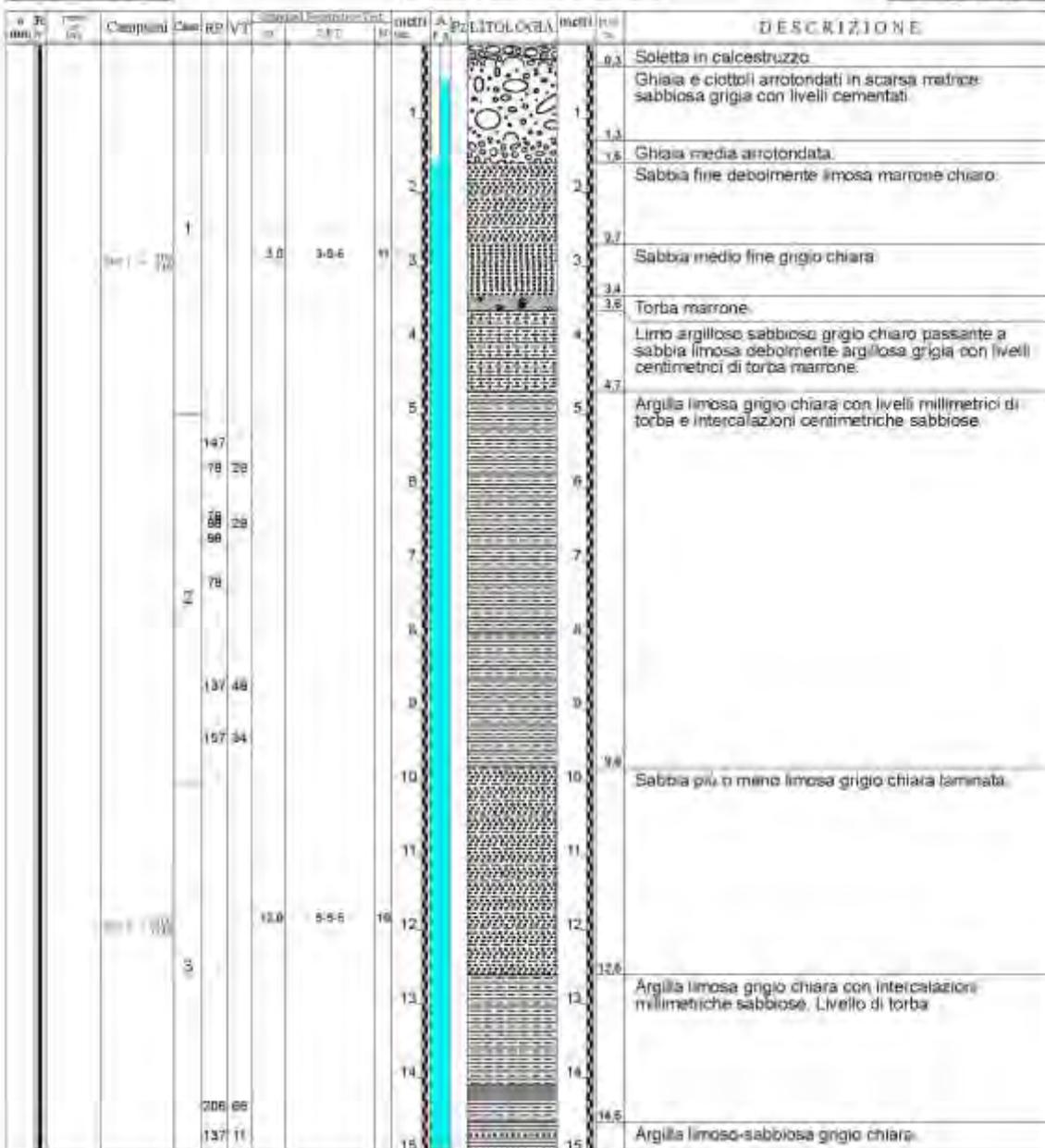
*Figura 9: Ortofoto della zona di Tessera in scala 1:100 000.*

In **Figura 10** la stratigrafia del carotaggio.



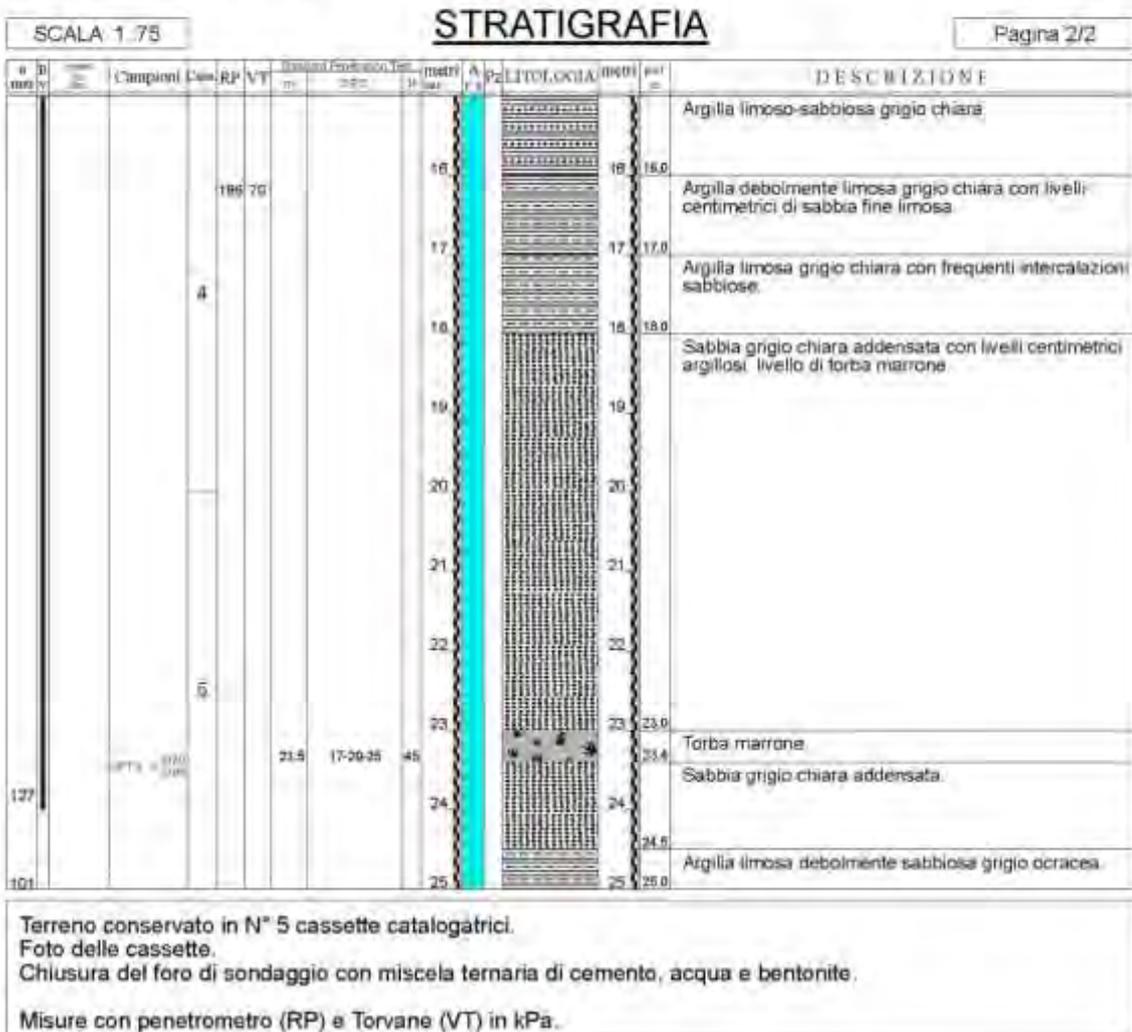
Committente: SUPERJET INTERNATIONAL S.P.A.	Sondaggio: 1
Riferimento: HANGAR D - TESSERÀ (VE)	Data: 07-08 febbraio 2013
Coordinate: N 45° 30' 52.50	Quota: Piano Lavoro
Perforazione: E 12° 21' 18.27	

SCALA 1:75 **STRATIGRAFIA** Pagina 1/2





Committente: SUPERJET INTERNATIONAL S.P.A.	Sondaggio: 1
Riferimento: HANGAR D - TESSERA (VE)	Data: 07-08 febbraio 2013
Coordinate: N 45° 30' 52.50"	Quota: Piano Lavoro
Perforazione: E 12° 21' 18.27"	



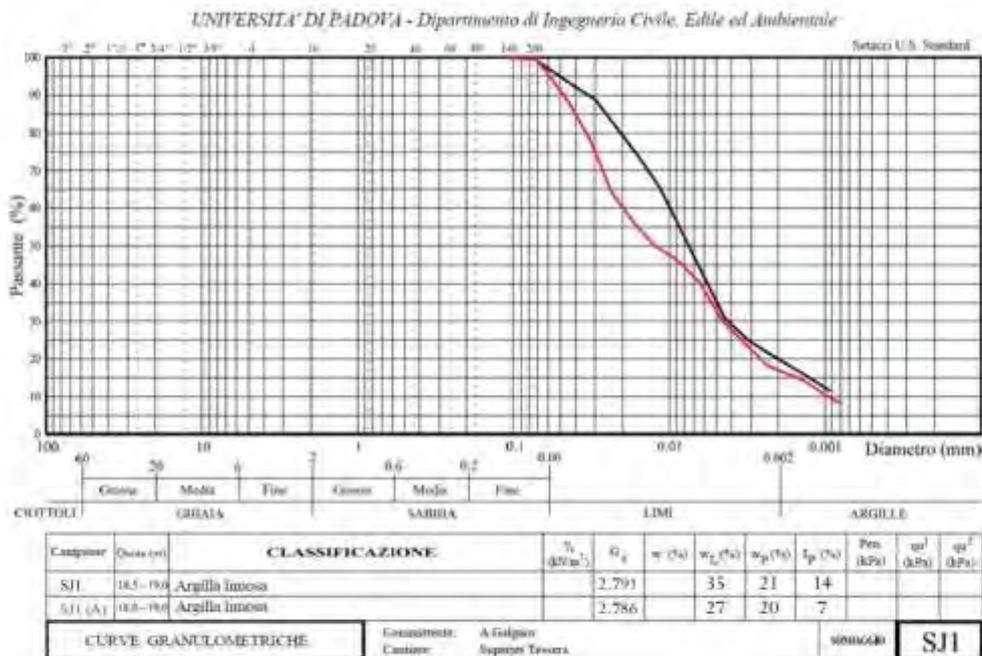
**Figura 10:** Stratigrafia del carotaggio

La terra utilizzata per gli esperimenti è stata prelevata in due campioni dal suddetto carotaggio ad una profondità compresa tra i 18 e i 19 metri. In **Figura 11** è raffigurata la cassetta catalogatrice da cui è stato prelevato il terreno campionato.



**Figura 11:** Cassetta catalogatrice da 15-20 m.

Il terreno utilizzato è stato nominato SJ1 tra 18 e 18,5 m e SJ1-A tra 18,5 e 19 m. Sono stati eseguiti i limiti di Atterberg, sono stati calcolati i pesi specifici, sono state eseguite le granulometrie, le aerometrie, calcolate le percentuali organiche e le composizioni chimiche. I risultati sono indicati nella curva **Figura 12**.



**Figura 12:** Classificazione del terreno SJ1 e SJ1A

## 5. STRUMENTAZIONE

### 5.1 Cella Edometrica

Le celle edometriche utilizzati sono di due tipi vedi **Figura 13**:

1. consolidometro con diametro interno pari a  $\varnothing 20$  cm e altezza 11,7 cm o, con prolunga verticale, di 16,8 cm;
2. cella edometrica con diametro interno pari a  $\varnothing 7$  cm e altezza 6,2 cm.

Le celle edometriche sono utilizzate nelle prove edometriche mentre i consolidometri sono stati utilizzati per portare il terreno, che verrà successivamente inserito nelle celle edometriche, dalla fase liquida ad una tensione di normalconsolidazione di 40 kPa in modo da evitare eccessivi cedimenti che avrebbero reso il provino troppo sottile per essere rappresentativo. Il consolidometro è stato anche utilizzato per la consolidazione a 80 kPa dei provini necessari per la prova triassiale.



**Figura 13:** Struttura di carico, cella edometrica e consolidometro.

## 5.2 Macchina di Taglio Diretto

La macchina di taglio diretto ha una cella di taglio a base quadrata di lato 6 cm e altezza 4 cm. La pressione verticale viene applicata attraverso un sistema pneumatico automatico.

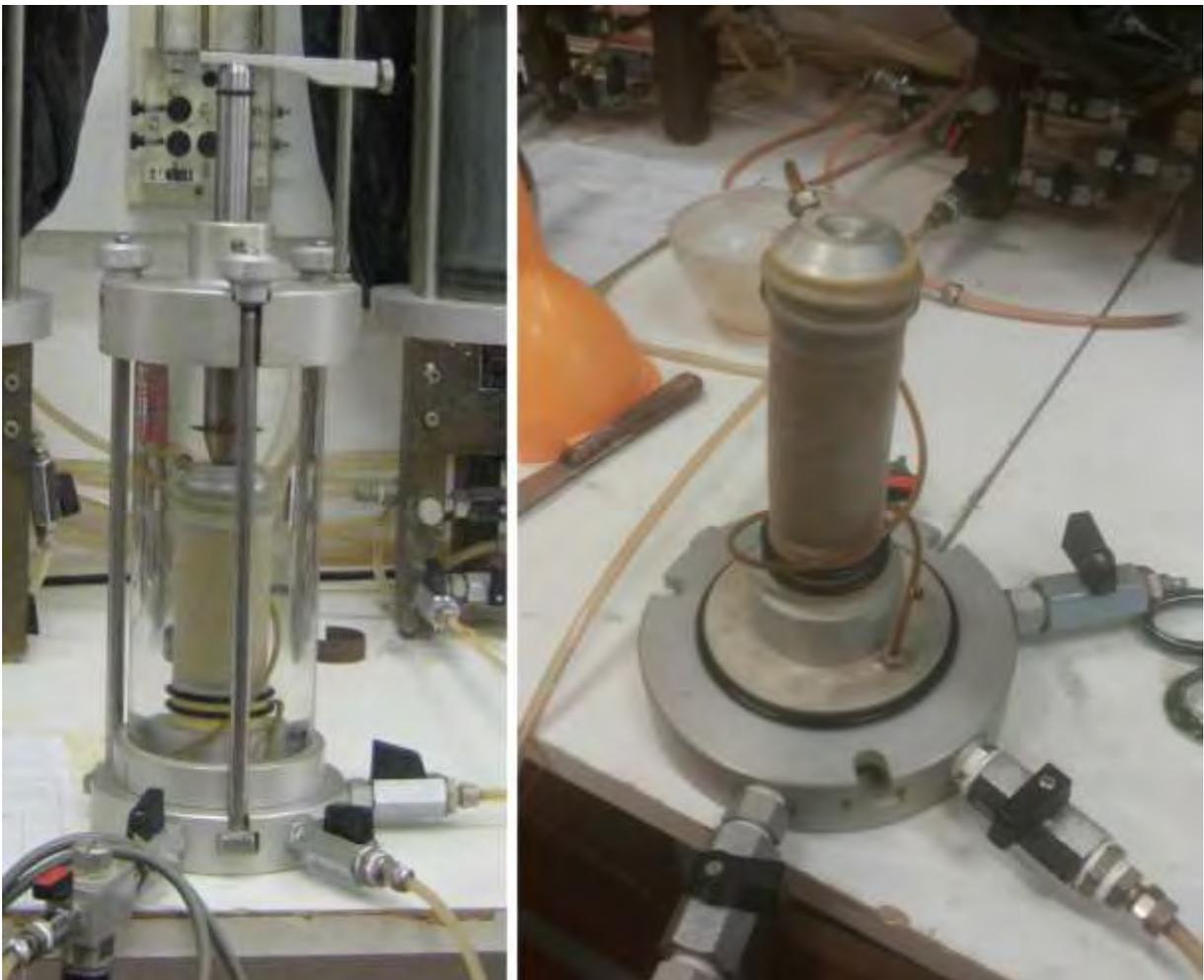


**Figura 14:** Macchina di taglio e cella di taglio.

### 5.3 Cella Triassiale

Le celle triassiali utilizzate hanno diametro  $\phi 9$  cm e altezza di 22 cm. Il provino all'interno deve avere un diametro di circa 35÷40 mm e un'altezza pari a 2÷3 volte il diametro. La strumentazione del laboratorio consente la saturazione di tutti e tre i campioni contemporaneamente attraverso l'installazione di una back pressure di 4 kPa superiore alla pressione di cella. La strumentazione permette invece una sola registrazione alla volta del volume di acqua drenata nella fase di consolidazione per le prove Tx-CU. Si è quindi dovuto consolidare e poi eseguire la prova a rottura di un provino per volta.

In **Figura 15** le celle triassiali durante la fase di saturazione e quella di rottura.



**Figura 15:** Cella triassiale e una delle fasi della preparazione della prova.

#### 5.4 Cella termostata

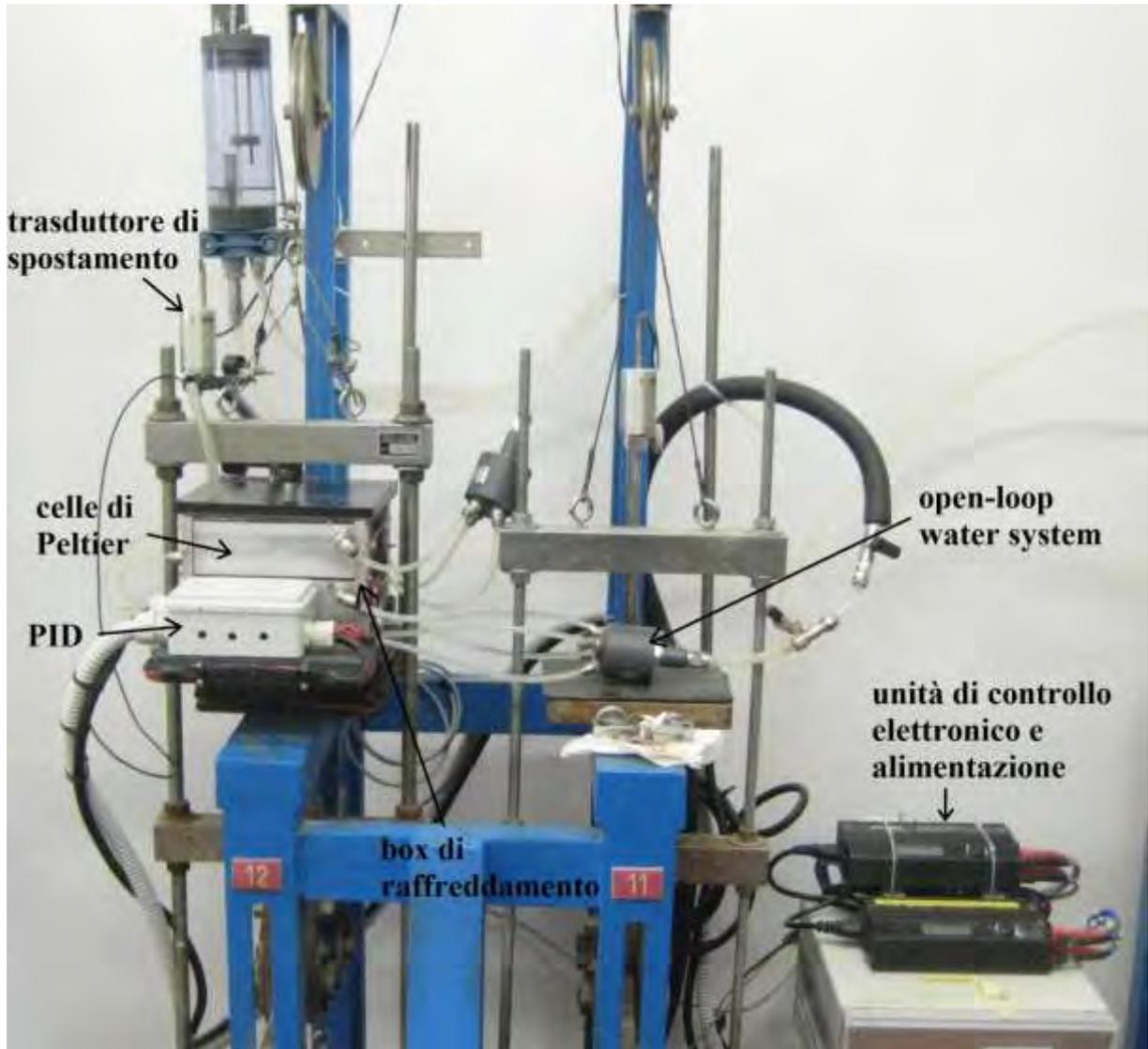
Al fine di simulare cicli di gelo e disgelo dei terreni nelle condizioni in sito è stata utilizzata un'apposita apparecchiatura prototipale composta da un recipiente rettangolare in acciaio inossidabile di dimensioni 14x14x13 che viene riempito di soluzione di glicole (una soluzione ad alta conducibilità termica e basso punto di solidificazione o congelamento). Le pareti del serbatoio sono rivestite da materiale ad alta inerzia termica che permette un adeguato isolamento termico. Il raffreddamento/riscaldamento è ottenuto con 12 celle di Peltier collegate tra loro in parallelo e alimentate in corrente continua a tensione variabile tra 5 e 12 volt che permettono il raggiungimento di temperature comprese tra -6 e + 55° C.

La cella di Peltier è sostanzialmente una pompa di calore a stato solido dall'aspetto di una piastrina sottile. Essa è formata da due materiali semiconduttori drogati di tipo N e di tipo P, collegati tra loro da una lamella di rame. Se si applica al tipo N una tensione positiva e al tipo P una tensione negativa, un lato si raffredda mentre l'altro si riscalda. Invertendo la tensione lo spostamento di energia termica si inverte. La faccia che si trova ad essere "calda" viene messa a contatto con un flusso d'acqua alimentato da una pompa di circolazione che ne permette il continuo raffreddamento e ottimizza le prestazioni delle celle di Peltier.

Le celle di Peltier sono state suddivise in due linee. La prima linea è composta da 4 celle utilizzate in riscaldamento mentre la seconda linea è composta da 8 celle utilizzate, assieme alle prime 4 in fase di raffreddamento. Ogni linea è alimentata da un alimentatore di rete regolato da un PID. Il PID (controllo Proporzionale Integrato Derivato) è un sistema di retroazione negativa impiegato nei sistemi di controllo. Questo acquisisce in ingresso un valore del processo (in questo caso un valore di temperatura, fornito da un sensore di temperatura) e lo confronta con un valore di riferimento (temperatura impostata da raggiungere). La differenza viene quindi usata per determinare il valore della variabile di uscita del controllore (in questo caso di tipo on-off), cioè se la temperatura impostata è stata raggiunta il sistema PID spegne l'alimentazione delle celle, altrimenti ne consente l'alimentazione.

Il sensore termico è collegato sia al PID che ad software di raccolta dati che ne registra in continuo i valori.

All'interno del serbatoio viene posto il provino, nel nostro caso la scatola di taglio o l'edometro modificato. L'edometro standard è stato modificato sostituendo l'ugello di drenaggio con un ugello di maggior diametro per permettere il passaggio del sensore di temperatura. La modifica non comporta alcuna ripercussione nell'esecuzione della prova poiché il drenaggio è regolato dalle pietre porose poste alle basi dell'edometro.



*Figura 16: Cella termostata.*

## 6. PREPARAZIONE DEI PROVINI

### 6.1 Preparazione del Terreno

Il terreno è stato prelevato dalla quarta cassetta catalogatrice (da 15 a 20 m) del carotaggio prescelto. Il terreno è stato mescolato ed omogeneizzato con aggiunta di acqua distillata fino al raggiungimento di un contenuto d'acqua compreso tra il 25 e il 30 % (a metà tra il  $w_p$  e il  $w_L$ ). Il terreno è stato poi conservato all'interno di scatole stagne in una camera umida a temperatura costante e umidità al 100%.

### 6.2 Preparazione dei Provini per Prova Edometrica

Il terreno è stato posto nel consolidometro per consolidare il terreno alla pressione di consolidazione stabilita (il primo a 40 kPa e il secondo a 200 kPa). Il terreno è stato fatto consolidare fino a completamento della consolidazione primaria ( $T_{100}$ ). A consolidazione avvenuta il terreno è stato estratto, fustellato nel centro del provino e inserito nella cella edometrica. L'operazione è stata ripetuta per tutte le prove edometriche.

### 6.3 Preparazione dei Provini per Prova di Taglio Diretto

Il terreno è stato posto nella scatola di taglio e lasciato consolidare imponendo un carico assiale. Nel caso della prova di taglio con  $\sigma_1=40$  kPa il gradino di carico è stato uno solo (da 0 a 40 kPa). Nel caso di  $\sigma_1=80$  kPa i gradini di carico sono stati due: 40 kPa e 80 kPa. Nel caso di  $\sigma_1=160$  i gradini di carico sono stati 3: 40 kPa, 80 kPa e 160 kPa. La procedura descritta è stata eseguita sulla macchina di taglio per i provini direttamente soggetti al test di taglio diretto. I provini "frozen" sono stati consolidati all'interno della macchina del gelo ad una temperatura di 15° C seguendo gli stessi step di carico dei provini non soggetti a cicli di gelo-disgelo.

### 6.4 Preparazione dei Provini per Prove Triassiali Consolidate Non Drenate, Tx-CU

Sono state eseguite 6 prove triassiali consolidate non drenate:

1. 3 su provini "unfrozen";
2. 3 su provini "frozen".

Una preconsolidazione è avvenuta nel consolidometro ad una pressione di 80 kPa. La preconsolidazione è stata necessaria, trattandosi di terreno rimaneggiato, per poter rendere il terreno sufficientemente compatto per essere inserito all'interno della membrana in lattice.



*Figura 17: Consolidometro in fase di consolidazione, a sinistra, e di scongelamento, a destra.*

Dopo che il terreno ha subito la pre-consolidazione nel consolidometro, lo si è estratto e se ne sono ricavati 4 provini cilindrici del diametro di 3,85 cm e di altezza di 7 cm circa.

In **Figura 17** è fotografato il consolidometro durante la fase di consolidazione e appena iniziata la fase di scongelamento; in **Figura 18** è fotografato il terreno dopo la consolidazione e in fase di preparazione per la prova triassiale.



**Figura 18:** Taglio del terreno dopo la consolidazione nel consolidometro e preparazione del provino per prova triassiale.

## 7. LE PROVE

### 7.1 Cicli di Gelo-Disgelo

La scatola della cella termostata è stata riempita di glicole fino ad una altezza di poco inferiore al bordo superiore dell'edometro in modo da permettere un perfetto isolamento idraulico tra il fluido e il provino all'interno dell'edometro. Nel caso della scatola di taglio, non essendo questa impermeabile, la si è inserita all'interno di una doppia busta di polietilene per impedire al glicole di entrare a contatto con il terreno.

Il primo giorno il provino viene portato ad una temperatura di 15° C e lasciato consolidare. Si eseguono poi i 9 cicli con le seguenti temperature e tempistiche:

1. Congelamento a -5,5°C per 17 ore;
2. Disgelo a 55°C per 7 ore.

Studi condotti da Jilin Qi, Wei Ma, Chunxia Song (2007), mostrano come il modulo, la direzione e il verso del gradiente termico e il tempo di dissipazione delle sovrappressioni neutrali siano i parametri rilevanti nel processo di ghiacciamento del terreno. Quindi il tempo in cui il provino rimane nello stato scongelato è determinante nella misura in cui consente il drenaggio delle sovrappressioni neutrali. Ovvero il lasso di tempo compreso tra la completa dissipazione delle sovrappressioni neutrali e il ricongelamento del provino è ininfluenza per ciò che riguarda la variazione dei parametri analizzati del terreno. Parte di queste considerazioni, sono state confermate anche da sperimentazioni precedenti condotte dalla dottoranda Ing. Giorgia Dalla Santa, che dimostrano come il tempo di congelamento non influenzi la deformazione indotta nel provino. Questo ci permette di estendere la validità dei risultati ottenuti anche per terreni soggetti a cicli di gelo-disgelo di diversa durata.

L'acquisizione dei dati di temperatura e relativi cedimenti/rigonfiamenti seguono la seguente legge di tempo:

$$t(i) = A \cdot i^B$$

con A=0,2; B=2 e  $t$  in minuti

## 7.2 La Prova Edometrica

Il terreno consolidato nel consolidometro a 40 kPa è stato inserito in 3 edometri, i quali sono stati soggetti alle seguenti prove:

1. prova edometrica su campione normalconsolidato con il seguente schema di carico-scarico e test di permeabilità a consolidazione avvenuta ai carichi indicati con \*:
  - a. carico: 20, 40\*, 80, 160\* kPa,
  - b. scarico: 80, 20 kPa,
  - c. ri-carico: 40, 80, 160, 320, 640, 1280\*, 2560 kPa,
  - d. scarico: 1280, 320, 80, 20 kPa;
2. cella termostata: 9 cicli di gelo-disgelo per successiva prova edometrica con il seguente schema di carico:
  - a. carico: 40\*, 80, 160\*, 320, 640, 1280\*, 2560 kPa,
  - b. scarico: 1280, 320, 80, 40 kPa;
3. consolidazione a 40 kPa per un periodo di 2 settimane (stesso periodo necessario a compiere 9 cicli di gelo e disgelo);

Il terreno consolidato a 200 kPa è stato inserito in 2 edometri “piccoli”, quest’ultimi sono stati soggetti alle seguenti prove:

1. cella termostata: 9 cicli di gelo-disgelo con pressione costante di 200 kPa e successivamente prova edometrica con scalini di carico:
  - a. carico 200\*, 320, 640\*, 1280\*, 2560 kPa;
  - b. scarico 1280, 320, 160\*, 40\* kPa.
2. Consolidazione a 200 kPa per un periodo di 2 settimane (stesso periodo necessario a compiere 9 cicli di gelo e disgelo).

L’acquisizione dei dati dei cedimenti seguono la seguente legge di tempo esponenziale:

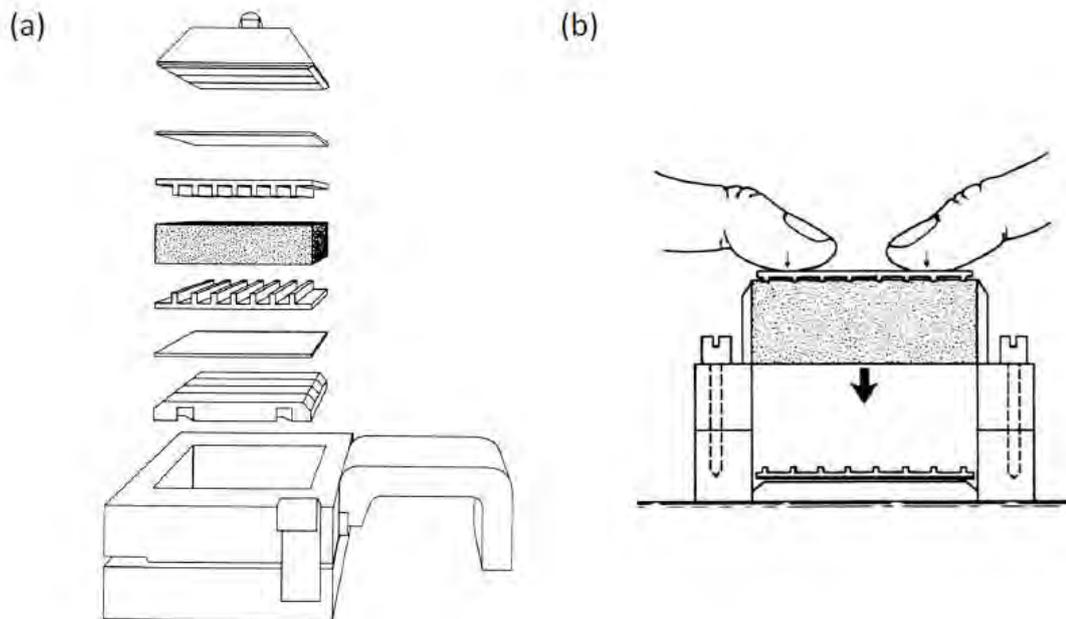
$$t(i) = A \cdot B^i$$

con  $A=0,05$ ;  $B=1,7$  e  $t$  in minuti.

Le due prove a carico costante (40 e 200 kPa) per 14 giorni sono stati eseguite per calcolare il cedimento di consolidazione avvenuto dopo il  $T_{100}$ . Infatti, come vedremo in seguito, il cedimento nei terreni soggetti a cicli di gelo-disgelo ha una componente di consolidazione termica e una di consolidazione primaria.

### 7.3 La Prova di Taglio

L'obiettivo della prova di taglio diretta è la determinazione dei parametri di resistenza efficaci della teoria di Mohr-Coulomb. La velocità di taglio è stata estremamente lenta per permettere il drenaggio. La velocità di taglio è stata impostata quindi, tenendo conto del tempo di consolidazione  $t_{100}$  soggetto al carico esaminato. Il provino ha dimensioni 60x60x20 mm e ha 2 superfici di drenaggio (le basi), vedi **Figura 19**.



**Figura 19:** Schema di montaggio (a) e di inserimento del provino (b) nella scatola di taglio.

La velocità di taglio viene calcolata con la seguente formula:

$$v = \frac{s_f}{t_f}$$

Con  $s_f$  pari alla stima dello scorrimento a rottura, vedi **Tabella 2** e  $t_f$  pari alla stima del tempo di rottura.

Gibson e Henkel (1954) propongono:

$$t_f = 12,7 \cdot t_{100}$$

Ladd (1971) propone:

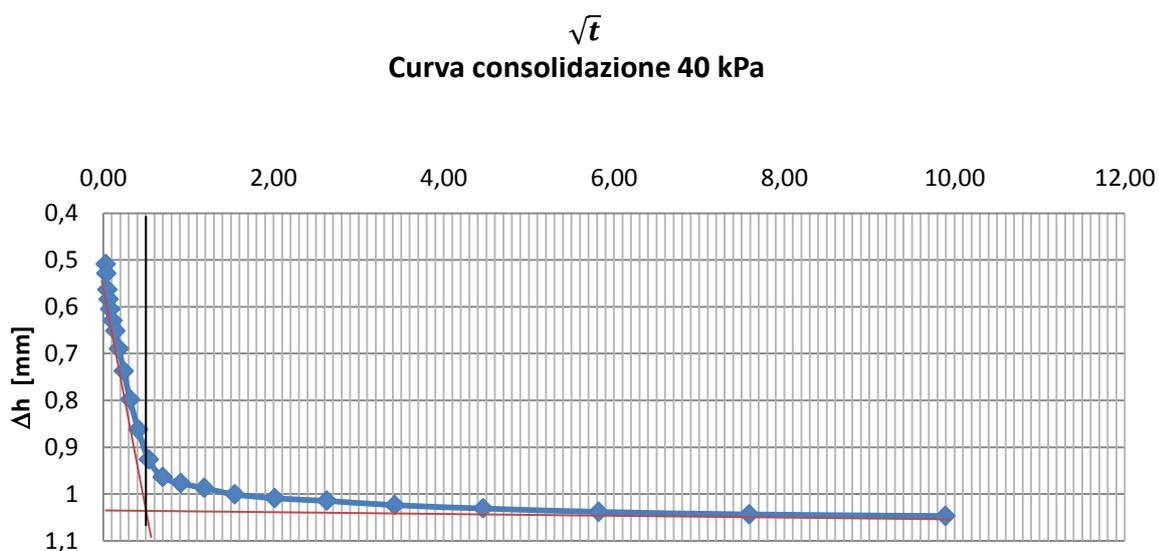
$$t_f = (5 \div 10) \cdot t_{100}$$

mentre  $s_f$  viene stimato sulla base di PI del terreno e il suo OCR:

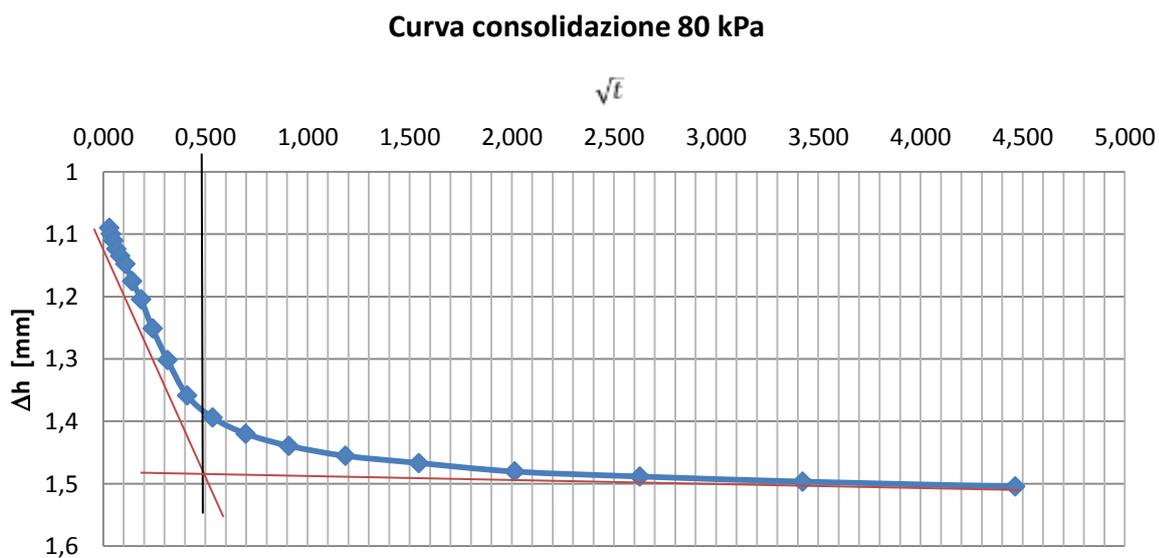
Terreno	Scorrimento [mm]
Argille tenere	8
Argille sovraconsolidate	2 ÷ 5
Argille marnose	1 ÷ 2
Sabbie	1 ÷ 5

**Tabella 2:**  $\Delta s$  a rottura per prove di taglio

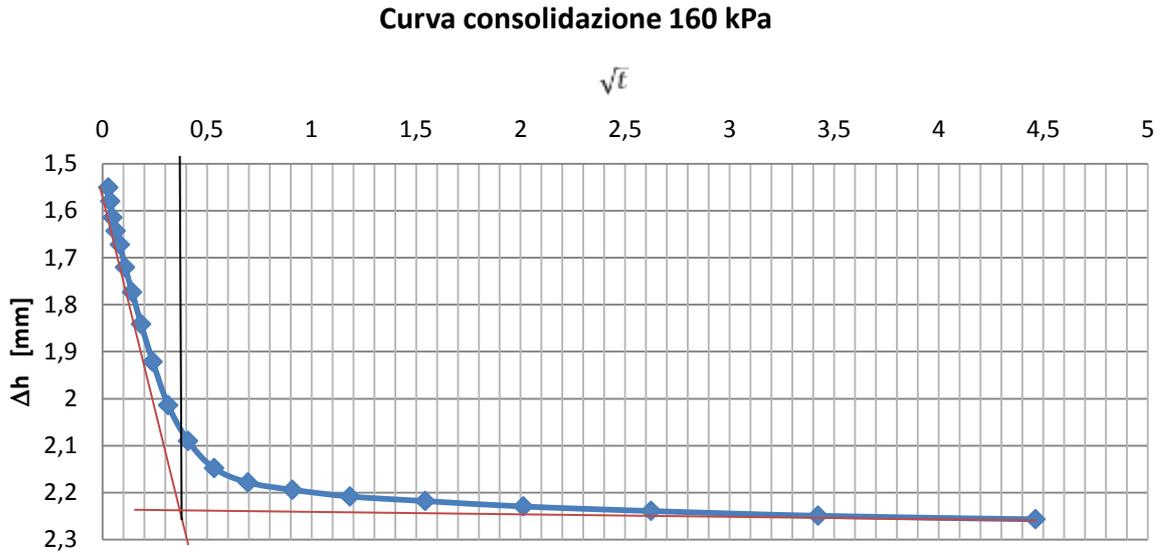
Il  $t_{100}$  per i carichi analizzati lo si può ricavare dalle curve di consolidazione in **Figura 20**, **Figura 21** e **Figura 22**.



**Figura 20:** Curva consolidazione a 40 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.



**Figura 21:** Curva consolidazione a 80 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.



**Figura 22:** Curva consolidazione a 160 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo.

Nella **Tabella 3** sono riportati i valori di  $t_{100}$ .

$\sigma'_v$ [kPa]	$T_{100}$ [min]
40	18
80	17
160	10

**Tabella 3:**  $t_{100}$

		carico [kPa]		40	80	160	
<b>Gibson</b>	<b>t [min]</b>		228,6				
<b>Ladd</b>			t <sub>minimo</sub>	90	85	50	
			t <sub>massimo</sub>	180	170	100	
<b>Gibson</b>	<b>v [mm/min]</b>	<b>s [mm]</b>	4	0,02			
<b>Ladd</b>				t <sub>minimo</sub>	0,04	0,05	0,08
				t <sub>massimo</sub>	0,02	0,02	0,04
<b>Gibson</b>	<b>v [mm/min]</b>	<b>s [mm]</b>	7	0,03			
<b>Ladd</b>				t <sub>minimo</sub>	0,08	0,08	0,14
				t <sub>massimo</sub>	0,04	0,04	0,07

**Tabella 4:** v di taglio diretto

Come riportato in **Tabella 4** il valore della velocità di taglio più cautelativo è 0,02 mm/min, i campioni sono stati tagliati ad una velocità di un ordine di grandezza inferiore così da garantire il drenaggio:

$$v = 0,005 \frac{mm}{min}$$

L'acquisizione dei dati dei cedimenti seguono la seguente legge di tempo:

$$t(i) = A \cdot i^B$$

con A=15; B=1 e  $t$  in minuti

#### 7.4 La Prova Triassiale

Sono state scelte prove triassiali CU (consolidate-non drenate) perché permettono di ottenere i parametri di interesse ( $c'$  e  $f'$ ) in minor tempo rispetto alle prove CD (consolidate-drenate). I provini sono stati rivestiti con una membrana in lattice senza interposizione di carta di drenaggio essendo la permeabilità del terreno sufficientemente alta e le dimensioni del provino sufficientemente ridotte da garantire il drenaggio in tempi contenuti. I provini sono stati saturati con una Back Pressure pari a 400 kPa e una pressione di cella pari a 403 kPa. Ogni provino è stato poi consolidato alla pressione prestabilita. La velocità di rottura è stata calcolata con la seguente formula:

$$v = \frac{L_c \cdot \varepsilon_f}{100 \cdot F \cdot t_{100}}$$

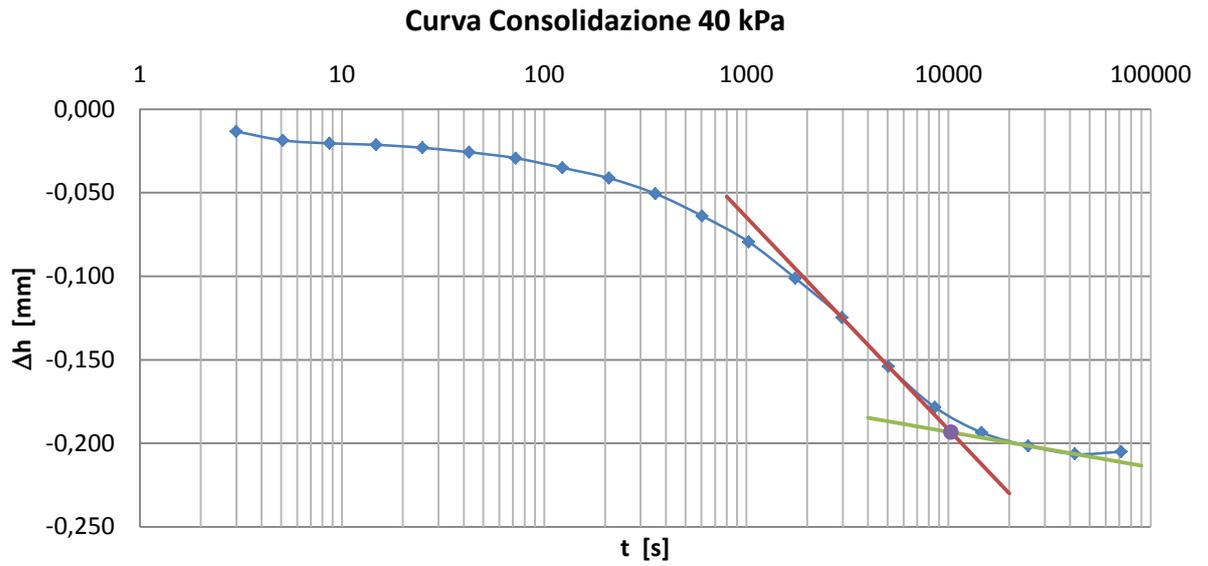
con:

$L_c$  = altezza del provino dopo consolidazione;

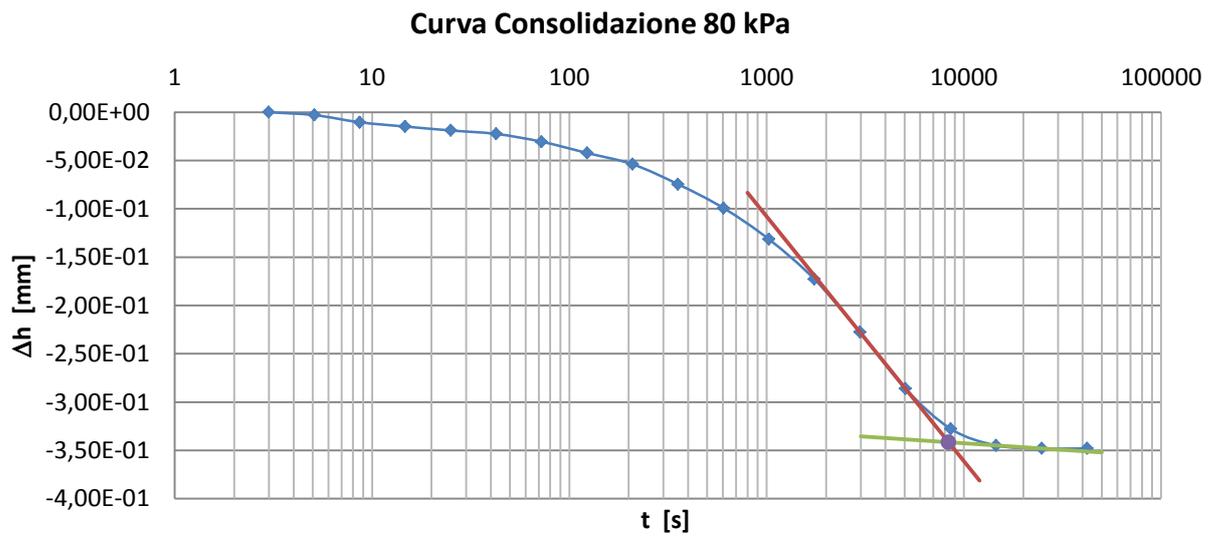
$\varepsilon_f$  = deformazione assiale del provino prevista a rottura in % (per argille normalconsolidate 15÷20 %);

$F$  = fattore adimensionale funzione delle condizioni di drenaggio: nel caso di drenaggio verticale dalle due basi con un rapporto  $h/r = 4$ , per prove CU,  $F$  risulta pari a 0,681.

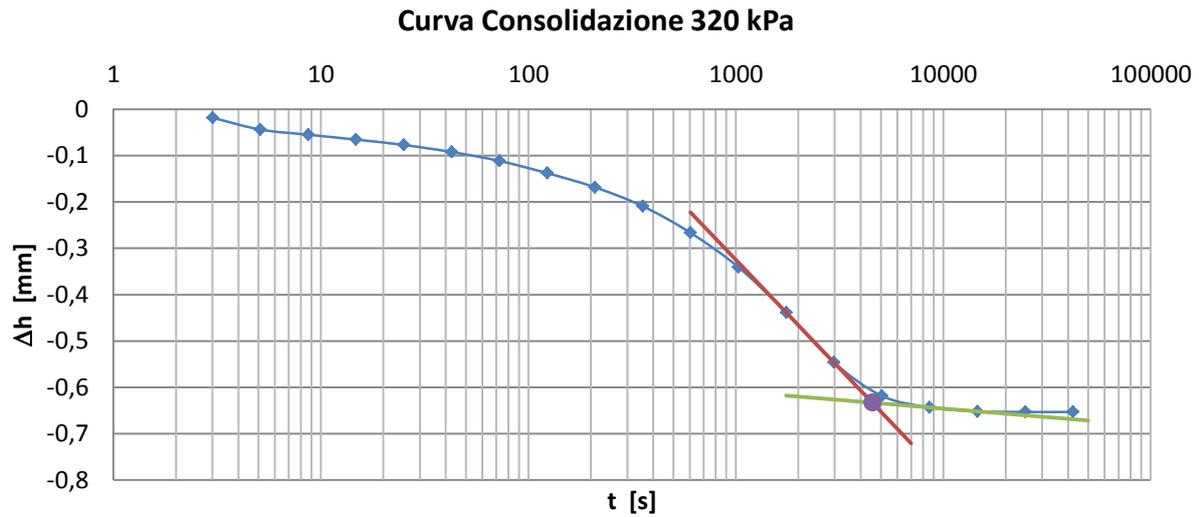
È stato calcolato  $t_{100}$  con il metodo di Casagrande ottenuto dalle curve riportate in **Figura 23**, **Figura 24** e **Figura 25** e calcolata la velocità di rottura riportata in **Tabella 5**.



**Figura 23:** Curva consolidazione a 40 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo



**Figura 24:** Curva consolidazione a 80 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo



**Figura 25:** Curva consolidazione a 320 kPa del campione non soggetto a cicli di gelo e disgelo

$\sigma_{\text{cons}}$	$t_{100}$	$v$
kPa	s	mm/min
40	10315	0,13
80	8368	0,12
320	4551	0,13

**Tabella 5:**  $t_{100}$  e  $v$  di rottura.

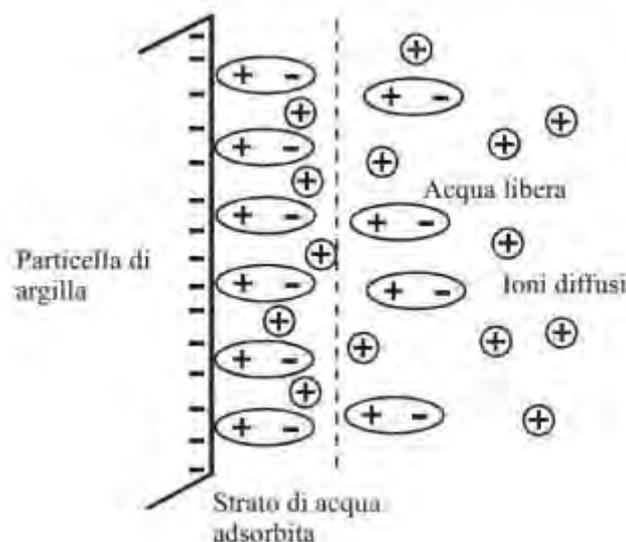
Per i provini soggetti a cicli di gelo-disgelo è stata utilizzata la medesima velocità utilizzata nella prova sul provino non ghiacciato consolidato al medesimo carico perché, come si vedrà in seguito, il valore della permeabilità aumenta per provini soggetti a cicli di gelo-disgelo. Questo determina una diminuzione del  $t_{100}$  e quindi la velocità di taglio utilizzata risulta conservativa.

## 8. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

### 8.1 Acqua Interstiziale e Acqua Adsorbita

Le argille sono terreni formate da minerali argillosi a struttura lamellare che rientrano nel gruppo dei fillosilicati. Le unità fondamentali della struttura dei minerali sono tetraedri e ottaedri. L'unità tetraedrica è formata da uno ione silicio al centro e da 4 ioni ossigeno posti ai vertici del tetraedro; l'unità ottaedrica invece, è formata da uno ione alluminio (o da uno ione magnesio) al centro e da otto ioni ossigeno disposti negli spigoli dell'ottaedro. Queste unità fondamentali si collegano tra loro e formano maglie piane che sono i "pacchetti elementari" che, a loro volta, combinandosi, formano i granuli argillosi.

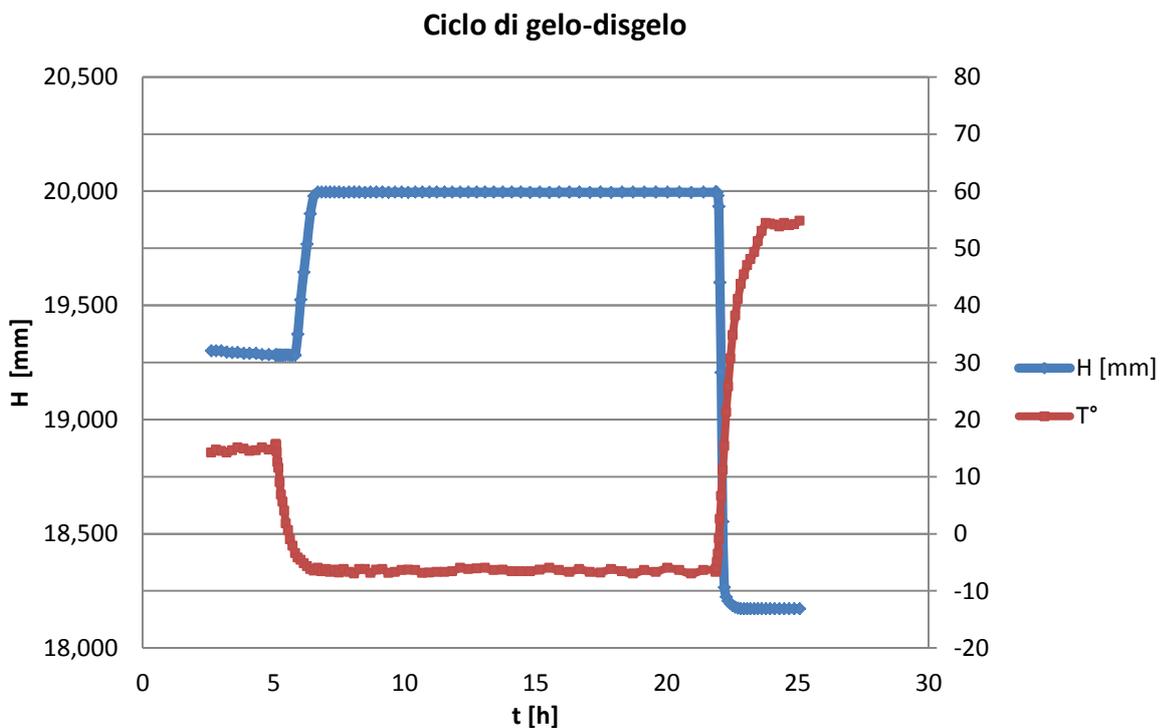
Nonostante le unità fondamentali siano approssimativamente neutre nel loro insieme, la disposizione geometrica degli ioni conferisce una forte carica negativa sulla superficie. Infatti gli ioni metallici (Si, Al, Mg) caricati positivamente, sono posti all'interno delle unità elementari, mentre gli ioni ossigeno sono disposti esternamente. La superficie dei granuli interagisce quindi con l'acqua presente nei terreni e con gli ioni in essa disciolti. Queste interazioni influiscono sulle caratteristiche meccaniche dei terreni. L'acqua, che è dipolare, è attratta dalla superficie negativa dei granuli, i quali risultano quindi idratati da un film di acqua che li riveste: l'acqua vincolata ai granuli è detta acqua adsorbita. Con l'aumentare della distanza delle molecole di acqua dalla superficie del granulo, la forza di legame diminuisce fino a non esercitare più alcuna attrazione sulle molecole d'acqua presenti, l'acqua risulta quindi libera, vedi **Figura 26**. In un terreno argilloso l'acqua può quindi essere presente in due diverse forme: l'acqua interstiziale (o libera) e l'acqua adsorbita.



**Figura 26:** Schematizzazione acqua interstiziale e acqua libera.

## 8.2 Cicli di Gelo-Disgelo

I risultati dei test di cicli di gelo-disgelo mostrano un'importante variazione di volume. La conseguenza immediata del processo di congelamento è l'aumento di volume del terreno dovuto al congelamento dell'acqua (l'aumento di volume tra stato solido e liquido dell'acqua è del 9%). Il processo di scongelamento nel caso del terreno analizzato normalconsolidato a 40 kPa e a 200 kPa, determina, al contrario, una diminuzione di volume. La variazione di volume nella fase di scongelamento è maggiore della variazione che il terreno ha subito durante il congelamento o, in altri termini, i terreni normalconsolidati analizzati soggetti, durante il ciclo di gelo-disgelo, alla pressione di consolidazione diminuiscono il volume dopo un ciclo completo di gelo-disgelo, vedi **Figura 27**. Qi et al. (2006) hanno dimostrato come cicli di gelo-disgelo in terreni normalconsolidati producano significanti e irreversibili cedimenti accompagnati dalla diminuzione del contenuto d'acqua.



**Figura 27:** tempo-altezza, tempo-temperatura primo ciclo gelo-disgelo per  $\sigma'_{vp}=40$  kPa

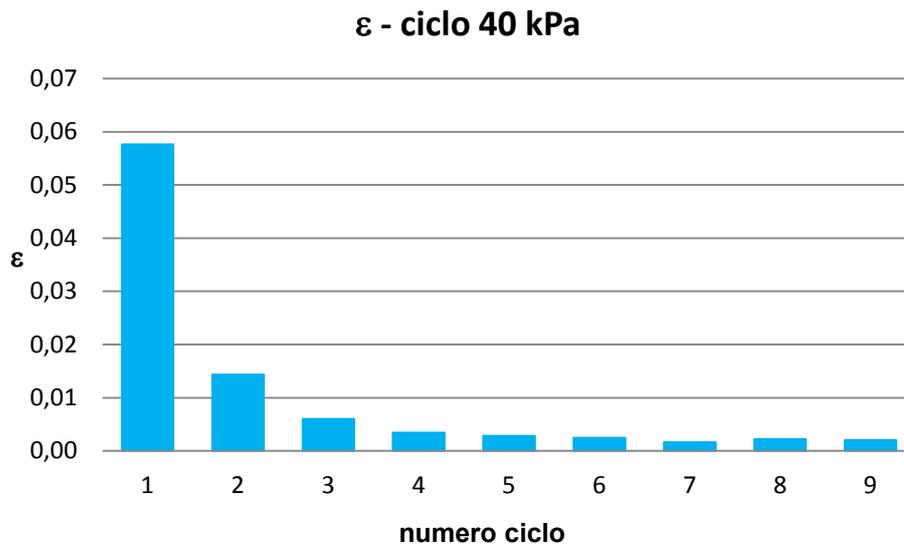
Il processo che sta alla base di questo fenomeno viene descritto dal punto di vista fisico da Dalai Dashjamts e Jamts Altantsetseg (2011). Il processo di congelamento di un terreno argilloso inizia con il congelamento dell'acqua interstiziale, che essendo libera è subito disponibile al congelamento. Le particelle di ghiaccio che si formano nei pori, dette lenti, agiscono da centri di nucleazione attirando altre molecole di acqua. Le particelle di ghiaccio infatti hanno una forte energia termica di superficie che aumenta al diminuire della temperatura. Si instaura quindi una sorta di migrazione di molecole di acqua che si liberano dai legami elettrici e migrano verso i centri di nucleazione. Questo processo fa sì che le lenti

si ingrandiscono sempre di più aumentando di volume mentre i granuli di disidratino. Il processo di congelamento continua fino a quando la forza di attrazione termica eguaglia quella di attrazione negativa esercitata dai granuli argillosi. Al diminuire dello spessore del film d'acqua aumenta la forza necessaria a "strappare" le molecole d'acqua. Quindi minore è la temperatura minore sarà lo spessore del film e quindi minore sarà l'acqua presente alla fine del processo di congelamento. Il processo di congelamento quindi, trasforma acqua adsorbita in acqua interstiziale. Quando il terreno verrà scongelato parte dell'acqua interstiziale viene drenata e la disposizione dello scheletro solido si modifica mettendo quindi in atto un processo di consolidazione.

Il processo di consolidazione non si esaurisce completamente durante il primo ciclo di gelo-disgelo ma prosegue nei successivi cicli. Il numero di cicli di gelo-disgelo necessari a completare il processo di consolidazione varia da terreno a terreno ma secondo Konrad (1989) si attesta tra 7 e 10. Le caratteristiche che influenzano maggiormente il numero di cicli necessari alla completa consolidazione sono la granulometria e la composizione chimica, il contenuto d'acqua iniziale, il grado di compattazione e la permeabilità. Maggiore è la percentuale di argille "attive", maggiore è la forza di attrazione che i granuli argillosi esercitano sulle molecole di acqua. Allo stesso tempo più fine è la granulometria più basso è il coefficiente di permeabilità. Questi due fattori determinano un aumento del numero di cicli termici per terreni con forte componente argillosa rispetto a terreni di matrice più siltosa per raggiungere il medesimo grado di sovraconsolidazione termica. Inoltre la presenza di sali nel fluido interstiziale aumenta la forza di legame elettrico che contrasta il congelamento determinando un diverso comportamento a congelamento.

### **8.2.1 Analisi dei cicli di gelo-disgelo su provino con $\sigma_v=40$ KPa**

Cicli di gelo-disgelo determinano una diminuzione del volume del terreno e una diminuzione del contenuto d'acqua. La componente di cedimento Come si può notare in **Figura 28** e in **Tabella 6**, nel terreno analizzato i cedimenti relativi ad ogni ciclo diminuiscono con il numero dei cicli (fatta eccezione per il settimo ciclo che presenta una compressione relativa inferiore a quella dell'ottavo e del nono ciclo). I primi tre cicli determinano circa l'84% del cedimento totale. I risultati confermano quanto riportato da Konrad (1989), che dimostra come il primo ciclo sia il più efficace per la grande quantità di acqua interstiziale presente. Un'attenta analisi dei risultati suggerisce che la piccola variazione del valore del settimo ciclo si mantiene all'interno della variabilità della misura.

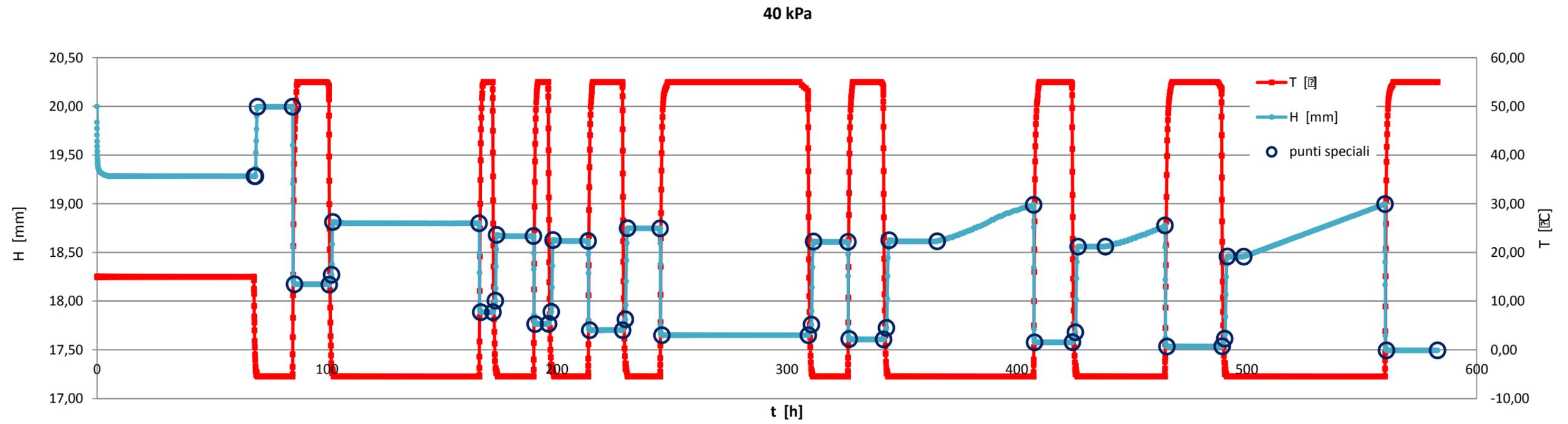


**Figura 28:** deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per  $\sigma'_{vp} = 40$  kPa

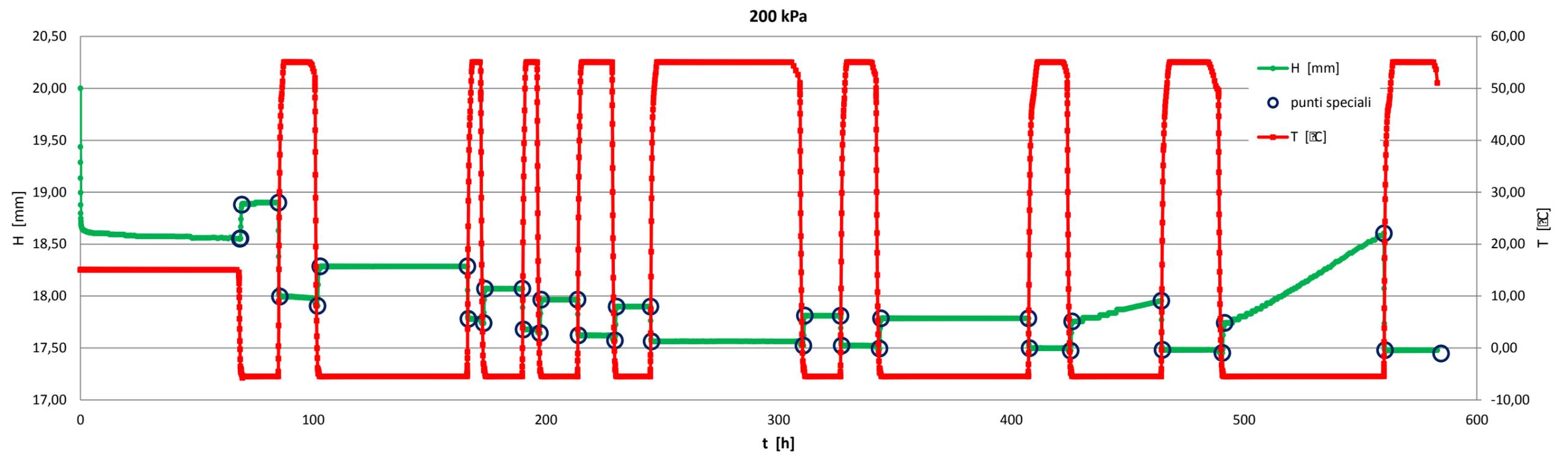
Cicli	$\Delta h$ [mm]	$\varepsilon$	$\varepsilon_i/\varepsilon_{tot}$
1	1,112	5,76	60,4%
2	0,287	1,58	16,6%
3	0,120	0,67	7,0%
4	0,062	0,35	3,7%
5	0,052	0,29	3,1%
6	0,045	0,25	2,7%
7	0,031	0,17	1,8%
8	0,042	0,24	2,5%
9	0,039	0,22	2,3%
			100%

**Tabella 6:** cedimenti e deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per  $\sigma'_{vp}=40$  kPa

In **Figura 29** è riportato il grafico che descrive l'intero processo di test dei 9 cicli di gelo e disgelo. Si è cercato di ottenere cicli di durata simile compatibilmente con le tempistiche di laboratorio, con minor tempo a temperatura di 55 °C e più lungo periodo a -5,5 °C (essendo la fase di gelo soggetta a variazioni anche a medio-lungo periodo, come verrà spiegato in seguito).



*Figura 28: Cicli di gelo-disgelo a 40 kPa per prova edometrica*



*Figura 29: Cicli di gelo-disgelo a 200 kPa per prova edometrica*

Come si può notare nel grafico, il settimo, ottavo e nono ciclo presentano un nuovo comportamento a congelamento. Inizialmente, come per i cicli precedenti, rigonfiano pressochè istantaneamente fino ad una altezza di “fine congelamento” e mantengono tale altezza. Al contrario dei cicli precedenti però, dopo alcune ore (che variano da ciclo a ciclo) il provino rigonfia nuovamente con un andamento monotono linearmente crescente.

n ciclo	$t_{start}$ [h]	$\Delta h_{swelling}$ [mm]	$t_{swelling}$ [h]	$v_{swelling}$ [mm/h]
7	19	0,376	42	9,0E-03
8	12	0,222	25	8,7E-03
9	7	0,076	9	8,8E-03

*Tabella 7: tempi e velocità di swelling dovuto a gelo*

In **Tabella 7** vengono riportate le principali caratteristiche che descrivono l'andamento di quella che verrà chiamata la “seconda fase di rigonfiamento”. Con  $t_{start}$  si indica il tempo (in ore) tra la fine del primo rigonfiamento (con andamento pressoché verticale) e inizio della seconda fase di rigonfiamento. Con  $\Delta h_{swelling}$  viene indicata la variazione dell'altezza del provino dall'inizio alla fine della seconda fase di rigonfiamento. Con  $t_{swelling}$  la durata (in ore) della seconda fase di rigonfiamento e con  $v_{swelling}$  il rapporto tra  $\Delta h_{swelling}$  e  $t_{swelling}$ , ovvero la velocità di rigonfiamento (e quindi la pendenza della retta di rigonfiamento)

Si nota che il tempo che passa tra la fine della prima fase di rigonfiamento e la seconda diminuisce tra il settimo e l'ottavo ciclo e tra l'ottavo e il nono ciclo. Si nota anche che la velocità di rigonfiamento rimane pressoché costante. Tale processo sarebbe dovuto alla presenza di sali nel terreno. La presenza di sale nell'acqua disciolta, aumenta la forza termica necessaria per il congelamento dell'acqua legata elettricamente ai sali e comporta un ghiacciamento progressivo dell'acqua interstiziale piuttosto che un ghiacciamento pressoché immediato come avviene nella prima fase di rigonfiamento. Nei primi cicli il fenomeno non si presenterebbe poiché la salinità dell'acqua è talmente bassa da non influire sul punto di gelo. All'aumentare del numero dei cicli, parte dell'acqua proveniente dallo scongelamento delle lenti di ghiaccio, dolce e priva di sali, drena, aumentando quindi il grado di salinità del terreno fino a raggiungere un grado di salinità critico. Raggiunto tale grado di salinità l'energia termica necessaria a “strappare” la molecola di acqua dal sale a cui è legata aumenterebbe. Raggiunto questo stato le fasi del processo di congelamento sarebbero quindi tre:

1. L'acqua libera dolce congela pressoché istantaneamente con la diminuzione della temperatura sotto lo zero;
2. Si mantiene per un periodo una situazione di equilibrio termico in cui non c'è energia termica sufficiente per “strappare” molecole di acqua legate a sali;

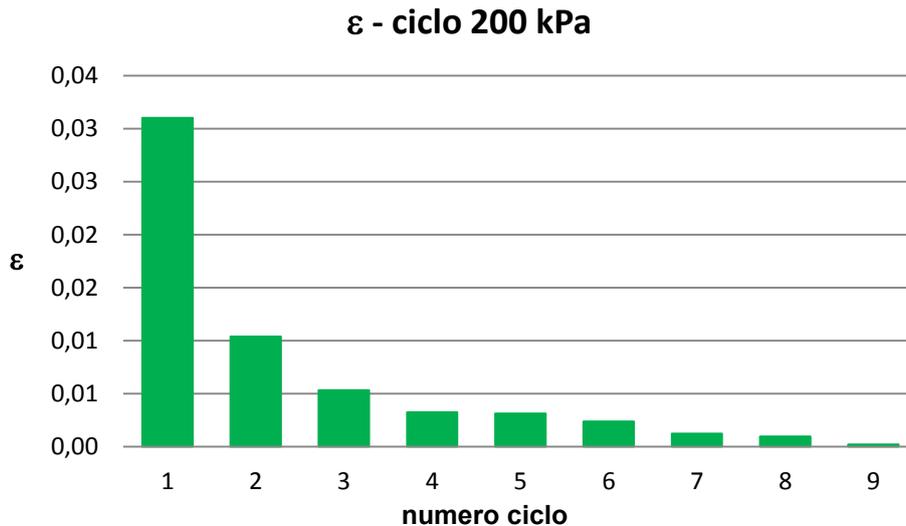
3. L'energia termica raggiunge il valore necessario per rompere il legame chimico tra le molecole d'acqua e quelle di sale e ghiacciando le prime.

La spiegazione per cui la fase 3 viene raggiunta in tempo decrescente tra un ciclo e quello successivo risiederebbe nel fatto che le molecole di acqua "strappate" dai sali, una volta scongelato il terreno, si ri-legherebbero ai sali con legami più deboli. Cioè, una volta rotto il legame attraverso l'energia termica, la molecola di acqua "migra" verso le lenti di ghiaccio. Quando poi il terreno viene scongelato parte dell'acqua strappata dal film e resa libera drena, un'altra parte rimane all'interno dei pori. Parte dell'acqua che non è drenata viene adsorbita dai Sali, il legame che si forma però è di natura più debole rispetto a quello che precedentemente la legava al sale. Quando il terreno viene ghiacciato nuovamente è quindi sufficiente un'energia termica minore per "strappare" le molecole di acqua di film determinando perciò una fase 2 più corta.

Per quanto riguarda il contenuto d'acqua del provino, inizialmente pari a  $W_{IN} = 33,6\%$ , dopo i cicli di gelo-disgelo è  $W_{FIN} = 21,4\%$ .

### 8.2.2 Analisi dei cicli di gelo-disgelo su provino con $\sigma_v=200$ kPa

I risultati dei cedimenti del provino soggetto a cicli di gelo-disgelo con una pressione assiale di 200 kPa sono in linea a quelli riscontrati nell'analisi del provino precedente. Più precisamente, notiamo l'analogia con il provino precedente nelle percentuali di consolidazione dovute al processo termico, vedi **Figura 31** e **Tabella 8**. Anche in questo caso la percentuale è molto alta pari a circa l'81% del cedimento termico totale nei 9 cicli.



**Figura 31:** deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per  $\sigma'_{vp}=200$  kPa

cicli	$\Delta h$	$\varepsilon$	$\varepsilon_i/\varepsilon_{tot}$
1	0,576	3,10	52,5%
2	0,196	1,09	18,5%
3	0,101	0,57	9,6%
4	0,0584	0,33	5,6%
5	0,0565	0,32	5,4%
6	0,0424	0,24	4,1%
7	0,0228	0,13	2,2%
8	0,0174	0,10	1,7%
9	0,0039	0,02	0,4%
			100%

**Tabella 8:** cedimenti e deformazioni per ciclo di gelo-disgelo per  $\sigma'_{vp}=200$  kPa

In **Figura 30** è riportato il grafico che descrive l'intero processo di test dei 9 cicli di gelo e disgelo. Nel grafico compaiono due linee, in rosso quella relativa alla temperatura mentre quella verde descrive l'altezza del provino.

L'ottavo e il nono ciclo presentano, come nel caso del provino soggetto al processo di gelo-disgelo con carico assiale di 40 kPa, un comportamento a congelamento diverso rispetto a quello registrato nei cicli precedenti. In questo caso il provino, dopo un primo pressoché istantaneo rigonfiamento, continua a rigonfiare con una velocità che aumenta tra l'ottavo e il nono ciclo, come si può notare in **Tabella 9**. Questa variazione nella velocità di rigonfiamento potrebbe avere le stesse ragioni che determinano la riduzione della durata della "fase 2" descritta in *Analisi dei cicli di gelo-disgelo su provino con  $\sigma_v=40$  KP*.

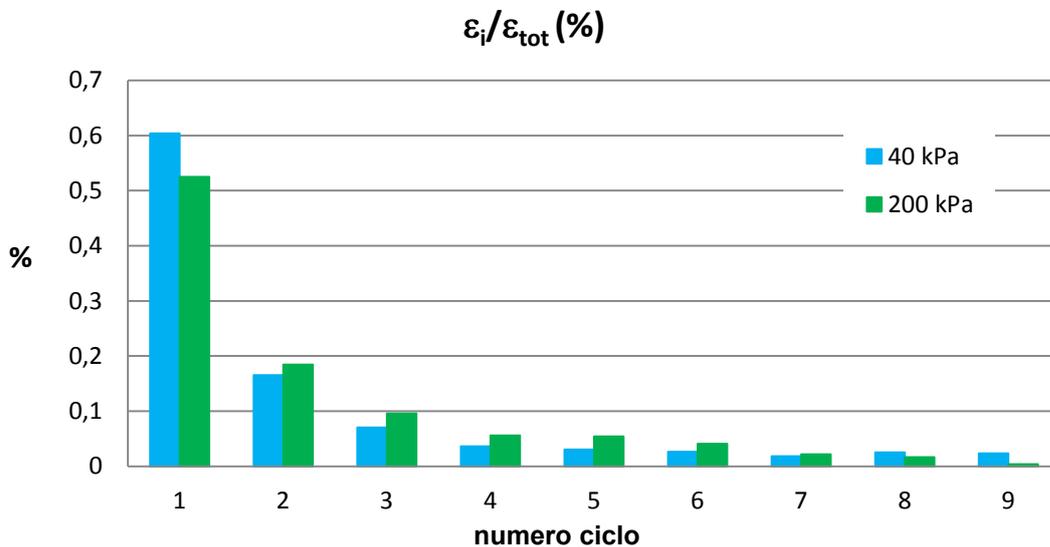
n ciclo	t <sub>start</sub> [h]	$\Delta h_{\text{swelling}}$ [mm]	t <sub>swelling</sub> [h]	v <sub>swelling</sub> [mm/h]]
8	0	0,138	22	6,3E-03
9	0	0,861	68	1,3E-02

**Tabella 9:** Tempi e velocità di swelling

Per quanto riguarda il contenuto d'acqua del provino, inizialmente pari a  $W_{IN} = 30,4\%$ , dopo i cicli di gelo-disgelo è  $W_{FIN} = 21,1\%$ , di poco inferiore quindi, al contenuto d'acqua finale del provino "frozen" a 40 kPa.

### 8.2.3 Confronto tra gli Effetti di Cicli di Gelo-disgelo nei due Provini

Come si può notare in **Figura 32** e in **Tabella 10**, i valori percentuali dei cedimenti relativi ai vari cicli sono simili.

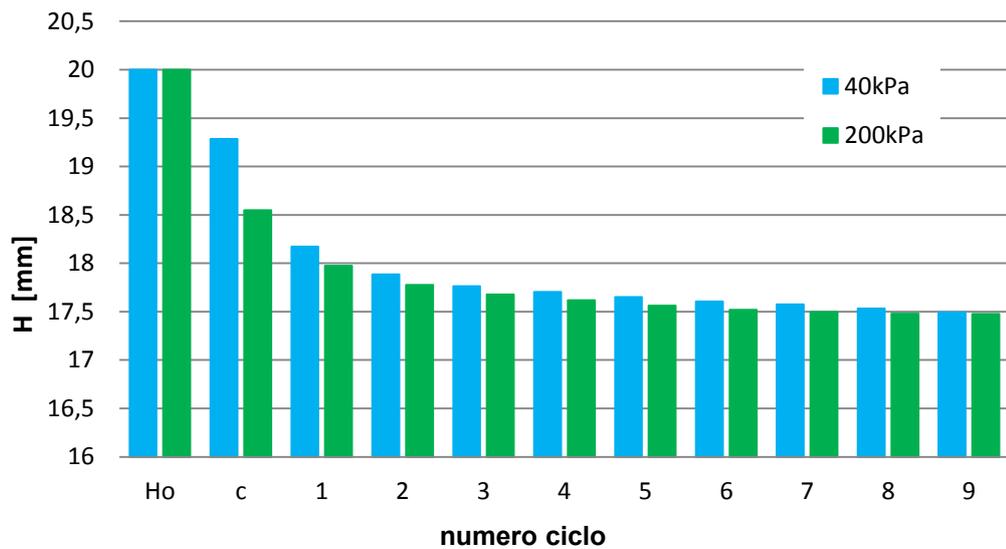


**Figura 32:** confronto percentuali di deformazione per ciclo.

cicli	$\varepsilon_i/\varepsilon_{tot}$	
	40 kPa	200 kPa
1	60,4%	52,5%
2	16,5%	18,5%
3	7,0%	9,6%
4	3,6%	5,6%
5	3,1%	5,4%
6	2,7%	4,1%
7	1,8%	2,2%
8	2,5%	1,7%
9	2,3%	0,4%

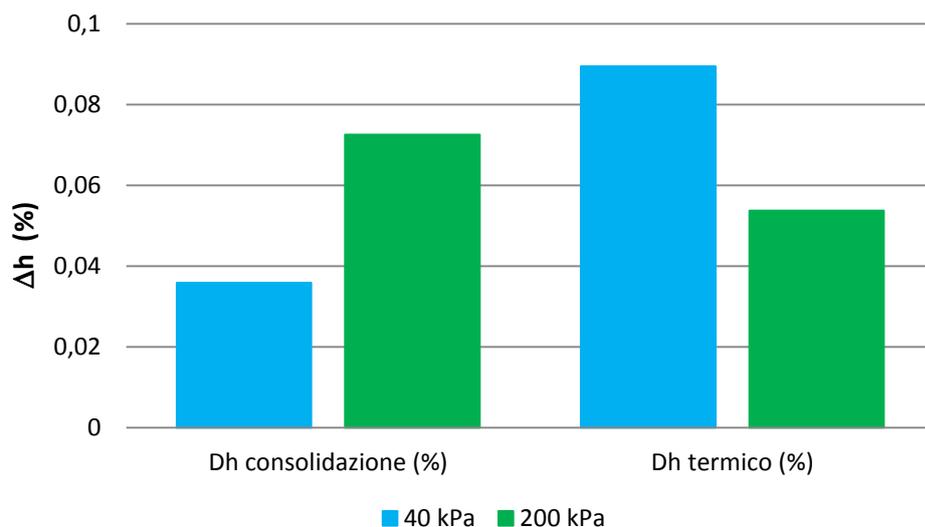
**Tabella 10:** percentuali di deformazione per ciclo.

L'andamento delle altezze dei due provini sono graficate in **Figura 33** in cui si può notare come, in seguito alla consolidazione da carico assiale, la differenza tra i due provini fosse massima. Tale differenza diminuisce progressivamente ad ogni ciclo di gelo-disgelo fino a quasi azzerarsi alla fine del IX ciclo.



**Figura 33:** Altezza provini dopo ogni ciclo

Analizzando le percentuali di compattazione dovute a consolidazione e a compattazione termica si nota come siano tra loro inversamente proporzionali (vedi **Figura 34** e **Tabella 11**). Cioè maggiore è la compattazione dovuta a consolidazione da carico minore sarà la compattazione dovuta a cicli termici perché minore è l'indice dei vuoti. Come descritto precedentemente il processo di consolidazione termica si basa su indice dei vuoti e disponibilità di acqua, quindi tanto minore sono questi ultimi, tanto minore è la consolidazione indotta dai cicli di gelo-disgelo.



**Figura 34:** Percentuale di variazione dell'altezza dei provini per consolidazione da carico e termica

	40 kPa	200 kPa
<b>Dh consolidazione (%)</b>	3,6%	7,3%
<b>Dh termico (%)</b>	8,9%	5,4%

**Tabella 11:** Percentuale di variazione dell'altezza per consolidazione da carico e termica (calcolata rispetto all'altezza iniziale del provino)

Secondo Jilin Qi, Wei Ma e Chunxia Song (2007) esiste un  $\gamma_d$  critico, ovvero una densità critica (e quindi un grado di compattazione) oltre il quale cicli di gelo-disgelo hanno un effetto opposto alla compattazione, determinando una diminuzione del peso specifico e un aumento di volume del terreno: “..per i provini con moderato peso secco netto, il volume del provino diminuisce dopo cicli di gelo-disgelo, cioè i cicli determinano una compattazione del provino, mentre per provini con elevato peso secco netto, cicli di gelo-disgelo determinano una diminuzione della densità del terreno.” Questo processo è dovuto all'effetto disgregante del processo di gelo: l'acqua ghiacciando cambia la struttura reticolare dello scheletro solido che è molto addensata, quando successivamente il terreno disgela, le particelle solide si ridispongono secondo uno schema meno addensato. Il processo è molto simile al processo che determina la c.d. dilatanza a taglio per terreni fortemente consistenti.

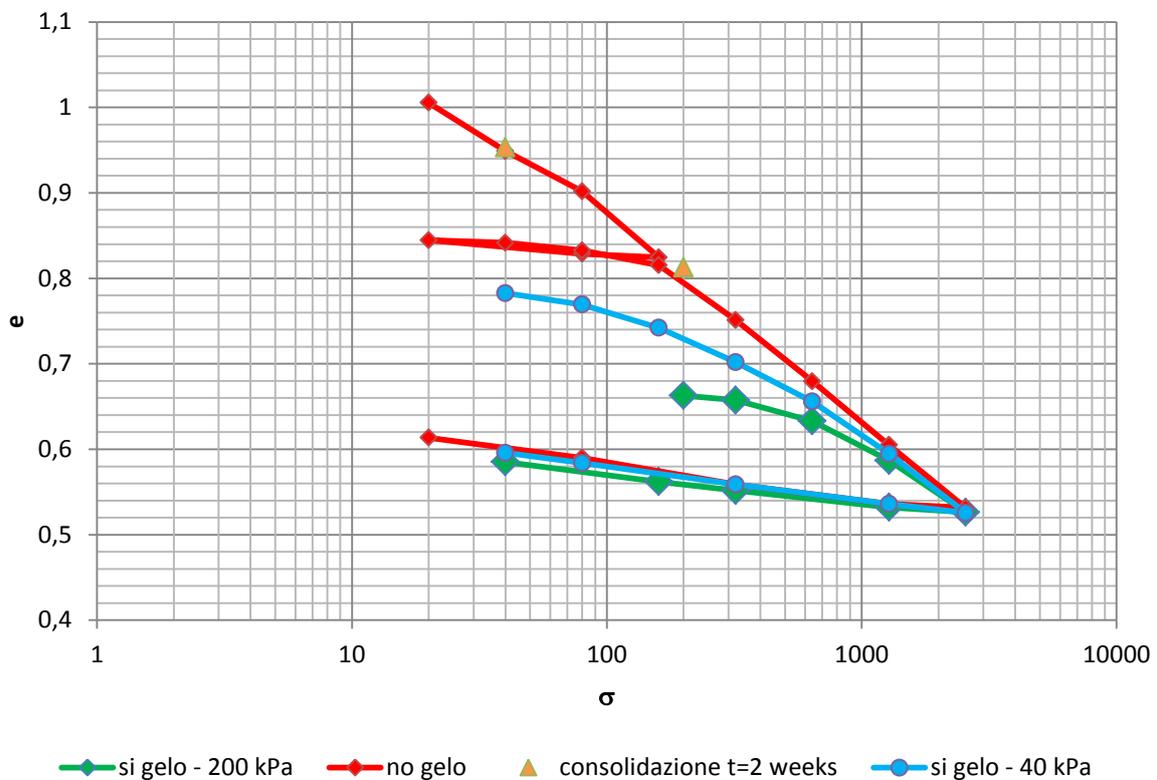
Un'altra differenza tra il comportamento dei due provini è riscontrabile negli ultimi cicli di gelo. Mentre nel primo provino (soggetto a gelo-disgelo con una pressione assiale di 40 kPa) esiste una “fase 2” e la pendenza di rigonfiamento nella “fase 3” è costante (vedi *Analisi dei cicli di gelo-disgelo su provino con  $\sigma_v=40$  KP*) nel secondo provino (soggetto a gelo-disgelo con una pressione assiale pari a 200 kPa) non esiste la “fase 2” ed il rigonfiamento nella “fase 3” aumenta di velocità tra l'ottavo e il nono ciclo. La variazione nella velocità di rigonfiamento nella “fase 3” del secondo provino potrebbe avere le stesse ragioni che determinano la riduzione della durata della “fase 2” nel primo provino.

Se si mettono a confronto i due provini si nota come il provino soggetto a 40 kPa di carico assiale abbia la prima “seconda fase di rigonfiamento” durante il congelamento nel settimo ciclo, mentre il provino con carico assiale pari a 200 kPa ha la prima “seconda fase di rigonfiamento” nel congelamento dell'ottavo ciclo. La discrepanza di un ciclo potrebbe essere determinata da una maggiore compattazione e quindi da una maggiore richiesta di energia termica per “strappare” le molecole di acqua di film. La tesi sembra trovare conferma anche nella velocità di rigonfiamento della seconda fase durante l'ottavo ciclo dei due provini. Infatti la velocità di rigonfiamento del provino con minor carico assiale (40 kPa), pari a  $8,7 \cdot 10^{-3}$  mm/h, è maggiore di  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mm/h, pari alla velocità di rigonfiamento del provino con maggior carico assiale (200 kPa).

### 8.3 Prova Edometrica

#### 8.3.1 Indici di compressione, ricomprensione e rigonfiamento e OCR.

I risultati della prova edometrica confermano un'importante azione di consolidazione dovuta a cicli di gelo e disgelo. In **Figura 35** sono riportati valori puntuali degli step edometrici. In rosso i valori edometrici per il terreno non soggetto a cicli di gelo-disgelo, in blu i valori per il terreno soggetto a cicli di gelo-disgelo con carico assiale di 40 kPa, in verde i valori per il terreno soggetto a cicli di gelo-disgelo con carico assiale di 200 kPa e in giallo i due valori dati da una consolidazione a carico costante (40 e 200 kPa) per un periodo di due settimane. La prova edometrica a carico costante per 2 settimane è stata eseguita per separare la componente di consolidazione data da cicli di gelo-disgelo dalla componente di consolidazione per creep. Il tempo di consolidazione (2 settimane) è pari al tempo necessario ad eseguire 9 cicli di gelo-disgelo. Come si può notare dal grafico la componente di consolidazione per creep a due settimane è ininfluente ai fini della nostra analisi. Si può considerare, senza errore, che la consolidazione sia interamente dovuta ai cicli di gelo-disgelo.



**Figura 35:** Curve edometriche dei tre provini.

Essendo il terreno pre-consolidato a 40 kPa e per cui non sovraconsolidato, la retta di carico del provino non soggetto a cicli di gelo-disgelo ci fornisce fin dai primi step il valore dell'indice di compressione  $C_c$ . Al contrario l'effetto di consolidazione dei cicli di gelo-disgelo sugli altri due provini determina una retta di carico meno inclinata, come se i provini fossero sovraconsolidati, il valore della pendenza della retta ci fornisce il valore dell'indice di compressione  $C_R$ . In **Tabella 12** sono riportati i valori dell'indice dei vuoti in relazione agli step di carico:

passo	$\sigma$ kPa	no gelo	gelo 40 kPa	gelo 200 kPa
		e		
1	20	1,01	-	-
2	40	0,95	0,78	-
3	80	0,90	0,77	-
4	160	0,82	0,74	-
5	80	0,83	-	-
6	20	0,84	-	-
7	40	0,84	-	-
8	80	0,83	-	-
9	160	0,82	-	-
10	200	-	-	0,66
11	320	0,75	0,70	0,66
12	640	0,68	0,66	0,63
13	1280	0,60	0,59	0,59
14	2560	0,53	0,53	0,53
15	1280	0,54	0,54	0,53
16	320	0,56	0,56	0,55
17	160	-	-	0,56
18	80	0,59	0,58	-
19	40	-	-	0,59
20	20	0,61	0,60	-

**Tabella 12:** Indice dei vuoti e carico assiale dei tre provini

Come si può notare l'indice dei vuoti dei tre provini è molto diverso per i primi step di carico e diventa uguale solo per carichi molto alti. Per il calcolo della tensione di consolidazione a cui corrisponderebbe lo stato dei provini soggetti a cicli di gelo-disgelo è stato applicato il metodo di Schmertmann.

Per il provino soggetto a cicli di gelo-disgelo a 40 kPa

1. Si è calcolato l'indice di ri-compressione posto pari alla media aritmetica tra gli indici di rigonfiamento dei singoli gradini di scarico (passi 7-11), in **Tabella 13**:

passo	sigma	log(sigma)	e	Cr
	kPa	kPa		
1	40	1,602	0,783	
2	80	1,903	0,769	
3	160	2,204	0,742	
4	320	2,505	0,702	
5	640	2,806	0,656	
6	1280	3,107	0,595	
7	2560	3,408	0,526	
8	1280	3,107	0,536	0,034
9	320	2,505	0,559	0,038
10	80	1,903	0,584	0,041
11	40	1,602	0,596	0,040
				<b>0,038</b>

**Tabella 13:** Indice di rigonfiamento per provino soggetto a gelo-disgelo con carico assiale di 40 kPa

2. Si è tracciata la retta con una pendenza pari all'indice di rigonfiamento passante per il punto caratterizzato dall'indice dei vuoti iniziale  $e_0$  e la pressione geostatica  $\sigma'_v$ . Con  $e_0$  si è considerato l'indice dei vuoti del provino alla fine dei cicli di gelo-disgelo:

$$e_0 = 0,794$$

$$\sigma'_{vg} = 40 \text{ kPa}$$

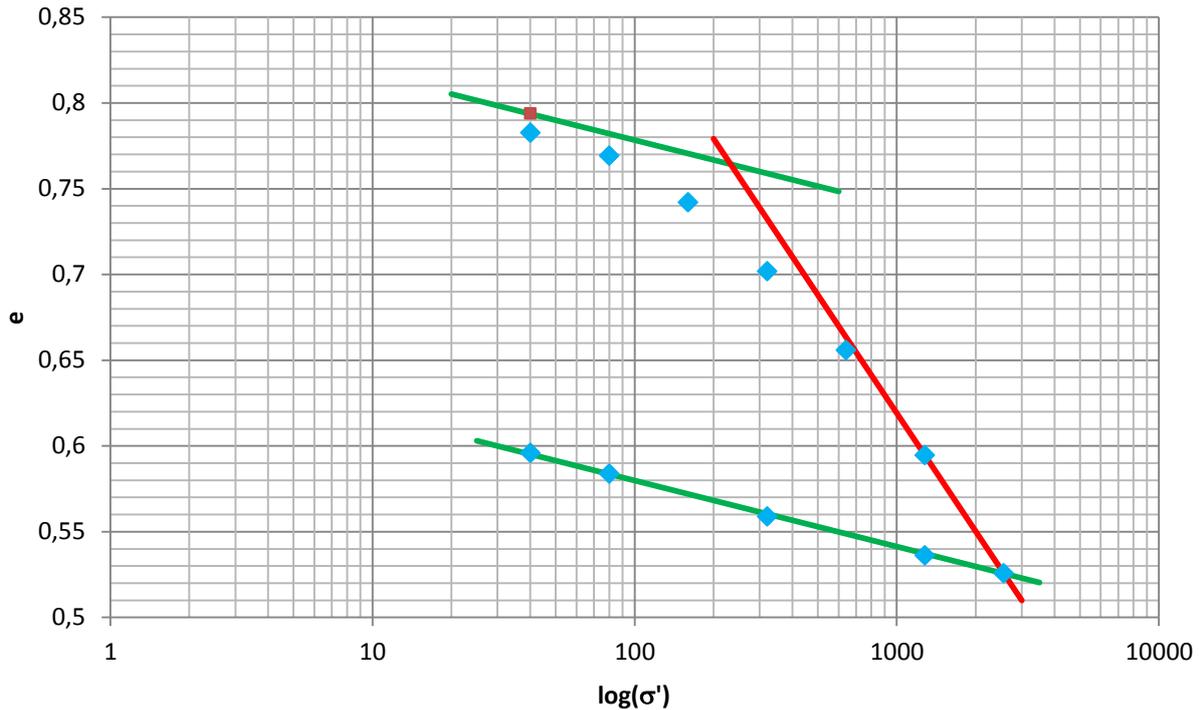
$$e = -0,038 \cdot \log(\sigma'_v) + 0,855$$

3. E' stata interpolata la retta di compressione tra i valori di  $\sigma'_v$  pari a 1280 kPa e 2560 kPa ottenendo la seguente retta:

$$e = -0,229 \cdot \log(\sigma'_v) + 1,306$$

4. Si sono messe a sistema le due rette ottenendo il punto la cui ascissa ci da il valore di consolidazione termica  $\sigma'_{vpt}$ , vedi **Figura 36**:

$$\sigma'_{vpt} \cong 230 \text{ kPa}$$



**Figura 36:** Curva edometrica del provino ghiacciato a 40 kPa

Considerando la pressione di consolidazione a cui è stato soggetto il provino durante i cicli di gelo-disgelo (pari a 40 kPa) si ottiene un OCR pari a:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vpt}}{\sigma'_{v0}} = \frac{230}{40} = 5,75$$

Nel caso del terreno analizzato consolidato a 40 kPa i cicli di gelo-disgelo determinano una forte consolidazione che porta un OCR molto elevato. Si è visto che facendo una stima degli errori possibili che affettano la misura dei valori si ottengono comunque valori elevati. Si è ad esempio interpolato la retta di compressione tra i valori  $\sigma'_v$  pari a 640 kPa e 1280 kPa (è la retta con minor pendenza tra tutte le rette di compressione interpolate tra i valori di  $\sigma'_v$  pari a 640, 1280 e 2560 kPa) ottenendo un OCR pari a 4,5. Se invece si utilizza la retta di compressione passante per il punto con  $\sigma'_v = 2560$  kPa e con  $C_c$  pari a quello calcolato per il provino non soggetto a gelo-disgelo si ottiene un OCR pari a 6,6.

Ripetendo i passi per il provino soggetto a cicli di gelo-disgelo a 200 kPa si ottiene:

1. Si è calcolato l'indice di ri-compressione posto pari alla media aritmetica tra gli indici di rigonfiamento dei singoli gradini di scarico (passi 6-9), in **Tabella 14**;

passo	sigma	log(sigma)	e	Cs
	kPa	kPa		
1	200	2,301	0,663	
2	320	2,505	0,657	
3	640	2,806	0,633	
4	1280	3,107	0,587	
5	2560	3,408	0,526	
6	1280	3,107	0,532	0,022
7	320	2,505	0,552	0,035
8	160	2,204	0,562	0,034
9	40	1,602	0,585	0,039
				<b>0,035</b>

**Tabella 14:** Indice di rigonfiamento per provino soggetto a gelo-disgelo con carico assiale di 200 kPa

2. Si è tracciata la retta con una pendenza pari all'indice di rigonfiamento passante per il punto caratterizzato dall'indice dei vuoti iniziale  $e_0$  e la pressione geostatica  $\sigma'_v$ . Con  $e_0$  si è considerato l'indice dei vuoti del provino alla fine dei cicli di gelo-disgelo:

$$e_0 = 0,690$$

$$\sigma'_{vg} = 200 \text{ kPa}$$

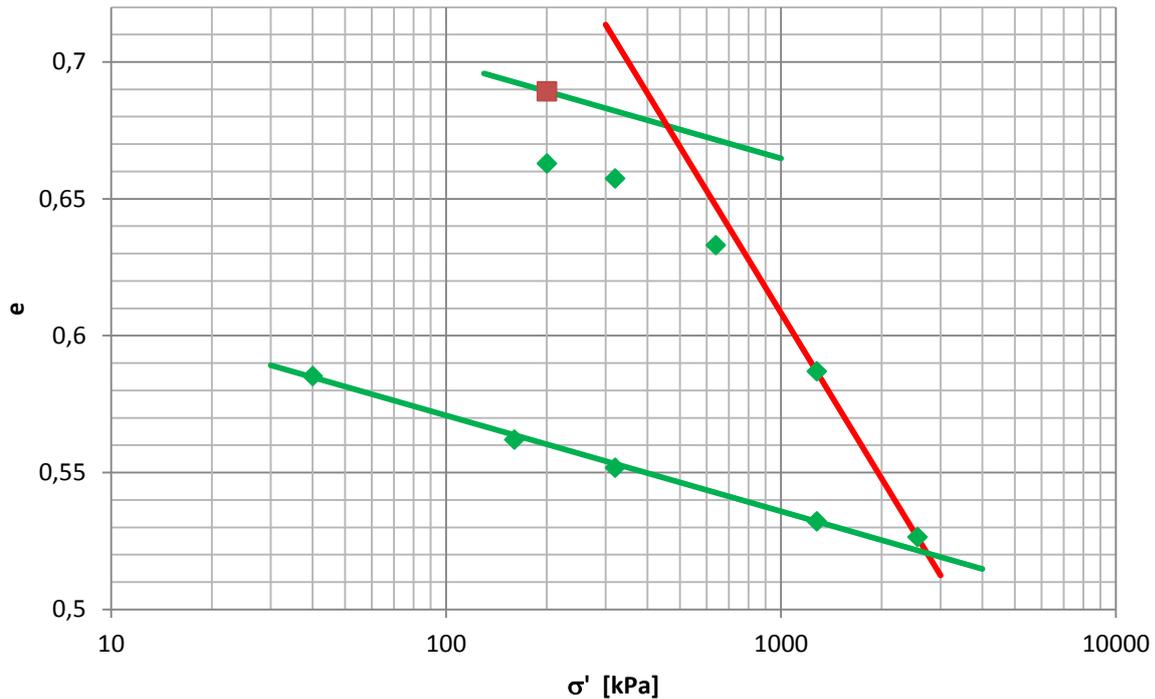
$$e = -0,035 \cdot \log(\sigma'_v) + 0,609$$

3. E' stata interpolata la retta di compressione tra i valori di  $\sigma'_v$  pari a 1280 kPa e 2560 kPa ottenendo la seguente retta:

$$e = -0,201 \cdot \log(\sigma'_v) + 1,212$$

4. Si sono messe a sistema le due rette ottenendo il punto la cui ascissa ci da il valore di consolidazione termica  $\sigma'_{vpt}$ , vedi **Figura 37**:

$$\sigma'_{vpt} \cong 359 \text{ kPa}$$



**Figura 37:** Curva edometrica del provino ghiacciato a 200 kPa

Considerando la pressione di consolidazione a cui è stato soggetto il provino durante i cicli di gelo-disgelo (pari a 200 kPa) si ottiene un OCR pari a:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vpt}}{\sigma'_{v0}} = \frac{359}{200} = 2,30$$

Come nel caso precedente si è effettuata una stima degli errori ottenendo come limite massimo un valore di OCR pari a 3,5 nel caso si utilizzi come retta di compressione la retta individuata dal terreno non soggetto a cicli di gelo-disgelo e passante per il punto con  $\sigma'_v = 2560$  kPa.

Come si può notare dal grafico gli indici  $C_c$ ,  $C_R$  e  $C_S$  non sono influenzati da cicli di gelo-disgelo. I valori sono stati stimati attraverso medie aritmetiche delle pendenze delle rette interpolate tra i vari step di carico ottenendo i valori di **Tabella 15**:

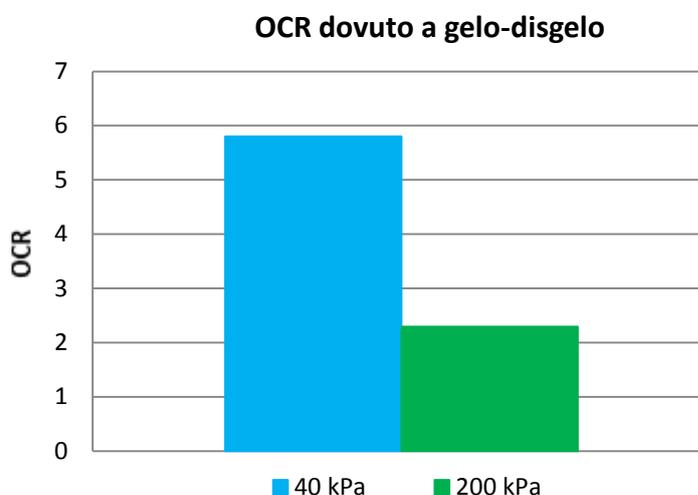
	si gelo - 40 kPa	si gelo - 200 kPa	no gelo	40 - ng	200-ng	40-200
<b>Cr</b>	0,044	0,042	0,044	-1%	3%	4%
<b>Cc</b>	0,203	0,190	0,240	15%	21%	7%
<b>Cs</b>	0,039	0,035	0,039	1%	15%	14%

**Tabella 15:** Cr, Cc, Cs dei tre provini e differenze percentuali

Analizzando i valori degli indici del provino non soggetto a gelo-disgelo e di quello soggetto ai cicli termici con carico assiale di 40 kPa si nota che gli indici di rigonfiamento hanno valore uguale a meno dell'1%, errore trascurabile. Gli indici di compressione e ricomprensione sono

invece, affetti da errori maggiori. Infatti, nel caso del provino non soggetto a gelo-disgelo gli indici sono stati interpolati tra un numero sufficiente di gradini di carico (3 nel caso di ricomprensione e 5 in quello di compressione) mentre nel caso del provino soggetto a gelo-disgelo a 40 kPa l'indice di ricomprensione è stato calcolato solo tra il primo e il secondo scalino di carico (40-80 kPa) e l'indice di compressione solo tra il penultimo e l'ultimo gradino di carico (1280-2560 kPa). Questo perché, come si può vedere dal grafico  $e\text{-log}(\sigma'_v)$  di **Figura 36** la curvatura tra lo stato di ricomprensione e quello di compressione è "morbida", simile a quella che presentano terreni non rimaneggiati e molti dei valori ottenuti dalla prova edometrica ricadono nella curvatura di raccordo.

Gli indici del provino soggetto a cicli di gelo-disgelo con 200 kPa di carico assiale hanno differenze comprese tra il 3% e il 21% rispetto agli indici del terreno non soggetto ai cicli termici. Sebbene siano errori maggiori rispetto a quelli tra gli altri due provini, sono errori che possono essere considerati derivanti dall'attività di sperimentazione, dovuti quindi a errori sia sistematici che accidentali. Guardando il grafico in **Figura 38** si può notare come il grado di sovraconsolidazione del terreno ghiacciato con carico assiale di 200 kPa sia notevolmente minore di quello del terreno ghiacciato con carico assiale di 40 kPa.

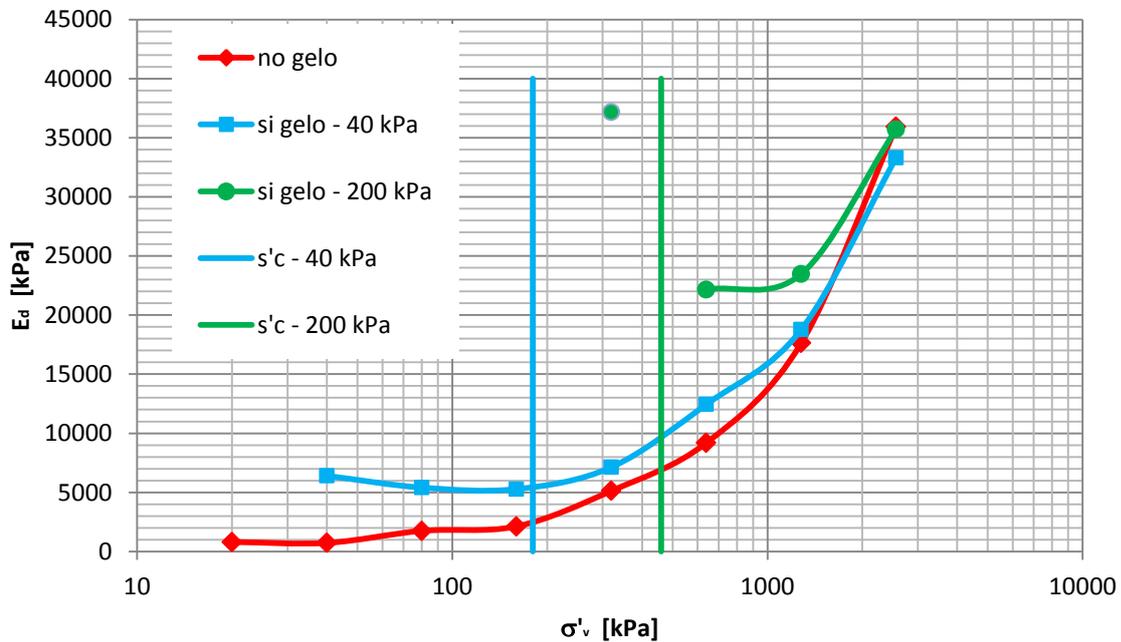


**Figura 38:** OCR dei due provini soggetti a cicli di gelo-disgelo

La diminuzione del grado di sovraconsolidazione all'aumentare del carico assiale cui il terreno è soggetto durante i cicli di gelo-disgelo è dovuta all'aumento della densità del terreno indotto dal carico assiale prima dell'inizio dei fenomeni di congelamento. L'aumento della densità, e quindi la diminuzione dell'indice dei vuoti, comporta una minore consolidazione del provino dovuta a processo termico. Si potrebbe ipotizzare quindi che esiste un valore di densità critica oltre il quale l'effetto di compattazione dato da cicli di gelo-disgelo sia nullo.

### 8.3.2 Modulo Edometrico $E_d$

Il confronto tra i valori del modulo edometrico calcolati step-by-step tra i provini “frozen” e “unfrozen” sono riportati in **Figura 39** in rosso la linea interpolante i dati del provino non soggetto a cicli, in blu quelli relativi al provino “frozen” con carico assiale di 40 kPa, in verde quelli relativi al provino “frozen” con carico assiale di 200 kPa, in verde i valori del modulo edometrico in ricarica del provino “unfrozen”. Le rette rappresentano il valore della  $\sigma$  di consolidazione dovuta all’effetto di consolidazione dei cicli di gelo-disgelo dei due provini “frozen” (blu e verde dei terreni “frozen” con carico assiale rispettivamente di 40 kPa e di 200 kPa). In **Tabella 16** sono riportati i valori del modulo edometrico dei tre provini per ogni step di carico.



**Figura 39:** Modulo edometrico dei tre provini.

	no gelo	si gelo - 40 kPa	si gelo - 200 kPa
$\sigma$	Ed		
kPa	kPa		
20	805	-	-
40	727	6402	-
80	1749	5408	-
160	2127	5279	-
320	5131	7139	37182
640	9190	12448	22156
1280	17633	18770	23477
2560	35925	33312	35710

**Tabella 16:** Modulo edometrico dei tre provini

Il grafico e i valori confermano le ipotesi di consolidazione determinata da cicli di gelo-disgelo. Come ci si aspettava la diminuzione degli indici dei vuoti e, dovuta al processo di consolidazione termico, determina, a parità di carico assiale, una minor comprimibilità e un conseguente aumento del modulo edometrico.

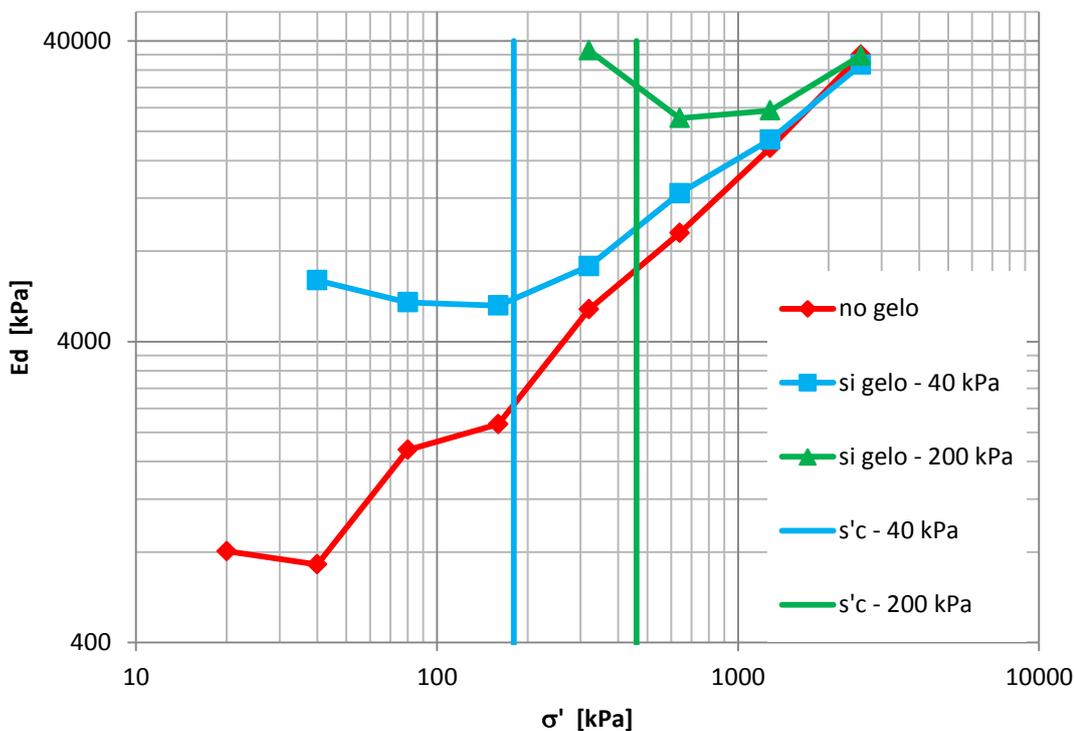
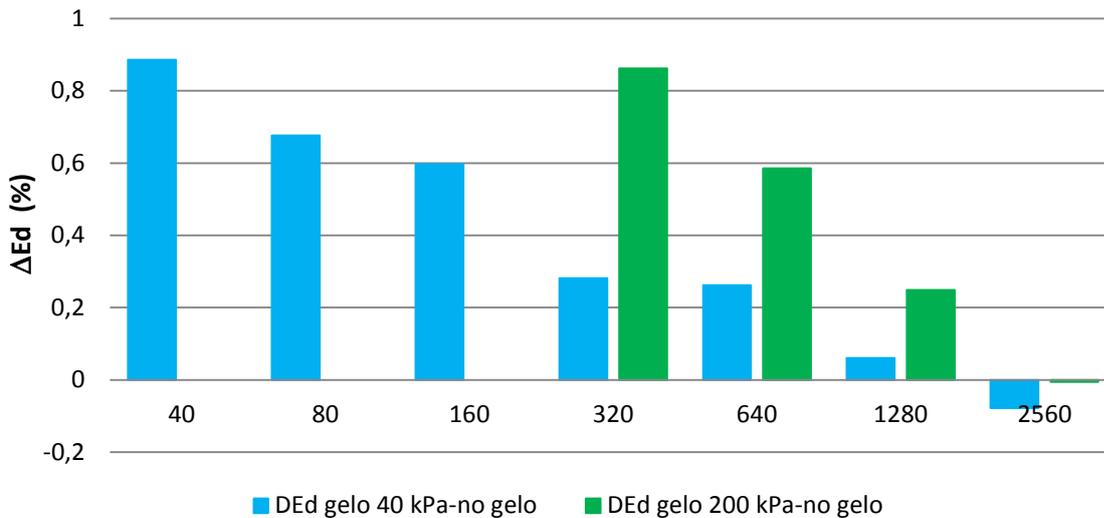


Figura 40: Ed per ogni step di carico nel grafico di Janbu

Tale effetto, come si può notare in **Tabella 17** e dal grafico in **Figura 40**, si attenua al crescere della tensione normale fino a scomparire per tensioni molto maggiori della tensione a cui era soggetto il provino durante i cicli di gelo-disgelo. Il grafico di Janbu di **Figura 41** con scala doppia logaritmica, conferma la consolidazione dei due provini "frozen". Nel grafico di Janbu infatti, una pendenza negativa della curva che interpola valori successivi del modulo edometrico al crescere del carico indica uno stato di sovraconsolidazione.

	ΔEd (%)	
	gelo 40 kPa-no gelo	gelo 200 kPa-no gelo
	kPa	kPa
<b>40</b>	89%	-
<b>80</b>	68%	-
<b>160</b>	60%	-
<b>320</b>	28%	86%
<b>640</b>	26%	59%
<b>1280</b>	6%	25%
<b>2560</b>	-8%	-1%

Tabella 17: Differenza percentuale di Ed tra i provini



**Figura 41:** Differenza percentuale di Ed tra i tre provini

Ricordando i valori di  $\sigma'_c$  per i due provini:

$\sigma'_c \cong 180$  kPa, per provino “frozen” a 40 kPa;

$\sigma'_c \cong 450$  kPa, per provino “frozen” a 200 kPa;

è interessante notare come per valori inferiori a  $\sigma'_c$  il modulo edometrico abbia andamento monotono decrescente all'aumentare del carico mentre abbia andamento monotono crescente per valori di carico assiale maggiori di  $\sigma'_c$  dato che sembrerebbe quindi confermare il valore di  $\sigma'_c$  calcolato.

Quindi riassumendo da queste prove possiamo dedurre che:

1. Cicli di gelo-disgelo producono un effetto di consolidazione termica su provini silto-argillosi;
2. La maggior parte della consolidazione termica avviene nei primi cicli di gelo-disgelo;
3. Il grado di sovraconsolidazione è proporzionale all'indice dei vuoti e, quindi, inversamente proporzionale al carico;
4. Gli indici di ricomprensione, compressione e rigonfiamento non sono influenzati da cicli di gelo-disgelo;
5. Il modulo edometrico aumenta notevolmente per tensioni minori alla tensione assiale cui era soggetto il provino nella fase di gelo-disgelo. La differenza tra il modulo edometrico di un provino unfrozen e di quello frozen si attenua al crescere della tensione assiale fino a scomparire per tensioni di molto maggiori alla tensione assiale cui era soggetto il provino nella fase di gelo-disgelo.

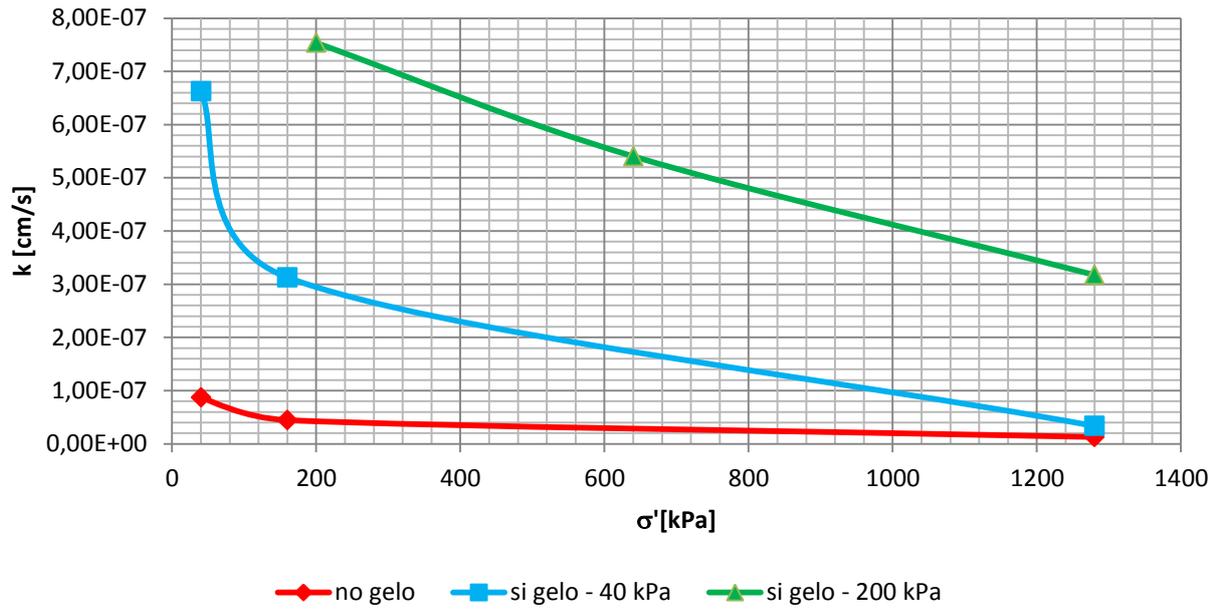
### 8.3.3 Permeabilità

Numerosi autori hanno trattato il cambio della permeabilità di un terreno in seguito a cicli di gelo-disgelo. Jinlin Qi, Pieter A. Vermeer e Giodong Cheng (2006) confermano quanto già affermato da Chamberlain and Gow (1979): “..cicli di gelo-disgelo possono determinare una compattazione accompagnata da un aumento della permeabilità. Questo risultato appare inizialmente sorprendente dato che, la compattazione è generalmente associata ad una diminuzione di permeabilità ma è confermata da numerosi studi su diversi tipi di terreno e in diverse condizioni”. Il concetto è ribadito anche da molti altri autori come Li Guoyu, Ma Wei, Zhao Shuping (2012). La permeabilità aumenta in seguito alla combinazione di tre fenomeni che avvengono contemporaneamente:

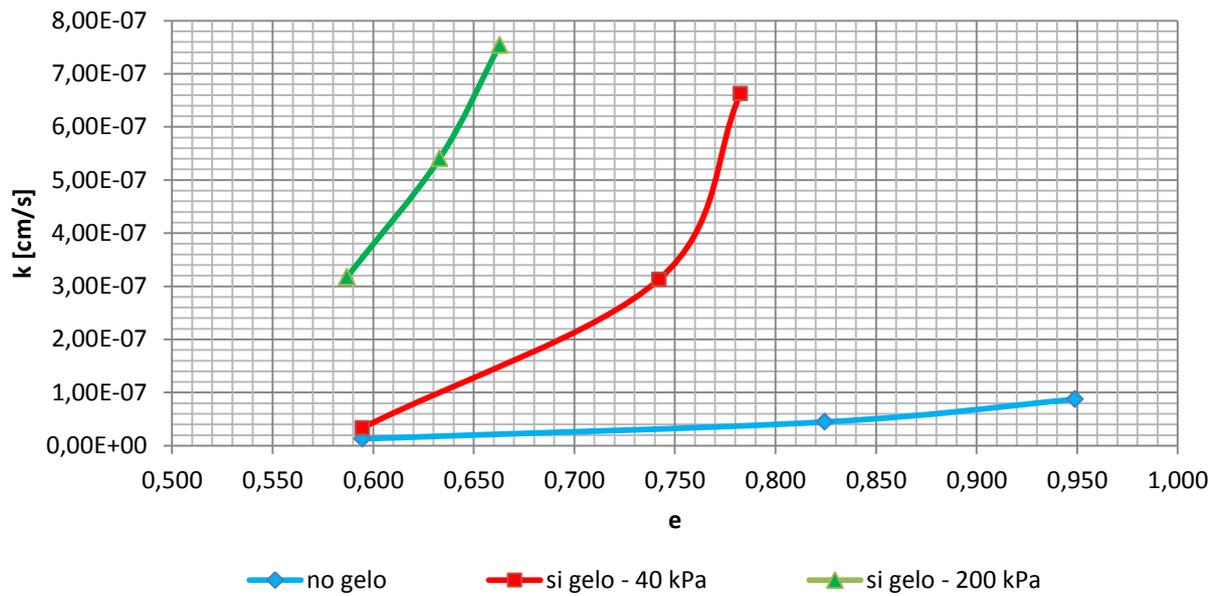
1. Cicli di gelo-disgelo producono micro-fessurazioni nel terreno che si comportano come veri e propri dreni;
2. Il disgelo del terreno lascia pori di grandi dimensioni, occupati dal ghiaccio quando il terreno era ghiacciato;

Cicli di gelo-disgelo determinano quindi un grado di addensamento medio del terreno maggiore (in effetti l'indice dei vuoti diminuisce) determinato da un numero molto minore di pori ma di maggiori dimensioni dove l'acqua presente si accumula durante il congelamento (il fenomeno di migrazione dell'acqua, descritto precedentemente, verso i centri di nucleazione) per venire poi drenata durante il decongelamento attraverso le micro-fessurazioni che fungono da dreni di interconnessione tra i pori.

Nei grafici in **Figura 42**, **Figura 43** e **Figura 44** vengono confrontate le permeabilità del provino “unfrozen” consolidato a 40 kPa, e quelle dei provini “frozen”: in rosso sono rappresentate le curve dei provini “unfrozen”, in blu quelle dei provini “frozen” con carico assiale di 40 kPa e in verde quelle dei provini “frozen” con carico assiale di 200 kPa.



**Figura 42:** Grafico carico assiale-permeabilità dei tre provini



**Figura 43:** Grafico indice dei vuoti-permeabilità dei tre provini

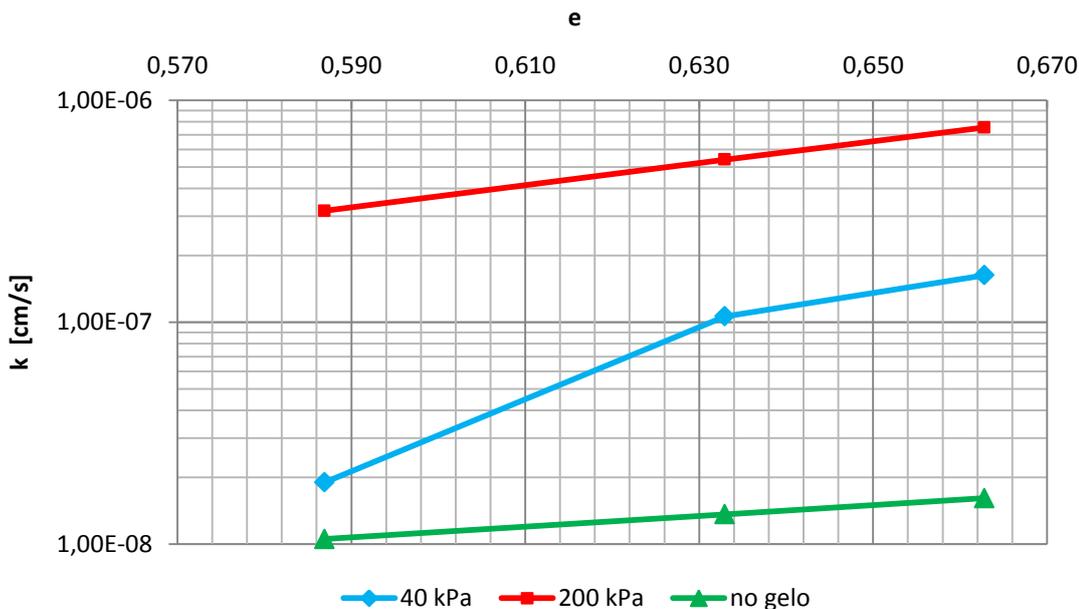


Figura 44: Grafico indice dei vuoti-permeabilità in scala logaritmica dei tre provini

carico	no gelo		si gelo – 40 kPa	
	e	k (cm/s)	e	k (cm/s)
40	0,949	8,72E-08	0,782	7,22E-07
160	0,824	4,46E-08	0,742	2,83E-07
1280	0,605	1,29E-08	0,536	2,9E-08

Tabella 18: e, k del provino “unfrozen” e di quello “frozen” con  $\sigma'_{vp}=40$  kPa

si gelo - 200 kPa		
carico	e	k (cm/s)
200	0,663	7,54E-07
640	0,633	5,40E-07
1280	0,587	3,17E-07

Tabella 19: e, k del provino “frozen” con  $\sigma'_{vp}=200$  kPa

Come si vede dai grafici di **Figura 42**, **Figura 43** e **Figura 44** e dai dati riportati in **Tabella 18** e **Tabella 19** le permeabilità dei provini “frozen” sono di molto maggiori a quella del provino “unfrozen”. La spiegazione sopra esposta trova ampio riscontro nella grande differenza tra i valori di permeabilità a parità di indice dei vuoti tra i provini: si è interpolata la curva e-k per il terreno “unfrozen” ottenendo la seguente funzione esponenziale:

$$k = 4 \cdot 10^{-10} e^{5,57 \cdot e}$$

Dove “e” base dell’esponenziale indica il numero di Eulero mentre “e” all’esponente indica l’indice dei vuoti. Inserendo i valori degli indici dei vuoti del provino “frozen” per i quali si hanno i coefficiente di permeabilità ne risultano i valori riportati in **Tabella 20**:

e	si gelo – 40 kPa	no gelo	
	k (cm/s)	Δk	
<b>0,783</b>	6,6E-07	3,1E-08	2013%
<b>0,742</b>	3,1E-07	2,5E-08	1151%
<b>0,536</b>	3,3E-08	7,9E-09	322%

**Tabella 20:** e, k e differenze percentuali del provino “frozen” a  $\sigma_{vp}=40$  kPa e di quello “unfrozen”.

E' importante notare anche come la differenza percentuale tra le permeabilità vari esponenzialmente. Nel caso di indici dei vuoti relativamente alti, vicini al valore  $e_0$ , la variazione di permeabilità è altissima (la permeabilità del provino “frozen” a 40 kPa è oltre 20 volte il valore di quella del provino “unfrozen”). La variazione percentuale decresce con il diminuire dell'indice dei vuoti.

Si è poi interpolata la curva di permeabilità del provino “frozen” e con carico assiale di 200 kPa in funzione dell'indice dei vuoti ottenendo la seguente funzione esponenziale:

$$k = 4 \cdot 10^{-10} e^{11,41 \cdot e}$$

Per ottenere un confronto tra le permeabilità dei tre provini per tre indici dei vuoti realmente “acquisiti” dai tre provini, si sono utilizzati gli indici dei vuoti del provino “frozen” con carico assiale di 200 kPa nel momento delle tre prove di permeabilità.

La permeabilità in funzione dell'indice dei vuoti del provino “frozen” a 40 kPa è ottenuto interpolando in maniera lineare il tratto tra i due indici dei vuoti minori, ottenendo la seguente retta:

$$k = 1,36 \cdot 10^{-6} \cdot e - 6,94 \cdot 10^{-7}$$

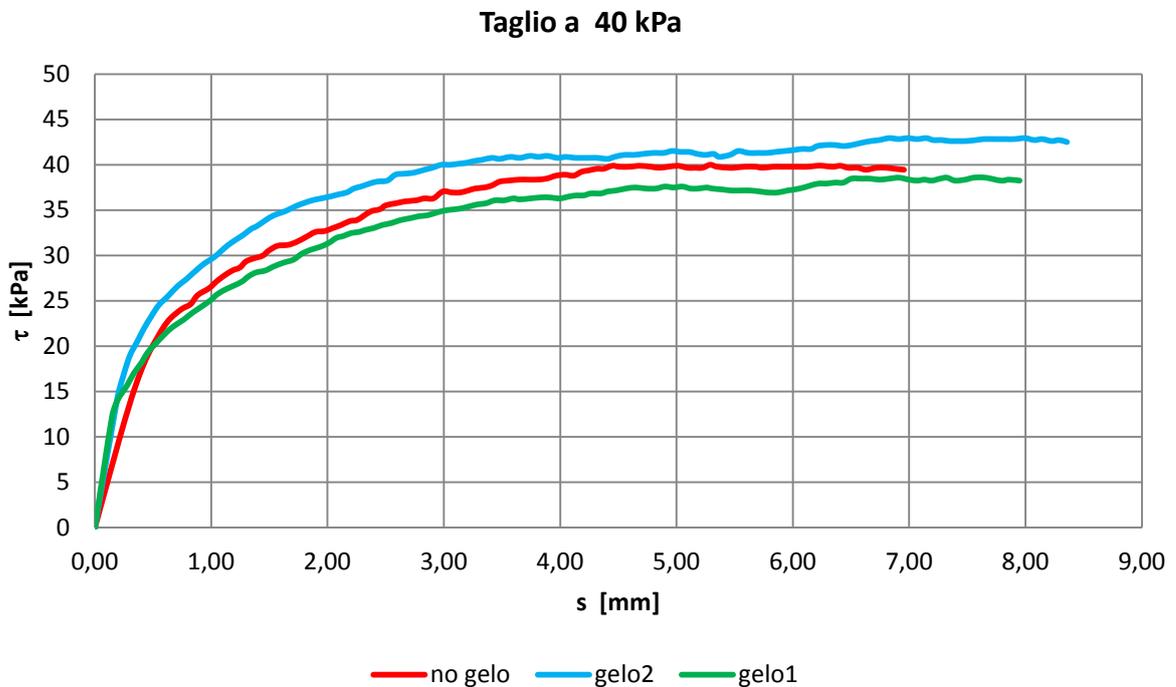
Interpolando quindi i valori delle permeabilità per il provino “frozen” con carico assiale di 40 kPa e per il provino non soggetto a cicli termici si sono trovate le permeabilità dei tre provini a parità di indice dei vuoti. Si sono quindi calcolate le differenze percentuali tra le varie permeabilità ottenendo i valori riportati in **Tabella 21**.

e	40 kPa	200 kPa	no gelo	40-200	40-no gelo	200-no gelo
	k (cm/s)			Dk		
0,663	2,05E-07	7,54E-07	1,61E-08	267%	1177%	4584%
0,633	1,65E-07	5,40E-07	1,36E-08	228%	1111%	3867%
0,587	1,03E-07	3,17E-07	1,05E-08	210%	873%	2912%

**Tabella 21:** k e differenze percentuali dei tre provini.

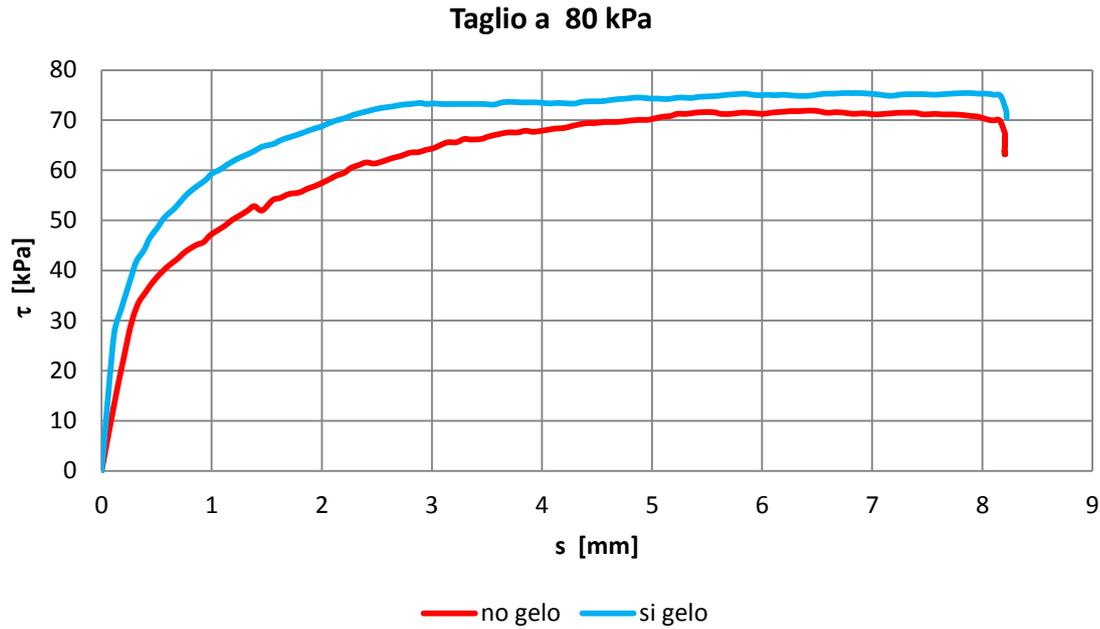
### 8.4 Prova di Taglio Diretto

Le prove di taglio diretto sono state eseguite con l'intento di determinare la massima resistenza a taglio drenata per i tre carichi assiali imposti e determinare la retta di rottura di Mohr-Coulomb. Nei grafici in **Figura 45** sono riportate le curve di deformazione-resistenza di taglio nel caso di preconsolidazione a 40 kPa. Sono state effettuate due prove di taglio diretto su provino "frozen"; il primo valore ottenuto infatti, non era in linea con i valori che ci si aspettava. Il valore di resistenza al taglio di picco del primo provino "frozen" risultava essere inferiore rispetto al valore di picco del provino "unfrozen". Nella ripetizione della prova il nuovo provino "frozen" ha fornito valori di resistenza leggermente superiori a quelli del provino "unfrozen".



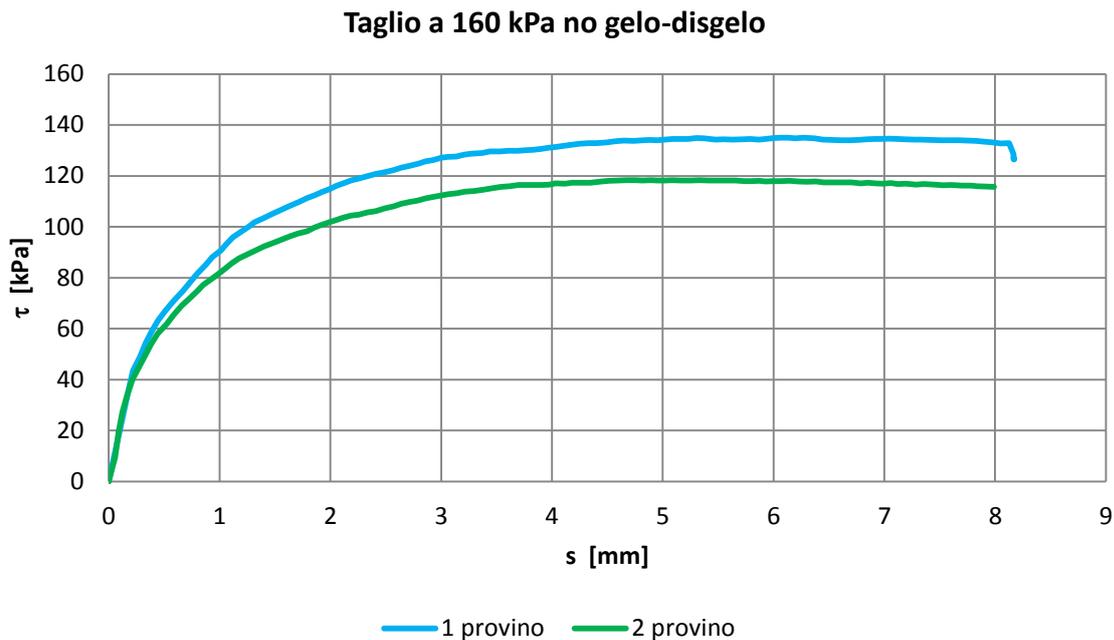
**Figura 45:** Grafico deformazione-taglio con  $\sigma'_{vp}=40$  kPa

Si è quindi effettuata la prova di taglio per i due provini con carico di 80 kPa. Come si può vedere dal grafico in **Figura 46**, anche in questo caso i valori sono molto simili.



**Figura 46:** Grafico deformazione-taglio con  $\sigma'_{vp}=80$  kPa

A fronte degli scarsi risultati ottenuti fin qui con la prova di taglio diretto, la prova con carico di consolidazione di 160 kPa è stata effettuata solo per due provini “unfrozen”. Infatti per problematiche legate alle tempistiche delle prove si è preferito sostituire la prova di taglio a 160 kPa su “frozen” con altre prove ritenute più utili alla fine dell’analisi qui riportata. Le due prove sono state eseguite per confrontare le differenze tra i valori delle resistenze di picco di provini allo stesso stato. In **Figura 47** sono graficati i risultati della prova di taglio .



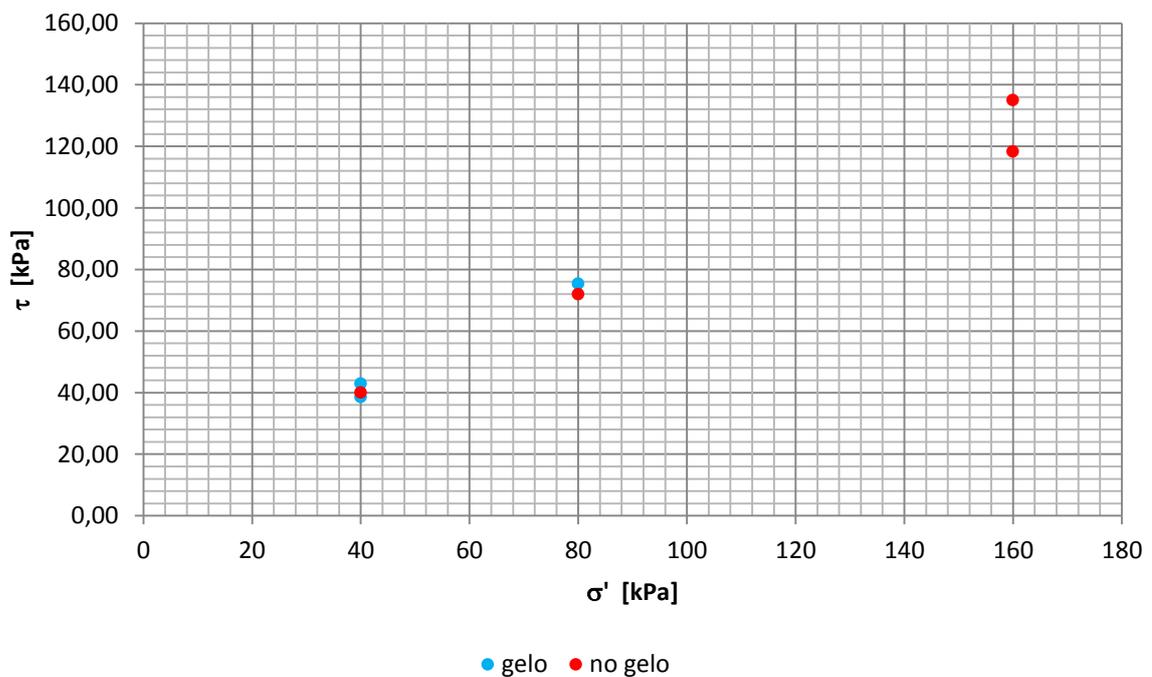
**Figura 47:** Grafico deformazione-taglio con  $\sigma'_{vp}=160$  kPa

Al fine di calcolare l'affidabilità dei valori ottenuti nelle varie prove di taglio sono stati calcolate le differenze percentuali tra le varie misurazioni, riportate in **Tabella 22**:

$\sigma'_v$	$\tau_{max}$				$\Delta\tau$ (%)		
	gelo1	gelo2	no gelo1	no gelo2	$\Delta\tau_{=condizioni}$	$\Delta\tau_{gelo1-no\ gelo}$	$\Delta\tau_{gelo2-no\ gelo}$
<b>40 kPa</b>	38,58	42,94	39,99	-	10%	7%	-4%
<b>80 kPa</b>	75,41	-	71,93	-	-	5%	-
<b>160 kPa</b>	-	-	135,03	118,35	12%	-	-

**Tabella 22:** valori e differenze percentuali valori di taglio

Come si può notare anche in **Figura 48** *Figura 48: valori  $\sigma'$ - $\tau_{max}$  delle prove di taglio diretto.* le differenze percentuali tra i valori di resistenza di picco tra i provini “unfrozen” e quelli “frozen” variano tra -4% e 7% mentre le differenze tra i provini alle stesse condizioni (“frozen” per carico assiale di 40 kPa e “unfrozen” per 160 kPa) sono del 10 e 12%. Le prove di taglio non sono quindi state utili per le finalità che la presente tesi si era proposta.



**Figura 48:** valori  $\sigma'$ - $\tau_{max}$  delle prove di taglio diretto.

I motivi principali per i quali i risultati della prova di taglio non hanno dato i risultati sperati sono stati attribuiti a:

1. bassa affidabilità di tale prova per terreni a grana fine. Infatti il drenaggio e le pressioni neutrali non sono controllabili né misurabili: le tensioni misurate sono pertanto tensioni totali. Non conoscendo l'andamento delle pressioni neutrali si imposta una velocità di rottura sufficientemente bassa da garantire il drenaggio, ciò

però è valido nella teoria mentre non si ha alcun modo di constatare in quali reali condizioni si trovi il provino durante la prova. La superficie di taglio è inoltre predefinita, può quindi non essere la superficie di resistenza minima.

2. la scatola di taglio ha il pistone di carico a forma piramidale con una superficie di scorrimento laterale limitata. Questo fa sì che il pistone, al contrario di quello della cella edometrica, mal si adatta alla misurazione dei cedimenti, soprattutto se questi sono alternatamente positivi e negativi. Come si può vedere nel grafico in **Figura 49**, la scatola di taglio soggetta a cicli di gelo-disgelo con un carico di 40 kPa non ha registrato l'aumento di volume che ci si sarebbe aspettato nelle fasi di ghiacciamento. Probabilmente il problema era dovuto al blocco dello scorrimento del pistone dovuto a ghiacciamento. Al contrario, dal grafico di **Figura 50**, dove vengono registrati i valori dei cedimenti dovuti a cicli di gelo-disgelo del terreno contenuto nella scatola di taglio con un carico di 80 kPa, si nota che vengono registrati sia i cedimenti positivi dovuti a sgelò, sia quelli negativi dovuti a ghiacciamento. C'è quindi una discrepanza rilevante tra la compattazione da cicli di gelo-disgelo tra il campione caricato a 40 kPa e quello a 80 kPa che potrebbe compromettere i risultati della prova di taglio successiva.

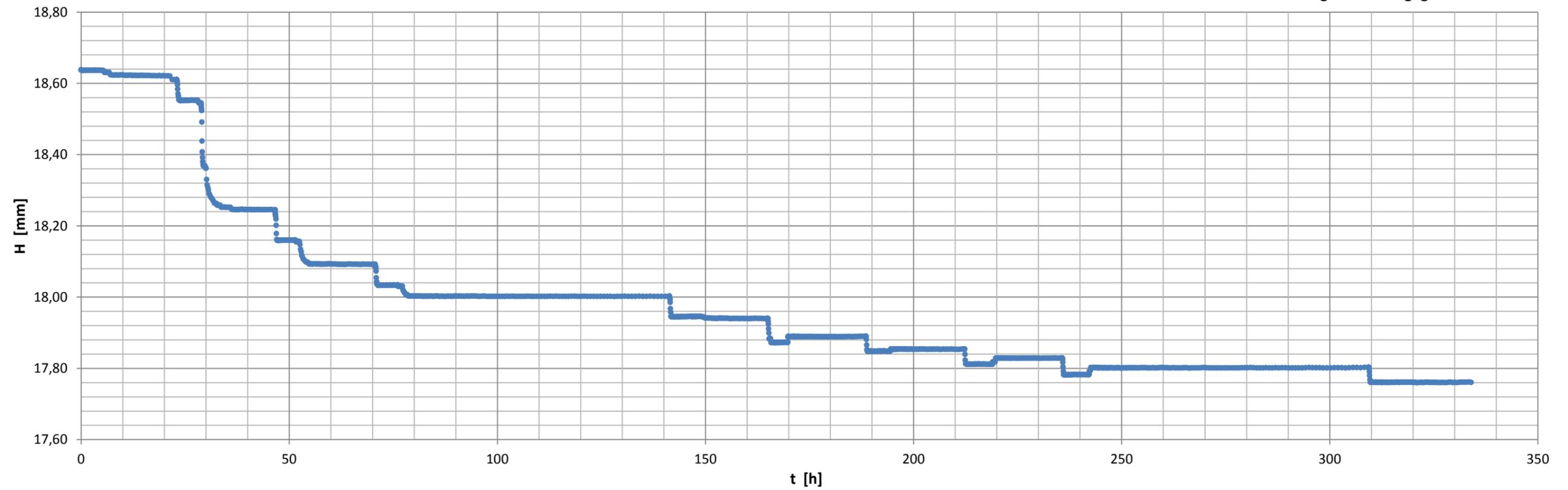


Figura 46: Cicli di gelo-disgelo a 40 kPa per prova di taglio

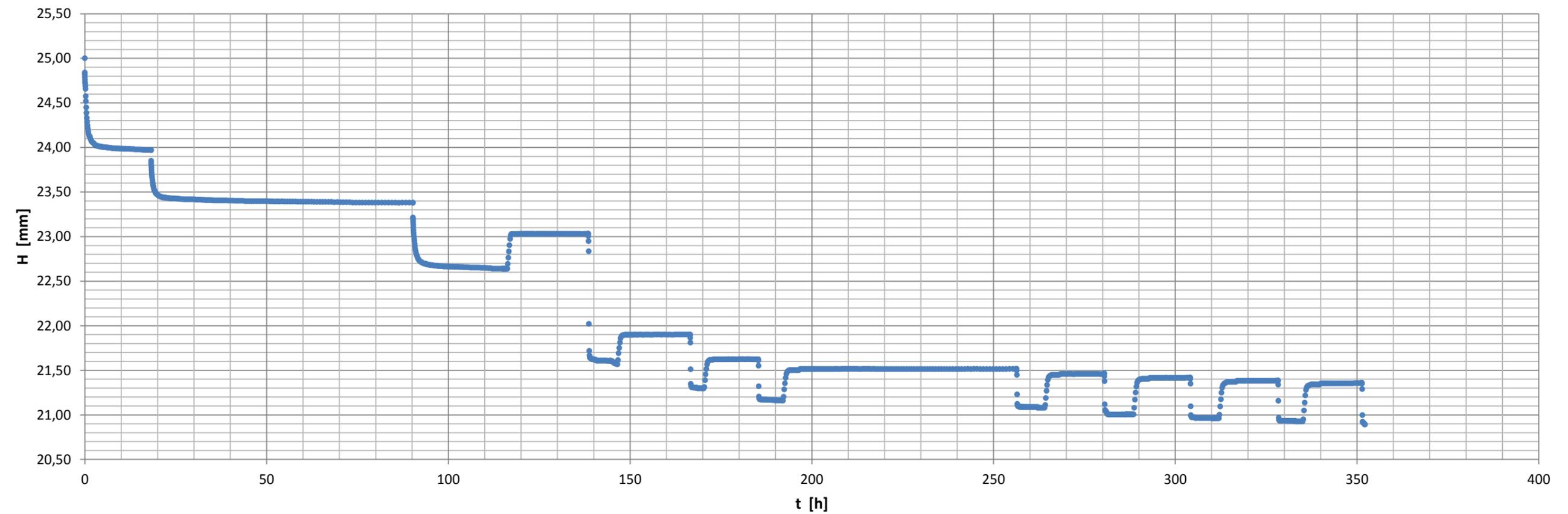


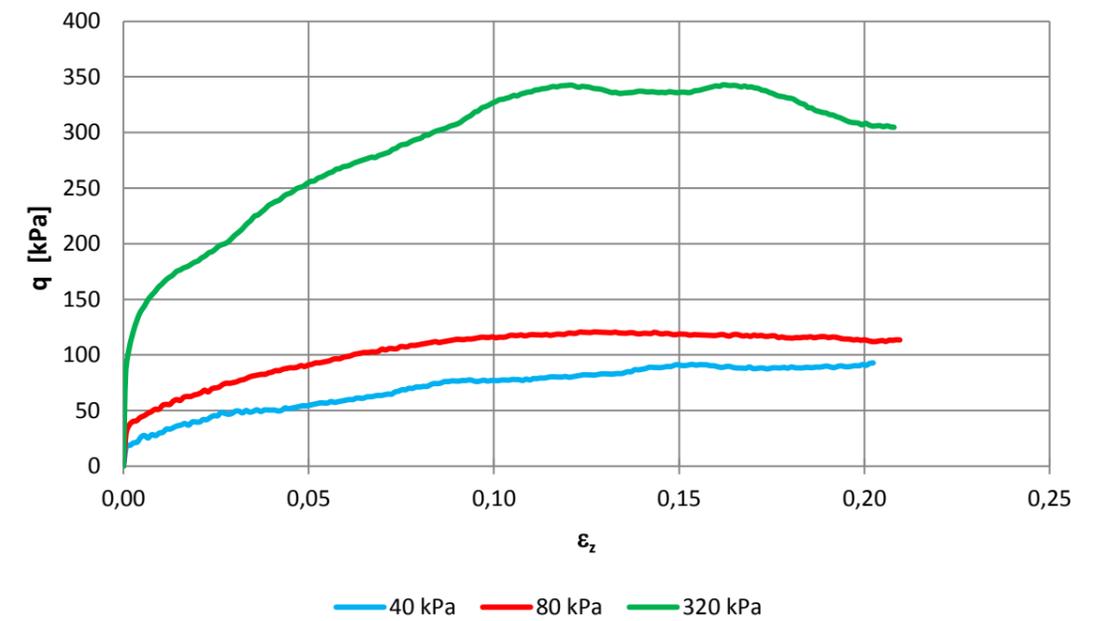
Figura 47: Cicli di gelo-disgelo a 80 kPa per prova di taglio

### 8.5 Prova Triassiale Consolidata non Drenata Tx-CU

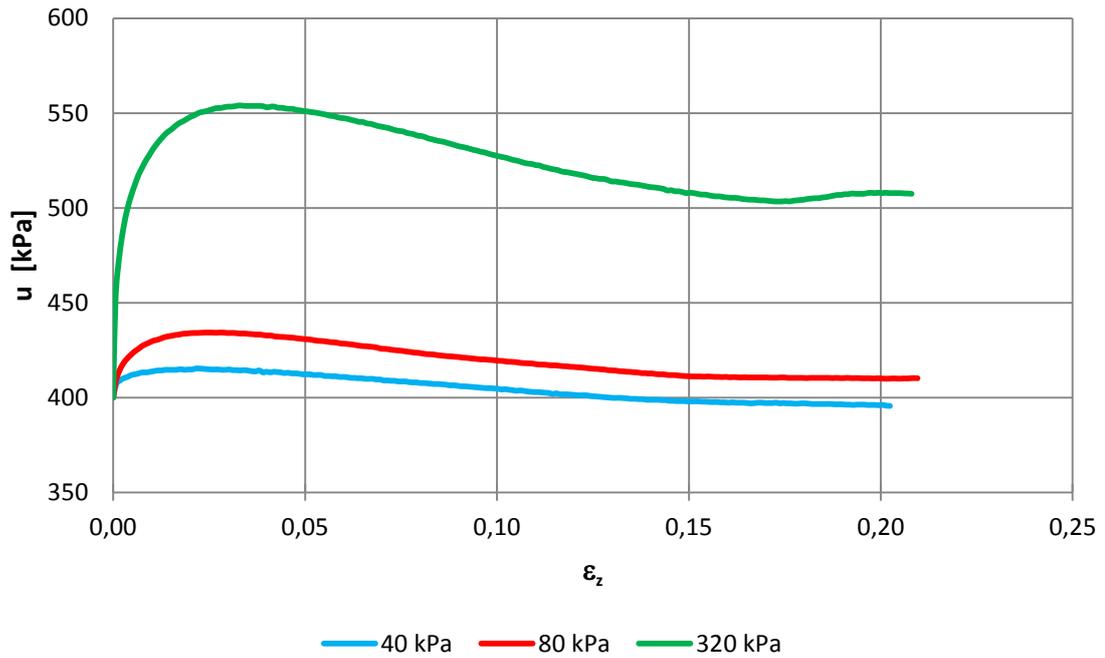
Le prove triassiali sono state eseguite sul terreno SJ1-A. Le prove triassiali sono state eseguite per valutare la variazione della coesione e dell'angolo di attrito interno tra provini "frozen" e "unfrozen".

#### 8.5.1 Tx-CU su terreno non soggetto a cicli di gelo-disgelo.

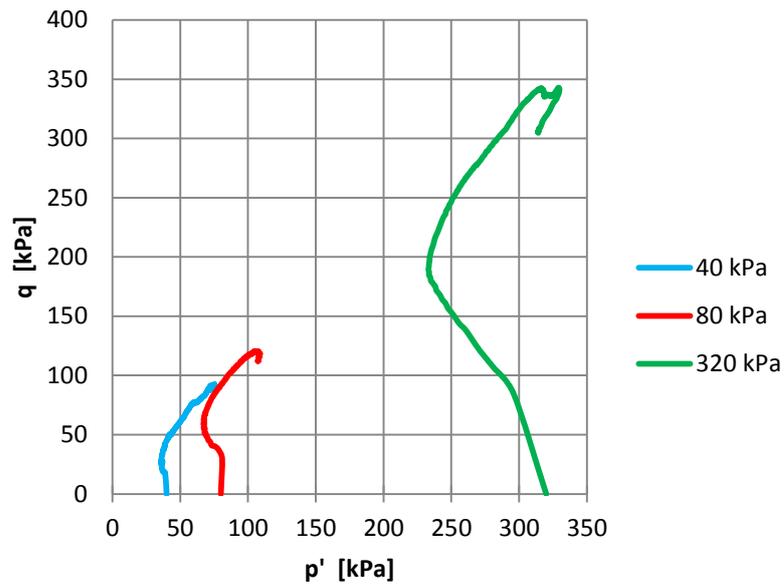
La prova triassiale è stata eseguita su provini consolidati nel consolidometro a 80 kPa non soggetti a cicli termici. I risultati sono ritratti nei grafici di **Figura 51**, **Figura 52** e **Figura 53**:



**Figura 51:** Grafico deformazione assiale-tensione deviatorica dei tre provini "unfrozen".



**Figura 52:** Grafico deformazione assiale-p pressione neutra dei tre provini "unfrozen".



**Figura 53:** Grafico tensione media efficace-tensione deviatorica dei tre provini "unfrozen".

Dai dati forniti dalla prova si sono ricavate le pressioni  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$ , riportati in **Tabella 23** da cui si sono ricavati i cerchi delle tensioni ammissibili di Mohr.

	$\sigma'_c$ [kPa]		
	40	80	320
$\sigma'_1$	137,2	188,1	557,8
$\sigma'_3$	44,4	67,7	215,5

**Tabella 23:**  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  dei tre provini non soggetti a gelo-disgelo

Attraverso le formule si sono calcolati i centri e i raggi dei cerchi di Mohr, vedi **Tabella 24**:

$$X_c = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2};$$

$$Y_c = 0;$$

$$r = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2}.$$

$\sigma'_c$	Xc	Yc	r
kPa	kPa	kPa	kPa
40	90,83	0	46,41
80	127,93	0	60,19
320	386,64	0	171,19

**Tabella 24:** Coordinate cerchi di Mohr per provini non ghacciati

Sono state calcolate le tre rette tangenti a due cerchi ottenendo le seguenti rette:

1. retta tangente ai cerchi con  $\sigma'_c$  40 e 80:  $\tau = 0,40 \cdot \sigma + 13,66$ ;
2. retta tangente ai cerchi con  $\sigma'_c$  80 e 320:  $\tau = 0,47 \cdot \sigma + 5,87$ ;
3. retta tangente ai cerchi con  $\sigma'_c$  40 e 320:  $\tau = 0,47 \cdot \sigma + 8,93$ .

Ottenendo quindi i valori dell'angolo di attrito interno e della coesione in **Tabella 25**, in rosso sono in evidenza i valori medi pesati:

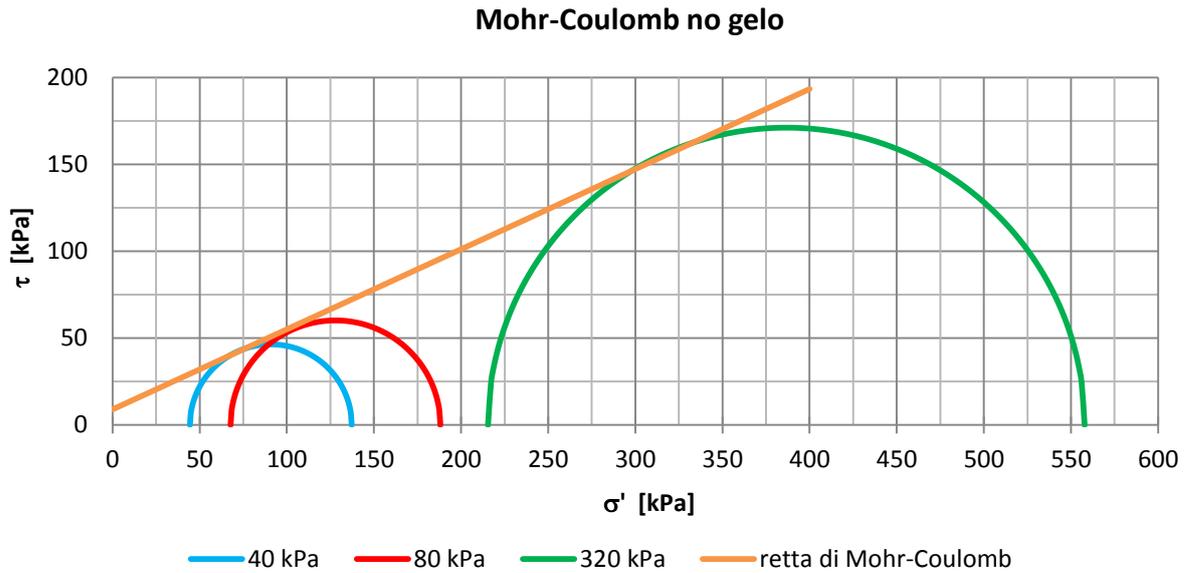
	$\phi'$			$c'$		
	$\phi'$ [°]	$\sigma^2$	peso	$c'$ [kPa]	$\sigma^2$	peso
40-80	21,8	5,1	0,2	13,7	17,4	0,1
80-320	25,4	1,8	0,5	5,9	13,1	0,1
40-320	24,9	0,8	1,2	8,9	0,3	3,3
		<b>24,8</b>			<b>8,9</b>	

**Tabella 25:** valori medi pesati di  $\phi'$  e  $c'$ .

La retta interpolata risultante è:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan(24,8^\circ) + 8,9$$

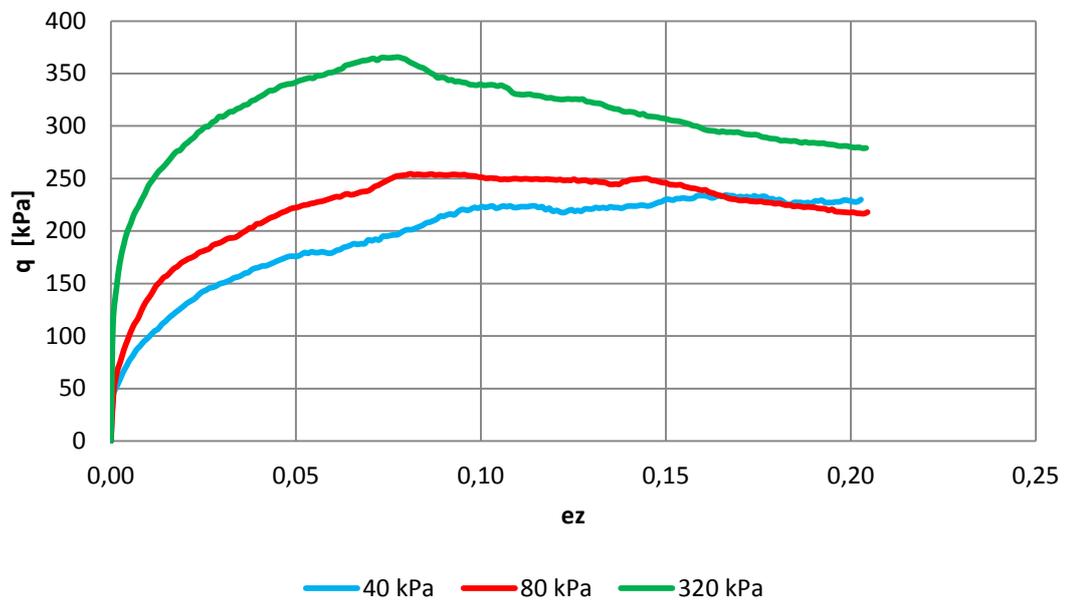
In **Figura 54** sono raffigurati i cerchi di Mohr dei tre provini testati e la retta di Stato Critico di Mohr Coulomb.



**Figura 54:** Cerchi di Mohr e retta di Stato Critico di Mohr-Coulomb per terreno “unfrozen”.

### 8.5.2 Tx-CU su terreno soggetto a cicli di gelo-disgelo.

I provini consolidati nel consolidometro a 80 kPa soggetti a 8 cicli di gelo-disgelo danno i grafici di **Figura 55**, **Figura 56** e **Figura 57**:



**Figura 55:** Grafico deformazione assiale-tensione deviatorica dei tre provini “frozen”.

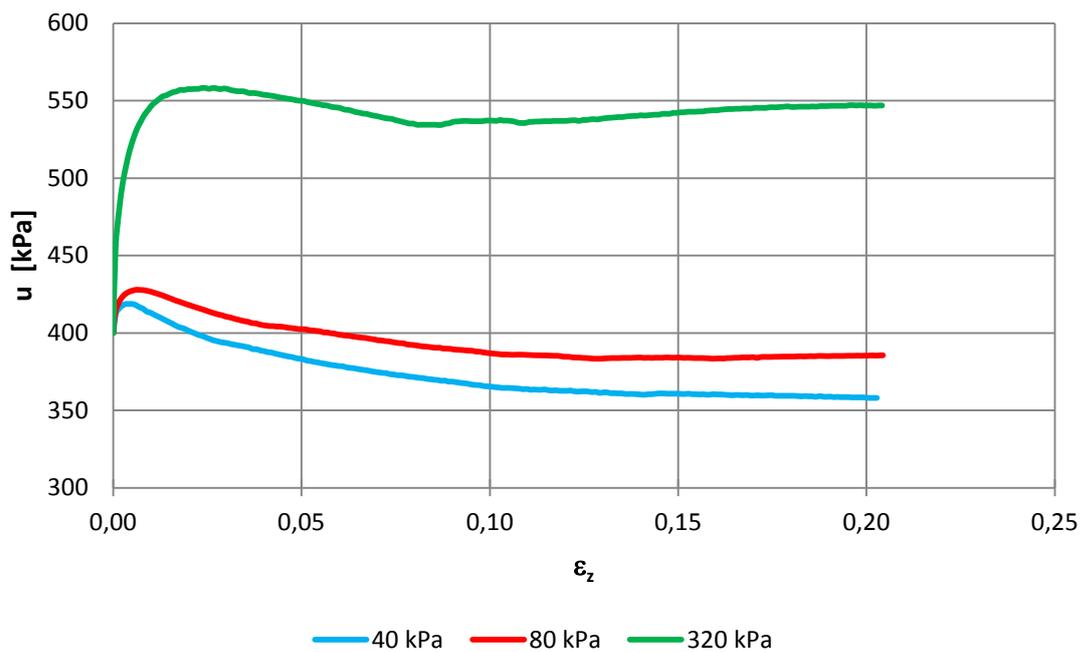


Figura 56: Grafico deformazione assiale-pressione neutra dei tre provini "frozen".

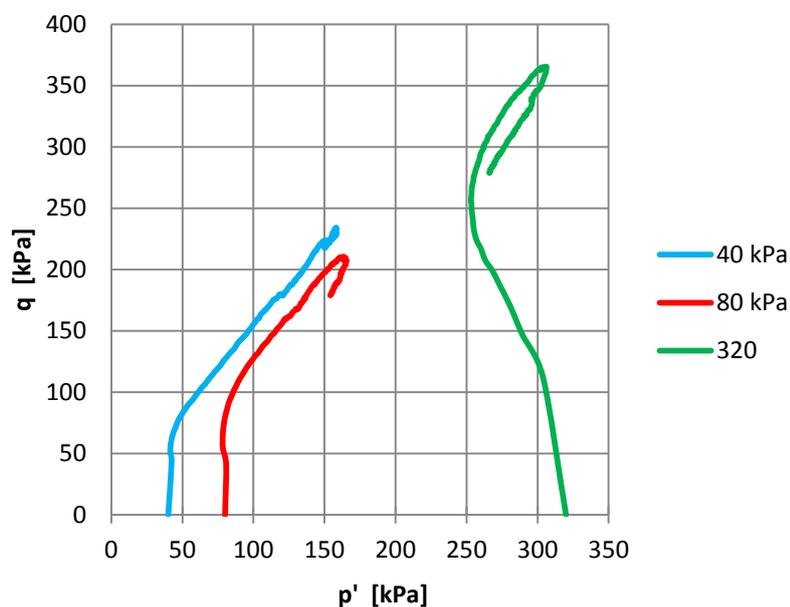


Figura 57: Grafico tensione media efficace-tensione deviatorica dei tre provini "frozen".

Dai dati forniti dalla prova si sono ricavate le pressioni  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$ , riportati in **Tabella 26** da cui si sono ricavati i cerchi delle tensioni ammissibili di Mohr.

kPa	$\sigma'_c$ [kPa]		
	40	80	320
$\sigma'_1$	314,5	357,4	549,9
$\sigma'_3$	80,1	103,6	184,2

**Tabella 26:**  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  dei tre provini "frozen".

Si sono calcolati quindi i centri e i raggi dei cerchi di Mohr, vedi **Tabella 27:**

$\sigma'_c$	Xc	Yc	r
kPa	kPa	kPa	kPa
40	197,29	0	117,18
80	230,53	0	126,91
320	367,06	0	182,82

**Tabella 27:** Coordinate cerchi di Mohr per provini "frozen".

Sono state calcolate le tre rette tangenti a due cerchi ottenendo le seguenti rette:

1. retta tangente ai cerchi con  $\sigma'_c$  40 e 80:  $\tau = 0,31 \cdot \sigma + 62,15$ ;
2. retta tangente ai cerchi con  $\sigma'_c$  80 e 320:  $\tau = 0,45 \cdot \sigma + 35,62$ ;
3. retta tangente ai cerchi con  $\sigma'_c$  40 e 320:  $\tau = 0,42 \cdot \sigma + 44,34$ .

Ottenendo quindi i valori dell'angolo di attrito interno e della coesione in **Tabella 28**, in rosso sono in evidenza i valori medi pesati:

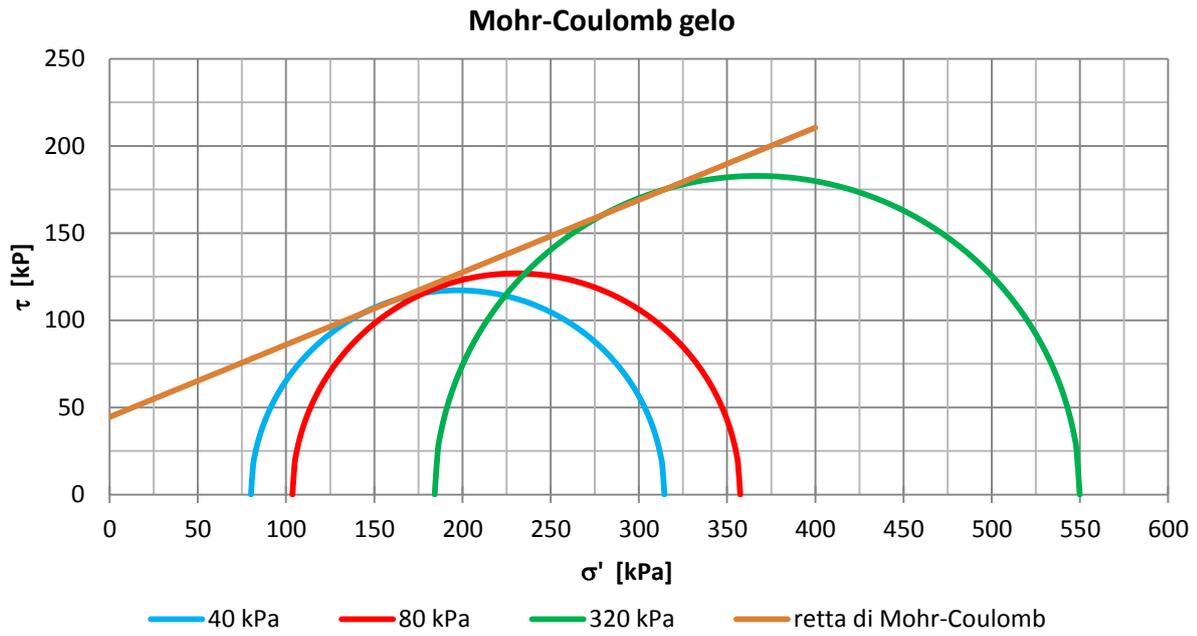
	$\phi'$			$c'$		
	$\phi'$ [°]	$\sigma^2$	peso	$c'$ [kPa]	$\sigma^2$	peso
40-80	17,0	18,4	0,054	62,2	218,4	0,005
80-320	24,2	8,2	0,122	35,6	138,1	0,007
40-320	22,7	2,1	0,487	44,3	9,2	0,109
		<b>22,5</b>			<b>44,5</b>	

**Tabella 28:** valori medi pesati di  $\phi'$  e  $c'$ .

La retta interpolata risultante è:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan(22,5^\circ) + 44,5$$

In **Figura 58** sono raffigurati i cerchi di Mohr dei tre provini testati e la retta di Stato Critico di Mohr Coulomb.



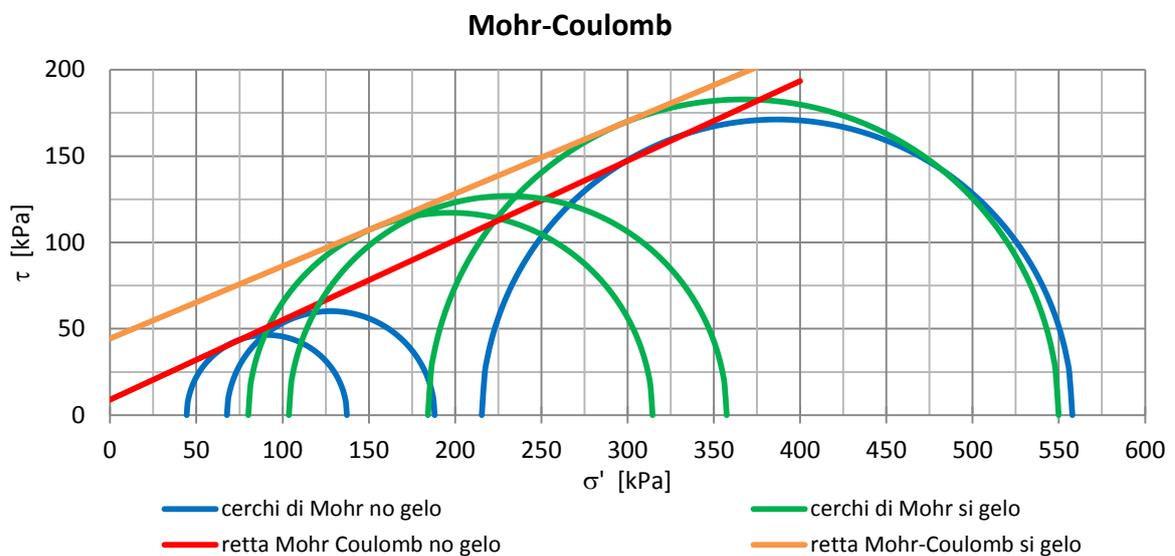
**Figura 58:** Cerchi di Mohr e retta di Stato Critico di Mohr-Coulomb per terreno "frozen".

### 8.5.3 Confronto dei risultati della prova Tx-CU sui due terreni.

I risultati della prova triassiale mostrano un rilevante aumento del valore della coesione mentre il valore dell'angolo di attrito diminuisce leggermente, come riportato in **Tabella 29** e graficato in **Figura 59**.

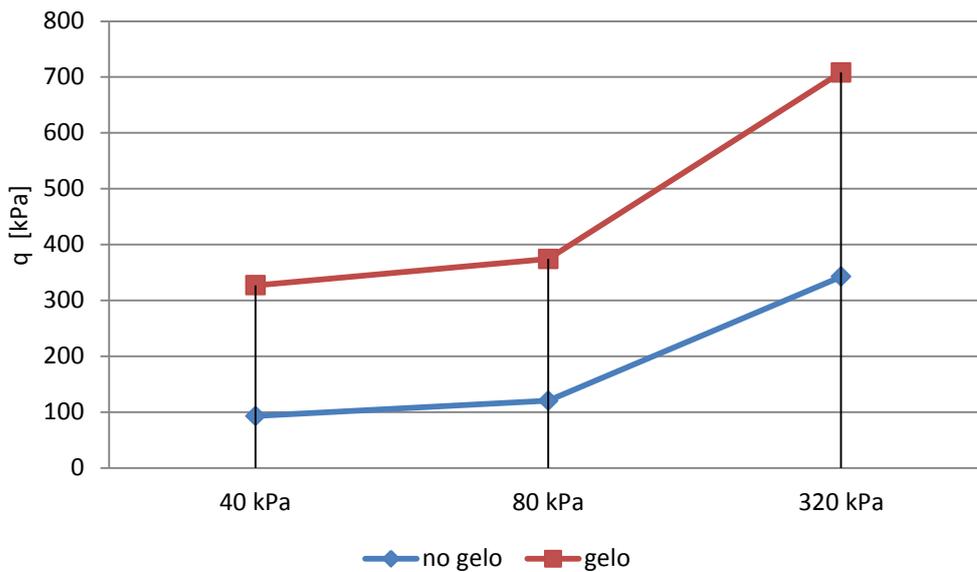
	$\phi'$ °	$c'$ kPa
<b>no gelo</b>	24,8	8,9
<b>gelo</b>	22,5	44,5
<b>D (%)</b>	9%	398%

**Tabella 29:** Valori e differenze  $c'$  e  $\phi'$  terreno non ghiacciato e terreno ghiacciato



**Figura 59:** Confronto rette di Mohr-Coulomb tra i due provini

In **Figura 60** si nota come, per il provino non soggetto a cicli di gelo-disgelo, la tensione deviatorica cresce poco tra il provino consolidato a 40 kPa, pressione minore di quella a cui il provino era stato consolidato, e quello consolidato a 80 kPa, pari alla pressione a cui era stato precedentemente consolidato. Mentre cresce di molto tra quest'ultimo e il provino consolidato a 320 kPa.



**Figura 60:** Tensione deviatorica dei provini

Nel caso dei provini di terreno soggetto a cicli di gelo-disgelo invece, la tensione deviatorica dei primi due provini è di molto maggiore a quella ottenuta per i provini precedenti. Questo significa che il terreno si comporta come se fosse sovraconsolidato a una pressione maggiore di 80 kPa. In effetti, la differenza tra la tensione deviatorica del terzo provino (consolidato a 320 kPa) e il secondo del terreno soggetto a cicli di gelo-disgelo è di molto minore alla stessa differenza tra i provini di terreno non soggetto a cicli di gelo-disgelo, come si può notare nel grafico di **Figura 61**. In **Figura 62** sono riportate le differenze percentuali di pressione deviatorica tra i provini soggetti e non soggetti a cicli di gelo-disgelo delle tre pressioni di consolidazione.

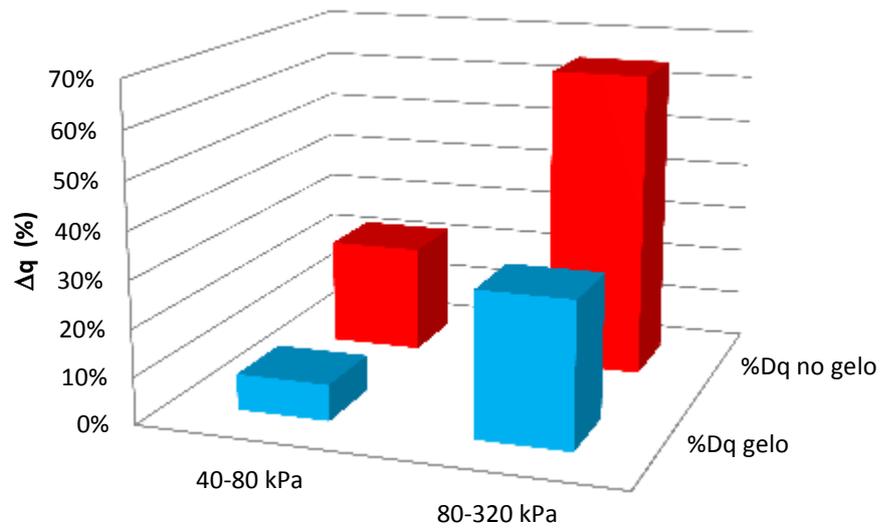


Figura 61: Differenze percentuali tra la variazione di pressione deviatorica tra i tre provini.

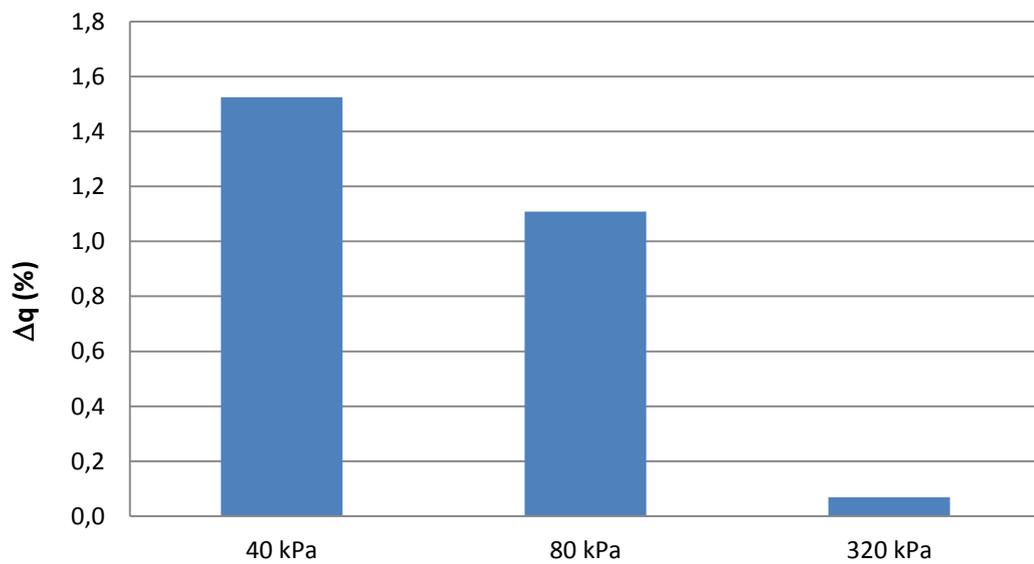


Figura 62: Differenze percentuali di pressione deviatorica tra provino non ghiacciato e provino ghiacciato.

## 9. CONCLUSIONI

### 9.1 Variazioni delle proprietà e dei parametri geotecnici del terreno

Il terreno silto-argilloso analizzato è stato soggetto a cicli di gelo-disgelo con temperatura minima di  $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e temperatura massima di  $55^{\circ}\text{C}$ , in condizione drenate al fine di valutare la variazione dei parametri geotecnici di interesse. Si può concludere che:

1- Cicli di gelo-disgelo determinano un **effetto di sovraconsolidazione** simile a quello che avviene per carico. L'effetto di sovraconsolidazione è tanto maggiore quanto minore è la densità del terreno iniziale. Il processo di consolidazione è determinato da due processi:

- I. Perdita di parte dell'acqua;
- II. Riorganizzazione dei grani.

Le fasi attraverso cui si realizzano questi due processi sono:

- I. il congelamento di acqua interstiziale, dotata di grande inerzia termica, funge da "nucleo" di richiamo per molecole di acqua di film che migrano verso il "nucleo" diventando acqua interstiziale. Quando il ghiaccio fonde e i "nuclei" diventano "bacini" di accumulo dell'acqua;
- II. le molecole d'acqua, che "migrano" verso i "nuclei", ghiacciando, determina la creazione di micro fessurazioni che, quando il ghiaccio fonde, fungono da canali di drenaggio;
- III. nonostante una diminuzione degli indici dei vuoti, cicli di gelo-disgelo determinano la formazione di una struttura di drenaggio composta da micro fessurazioni e nuclei di accumulo che possono aumentare la permeabilità di un'argilla anche di due ordini di grandezza.

Questo processo di sovraconsolidazione determina:

1. deformazioni indotte sul terreno in funzione dell'indice dei vuoti;
2. un aumento del **modulo edometrico** per valori di carico assiale minori di  $\sigma'_c$ ;
3. un aumento della **coesione** in funzione del grado di sovraconsolidazione. Nel caso analizzato si ha un grandissimo aumento di coesione pari al 400%;
4. l'**angolo di attrito interno** è meno sensibile a cicli di gelo-disgelo rispetto alla coesione. L'angolo di attrito interno diminuisce in funzione del grado di

sovracconsolidazione, nel caso analizzato si ha una lieve diminuzione dell'angolo pari al 9%;

5. **gli indici di compressione, rigonfiamento e ricomprensione** non sono influenzati da cicli di gelo-disgelo.

2- Cicli di gelo-disgelo determinano, come appena spiegato, un forte **aumento di permeabilità verticale**.

## 9.2 Note per la progettazione di pali energetici

La progettazione di un palo energetico, essendo questo un'opera strutturale, deve essere effettuata nei riguardi delle prestazioni a questo richieste. Sarà quindi necessario riferirsi alla norma vigente nella località di costruzione dell'opera. Nel caso italiano ci si riferisce alle NTC2008 in cui si prescrivono per le opere strutturali il possesso dei requisiti atti a soddisfare gli SLU e gli SLE. Nel caso di un palo di fondazione si dovrà quindi verificare che la capacità portante sia sufficiente e che le deformazioni del terreno, a cui il palo è solidale, non superino quelle prescritte agli SLE.

La capacità portante è descritta dalla seguente relazione:

$$P_U = P_B + P_L - W$$

Con:

$P_B$  = Capacità portante di punta

$P_L$  = Capacità portante per attrito laterale

$W$  = Peso proprio della colonna

Nella progettazione di pali in terreni argillosi viene solitamente considerato il terreno in condizione non drenata, nel calcolo viene quindi utilizzata la resistenza di taglio non drenata  $c_u$ . Tuttavia nella tesi è stato studiato esclusivamente il comportamento del terreno in condizioni drenate per le seguenti motivazioni:

1. l'analisi qui riportata si riferisce alla variazione di parametri in seguito ad alcuni (nel caso analizzato 9) cicli di gelo-disgelo. Ogni fase, nel caso di pali energetici che utilizzino glicole, ha durata stagionale, un ciclo corrisponde cioè a circa un anno. Anche considerando, a favore di sicurezza, che l'intera variazione dei parametri registrata possa avvenire successivamente ad un solo ciclo di gelo-disgelo, si hanno tempi sufficientemente lunghi da garantire il drenaggio delle sovrappressioni neutrali nel terreno vicino alla superficie del palo;

2. cicli di gelo-disgelo aumentano considerevolmente la permeabilità determinando un minor tempo di dissipazione delle sovrappressioni neutrali;
3. alcuni autori, tra i quali Burland (1973), Marita Allan (1998) e Randolph (2003), considerano l'analisi in condizione drenate più appropriata nella progettazione di fondazioni su pali. La permeabilità nell'interfaccia palo-terreno è generalmente sufficientemente elevata da garantire la dissipazione delle sovrappressioni neutrali nel terreno vicino alla superficie del palo nel tempo successivo alla costruzione del palo e precedente all'applicazione del carico.

La capacità portante di base sarà quindi pari a:

$$P_B = A_B(c' \cdot N_c + \sigma'_{vb} \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot d \cdot N_\gamma)$$

Con:

$A_B$ : area di base del palo;

$c'$ : coesione del terreno alla profondità della base;

$\sigma'_{vb}$ : tensione verticale alla base del palo;

$\gamma$ : peso specifico del terreno;

$d$ : diametro di base del palo;

$N_c, N_q, N_\gamma$ : fattori di correzione che sono funzione dell'angolo di attrito interno del terreno e della geometria del palo.

La capacità portante di base sarà quindi aumentata di un aliquota proporzionale all'aumento della coesione.

La capacità portante laterale sarà quindi funzione della resistenza di taglio drenata e pari a:

$$P_L = \alpha \cdot A_L \cdot \tau_E$$

Con:

$\alpha$ : coefficiente di adesione palo-terreno;

$A_L$ : area laterale del palo;

$\tau_E$ : resistenza di taglio drenata paria a:

$$\tau_E = c' + \sigma'_h \cdot tg(\phi')$$

Esseno  $\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v$ .

La resistenza di taglio drenata in seguito a cicli di gelo-disgelo risulta amentata da:

1. aumento di  $c'$ ;
2. aumento di  $\sigma'_h$ , essendo questo funzione di  $k_0$  che, per argille sovraconsolidate cresce secondo la relazione di Jamiolkowski (1979):

$$k_0(OC) = k_0(NC) \cdot OCR^n, \quad n = 0,46 \pm 0,06;$$

La capacità portante laterale mobilitata lungo tutta la superficie del palo è pari a:

$$P_L = 2 \int_0^L \pi \cdot r \cdot \alpha \cdot (c' + k_0 \cdot \sigma'_v \cdot tg(\phi')) dz$$

Il lavoro di tesi qui presentato prova un aumento rilevante della resistenza di taglio per terreni argillosi in seguito a cicli di gelo-disgelo. E' tuttavia necessario un'attenta analisi della variazione del coefficiente di adesione palo-terreno per poter stabilire l'influenza di cicli di gelo-disgelo sulla capacità portante complessiva del palo. Infatti, cicli di gelo-disgelo determinano variazioni alternate di volume del terreno, le quali potrebbero causare uno scollamento del terreno stesso dalla superficie del palo e ridurre di conseguenza il valore del coefficiente di adesione tra palo-terreno.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. Jilin Qi, Pieter A. Vermeer, Guodong Cheng (2006). *A Review of the Influence of Freeze-thaw Cycles on Soil Geotechnical Properties*. *Permafrost and Periglacial Processes* 17, pp 245-252. ©2006 John Wiley & Sons, Ltd.
2. Jilin Qi, Wei Ma, Chunxia Song (2007). *Influence of Freeze-thaw on Engineering Properties of a Silty Soil*. *Cold Region Science and Technology* 53, pp.398-404. ©2007 Elsevier B. V.
3. Dalai Dashjamts, Jamts Altantsetseg (2011). *Research on Consolidation of Frozen Soil upon Thawing*. The 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology, pp. 1295-1300. ©2011 IEEE
4. Guoyu Li, Wei Ma, Shuping Zhao, Yuncheng Mao, Yanhu Mu (2012). *Effect of Freeze-thaw Cycles on Mechanical Behavior of Compacted Fine-grained Soil*. *Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure in a Changing Cold Environment*, pp. 72-81. ASCE
5. Antics, Bertani, Sanner (2013). *Summary of ECG 2013 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe*. – Proc. ECG 2013, paper keynote, pp. 1-18, Pisa.
6. Chamberlain, E.J., Gow, A. J. (1979). *Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils*. *Eng. Geol.* 13, pp. 73-92.
7. Konrad, J.-M. (1989). *Physical Processes During Freeze-Thaw Cycles in Clayey Silts*. *Cold Region Science Technology* 16, pp. 291-303.
8. Konrad, J.-M. (1990). *Unfrozen Water as a Function of Void Ratio in a Clayey Silts*. *Cold Region Science Technology* 18, pp. 49-55.
9. Marita, Allan. (1998). *Geothermal Heat Pump Grouting Materials*. Brookhaven National Laboratory. BNL-65676
10. Randolph, M. F. (2003). *Science and Empiricism in Pile Foundation Design*. *Géotechnique* 53, No. 10, pp. 847-875

## 10. SITOGRAFIA

1. [http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/pdf-volumi/VRAEE\\_2012.pdf](http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/pdf-volumi/VRAEE_2012.pdf)
2. <http://www.agienergia.it/Notizia.aspx?idd=1087&id=84&ante=0>
3. [http://www.edurete.org/pd/sele\\_art.asp?idp=213&ida=3551](http://www.edurete.org/pd/sele_art.asp?idp=213&ida=3551)
4. [http://it.wikipedia.org/wiki/Consumo\\_di\\_energia\\_nel\\_mondo](http://it.wikipedia.org/wiki/Consumo_di_energia_nel_mondo)
5. [http://www.groundmed.eu/uploads/media/111213\\_Corso\\_GROUNDMED\\_AICARR\\_U NIPD\\_7\\_GALGARO.pdf](http://www.groundmed.eu/uploads/media/111213_Corso_GROUNDMED_AICARR_U NIPD_7_GALGARO.pdf)
6. <http://liceofrancescodassisi.it/Documenti/lezioni/scienze/problema%20energetico.pdf>



## **Ringraziamenti**

*Desidero ringraziare la Prof.ssa Simonetta Cola per la grande professionalità e competenza.*

*La Dott.ssa Ing. Giorgia per la sua grande intelligenza umana, ottima insegnante e impagabile compagna non solo di tesi ma anche di momenti di vita.*

*Alla mamma e al papà per avermi sempre supportato in questo percorso ma, prima ancora, per essere dei bellissimi genitori.*

*A Dario per essere il miglior fratello che abbia mai potuto desiderare.*

*Al nonno, alla nonna, agli zii e alle cuginette per essere la mia seconda famiglia.*

*Alla zia Cati perché, se un cielo c'è, "da lì mi stai fieramente guardando..."*

*A Jacopo, mio secondo gemello, Basti, Max, Meme e Riki per essere dei veri Amici.*

*A Fulvio e alla Patri per essere i miei secondi genitori.*

*Agli amici e ai conoscenti perché ognuno di voi è unico.*