



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

---

Compressibilità e conducibilità idraulica di una terra  
trattata con calce e cenere volante

Compressibility and hydraulic conductivity of a soil treated  
with lime and fly ash

**RELATORE:**

Prof.ssa Marta di Sante

**TESI DI LAUREA DI:**

Samuele Borra

---

Anno accademico 2022-2023



# Indice

<b>1- Introduzione</b> .....	4
<b>2- Stato dell'arte</b>	
2.1 Fly ash .....	5
2.2 Calce.....	6
2.3 Miscela terra-cenere volante .....	8
2.4 Miscela terra calce.....	9
<b>3- Materiali e metodi sperimentali</b>	
3.1 Materiali.....	10
3.1.1 Fly ash .....	10
3.1.2 Calce.....	13
3.1.3 Terra .....	13
3.2 Metodi sperimentali .....	15
3.2.1 Compattazione Proctor .....	15
3.2.2 Prova di permeabilità .....	17
3.2.3 Prova edometrica .....	19
3.2.4 SEM .....	22
<b>4- Risultati sperimentali</b>	
4.1 Costipamento.....	23
4.2 Conducibilità idraulica .....	25
4.3 Compressibilità .....	27
4.4 Analisi al SEM.....	41
4.5 Confronti con altre sperimentazioni .....	46
<b>5- Conclusioni</b> .....	49

# 1. Introduzione

Lo scopo della presente tesi è indagare le caratteristiche di un terreno trattato con calce e cenere volante, in riferimento alle proprietà di compressibilità e di conducibilità idraulica.

Si è scelto di includere nel mix-design della miscela la cenere volante poiché, nell'ambito dei recenti sviluppi in relazione alla sostenibilità degli interventi, essa sta assumendo rilevanza come legante alternativo, presentando dei vantaggi economici e ambientali poiché si tratta di un materiale di scarto riutilizzato.

La tesi si inquadra in una ricerca più ampia già avviata presso il laboratorio di Geotecnica ambientale del Dipartimento SIMAU dell'Università Politecnica delle Marche.

Nei capitoli a seguire viene presentato lo stato dell'arte, descrivendo brevemente le conoscenze finora acquisite in materia dalla comunità scientifica, in particolare nell'ambito delle miscele terra-calce.

Successivamente vengono descritti nel dettaglio i materiali utilizzati e vengono inquadrare le metodologie adottate durante l'esecuzione delle prove. Nel dettaglio, i provini di terreno sono stati ottenuti dopo aver ricostituito i campioni di miscela compattandoli con il metodo Proctor a energia Standard, per poi essere sottoposti alla prova di conducibilità idraulica e alla prova edometrica.

Nel corso delle attività sperimentali si è scelto di testare due mix design:

- il primo trattando una terra argillosa con il 4% di cenere volante e il 2% di calce viva;
- il secondo, trattando la stessa terra con il 2% di entrambi i leganti.

Alla fine dei test è stato possibile confrontare i risultati ottenuti con quelli relativi al terreno non trattato e a quelli ottenuti trattando lo stesso terreno con la sola calce, per verificare l'effettiva efficacia della combinazione dei leganti calce-cenere volante.

È stata inoltre eseguita un'analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM), per osservare la microstruttura della miscela e conoscere la sua composizione chimica (in termini di concentrazione degli elementi componenti) per meglio analizzare il comportamento macroscopico del materiale.

Infine, nell'ultimo capitolo della tesi sono mostrati e commentati i risultati delle attività sperimentali eseguite seguite dalle conclusioni.

## 2. Stato dell'arte

### 2.1 Fly ash

Le ceneri volanti (o fly ash) sono ottenute come sottoprodotto dei sistemi di depolverizzazione dei fumi di combustione delle centrali termoelettriche tradizionali a polverino di carbone.

Queste ceneri sono composte da particelle il cui diametro è compreso tra 1 e 100  $\mu\text{m}$ , di forma sferoidale e struttura amorfa. Le particelle possono essere piene o porose, e grazie alla loro forma conferiscono un'alta lavorabilità e pompabilità all'impasto.

Il solido particellare deriva dalle impurità minerali presenti nel carbone a seguito della sua combustione. Questa frazione risulta infatti incombustibile, perciò durante il riscaldamento a 1400 °C all'interno della camera di combustione fonde, per poi raffreddarsi bruscamente in uscita, solidificando sotto forma di particelle.

Infine, si separano le ceneri dai fumi di combustione tramite elettrofiltri (precipitatori elettrostatici) nell'impianto di abbattimento polveri.

Le ceneri volanti, dal punto di vista chimico, sono costituite in prevalenza da silice ( $\text{SiO}_2$ ), allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e ossido di ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). I minerali presenti sono principalmente gesso, calce, quarzo ed ematite con ferrite. La loro composizione è assimilabile a quella delle pozzolane naturali di origine vulcanica, anche dal punto di vista microstrutturale, essendo costituite per più del 70% da particelle vetrose amorphe. Pertanto, le ceneri volanti hanno un comportamento pozzolanico e, reagendo a temperatura ambiente con la calce, generano prodotti del tutto simili a quelli che si ottengono con l'idratazione del cemento Portland.

Le modalità per l'utilizzo della fly ash per il confezionamento di calcestruzzi, in sostituzione o aggiunta al cemento, sono descritte dalle UNI EN 206 prevedendo di norma percentuali di concentrazioni che vanno tra il 35% e il 45% come sostituto del cemento.

Le ceneri leggere prodotte dalle tradizionali centrali termoelettriche agiscono nei calcestruzzi come filler (contributo fisico) e forniscono anche un contributo chimico attraverso il miglioramento delle caratteristiche del conglomerato, rendendolo più resistente e impermeabile grazie alla finezza dei suoi componenti.

Inoltre, le fly ash sono un'interessante soluzione nell'ottica della progettazione sostenibile, in quanto materiale di scarto, e vantaggiose dal punto di vista economico, essendo in buona sostanza un materiale a costo praticamente nullo.

## 2.2 Calce

La calce deriva principalmente dalla cottura del calcare, una pietra contenente carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) che se riscaldata ad alte temperature si dissocia formando anidride carbonica e ossido di calcio, cioè calce viva.

Già in antichità i Romani e i Fenici avevano imparato ad utilizzare la calce come materiale da costruzione per ottenere miscele aventi proprietà meccaniche soddisfacenti e stabili nel tempo, come ad esempio l'aggiunta di calce alla sabbia o alla terra per impieghi stradali.

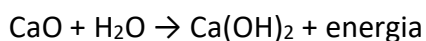
Il processo produttivo della calce (schema in figura 2.1) parte naturalmente dall'estrazione della materia prima, cioè il calcare. Le rocce calcaree fanno parte della famiglia delle rocce sedimentarie, prevalentemente di origine organogena e solo in parte formatosi da processi chimici. Un'alternativa al calcare per l'ottenimento della calce sono le dolomie, rocce aventi come componente principale il carbonato di magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ).

Il processo di estrazione del calcare avviene generalmente nelle cave a cielo aperto attraverso esplosivi e il successivo trasporto in impianti di frantumazione solitamente non distanti dal sito di scavo. Il materiale dopo essere stato frantumato attraverso i frantoi e passato al vaglio, viene trasportato tramite nastri trasportatori ai piazzali di stoccaggio. Si passa poi, in una seconda fase, alla cottura del calcare a temperature di circa  $900\text{ }^\circ\text{C}$  realizzando la reazione di decarbonatazione in cui il carbonato di calcio libera l'anidride carbonica formando l'ossido di calcio:



I forni da calce in Italia sono generalmente alimentati da gas naturale e si distinguono in tre tipologie: quelli verticali, quelli rotanti e quelli misti. In generale il materiale viene riscaldato da un flusso di gas di combustione introdotto controcorrente rispetto al calcare.

Una volta uscito dal forno, se il prodotto della combustione non è della dimensione corretta viene riportato a macinatura, altrimenti viene spedito direttamente allo stabilimento di idratazione, dove avviene il contatto con l'acqua e quindi il processo di idratazione che prevede lo spegnimento della calce viva:



Una volta completato il processo di produzione, la calce viva e/o quella spenta vengono stoccate in sili chiusi per poi passare alla distribuzione.

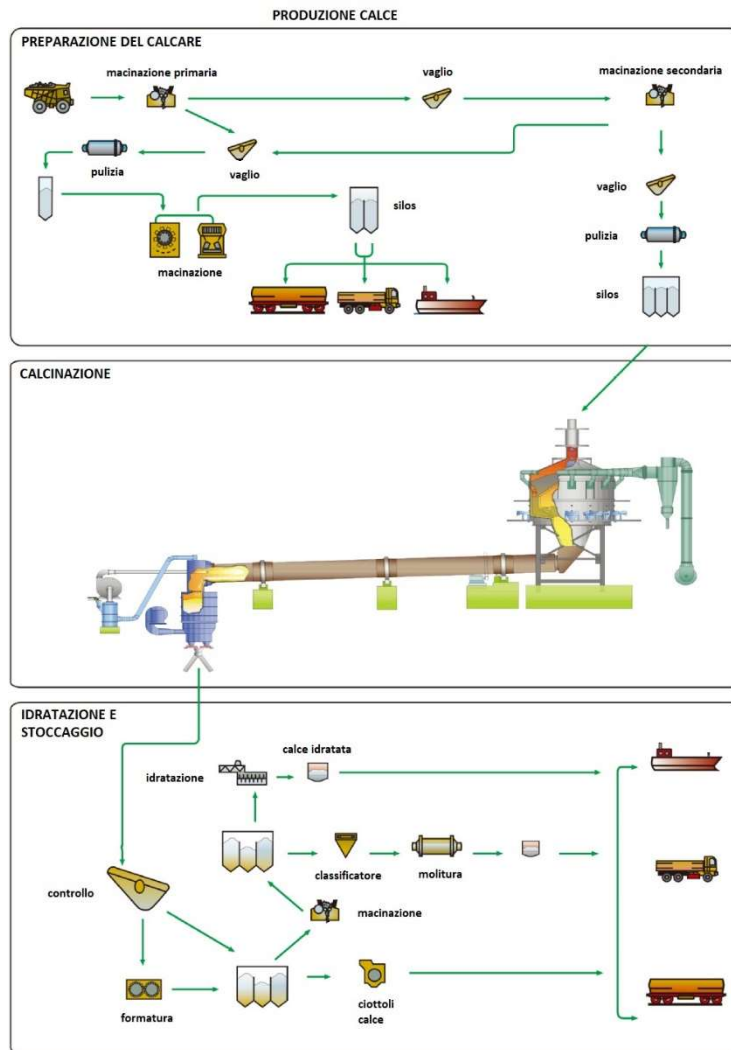


Figura 2.1 – Fasi di produzione della calce

La calce ha vari campi di applicazione ma viene utilizzata principalmente nell'edilizia, le cui regolamentazioni sono dettate dalla norma UNI EN 459-1.

La calce, inoltre, si divide in calce aerea e idraulica in base alle condizioni necessarie all'indurimento: la prima, non possedendo proprietà idrauliche, indurisce solamente all'aria e si suddivide in calci calciche e dolomitiche in base alla loro composizione; la seconda, invece, riesce a far presa anche sott'acqua grazie alla presenza di altri prodotti come il silicio e l'alluminio, e si raggruppano in calci idrauliche naturali e artificiali in base all'origine.

## 2.3 Miscele terra-cenere volante

Le ceneri volanti grazie alle loro caratteristiche hanno diversi impieghi nel settore delle costruzioni, soprattutto come additivi nei materiali, come ad esempio il calcestruzzo, ma sono usate anche nell'ambito dell'Ingegneria Civile o Edile per la stabilizzazione dei terreni.

Tali pratiche sono sempre più sfruttate per i risvolti positivi in termini di risparmio economico e di impatto ambientale. Per questo negli ultimi anni sono state eseguite diverse ricerche che hanno evidenziato i vantaggi chimici e fisici della stabilizzazione del terreno mediante l'utilizzo di sottoprodotti industriali come la fly ash, in particolare di seguito si elencano i benefici ottenibili con il suddetto trattamento:

- aumento del Ph;
- incremento della resistenza del provino, dovuto alla formazione di composti cementizi da parte della fly ash e ad una buona adesione;
- a causa della natura non espansiva della cenere volante e della riduzione della superficie specifica, si evidenzia una minore tendenza del terreno a subire variazioni volumetriche significative, per esempio durante il passaggio da uno stato saturo ad uno non saturo;
- l'indice CBR (rapporto fra il carico necessario a far penetrare un pistone all'interno di un provino confinato ed un carico di riferimento) aumenta;
- la densità massima del terreno compattato (indice MDD) diminuisce.

Per quanto riguarda l'aggiunta di cenere volante per la realizzazione di calcestruzzo, è stato dimostrato che tale aggiunta provoca un incremento delle qualità del conglomerato, grazie alla formazione del silicato di calcio idrato durante il processo di idratazione. Tale processo provoca una riduzione della dimensione dei pori del calcestruzzo che si traduce in un minor rilascio di calore di idratazione, un aumento della durabilità e della resistenza meccanica, oltre che ad un aumento della resistenza alle aggressioni dovute agli agenti chimici, ciò a discapito di una riduzione della lavorabilità.



## 2.4 Miscele terra-calce

La terra stabilizzata a calce è una miscela composta da terra unita ad acqua e a calce viva o idrata, in modo tale da ottenere una miscela con caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche tali da migliorare, dopo il costipamento, la capacità portante e la stabilità del materiale all'azione dell'acqua e del gelo.

Le miscele terra-calce oggi hanno svariati impieghi in diverse applicazioni di Ingegneria Civile/Edile come la bonifica dei sottofondi, dei piani di posa e del corpo dei rilevati, la stabilizzazione dei pendii e miglioramento dei terreni di fondazione.

Tradizionalmente l'Italia non vanta una lunga tradizione nell'uso di queste miscele, ma negli ultimi anni, anche nel nostro Paese si è affermata questa tecnica, visti i vantaggi economici portati dal riutilizzo di materiale in sito e quelli ambientali legati alla mancata necessità di smaltimento di terre non idonee agli scopi costruttivi.

Facendo riferimento agli studi effettuati negli Stati Uniti, il trattamento con la calce presenta maggiori effetti positivi con terreni argillosi rispetto a terreni limosi e sabbiosi. In generale, i materiali trattabili con calce si suddividono in due categorie: quelli naturali, come basalti, le pozzolane, i limi e le argille, e quelli artificiali, cioè le loppe e le ceneri volanti.

Il protagonista della stabilizzazione delle terre è il calcio. In particolare, gli agenti stabilizzanti a contatto con l'acqua causano due reazioni: la prima è la flocculazione, cioè l'aggregazione delle particelle argillose, preceduta dallo scambio cationico, tali reazioni producono effetti immediati; il secondo processo è rappresentato dalla reazione pozzolanica, in cui, attraverso la formazione di composti cementizi, si aumenta la resistenza a lungo termine e la durabilità delle terre stabilizzate. Inoltre, in particolari condizioni, la calce può reagire con l'anidride carbonica presente nell'aria dando vita a una reazione di carbonatazione, questa condizione però andrebbe evitata perché impedisce alla calce di reagire completamente con la terra.

L'unico svantaggio nell'utilizzo delle miscele terra-calce è rappresentato dalle emissioni di CO<sub>2</sub>, causate dall'estrazione della materia prima e della produzione della calce, per questo negli anni si sono intensificati gli studi per la ricerca di leganti alternativi per la stabilizzazione dei terreni, come ad esempio l'impiego di scarti industriali quali la polvere di buccia di riso, il polverino di marmo, la loppa d'altoforno e la cenere volante.

## 3. Materiali e metodi sperimentali

### 3.1 Materiali

#### 3.1.1 Fly ash

La cenere volante che è stata oggetto di studio è stata fornita dalla General Admixtures, un impianto chimico situato nella località di Ponzano.

Al prodotto in questione è attribuito il nome commerciale di MICRO-POZZ PFA, definita come un'aggiunta minerale ad elevata attività pozzolanica, risponde ai requisiti previsti dal DM 17-01-18 sulle Norme Tecniche per le Costruzioni ed è dotata di Marcatura CE secondo le Norme UNI EN 450-1 e UNI EN 12520.

Nella scheda tecnica fornita dalla General Admixtures il prodotto viene descritto come un'aggiunta minerale costituita da "Cenere Volante Selezionata e Controllata", dal notevole effetto fillerizzante e di elevata attività pozzolanica che contribuisce in modo importante allo sviluppo delle prestazioni del calcestruzzo, sia allo stato fresco che a quello indurito, nonché alla riduzione del calore di idratazione.

La curva granulometrica che la caratterizza e soprattutto la peculiare forma sferica delle particelle costituenti, consentono a MICRO-POZZ FA di completare la distribuzione granulometrica degli inerti e risolvere il problema della carenza di parti fini nel conglomerato.

La scheda tecnica inoltre definisce i dosaggi necessari per la realizzazione del calcestruzzo che variano da 30 a 120 kg/m<sup>3</sup>. Il peso specifico della cenere è pari a 2000-2400 kg/m<sup>3</sup>.

La cenere volante è stata analizzata mediante diffrazione a raggi X, strumento utilizzato per la determinazione della composizione mineralogica dei materiali. Tale pratica si avvale di un fascio monocromatico di raggi X che, una volta inviato al campione, viene rifratto generando un fascio secondario ad angoli specifici in base ai componenti minerali del materiale. Ciò è causato dall'interazione del fascio di raggi X con la struttura cristallina, che in base alla sua geometria piega il raggio. Il fascio lascia la superficie del materiale, per poi essere misurato dal detector, che rappresenta i fasci rifratti come picchi su carta. Ogni angolo è corrispondente ad un reticolo cristallino che può essere associato ai minerali presenti.

Dall'analisi XRD (vedi figura 3.1) effettuata nel caso specifico, sono stati identificati composti come SiO<sub>2</sub> nella forma cristallina di quarzo, Mullite e l'ossido di calcio CaO (calce).

Le concentrazioni dei composti sono riportate graficamente in funzione dei vari angoli dei fasci, che possono essere associati a diversi minerali, come riportato di seguito.

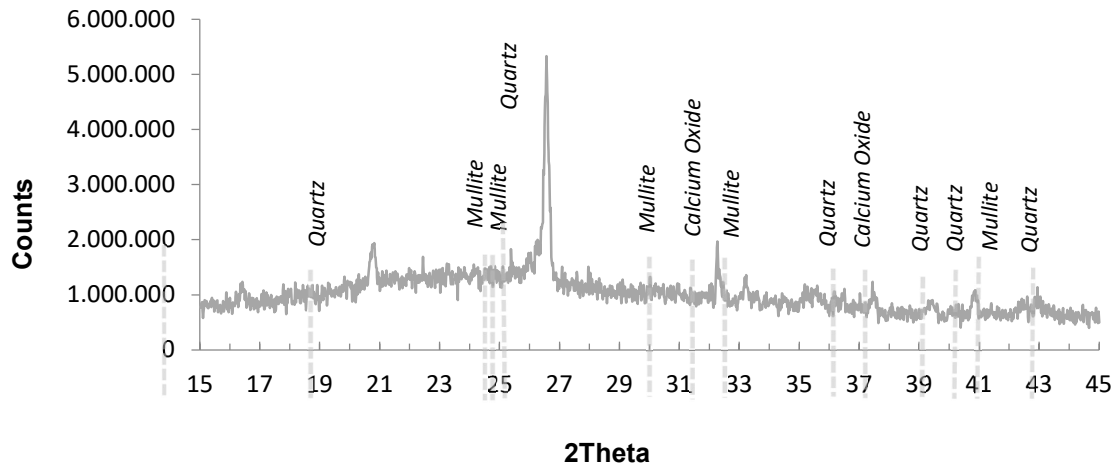


Figura 3.1 – Analisi RDX della FA

Dall'analisi tramite microscopio elettronico sono state ottenute delle immagini che mostrano la struttura microscopica della fly ash. La cenere è composta da particelle di forma sferoidale, con dimensioni che variano dai 10  $\mu\text{m}$  fino ad un minimo di 300 nm. Nelle figure dalla 3.2 alla 3.6 vengono riportate le immagini acquisite nel corso delle osservazioni a diversi livelli di ingrandimento.

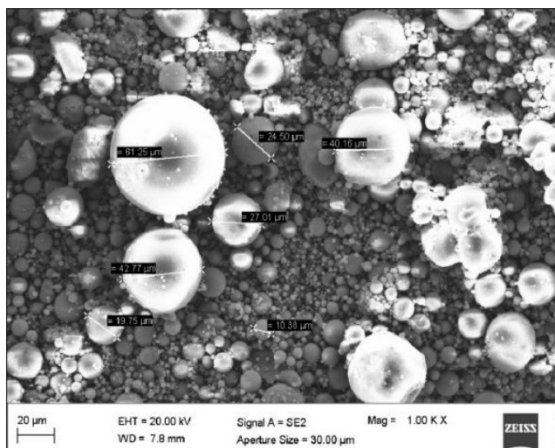


Figura 3.2 - Immagine al microscopio della FA (10,38-61,25  $\mu\text{m}$ )

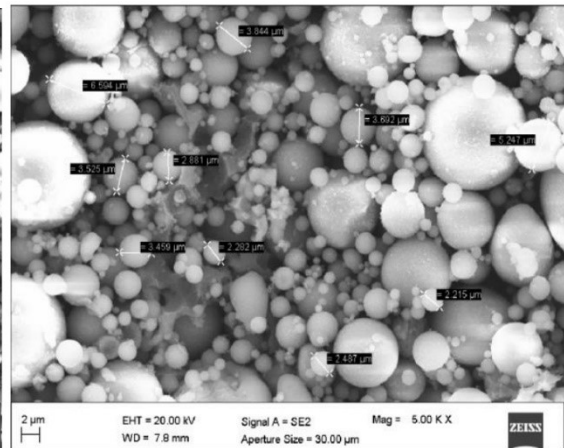


Figura 3.4 - Immagine al microscopio della FA (2,22-6,59  $\mu\text{m}$ )

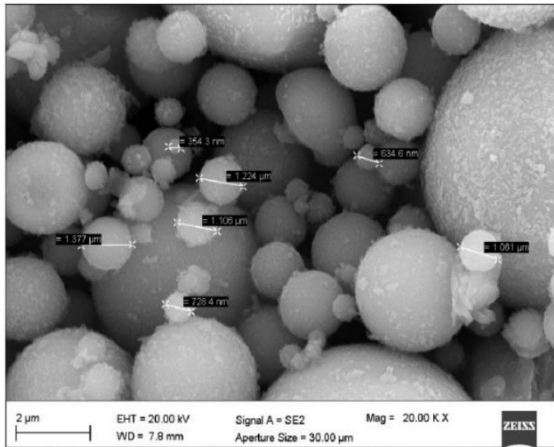


Figura 3.5 - Immagine al microscopio della FA (1,38-0,35 μm)

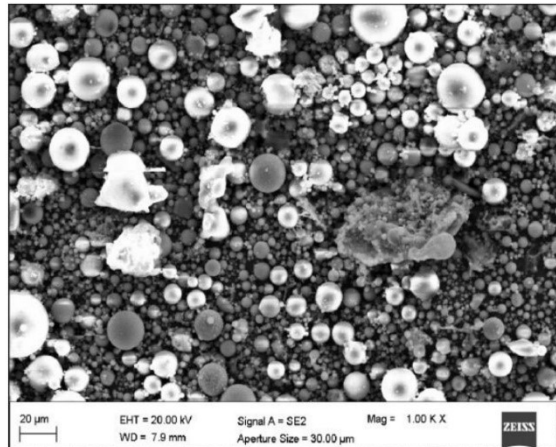


Figura 3.6 - Immagine al microscopio della FA

L'analisi al microscopio fornisce anche la spettroscopia attraverso il rilevamento degli elementi che compongono il provino: nel caso particolare i componenti rilevati sono silicio, alluminio, ossigeno, ferro, calcio, potassio, magnesio, sodio, titanio e zolfo. La differenza principale con l'analisi DRX deriva dal fatto che la spettroscopia fornisce informazioni riguardanti la composizione del materiale riferita ai singoli elementi, mentre la diffrazione a raggi X permette di distinguere i composti cristallini.

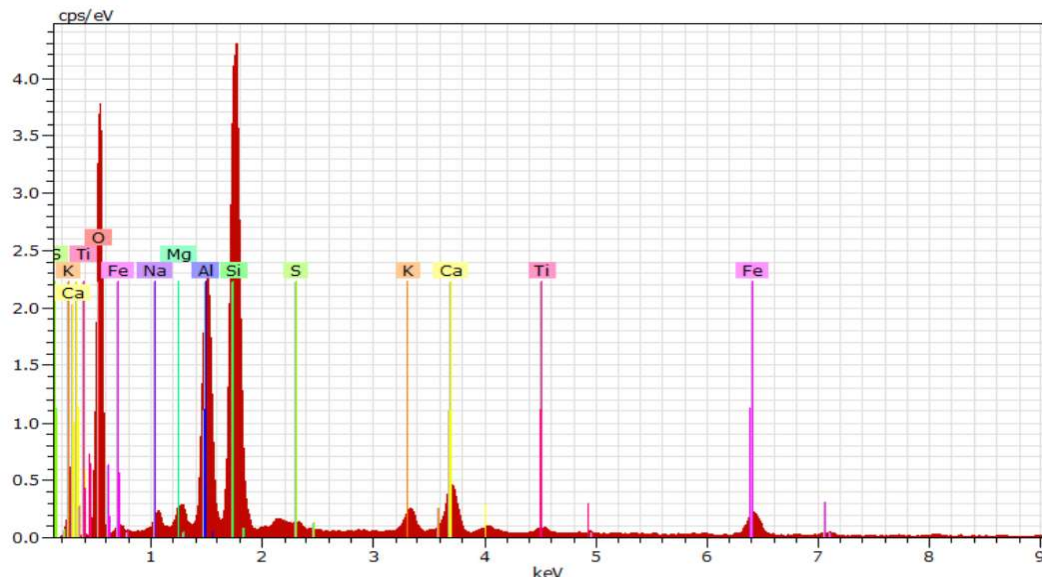


Figura 3.7 – Spettroscopia della FA

### 3.1.2 Calce

La calce utilizzata corrisponde alla sigla CL80-Q secondo la norma UNI EN 459-1 “Calci da costruzione – Definizioni, specifiche e criteri di conformità”. In particolare, si tratta di una calce aerea calcica in cui la componente percentuale in massa della frazione (CaO + MgO) rappresenta più del 80%, è una calce viva fornita in polvere fine. La calce utilizzata presenta una pezzatura tale da essere completamente passante al setaccio 200 ASTM (apertura 0.075 mm).

### 3.1.3 Terra

Il terreno oggetto di studio proviene dalla località di San Giovanni Teatino (SGT), in provincia di Chieti ed è un terreno argilloso, classificato come argilla magra (CL) ed è composto da una percentuale di fine pari al 97%, un 39% di frazione argillosa e una percentuale di sabbia del 3%.

I criteri di classificazione dei terreni e di accettazione dei materiali da costruzione si basano principalmente sull'analisi granulometrica. Le informazioni che si ricavano da questo tipo di prova sono usate inoltre per studiare i problemi di filtrazione. L'obiettivo dell'analisi granulometrica è quello di determinare la composizione di una terra in termini di percentuali in peso di diverse classi di grandezza delle particelle costituenti il terreno, riferendolo al peso secco del campione iniziale.

Un'analisi granulometrica si effettua per setacciatura e/o per sedimentazione; la prima viene eseguita con una serie di setacci, sovrapposti con apertura via via decrescente dall'alto verso il basso, fatti vibrare in modo che i granuli di terra vengano separati in frazioni pressoché uguali e trattenuti nei setacci col diametro corrispondente.

La curva granulometrica (vedi figura 3.8) si ottiene mettendo in relazione la dimensione dei grani in millimetri e la percentuale di trattenuto o passante delle particelle attraverso ciascun setaccio durante la setacciatura.

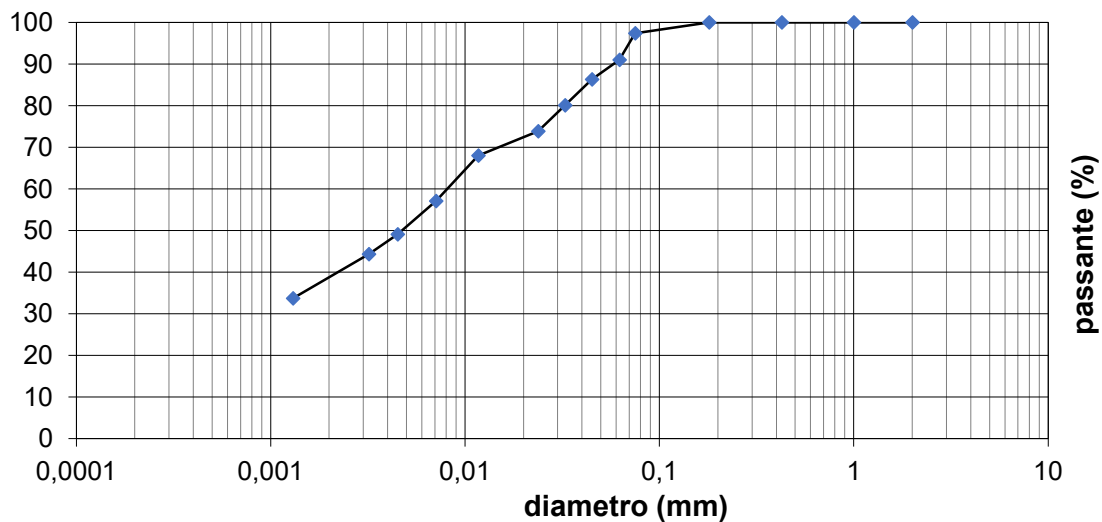


Figura 3.8 – Curva granulometrica terreno

Nell'ambito dell'ingegneria, i terreni si suddividono in base alla loro granulometria, in terreni fini, come il limo e l'argilla, e in terreni a grana grossa, in cui rientrano la ghiaia e la sabbia.

Le argille fanno parte degli elementi attivi che, insieme a quelli inerti, formano la fase solida dei terreni. Si tratta di silicati di alluminio idratati complessi, con un'elevata affinità per l'acqua, la cui presenza, infatti, può provocare notevoli variazioni di volume e di resistenza.

I granuli argillosi presentano una forma appiattita, che dona loro un comportamento principalmente governato da forze superficiali. A livello microscopico la superficie delle particelle d'acqua presenta generalmente una carica negativa, per cui i cationi presenti nell'acqua formano uno strato disperso intorno alle particelle. Questo sistema prende il nome di doppio strato elettrico. Le molecole d'acqua si comportano come dipoli e sono attratte dalla superficie delle particelle. A queste molecole si dà il nome di acqua adsorbita ed esse entrano a far parte integrante della struttura della particella argillosa. Inoltre, i dipoli adsorbiti e gli ioni liberi generano dei campi elettrici, e di conseguenza azioni repulsive tra i granuli.

Per questi motivi il comportamento delle argille è fortemente influenzato dall'acqua in esse presente, che, insieme agli effetti dell'attrazione intermolecolare, conferisce a questi minerali proprietà coesive e di attività.

Risulta dunque fondamentale definire i limiti, in termini di contenuto d'acqua, che descrivono il comportamento del terreno fine, noti come limiti di Atterberg o limiti di consistenza. A tal fine, sono stati definiti:

- il limite plastico ( $w_P$ ), che separa il passaggio dallo stato semisolido al plastico;
- limite liquido ( $w_L$ ), che separa il passaggio dallo stato plastico al fluido;

- l'indice di plasticità ( $I_p$ ), cioè la differenza tra il limite liquido e quello plastico.

Nel caso del terreno preso in esame, il limite liquido è pari a 40, il limite plastico è uguale a 20, e, di conseguenza, l'indice di plasticità, definito come la differenza tra i due suddetti limiti, è pari a 20.

## 3.2 Metodi sperimentali

### 3.2.1 Compattazione Proctor

La terra può essere impiegata quale materiale da costruzione per la costruzione delle opere in terra tipiche dell'ingegneria civile (rilevati, argini, berme) e, per tale impiego, sono stati studiati e sviluppati vari metodi di miglioramento delle caratteristiche idrauliche e meccaniche del terreno di partenza. Tra tali metodi riveste particolarmente importanza il costipamento; con questo termine si indica generalmente l'aumento artificiale della densità della terra a mezzo di apparecchiature meccaniche.

Nel costipare ogni tipo di terra si può variare il contenuto d'acqua, il tipo di costipamento e l'energia di costipamento. Variando ognuno dei fattori nella posa in opera è possibile modificare l'efficienza del processo di costipamento e le proprietà di permeabilità, compressibilità, rigonfiamento, resistenza e deformabilità del terreno.

L'ingegnere americano Proctor ha eseguito per primo studi sull'influenza del contenuto d'acqua e dell'energia di costipamento. Egli ha ideato una prova nella quale la terra, posta a strati in un recipiente metallico cilindrico, viene compattata per azione di un pestello a caduta libera. L'energia di costipamento può variare modificando il peso del pestello, l'altezza di caduta, il numero di colpi per strato e lo spessore degli strati.

Se si fa variare il contenuto d'acqua del campione in esame, mantenendo costante l'energia di costipamento e si rappresenta in un diagramma (vedi figura 3.9) la variazione del peso di volume secco  $\gamma_d$ , in funzione del contenuto d'acqua  $w$ , si ottiene una curva a campana che presenta un massimo in corrispondenza di un certo contenuto d'acqua indicato anche come "optimum Proctor", a cui corrisponde un "maximum" di densità secca.

Se per una stessa terra si adopera lo stesso metodo di costipamento, ma si varia l'energia, si ottiene una famiglia di curve con andamento simile. Al crescere dell'energia di costipamento aumenta il peso di volume secco massimo e diminuisce il contenuto d'acqua "optimum".

Andando verso contenuti d'acqua elevati, la curva di costipamento è all'incirca approssimata dalla curva di saturazione, che risulta inoltre parallela alla linea che congiunge i punti di "optimum". Tale curva di saturazione può essere individuata calcolando per ciascun valore di peso di volume secco il contenuto d'acqua necessario a saturare il materiale.

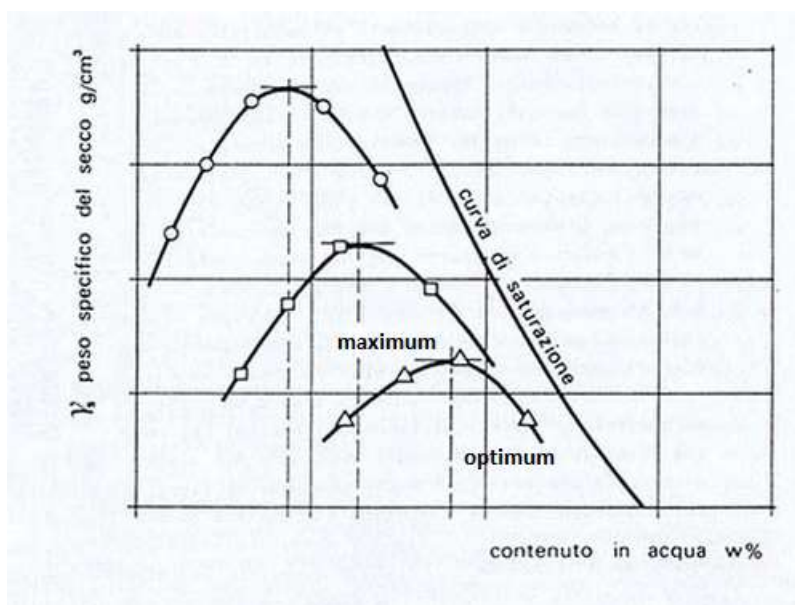


Figura 3.9 – Curve di costipamento

La prova di costipamento prevede specifiche caratteristiche e dimensioni delle apparecchiature (figure 3.10 e 3.11):

- fustella con diametro: 10,16 cm, altezza pari a 11,7 cm e volume di 945 cm<sup>3</sup>;
- pestello con diametro di 50,8 mm e peso di 2,5 kg.

Per prima cosa si unge con la vaselina l'interno della fustella per favorire l'estrazione del campione una volta compattato, successivamente si aggancia il contenitore alla base e si inseriscono 700g di terreno che andranno poi livellati. La fase di compattazione consiste in 25 colpi impressi su ciascuno strato di terreno con il maglio, di cui i primi 4 in croce e il resto ruotando in senso orario o antiorario. A questo punto si stacca il terreno in avanzo, e se presenti, si ripete il processo con i successivi strati fissando anche un anello superiore (collare per contenere il terreno).

Alla fine, si estrae il collare ruotandolo lentamente, successivamente si raso il campione prelevando al centro una frazione di materiale per la misurazione del contenuto d'acqua, la fustella viene poi pesata con il terreno all'interno (immagini in figura 3.12 e 3.13). A questo punto si estrae il campione con un estrattore a pistone, che, dopo essere posto a maturare, verrà utilizzato per un eventuale prova edometrica, di taglio o di permeabilità.





Figura 3.10 – Maglio e fustella



Figura 3.11 – Montaggio prova



Figura 3.12 – Fustella compattata



Figura 3.14 – Fustella finale

### 3.2.2 Prova di permeabilità

La permeabilità è la proprietà di un terreno o di una roccia di lasciarsi attraversare dall'acqua sotto un determinato gradiente idraulico; in particolare, la permeabilità assoluta può essere quindi definita come il volume di acqua che, soggetta all'azione della gravità, passa nell'unità di tempo, attraverso l'unità di superficie di una sezione di roccia acquifera, sotto un gradiente idraulico unitario a 20 °C. Il concetto di permeabilità è strettamente collegato con la porosità, che dà un'indicazione degli spazi vuoti presenti.

Ad esempio, per l'argilla tenera, la permeabilità  $k$  è inferiore a  $10^{-9}$  m/s.

Nel caso oggetto di studio, la permeabilità è stata valutata mediante una prova a carico variabile, impiegando permeametri a pareti flessibili, in cui è stato misurato il volume d'acqua che ha attraversato il campione di terra, in un determinato periodo di tempo.

Il provino di terreno è alloggiato all'interno della cella tra due pietre porose, che hanno lo scopo di distribuire l'acqua in maniera uniforme, seguite da una carta filtro che previene l'occlusione dei pori della pietra porosa con particelle fini di terreno. Sulla parte inferiore e su quella superiore è presente un supporto dotato di bocchette collegate ai condotti di ingresso e uscita dell'acqua, mentre lateralmente il campione viene isolato idraulicamente da una membrana sigillata con l'ausilio degli o-ring. Il cilindro esterno in plexiglass viene riempito d'acqua e sigillato tramite un tappo superiore e tre tiranti.

La prova è effettuata grazie al collegamento della base con tre condotti; uno connesso alla buretta di ingresso, uno in uscita, e l'ultimo connesso alla buretta della cella che consente il monitoraggio della variazione d'acqua all'interno della cella stessa.

I tre condotti sono collegati a un pannello di controllo, che funge da indicatore visivo del flusso di entrata, di uscita e della cella, in cui è possibile settare le pressioni delle tre vie.

Prima di avviare le misurazioni, è necessario saturare il campione. Per il raggiungimento di tale scopo, vengono applicate due pressioni, che saranno incrementate gradualmente: una che caratterizza l'ingresso e l'uscita, fino al raggiungimento di 40 psi, ed una che caratterizza l'acqua di cella, di 45 psi nel caso preso in esame.

Una volta completato il processo di saturazione si impostano le pressioni che verranno utilizzate durante la prova, ossia 43 psi per l'ingresso, 40 psi per l'uscita e 45 psi in cella per il confinamento del campione. Per calcolare il coefficiente di permeabilità si misurano, durante più prove, la differenza di livello d'acqua in ingresso e in uscita, il tempo in cui si sviluppa la filtrazione e la temperatura ambientale, per una eventuale correzione connessa alla viscosità cinematica dell'acqua.

Il calcolo della permeabilità  $k$  avviene attraverso la formula:

$$k = \frac{a \cdot L}{2A(t_1 - t_2)} \times \ln\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}\right)$$

dove:

$k$  = coefficiente di permeabilità [L/T]

$a$  = area della buretta [L<sup>2</sup>]

$L$  = lunghezza del campione [L]

$A$  = area della sezione trasversale del campione [ $L^2$ ]

$(t_1-t_2)$  = intervallo di tempo per un ciclo di permeazione [T]

$\Delta h_1$  = differenza di carico iniziale [L]

$\Delta h_2$  = differenza di carico finale [L]



Figura 3.15 – Prova di permeabilità montata

Nei momenti in cui non è in corso la prova, si blocca il flusso tra ingresso e uscita, annullando il gradiente idraulico, mettendo le pressioni dei due condotti in ponte a 40 psi.

### 3.2.3 Prova edometrica

Le prove di compressione edometrica consentono di:

- determinare la relazione tensione-deformazione che caratterizza le proprietà di compressibilità e di rigonfiamento per effetto di variazioni di stato tensionale effettivo in condizioni monodimensionali;
- determinare le caratteristiche che governano la variabilità di tali deformazioni nel tempo, per effetto dei fenomeni di consolidazione primaria e secondaria;
- ricostruire la storia tensionale del terreno.

Nella cella edometrica un provino cilindrico di terreno, confinato lateralmente da un anello metallico immerso in acqua, è sottoposto ad una sollecitazione verticale bloccando le deformazioni trasversali. Le condizioni di drenaggio in direzione verticale

sono consentite dalla presenza di carta da filtro e pietre porose sulle basi inferiore e superiore del provino. Prima di dare inizio alla prova si misurano le dimensioni dell'anello, la sua tara e il peso umido del provino.

Mediante un sistema di pesi, si applicano successivi incrementi di tensione verticale,  $\sigma_v$ , variabili secondo una progressione geometrica. Nel caso preso in esame è stato utilizzato uno schema che prevede il progressivo raddoppio dei carichi ogni 24 h, partendo da 50 kPa, fino al raggiungimento di una pressione di 3200 kPa.

La fase di scarico e la successiva fase di ricarico, si effettua con un numero di gradini pari alla metà di quelli relativi alla fase di carico.

Durante ogni incremento di carico, i cedimenti verticali del provino vengono misurati mediante un trasduttore di spostamento. Al termine della prova si traccia la curva di consolidazione, ottenuta rappresentando il valore del cedimento totale cumulato nel tempo, per poi effettuare lo smontaggio della prova e il provino viene pesato ed essiccato per la misura del suo peso secco.



Figura 3.16 – Edometro

Ogni incremento è mantenuto al fine di consentire il completo sviluppo della consolidazione primaria e per garantire la completa dissipazione delle sovrappressioni interstiziali, in modo che la variazione delle tensioni totali corrisponda a quella delle tensioni efficaci, simulando un processo di consolidazione monodimensionale.

I risultati della prova edometrica vengono riportati graficamente attraverso la rappresentazione dei cedimenti del provino che variano in funzione del tempo. Da questo andamento è possibile distinguere due diverse fasi nel processo di consolidazione:

- consolidazione primaria, che termina col raggiungimento del cedimento  $\delta_{100}$  che viene determinato graficamente dall'intersezione tra la retta tangente al punto di flesso e quella che interpola l'ultimo tratto della curva. Al tempo  $t_{100}$  corrisponde un certo cedimento chiamato di fine consolidazione primario;

- consolidazione secondaria, di natura viscosa.

Questa risulta la più diffusa procedura di interpretazione della curva cedimenti-tempo, noto come metodo di Casagrande, con cui è possibile determinare l'aliquota del cedimento primario.

Esiste un metodo alternativo ma meno diffuso, chiamato costruzione di Taylor. In questo caso, i cedimenti sono rappresentati in funzione della radice quadrata del tempo e il cedimento di fine consolidazione è quello corrispondente al tempo  $t_{90}$ , che può essere identificato dall'intersezione tra la retta interpolatrice e la retta con ascisse incrementate del 15%.

Come risultato della prova edometrica si può riportare la curva di compressibilità, mettendo in relazione l'indice dei vuoti ( $e$ ) e il logaritmo delle tensioni efficaci ( $\log \sigma'$ ) oppure la deformazione assiale, ( $\epsilon$ ) con il logaritmo delle tensioni efficaci ( $\log \sigma'$ ).

Tale curva è caratterizzata da un primo tratto, detto di ricompressione, in cui le deformazioni sono di natura elastica ed un secondo tratto, detto di compressione, in cui le deformazioni sono principalmente plastiche. Ogni tratto del grafico può essere descritto da un parametro che descrive la pendenza dei vari tratti, considerati rettilinei:

- indice di ricompressione  $C_R$ , lungo il ramo di ricarico iniziale;
- indice di compressibilità  $C_C$ , lungo la retta di normal-consolidazione;
- indice di rigonfiamento  $C_S$ , lungo i rami di scarico ed eventuale ricarico.

Un altro valore importante ricavato dalla prova edometrica è rappresentato dal modulo di compressione edometrica  $E_{ed}$ , calcolato come il rapporto tra la differenza di tensione e la variazione dell'indice dei vuoti. Questo parametro è di fatto un'importante indicatore del comportamento del terreno, infatti, tanto è maggiore il valore del modulo edometrico, tanto meno è deformabile il materiale.

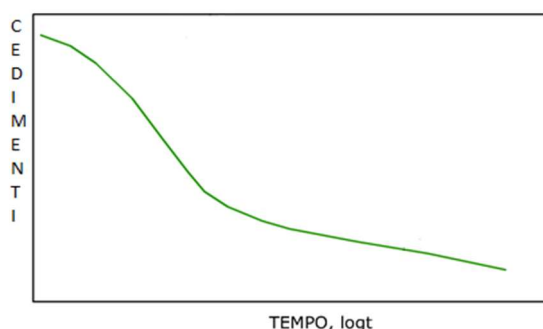


Figura 3.17 – Curva cedimenti-tempo

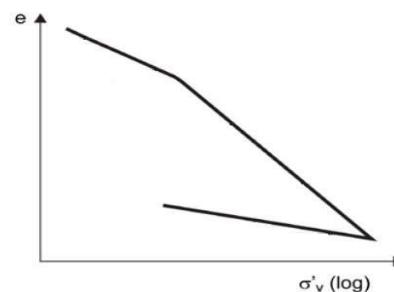


Figura 3.18 – Curva di compressibilità

### 3.2.4 SEM

Il microscopio elettronico a scansione (SEM per Scanning Electron Microscope) è costituito da una camera operante ad un elevato valore di vuoto e nel quale un campione viene fatto interagire con un fascio elettronico ad elevata energia. Dalla interazione tra fascio elettronico e campione vengono originati e raccolti numerosi segnali utilizzabili per la formazione delle immagini relative alla struttura morfologica del campione e per lo studio della sua composizione chimico-fisica.

Il principio di funzionamento del SEM è che un fascio elettronico generato da una opportuna sorgente viene focalizzato da un sistema di lenti elettromagnetiche e, tramite un sistema di deflessione, viene inviato sul campione da analizzare. Il sistema di deflessione permette di realizzare scansioni su aree rettangolari di dimensioni variabili. Il segnale originato a seguito dell'interazione fascio-campione viene raccolto da opportuni rilevatori e trasferito alla griglia di controllo di un tubo a raggi catodici (CRT per Cathode Ray Tube); il segnale raccolto modula l'intensità del fascio elettronico del CRT generando il contrasto nell'immagine finale che viene visualizzata sul display.

Il microscopio elettronico a scansione è costituito dunque da diverse parti: la sorgente di elettroni è il cannone elettronico, composto da un filamento di tungsteno, dal wehnelt e dall'anodo. Il cannone genera un fascio di elettroni e li accelera ad energie comprese tra 1 e 40 keV. Il sistema di lenti serve a ridurre il diametro del fascio emesso dalla sorgente e lo focalizza sulla superficie del campione. Il sistema di deflessione deflette il fascio in modo che l'interazione con il campione avvenga punto per punto sulla sua superficie; un sistema di bobine di deflessione permette di realizzare scansioni su aree rettangolari di dimensioni variabili. I rivelatori raccolgono il segnale emesso a seguito dell'interazione del fascio con il campione.

Il segnale raccolto modula l'intensità di un CRT generando il contrasto nell'immagine finale.

## 4. Risultati sperimentali

### 4.1 Costipamento

Lo scopo delle prove effettuate è verificare l'efficacia dell'aggiunta di cenere volante a terreni, in questo caso argillosi.

Per prima cosa è stato prelevato un quantitativo sufficiente di terreno, all'incirca pari a 2100g, che verrà successivamente frantumato fino al raggiungimento di una pezzatura adeguata.

Si è deciso di operare con un'umidità della terra di circa del 20% e, per raggiungere questa percentuale, si è misurato il contenuto d'acqua di partenza del terreno prelevato, per poi calcolare il quantitativo d'acqua in grammi da aggiungere per raggiungere il contenuto d'acqua desiderato.

Sono stati confezionati 3 campioni di terreno; i primi due (MIX A e B) sono stati additivati con il 2% di calce e il 4% di fly ash, mentre all'ultimo (MIX C) sono stati aggiunti il 2% di cenere volante e il 2% calce. Il primo e l'ultimo campione sono stati sottoposti alla prova edometrica, mentre il secondo è stato sottoposto alla prova di permeabilità.

Prima di iniziare il test, come da procedura, viene pesato il terreno e calcolata l'umidità, che naturalmente sarà leggermente diminuita rispetto a quella iniziale a causa del processo di idratazione, conseguente all'aggiunta della fly ash e della calce.

Tutti e tre i campioni sono stati sottoposti alla prova di compattazione Proctor Standard, da cui sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- il primo provino, cioè il MIX A, presenta un'umidità del 19,75% e un peso di volume secco  $\gamma_d$  di 17,36 g/cm<sup>3</sup>;
- il MIX B ha un  $\gamma_d$  di 17,7 g/cm<sup>3</sup>, a fronte di un contenuto d'acqua del 19,5%;
- il MIX C ha un  $\gamma_d$  di 17,73 g/cm<sup>3</sup>, e un'umidità del 18,88%.

Questi punti sono stati riportati graficamente (vedi figura 4.1) tramite dei punti blu e verdi, per poi essere confrontati con l'andamento di un terreno normale non trattato (curva grigia) e uno trattato con il 4% di calce (curva nera).

In tutti e tre i casi (mix A, B e C), a parità di contenuto d'acqua, il peso di volume del secco risulta maggiore del terreno additivato con la sola calce.

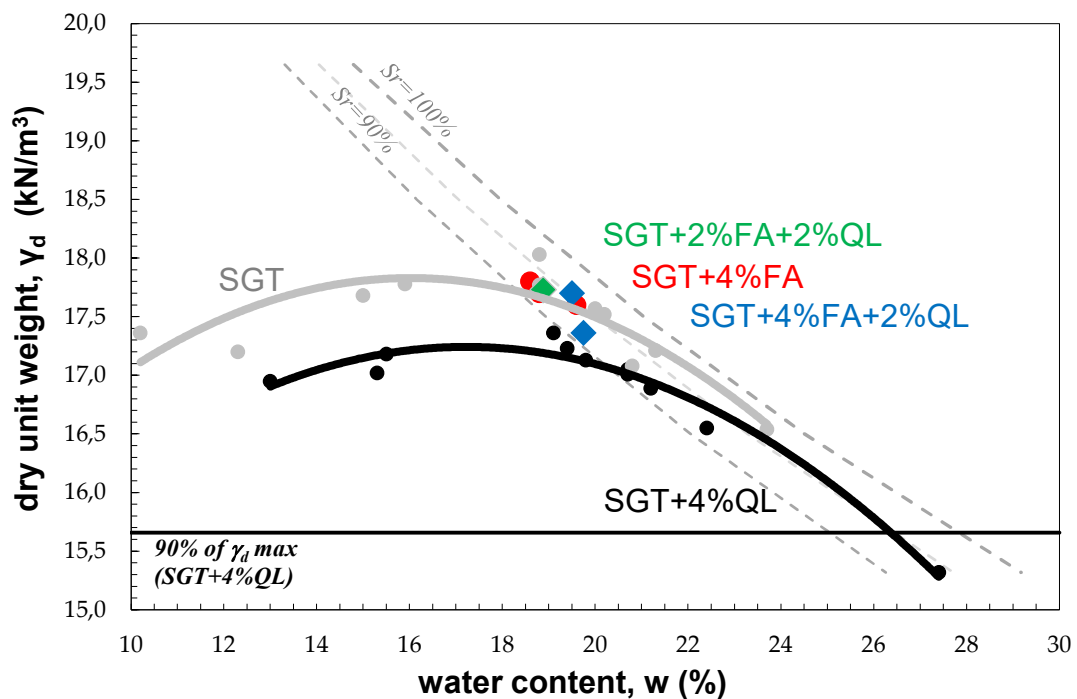


Figura 4.1 – Curve di compattazione Proctor e coppie (w,  $\gamma_d$ ) dei campioni confezionati con calce e cenere volante.

È possibile, inoltre, confrontare i risultati della prova Proctor eseguita nel presente lavoro di tesi con quelli di un precedente lavoro di ricerca, eseguito sullo stesso terreno, che però prevedeva la sola aggiunta del 4% di cenere volante (punti rossi) e si può facilmente percepire l'analogia con i risultati nel comportamento con i campioni oggetto di studio.

Come valore minimo di riferimento, solitamente utilizzato per le specifiche tecniche di interventi di stabilizzazione, si utilizza il 90% della massima densità secca ottenuta per i campioni stabilizzati con il legante tradizionale.

Per ognuno dei tre campioni confezionati le caratteristiche di compattazione si possono considerare adeguate, garantendo un peso di volume secco maggiore rispetto a quello di riferimento.

In conclusione, si ottengono dei valori di peso di volume secco lievemente più alti rispetto a quelli che si otterrebbero senza trattamento del terreno o con l'aggiunta della singola calce.

Tale risultato, ottenuto con l'utilizzo della fly ash è sicuramente un risultato che promette buoni risultati in termini di resistenza, e compressibilità.



## 4.2 Conducibilità idraulica

Nella prova di conducibilità idraulica, il campione del terreno con il 2% di calce e il 4% di cenere volante è stato sottoposto a una prova a 7 giorni di stagionatura, per poi essere interrotta circa due mesi dopo.

Per ogni misurazione viene stimato un valore di conducibilità idraulica, poi corretto in base alla temperatura rilevata.

Durante la prova non sono state riscontrate anomalie tra i volumi di entrata e di uscita; quindi, l'andamento del coefficiente di conducibilità  $k$  si mostra stabile, mantenendo un valore di  $8,8 \cdot 10^{-9}$  m/s, e un valore finale pari a  $9,3 \cdot 10^{-9}$  m/s.

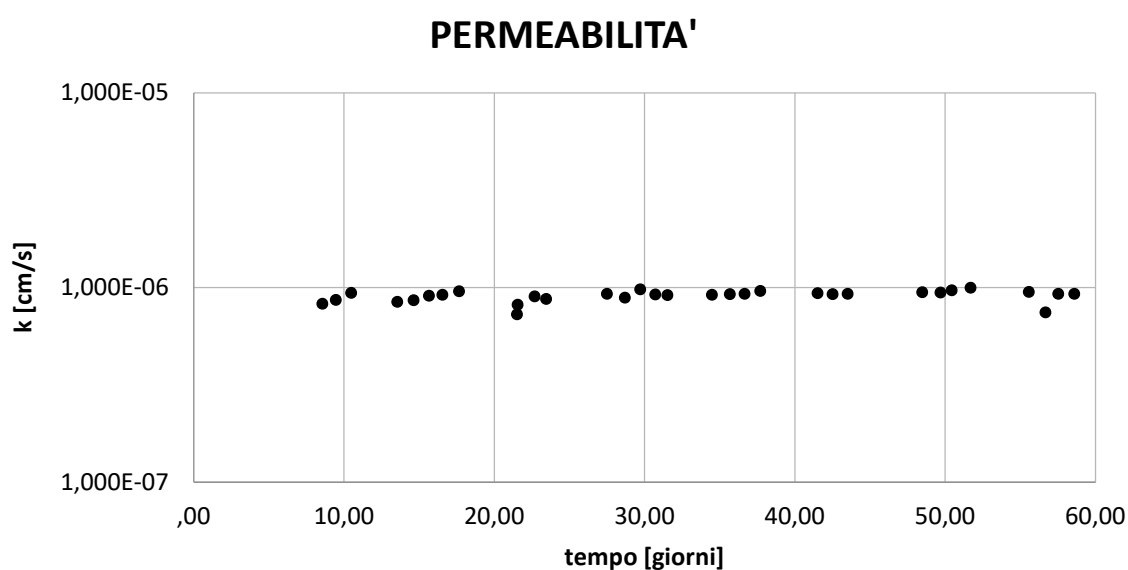


Figura 4.2 – Andamento di K al progredire del tempo

Il terreno non trattato ha una conducibilità idraulica di  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s, perciò minore di circa due ordini di grandezza rispetto al terreno con l'aggiunta della fly ash e della calce.

Questo aumento della conducibilità idraulica del terreno è riconducibile a un incremento delle porosità interconnesse nel materiale, a seguito della reazione di scambio cationico innescata dall'aggiunta dei leganti.

Il risultato della prova è sicuramente positivo, visto che un'alta conducibilità dei terreni, nell'ambito delle costruzioni, garantisce un buon drenaggio velocizzando il processo di filtrazione attraverso il materiale. Un esempio può essere riscontrato nei terreni utilizzati per i sottofondi o i rilevati stradali, in cui è necessaria un'adeguata filtrazione per il drenaggio delle acque superficiali, come quelle meteoriche.

Di seguito sono riportate le misurazioni dei livelli d'acqua in uscita e in entrata nel campione, lette tramite il pannello di controllo (vedi figura 4.3) e i relativi calcoli di permeabilità, eseguiti applicando la formula di pagina 18.

data e ora	Lettura E	Lettura U	Temp (°C)	k <sub>20</sub> (cm/s)
17/05/2023 11:54	2,40	21,30	21,5	8,23×10 <sup>-7</sup>
17/05/2023 13:25	22,60	1,40	21,5	
18/05/2023 09:40	2,60	21,00	20,0	8,62×10 <sup>-7</sup>
18/05/2023 10:47	18,20	6,00	20,0	
19/05/2023 10:08	0,00	24,00	20,0	9,36×10 <sup>-7</sup>
19/05/2023 11:22	18,60	5,50	20,0	
22/05/2023 11:21	2,20	20,70	21,0	8,40×10 <sup>-7</sup>
22/05/2023 13:00	25,00	0,00	21,0	
23/05/2023 14:03	0,20	23,60	22,0	8,58×10 <sup>-7</sup>
23/05/2023 15:23	19,40	4,50	22,0	
24/05/2023 14:38	2,10	22,30	22,0	9,06×10 <sup>-7</sup>
24/05/2023 15:58	22,00	2,60	22,0	
25/05/2023 12:28	2,40	22,00	22,0	9,16×10 <sup>-7</sup>
25/05/2023 13:25	17,10	7,40	22,0	
26/05/2023 14:49	0,30	23,70	23,0	9,54×10 <sup>-7</sup>
26/05/2023 15:55	18,40	5,60	23,0	
30/05/2023 10:30	1,20	22,90	23,0	7,27×10 <sup>-7</sup>
30/05/2023 12:08	21,40	3,00	23,0	
30/05/2023 12:09	0,60	22,90	23,0	8,14×10 <sup>-7</sup>
30/05/2023 13:33	20,10	3,60	23,0	
31/05/2023 15:07	2,60	21,80	24,0	8,97×10 <sup>-7</sup>
31/05/2023 16:20	21,50	3,20	24,0	
01/06/2023 09:58	1,20	23,90	23,5	8,73×10 <sup>-7</sup>
01/06/2023 10:53	15,30	9,60	23,5	
05/06/2023 10:30	2,50	21,40	23,0	9,27×10 <sup>-7</sup>
05/06/2023 11:43	21,40	2,50	23,0	
06/06/2023 15:44	3,60	20,20	24,0	8,86×10 <sup>-7</sup>
06/06/2023 16:41	18,20	5,60	24,0	
07/06/2023 16:11	2,00	21,50	24,0	9,75×10 <sup>-7</sup>
07/06/2023 17:23	21,40	0,90	24,0	
08/06/2023 16:11	2,00	21,30	25,0	9,20×10 <sup>-7</sup>
08/06/2023 17:23	21,40	2,00	25,0	
09/06/2023 11:09	2,50	20,60	24,0	9,12×10 <sup>-7</sup>
09/06/2023 12:21	21,30	2,00	24,0	
12/06/2023 10:21	3,10	20,20	24,0	9,17×10 <sup>-7</sup>
12/06/2023 11:29	20,90	2,50	24,0	
13/06/2023 15:11	2,90	19,80	25,0	9,23×10 <sup>-7</sup>
13/06/2023 16:11	19,20	3,60	25,0	
14/06/2023 14:31	2,80	20,20	24,0	9,26×10 <sup>-7</sup>
14/06/2023 15:42	21,50	1,60	24,0	
15/06/2023 15:50	3,20	20,40	25,0	9,57×10 <sup>-7</sup>
15/06/2023 16:58	22,00	1,50	25,0	
19/06/2023 11:36	3,20	19,60	26,0	9,33×10 <sup>-7</sup>
19/06/2023 12:33	19,20	3,70	26,0	
20/06/2023 10:52	3,10	21,60	26,0	9,21×10 <sup>-7</sup>
20/06/2023 12:08	23,80	1,00	26,0	
21/06/2023 11:06	2,40	20,20	27,0	9,26×10 <sup>-7</sup>
21/06/2023 12:18	22,40	0,00	27,0	
26/06/2023 10:35	3,00	20,70	27,0	9,42×10 <sup>-7</sup>
26/06/2023 11:31	19,30	4,50	27,0	
27/06/2023 15:23	3,00	20,50	28,0	9,40×10 <sup>-7</sup>
27/06/2023 16:26	21,40	2,10	28,0	
28/06/2023 09:26	1,20	22,40	27,0	9,67×10 <sup>-7</sup>
28/06/2023 10:27	19,50	4,10	27,0	
29/06/2023 15:31	2,00	21,10	27,0	9,95×10 <sup>-7</sup>
29/06/2023 16:32	20,90	2,80	27,0	
03/07/2023 12:35	4,00	20,00	27,0	9,46×10 <sup>-7</sup>
03/07/2023 13:36	21,50	2,50	27,0	
04/07/2023 15:07	4,50	19,20	27,0	7,42×10 <sup>-7</sup>
04/07/2023 16:20	20,90	2,80	27,0	
05/07/2023 11:33	3,60	19,60	27,0	9,26×10 <sup>-7</sup>
05/07/2023 12:34	20,80	2,50	27,0	
06/07/2023 13:44	3,90	19,50	28,0	9,27×10 <sup>-7</sup>
06/07/2023 14:15	13,20	10,20	28,0	

Figura 4.3 – Tabelle delle misurazioni effettuate durante la prova di permeabilità

### 4.3 Compressibilità

I provini di terreno con l'aggiunta di calce e cenere volante sono stati sottoposti a prova di compressione unidimensionale, alla conclusione della quale sono state tracciate le curve di compressibilità, che mettono in relazione alla pressione verticale efficace applicata, l'andamento della deformazione assiale in forma percentuale.

In particolare, è stato testato il provino con il 4% di fly ash più il 2% di calce (mix A) e il terreno con il 2% di cenere volante più il 2% di calce (mix C). I due provini sono stati confrontati con un terreno non additivato (curva grigia) e con uno con il 4% di calce (curva rossa).

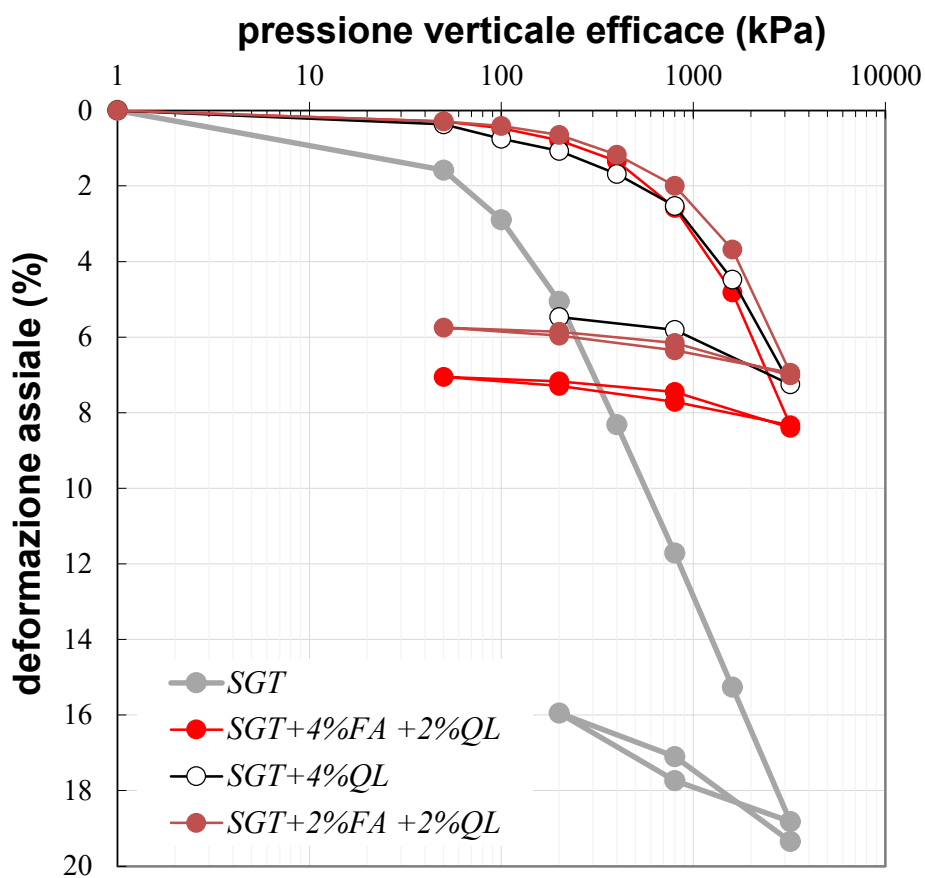


Figura 4.4 – Curve di compressibilità

Graficamente si evidenzia che i cedimenti, rispetto al terreno non trattato, vengono notevolmente ridotti in ognuno dei casi che preveda l'aggiunta dei leganti. L'aggiunta della cenere volante con calce, in termini di effetti sul comportamento del terreno, è paragonabile all'utilizzo della calce, anche se in quest'ultimo caso si ottengono dei cedimenti ancora minori.

Nel dettaglio, il suolo non trattato presenta una deformazione assiale massima che varia notevolmente in base alla soluzione scelta: pari al 19% nel caso del terreno non trattato, al 8% nel mix A (4%FA+2%QL), 7% con la calce e nel mix C (2%FA+2%QL).

Nell'intervallo di carico verticale efficace compreso tra 1600 e 3200 kPa, la deformazione assiale del terreno trattato con la fly ash si è ridotta più del doppio rispetto al terreno non trattato. Nel campo di pressioni tipico delle applicazioni stradali (fino a 200kPa) il comportamento deformativo dei tre provini additivati è simile e presenta bassissimi livelli di deformazione assiale (1%).

Per calcolare i cedimenti primari è stato fatto riferimento alla costruzione di Casagrande, prima per il terreno trattato con il 4% di cenere volante più il 2% di calce e a seguire per il terreno trattato con il 2% + 2%. In entrambi i casi i cedimenti primari risultano ridotti rispetto al terreno non trattato, come mostrato dal grafico di seguito.

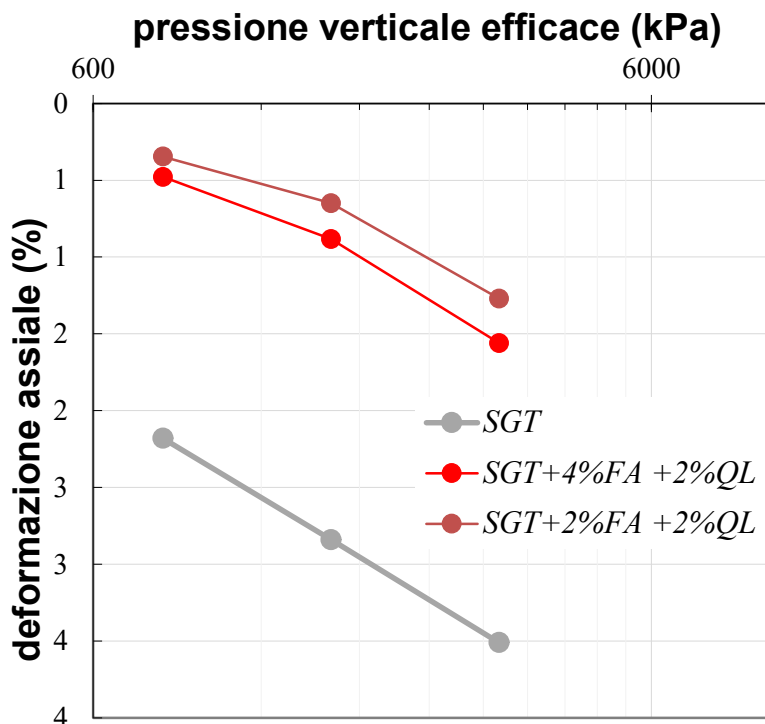


Figura 4.5 – Andamento cedimenti primari

Nel caso dei cedimenti primari, la riduzione massima delle deformazioni, grazie all'utilizzo della fly ash, è di circa 3 volte rispetto al terreno non trattato.

Nelle tabelle nelle pagine a seguire sono riportate le letture eseguite durante l'esecuzione della prova (vedi figura 4.6 e 4.7), oltre che alle costruzioni di Casagrande utilizzate per l'individuazione dei cedimenti primari.

Pressione verticale = 50 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
09/05/23 11:20	0,1	0,32	4,0	0,040
09/05/23 11:20	0,25	0,50	4,3	0,043
09/05/23 11:20	0,5	0,71	4,6	0,046
09/05/23 11:21	1	1,00	4,9	0,049
09/05/23 11:22	2	1,41	5,0	0,050
09/05/23 11:24	4	2,00	5,0	0,050
09/05/23 11:28	8	2,83	5,0	0,050
09/05/23 11:35	15	3,87	5,0	0,050
09/05/23 11:50	30	5,48	5,3	0,053
09/05/23 12:20	60	7,75	5,3	0,053
09/05/23 13:20	120	10,95	5,3	0,053
09/05/23 15:20	240	15,49	5,3	0,053
10/05/23 10:55	1415	37,62	5,6	0,056

Pressione verticale = 100 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
10/05/23 13:44	0,1	0,32	7,5	0,075
10/05/23 13:44	0,25	0,50	7,6	0,076
10/05/23 13:44	0,5	0,71	7,6	0,076
10/05/23 13:45	1	1,00	7,9	0,079
10/05/23 13:46	2	1,41	7,9	0,079
10/05/23 13:48	4	2,00	7,9	0,079
10/05/23 13:52	8	2,83	8,0	0,080
10/05/23 14:04	20	4,47	8,0	0,080
10/05/23 14:14	30	5,48	8,0	0,080
10/05/23 14:44	60	7,75	8,3	0,083
10/05/23 15:44	120	10,95	8,3	0,083
10/05/23 17:44	240	15,49	8,6	0,086
11/05/23 14:11	1467	38,30	8,9	0,089

Pressione verticale = 200 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
11/05/23 14:13	0,1	0,32	13,0	0,130
11/05/23 14:13	0,25	0,50	13,3	0,133
11/05/23 15:13	60,5	7,78	13,6	0,136
11/05/23 14:14	1	1,00	13,6	0,136
11/05/23 14:15	2	1,41	13,9	0,139
11/05/23 14:17	4	2,00	14,0	0,140
11/05/23 14:21	8	2,83	14,0	0,140
11/05/23 14:28	15	3,87	14,3	0,143
11/05/23 14:43	30	5,48	14,6	0,146
11/05/23 15:13	60	7,75	14,6	0,146
11/05/23 16:13	120	10,95	14,9	0,149
11/05/23 18:05	232	15,23	14,9	0,149
12/05/23 11:06	1253	35,40	15,0	0,150

Pressione verticale = 400 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
15/05/23 10:22	0,1	0,32	21,9	0,219
15/05/23 10:22	0,25	0,50	22,0	0,220
15/05/23 10:22	0,5	0,71	22,3	0,223
15/05/23 10:23	1	1,00	22,6	0,226
15/05/23 10:24	2	1,41	22,9	0,229
15/05/23 10:26	4	2,00	23,0	0,230
15/05/23 10:30	8	2,83	23,6	0,236
15/05/23 10:37	15	3,87	23,9	0,239
15/05/23 10:53	31	5,57	24,0	0,240
15/05/23 11:23	61	7,81	24,3	0,243
15/05/23 12:23	121	11,00	24,6	0,246
15/05/23 14:23	241	15,52	24,9	0,249
16/05/23 11:46	1524	39,04	25,6	0,256

Pressione verticale = 800 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	(+15%)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
16/05/23 11:47	0,1	0,36	39,0	0,390
16/05/23 11:47	0,25	0,57	39,6	0,396
16/05/23 11:47	0,5	0,81	40,3	0,403
16/05/23 11:48	1	1,15	41,0	0,410
16/05/23 11:49	2	1,63	42,0	0,420
16/05/23 11:51	4	2,30	42,9	0,429
16/05/23 11:55	8	3,25	43,9	0,439
16/05/23 12:02	15	4,45	44,3	0,443
16/05/23 12:17	30	6,30	46,3	0,463
16/05/23 12:47	60	8,91	47,0	0,470
16/05/23 13:30	103	11,67	47,3	0,473
16/05/23 15:20	213	16,78	48,0	0,480
17/05/23 10:39	1372	42,60	49,0	0,490

Pressione verticale = 1600 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	(+15%)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
17/05/23 10:44	0,10	0,363	68,0	0,680
17/05/23 10:44	0,25	0,575	69,0	0,690
17/05/23 10:44	0,50	0,813	71,9	0,719
17/05/23 10:45	1,00	1,15	73,9	0,739
17/05/23 10:46	2,00	1,626	76,3	0,763
17/05/23 10:48	4,00	2,3	79,9	0,799
17/05/23 10:52	8,00	3,252	82,9	0,829
17/05/23 11:07	23,00	5,515	85,9	0,859
17/05/23 11:22	38,00	7,089	87,3	0,873
17/05/23 11:44	60,00	8,907	88,6	0,886
17/05/23 12:44	120,00	12,59	89,6	0,896
17/05/23 14:49	245,00	18,00	90,3	0,903
18/05/23 09:35	1371,00	42,58	91,6	0,916

Pressione verticale = 3200 kPa (Mix C)				
Data	Tempo (min)	(+15%)	Lettura	$\Delta H$ mm
18/05/23 09:47	0,1	0,36	112,0	1,120
18/05/23 09:47	0,25	0,58	118,0	1,180
18/05/23 09:47	0,50	0,81	120,3	1,203
18/05/23 09:48	1	1,15	125,6	1,256
18/05/23 09:49	2	1,63	131,6	1,316
18/05/23 09:51	4	2,30	138,3	1,383
18/05/23 09:55	8	3,25	145,3	1,453
18/05/23 10:02	15	4,45	150,3	1,503
18/05/23 10:17	30	6,30	152,9	1,529
18/05/23 10:47	60	8,91	154,3	1,543
18/05/23 12:01	134	13,31	155,9	1,559
18/05/23 14:40	293	19,68	156,6	1,566
19/05/23 10:10	1463	43,99	158,3	1,583

Figura 4.6

Pressione verticale = 50 kPa (Mix C)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
12/06/23 11:06	0,1	0,32	4,0	0,040
12/06/23 11:06	0,25	0,50	4,3	0,043
12/06/23 11:06	0,5	0,71	4,6	0,046
12/06/23 11:07	1	1,00	4,6	0,046
12/06/23 11:08	2	1,41	4,9	0,049
12/06/23 11:10	4	2,00	4,9	0,049
12/06/23 11:14	8	2,83	5,0	0,050
12/06/23 11:21	15	3,87	5,0	0,050
12/06/23 11:36	30	5,48	5,0	0,050
12/06/23 12:06	60	7,75	5,0	0,050
12/06/23 13:06	120	10,95	5,3	0,053
12/06/23 15:06	240	15,49	5,3	0,053
13/06/23 14:58	1672	40,89	5,6	0,056

Pressione verticale = 100 kPa (Mix C)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
13/06/23 15:00	0,1	0,32	6,6	0,066
13/06/23 15:00	0,25	0,50	6,9	0,069
13/06/23 15:00	0,5	0,71	6,9	0,069
13/06/23 15:01	1	1,00	6,9	0,069
13/06/23 15:02	2	1,41	7,0	0,070
13/06/23 15:04	4	2,00	7,0	0,070
13/06/23 15:08	8	2,83	7,0	0,070
13/06/23 15:15	15	3,87	7,0	0,070
13/06/23 15:30	30	5,48	7,3	0,073
13/06/23 16:00	60	7,75	7,3	0,073
13/06/23 17:00	120	10,95	7,6	0,076
13/06/23 19:00	240	15,49	7,6	0,076
14/06/23 14:23	1403	37,46	7,9	0,079

Pressione verticale = 200 kPa (Mix C)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
14/06/23 14:23	0,1	0,32	10,0	0,100
14/06/23 14:23	0,25	0,50	10,3	0,103
14/06/23 14:23	0,5	0,71	10,3	0,103
14/06/23 14:24	1	1,00	10,6	0,106
14/06/23 14:25	2	1,41	10,6	0,106
14/06/23 14:27	4	2,00	10,9	0,109
14/06/23 14:31	8	2,83	11,0	0,110
14/06/23 14:38	15	3,87	11,0	0,110
14/06/23 14:53	30	5,48	11,3	0,113
14/06/23 15:23	60	7,75	11,6	0,116
14/06/23 16:23	120	10,95	11,6	0,116
14/06/23 18:23	240	15,49	11,9	0,119
15/06/23 15:42	1519	38,97	12,3	0,123

Pressione verticale = 400 kPa (Mix C)				
Data	Tempo (min)	RadQ (T)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
15/06/23 15:43	0,1	0,32	18,0	0,180
15/06/23 15:43	0,25	0,50	18,3	0,183
15/06/23 15:43	0,5	0,71	18,6	0,186
15/06/23 15:44	1	1,00	18,9	0,189
15/06/23 15:45	2	1,41	19,3	0,193
15/06/23 15:47	4	2,00	19,9	0,199
15/06/23 15:51	8	2,83	20,0	0,200
15/06/23 15:58	15	3,87	20,3	0,203
15/06/23 16:13	30	5,48	20,9	0,209
15/06/23 16:43	60	7,75	21,0	0,210
15/06/23 17:43	120	10,95	21,3	0,213
15/06/23 19:00	197	14,04	21,6	0,216
16/06/23 15:00	1397	37,38	22,3	0,223

Pressione verticale = 800 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	(+15%)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
19/06/23 11:17	0,1	0,36	32,0	0,320
19/06/23 11:17	0,25	0,58	32,6	0,326
19/06/23 11:17	0,5	0,81	32,9	0,329
19/06/23 11:18	1	1,15	33,0	0,330
19/06/23 11:19	2	1,63	33,9	0,339
19/06/23 11:21	4	2,30	34,3	0,343
19/06/23 11:25	8	3,25	34,6	0,346
19/06/23 11:32	15	4,45	35,0	0,350
19/06/23 11:47	30	6,30	35,6	0,356
19/06/23 12:17	60	8,91	36,0	0,360
19/06/23 13:17	120	12,60	36,9	0,369
19/06/23 15:23	246	18,04	36,9	0,369
20/06/23 10:39	1402	43,06	38,0	0,380

Pressione verticale = 1600 kPa (Mix A)				
Data	Tempo (min)	(+15%)	Lettura	$\Delta H$ (mm)
20/06/23 10:40	0,10	0,363	57,0	0,570
20/06/23 10:40	0,25	0,575	58,6	0,586
20/06/23 10:40	0,50	0,813	59,9	0,599
20/06/23 10:41	1,00	1,15	61,0	0,610
20/06/23 10:42	2,00	1,626	62,6	0,626
20/06/23 10:44	4,00	2,3	63,6	0,636
20/06/23 10:48	8,00	3,252	64,9	0,649
20/06/23 10:55	15,00	4,453	65,6	0,656
20/06/23 11:10	30,00	6,298	66,3	0,663
20/06/23 11:40	60,00	8,907	67,0	0,670
20/06/23 12:40	120,00	12,59	67,9	0,679
20/06/23 14:43	243,00	17,92	68,3	0,683
21/06/23 10:52	1452,00	43,82	69,9	0,699

Pressione verticale = 3200 kPa (Mix C)				
Data	Tempo (min)	(+15%)	Lettura	$\Delta H$ mm
21/06/23 10:54	0,1	0,36	100,0	1,000
21/06/23 10:54	0,25	0,57	104,0	1,040
21/06/23 10:54	0,50	0,81	108,3	1,083
21/06/23 10:55	1	1,15	112,3	1,123
21/06/23 10:56	2	1,63	116,3	1,163
21/06/23 10:58	4	2,30	120,6	1,206
21/06/23 11:02	8	3,25	123,3	1,233
21/06/23 11:09	15	4,45	125,6	1,256
21/06/23 11:24	30	6,30	127,0	1,270
21/06/23 11:54	60	8,91	128,3	1,283
21/06/23 12:54	120	12,60	129,0	1,290
21/06/23 14:38	224	17,21	130,0	1,300
22/06/23 14:32	1658	46,83	132,0	1,320

Figura 4.7

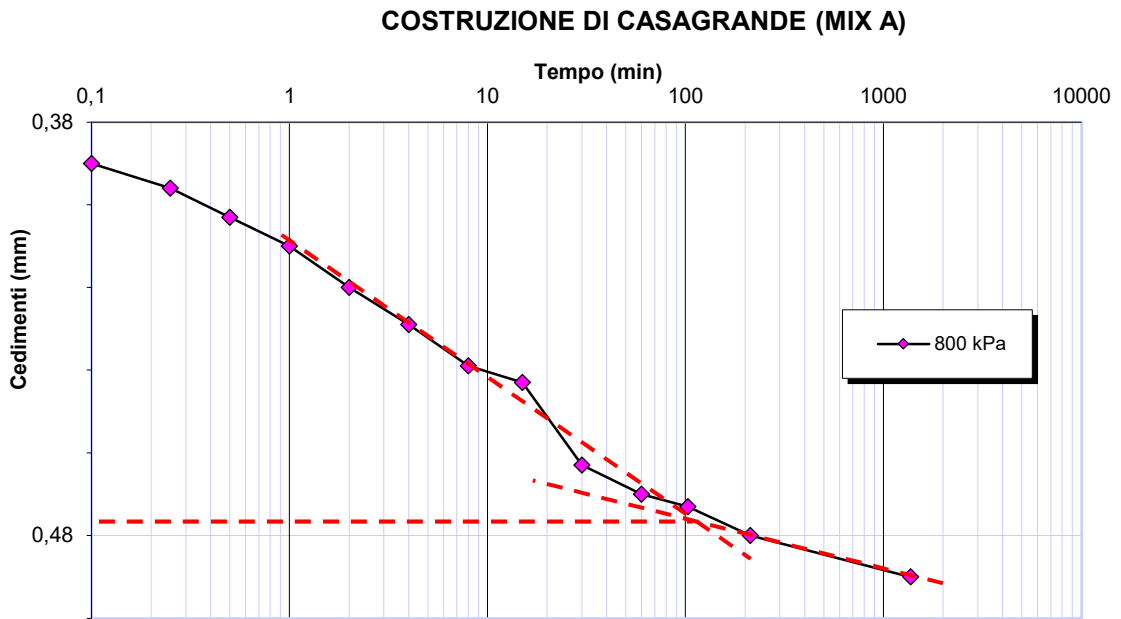


Figura 4.8 – Costruzione di Casagrande del MIX A per il calcolo del cedimento primario con carico 800 kPa

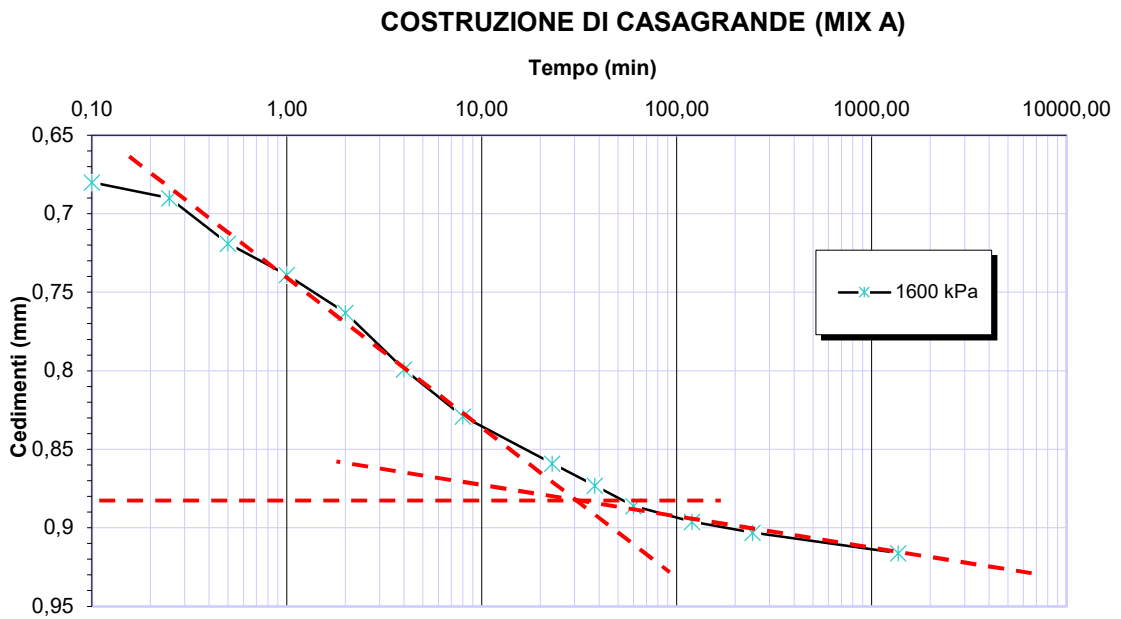


Figura 4.9 – Costruzione di Casagrande del MIX A per il calcolo del cedimento primario con carico 1600 kPa

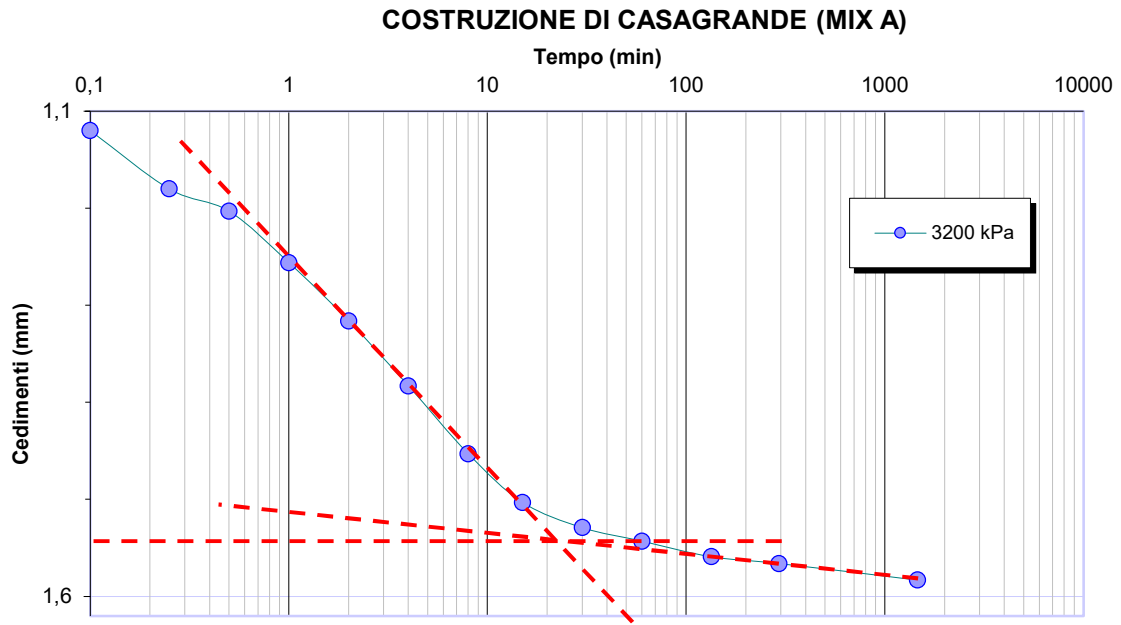


Figura 4.10 – Costruzione di Casagrande del MIX A per il calcolo del cedimento primario con carico 3200 kPa

Nel caso del MIX C, per la stima del cedimento primario con il carico da 800 kPa, è stato necessario utilizzare la costruzione di Taylor, dal momento che l'andamento della curva del metodo di Casagrande non permetteva l'intersezione delle due rette tangenti.

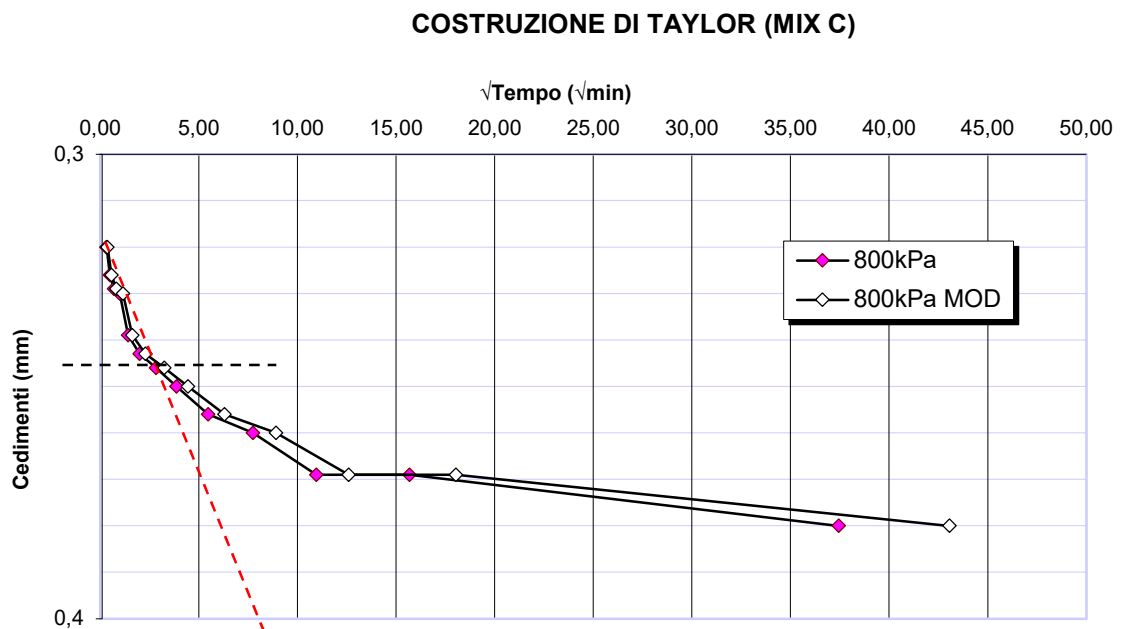


Figura 4.11 – Costruzione di Taylor del MIX C per il calcolo del cedimento primario con carico 800 kPa



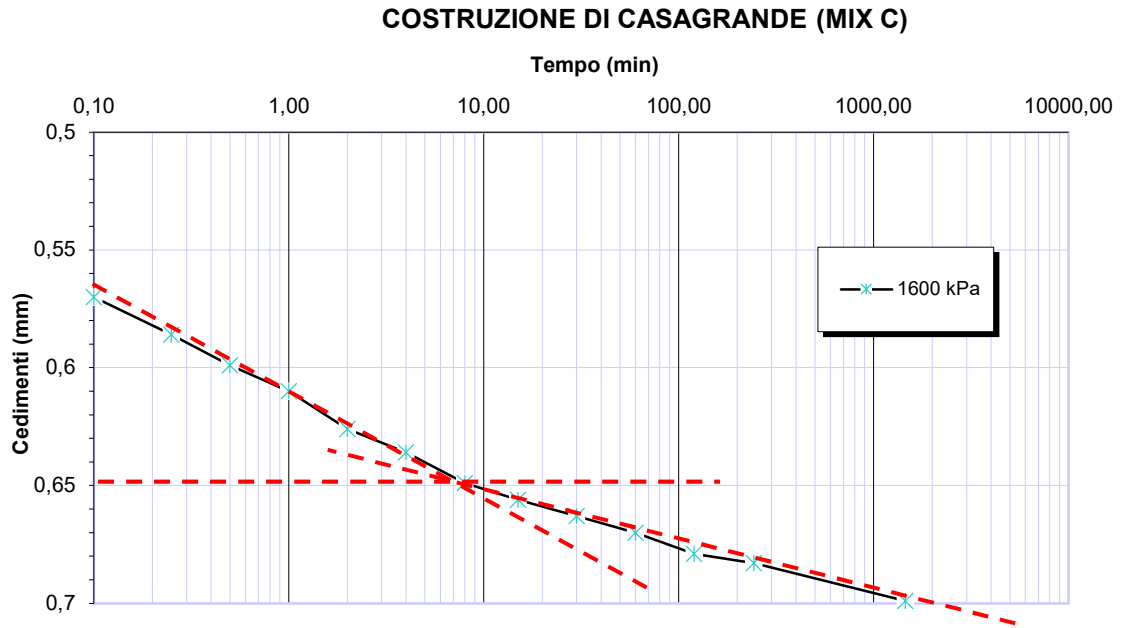


Figura 4.12 – Costruzione di Casagrande del MIX C per il calcolo del cedimento primario con carico 1600 kPa

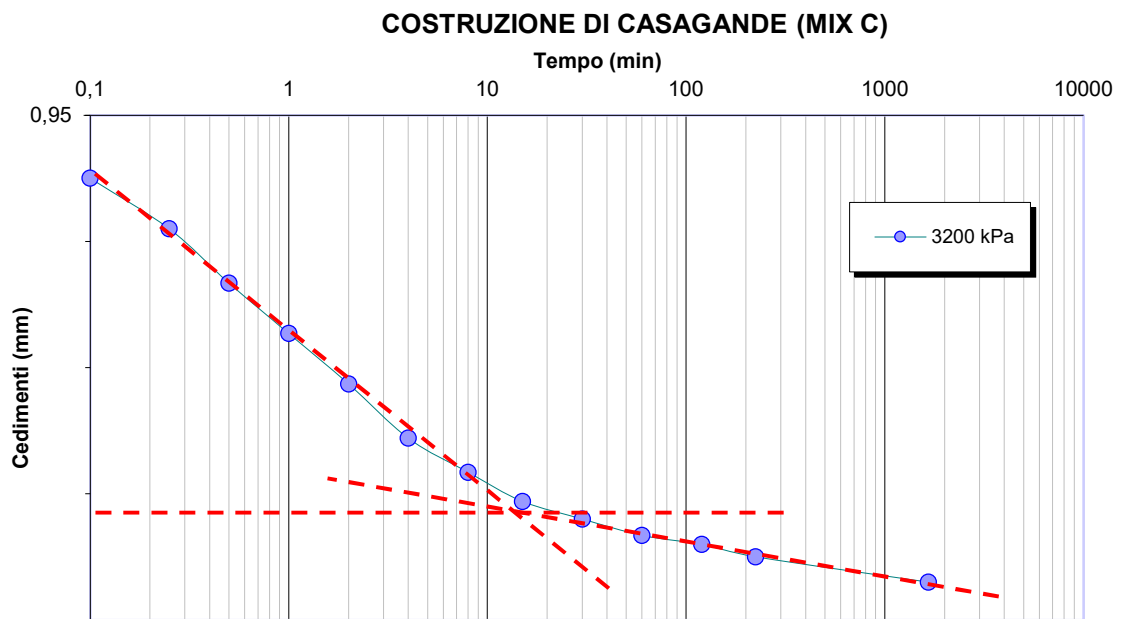


Figura 4.13 – Costruzione di Casagrande del MIX C per il calcolo del cedimento primario con carico 3200 kPa

Dopo la stima dei cedimenti primari, è stato possibile ricostruire interamente il comportamento del terreno durante la prova di compressibilità, rappresentandolo graficamente attraverso la curva cedimenti-tempo, le curve di compressibilità in fase di carico e di scarico, e il diagramma del modulo edometrico. Di seguito sono riportati i grafici relativi al terreno con il 4% di fly ash e il 2% di calce (vedi dalla figura 4.14 alla 4.27).

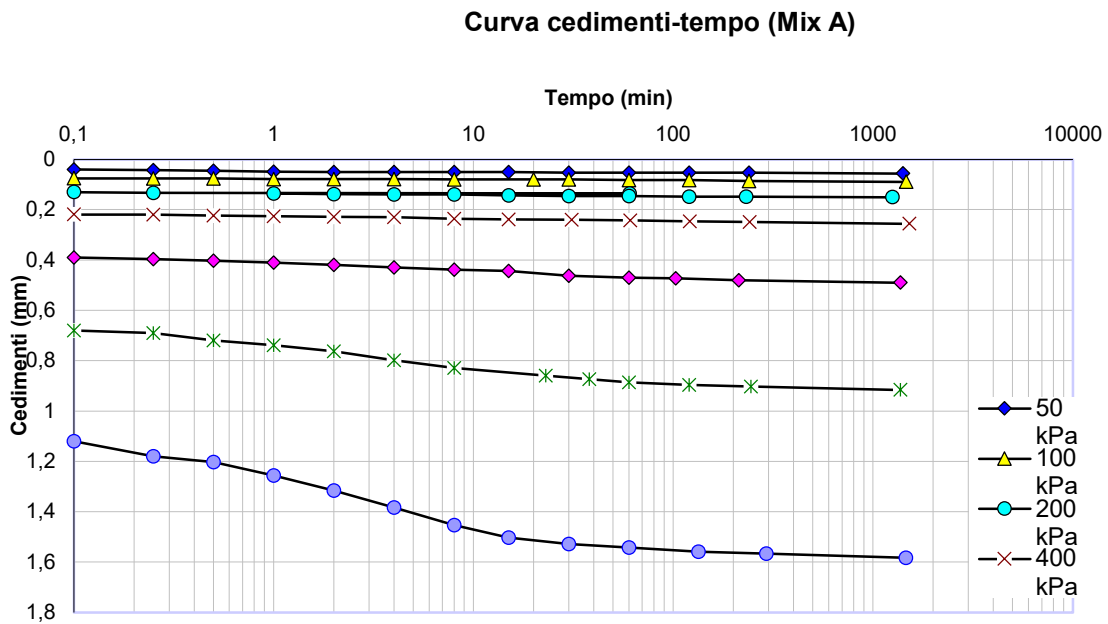


Figura 4.14 – Curva cedimenti-tempo MIX A

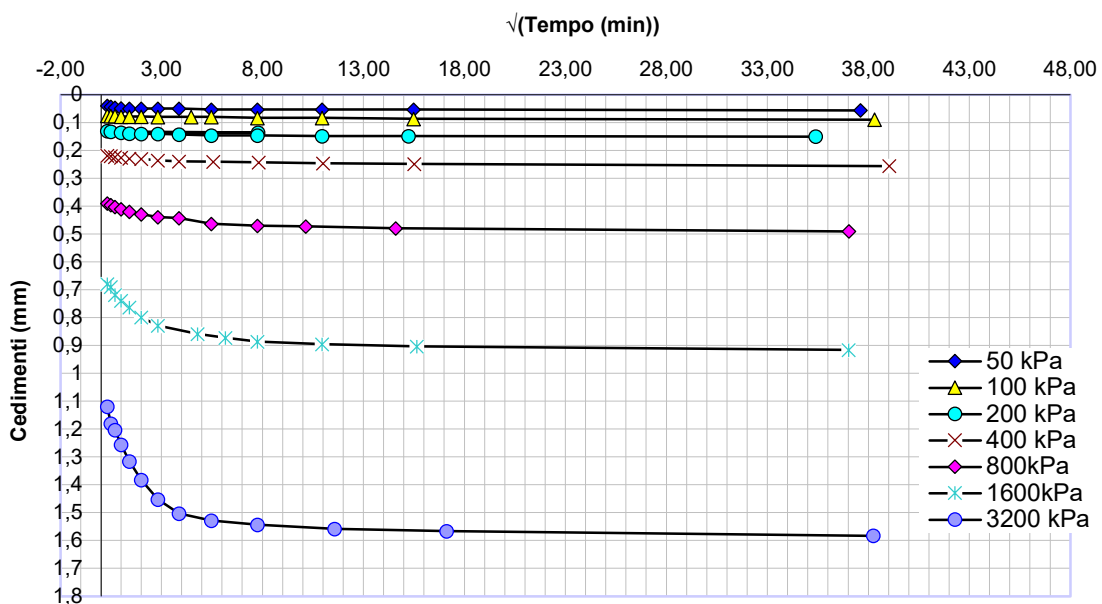


Figura 4.15 – Curva cedimenti- $\sqrt{t}$  tempo MIX A

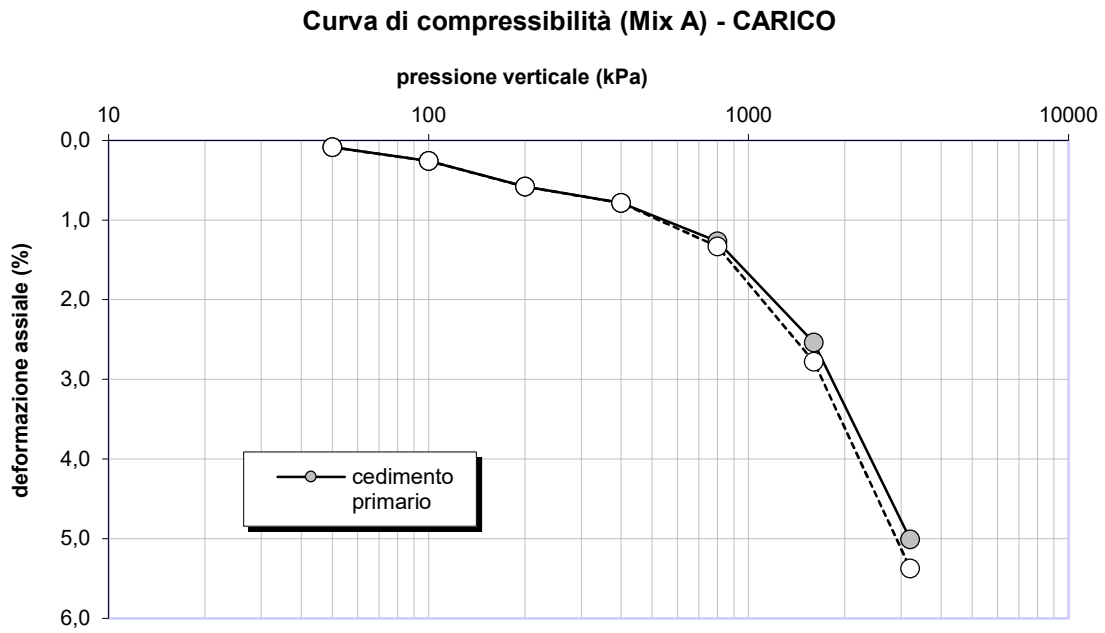


Figura 4.16 – Curva di compressibilità di carico (deformazione assiale) MIX A

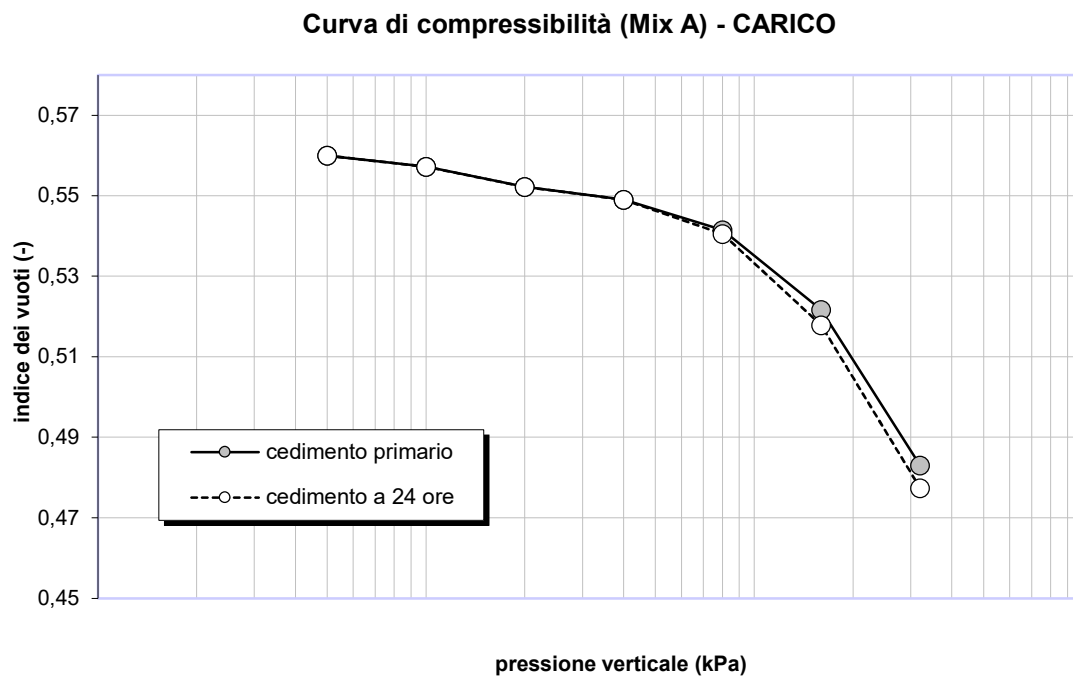


Figura 4.17 – Curva di compressibilità di carico (indice dei vuoti) MIX A

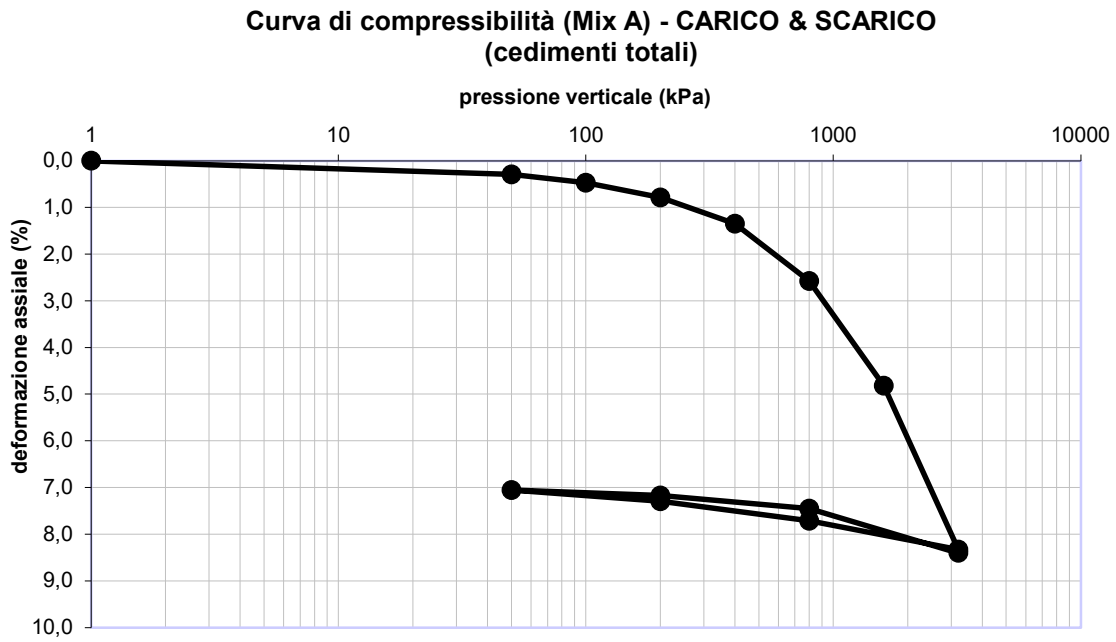


Figura 4.18 – Curva di compressibilità di carico e scarico (deformazione assiale) MIX A

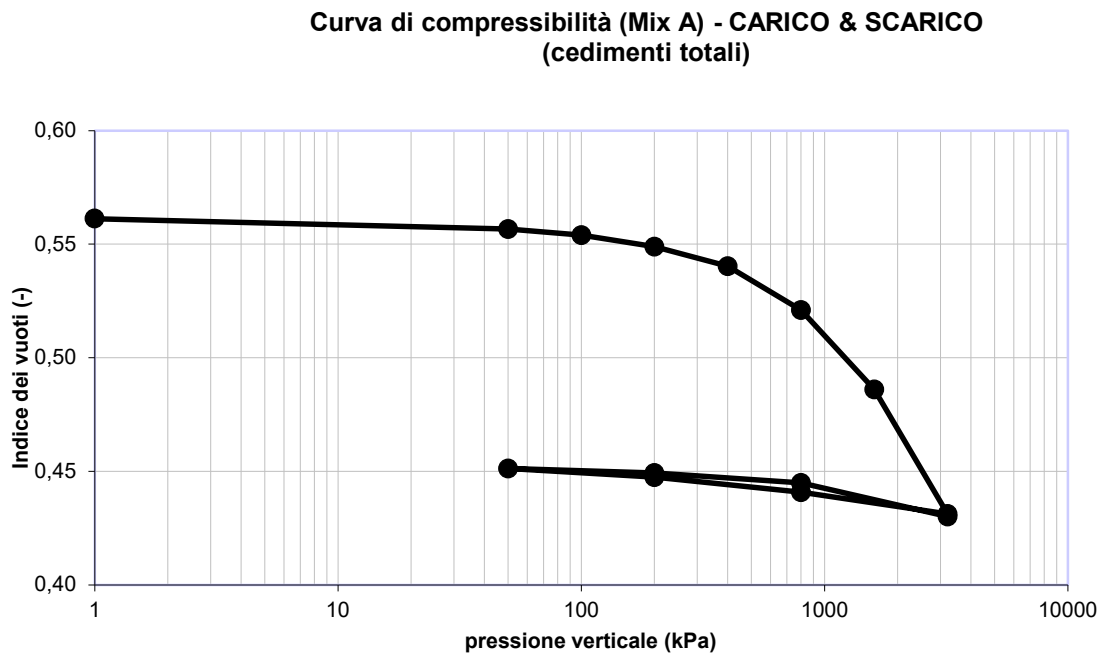


Figura 4.19 – Curva di compressibilità di carico e scarico (indice dei vuoti) MIX A

Curva cedimenti-tempo (Mix C)

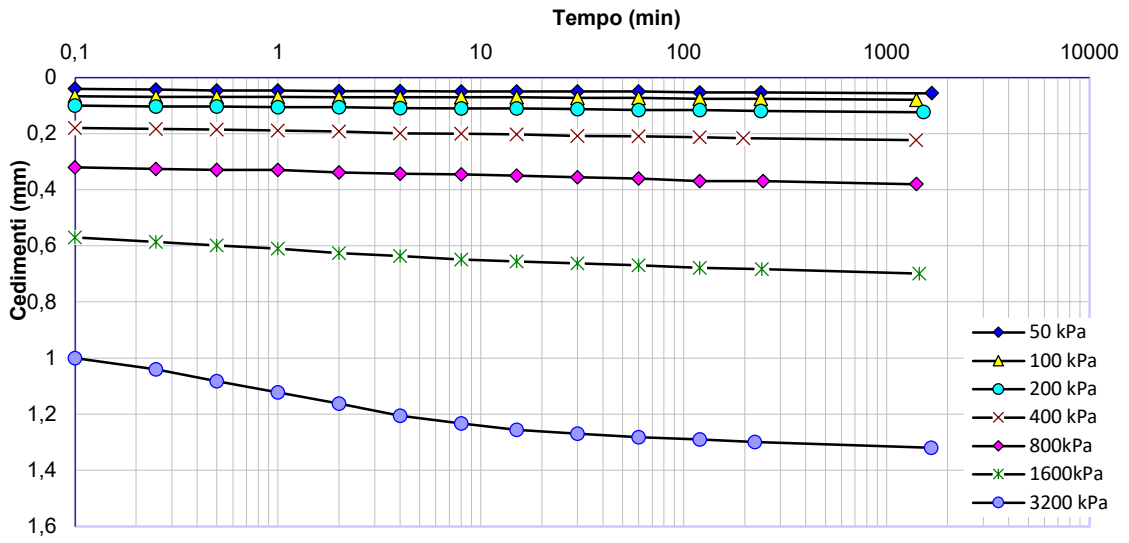


Figura 4.20 – Curva cedimenti-tempo MIX C

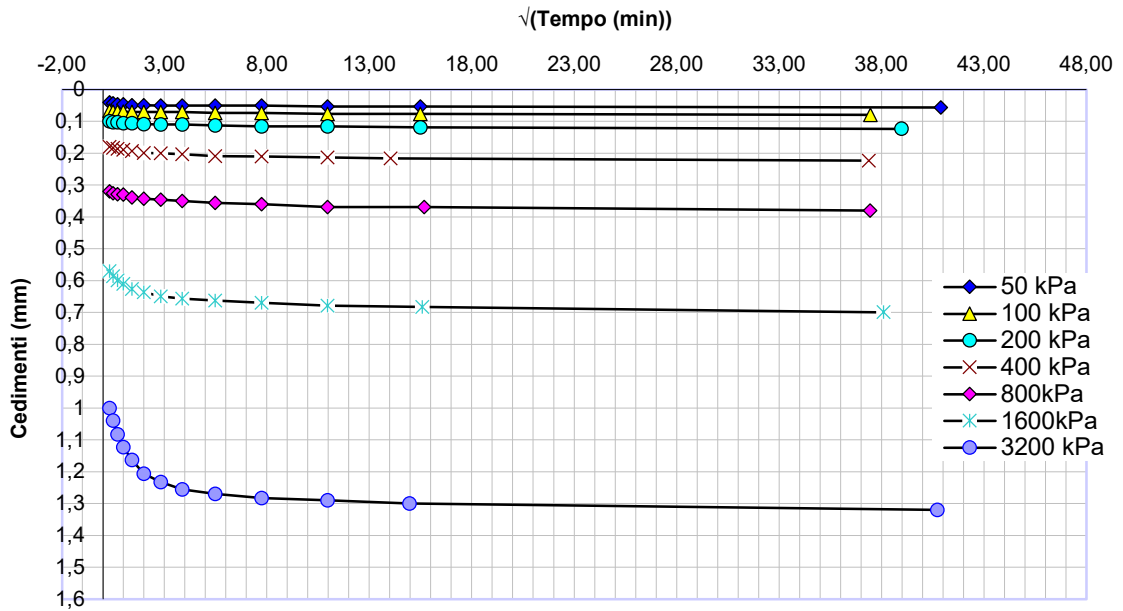


Figura 4.21 – Curva cedimenti-  $\sqrt{t}$  tempo MIX C

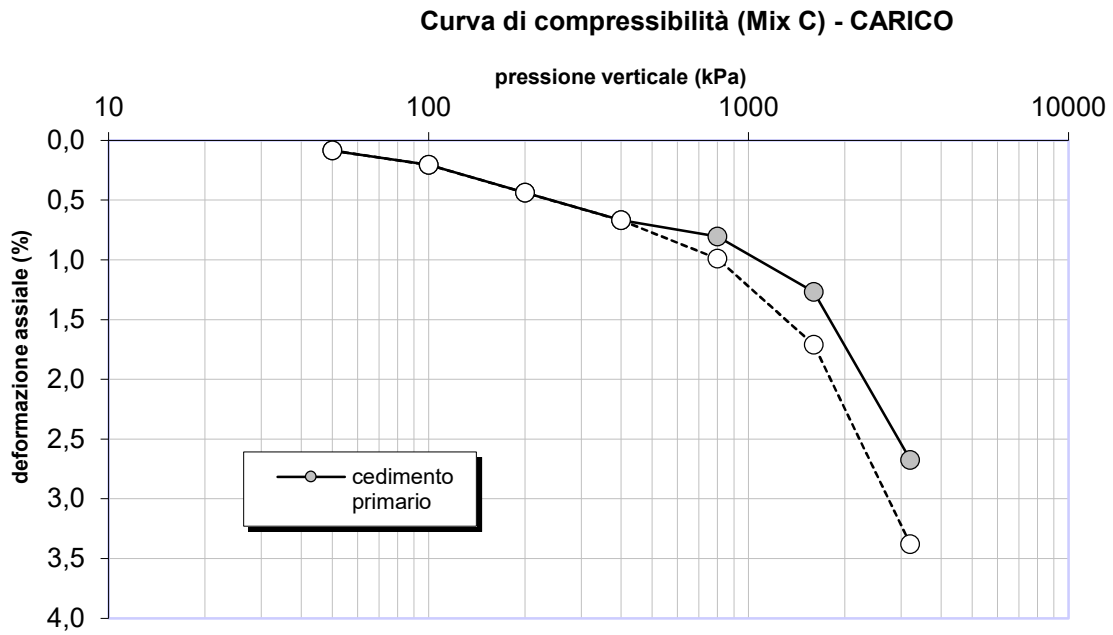


Figura 4.22 – Curva di compressibilità di carico (deformazione assiale) MIX C

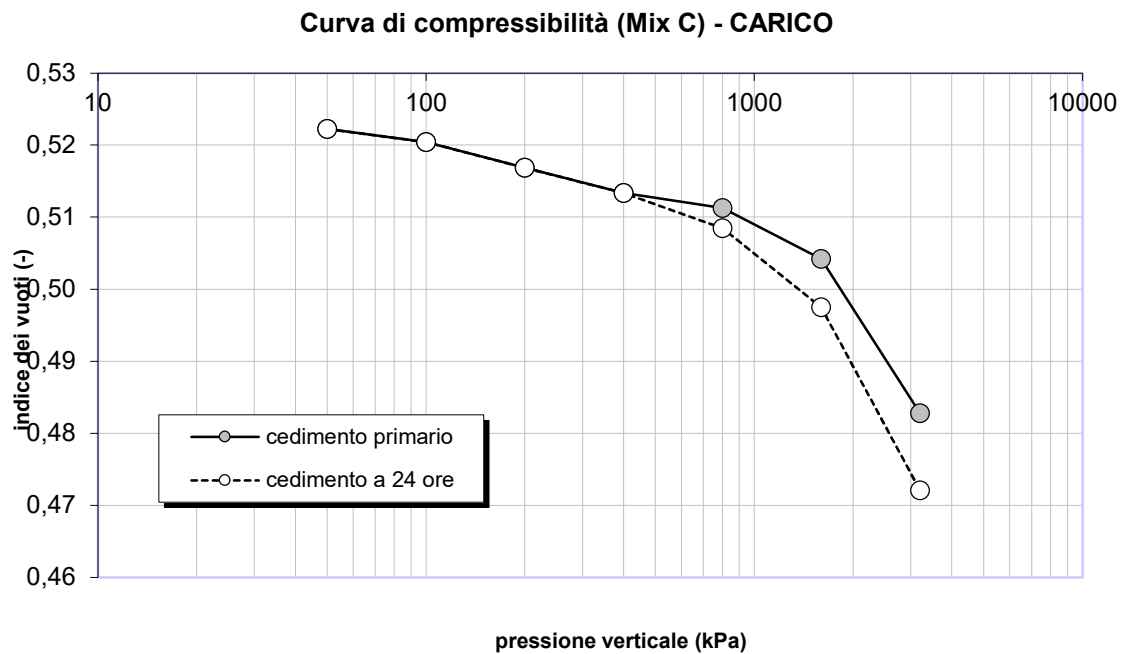


Figura 4.23 – Curva di compressibilità di carico (indice dei vuoti) MIX C

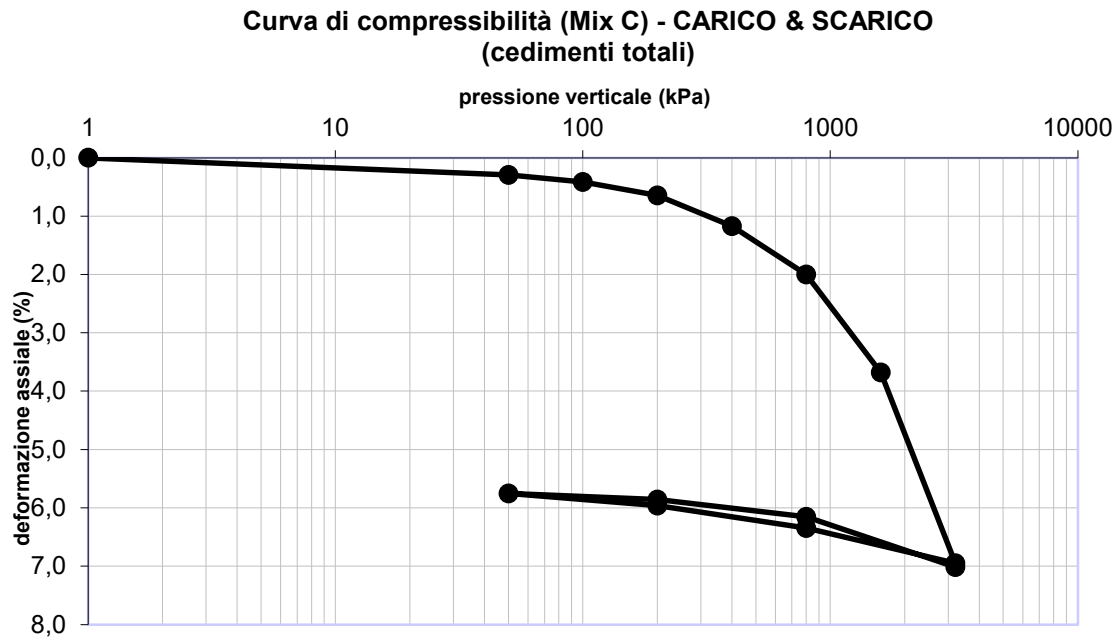


Figura 4.24 – Curva di compressibilità di carico e scarico (deformazione assiale) MIX C

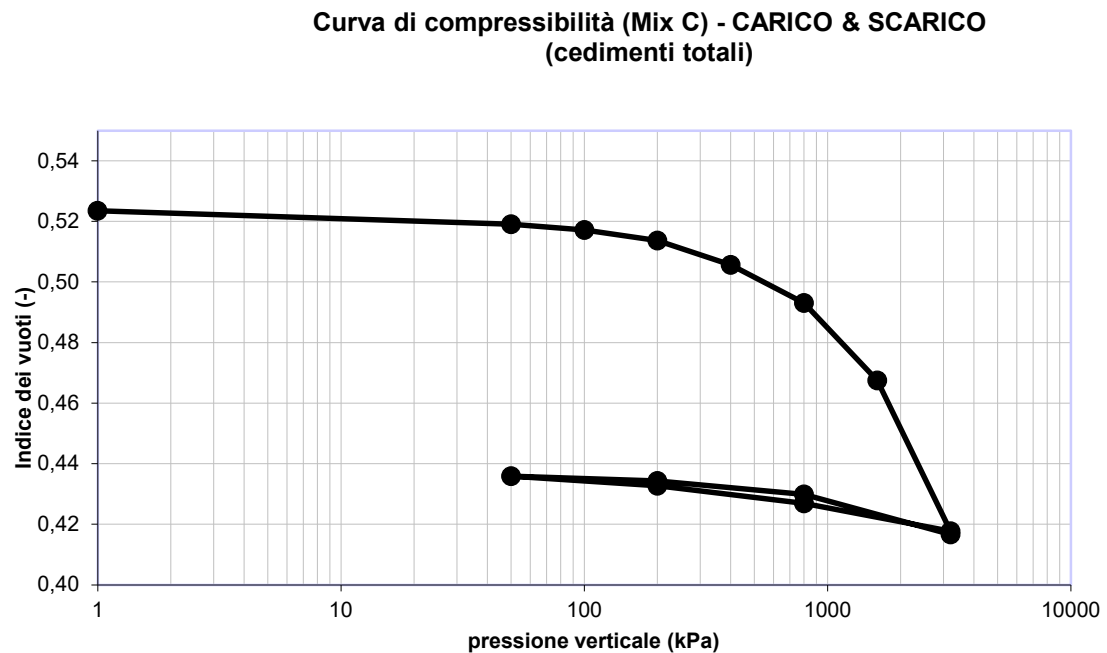


Figura 4.25 – Curva di compressibilità di carico e scarico (indice dei vuoti) MIX C

Dal rapporto tra l'incremento di pressione verticale e il coefficiente adimensionale di deformazione si ottiene il valore del modulo edometrico ( $E_{ed}$ ), il cui valore è fondamentale per esprimere la propensione dei materiali ad allungarsi o ad accorciarsi a seguito dell'azione di una forza di carico. Di fatto, tanto è maggiore il valore del modulo edometrico, tanto meno è deformabile il materiale.

Dalle comparazioni grafiche (vedi figura 4.26 e 4.27) è possibile dedurre che il terreno additivato con il 2% di fly ash e 2% calce presenta un valore medio del modulo edometrico più alto rispetto alla miscela con il 2% di calce e il 4% di cenere volante.

Essendo un alto valore del modulo edometrico indice di una bassa compressibilità, i risultati ottenuti corrispondono a quelli dedotti dall'analisi delle curve di compressibilità, per cui a parità di carico applicato, il terreno con la percentuale più bassa di fly ash presenta dei cedimenti primari e totali lievemente minori.

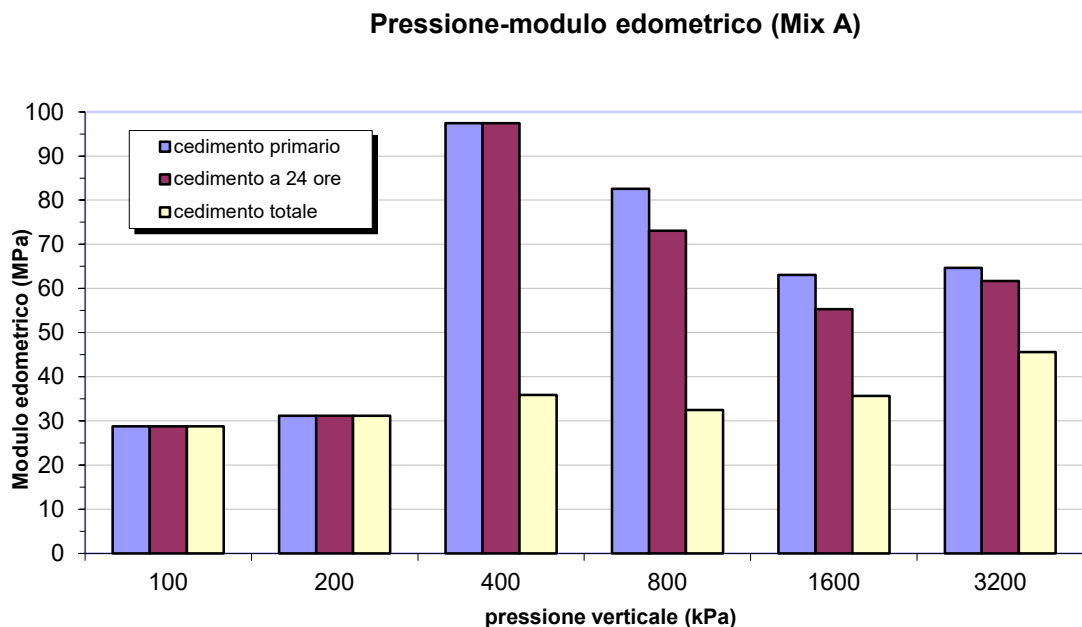


Figura 4.26 – Diagramma del modulo edometrico MIX A



### Pressione-modulo edometrico (Mix C)

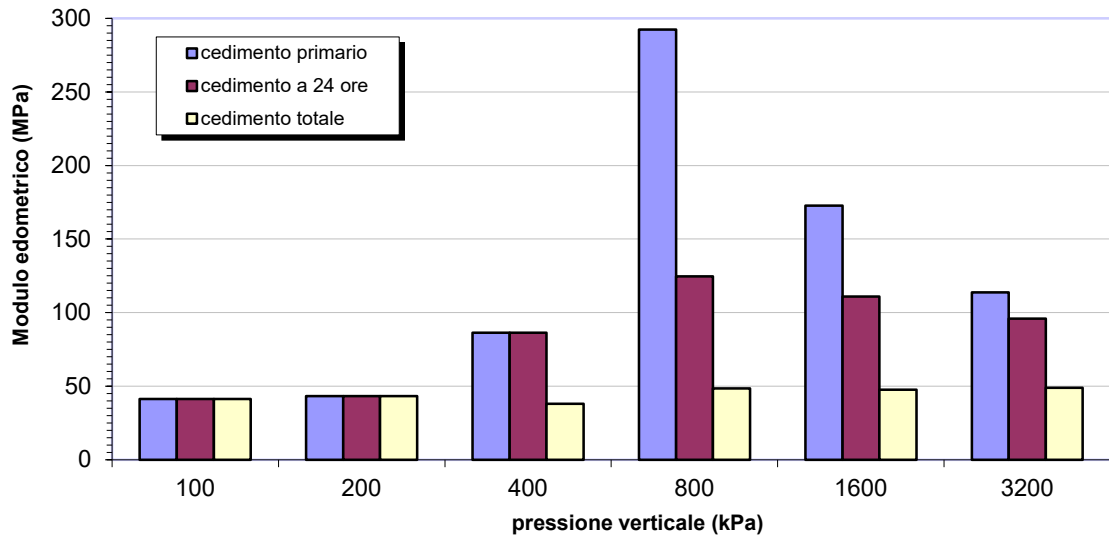


Figura 4.27 – Diagramma del modulo edometrico MIX C

## 4.4 Analisi al SEM

Al termine della prova di conducibilità idraulica, è stata eseguita l'osservazione al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) di un campione estratto dal provino di terreno trattato con il 2% di cenere volante e 2% di calce viva. Il campione è stato sottoposto a essiccazione all'aria per 24 ore e successiva doratura in preparazione alla fase di osservazione con il microscopio.

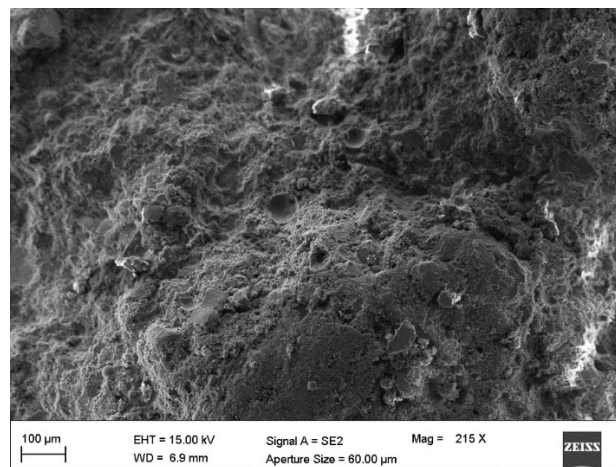


Figura 4.28 – Immagine al microscopio del terreno trattato (ingrandimento 215 X)

Dalle immagini ottenute si individua una distribuzione non uniforme dei prodotti di reazione (vedi figura 4.29 e 4.30). In particolare, la cenere volante è presente nel campione in due forme: come particelle sferiche con superficie rugosa e come particelle sferiche che presentano una superficie liscia. Le prime sono testimonianza dello sviluppo di prodotti pozzolanici di reazione principalmente di natura amorfa; al contrario, le seconde, che non hanno reagito nel sistema, possono avere solamente una funzione di “filler” delle porosità conferendo al campione una struttura più chiusa e compatta.

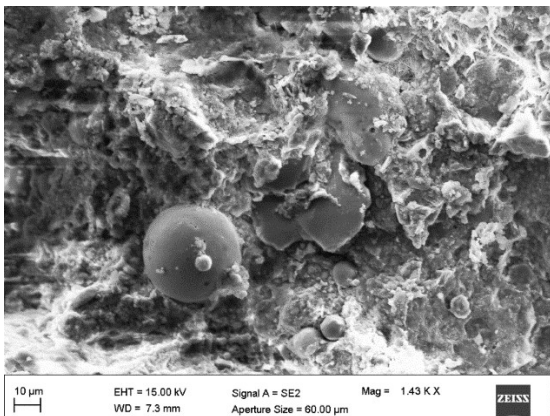


Figura 4.29 - Immagine al microscopio del terreno trattato (1,43 X)

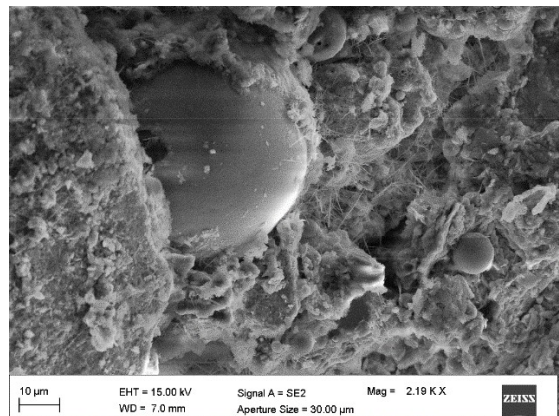


Figura 4.30 - Immagine al microscopio del terreno trattato (2,19 X)

Sul campione sottoposto a osservazione si rileva, inoltre, la presenza di prodotti pozzolanici sotto forma di strutture aghiformi, corrispondenti a C-S-H in forma cristallina derivante dalle reazioni tra la calce e i silicati disponibili nella frazione argillosa del terreno e nella cenere volante (vedi figura 4.31 e 4.32). Tali strutture svolgono la funzione di legante, collegando fisicamente le pareti delle porosità create tra i grani del terreno, migliorando così anche le prestazioni meccaniche della miscela.

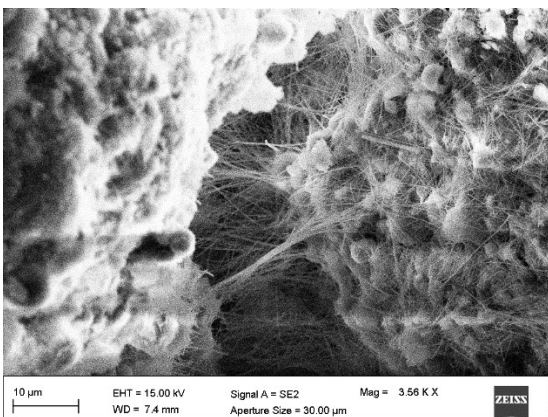


Figura 4.31 - Immagine al microscopio del terreno trattato (3,56 X)

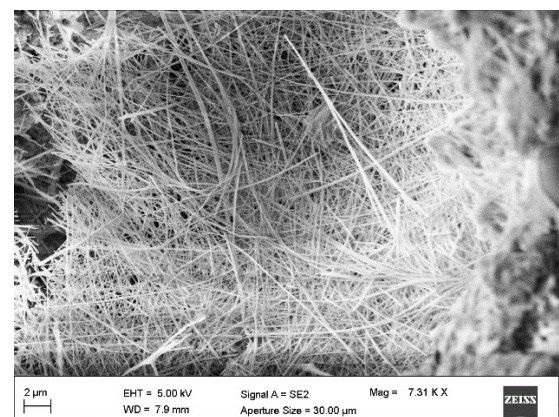
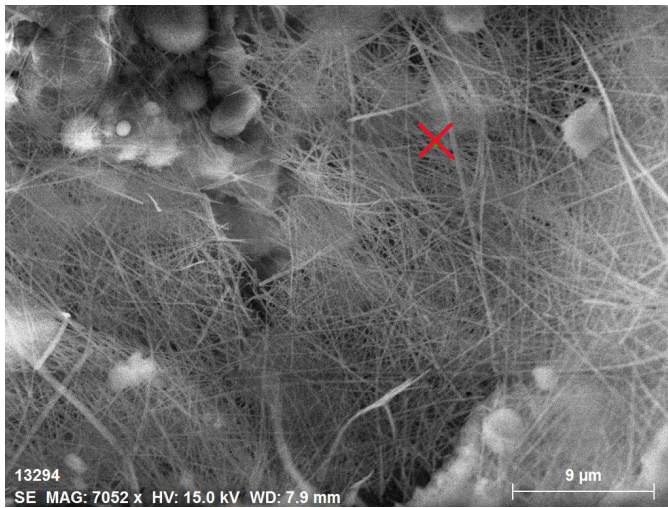


Figura 4.32 - Immagine al microscopio del terreno trattato (7,31 X)

Mediante l'utilizzo della spettroscopia a raggi X (EDS) sono stati identificati inoltre i seguenti elementi componenti del terreno additivato: calcio, potassio, ferro, silicio, alluminio, magnesio, ossigeno e zolfo. Nello specifico, di seguito, sono riportate le composizioni percentuali in peso in due punti specifici del campione (segnati con delle croci rosse in fig.4.33 e 4.34): nel primo caso l'analisi è stata eseguita in prossimità delle strutture cristalline, mentre nel secondo è stata analizzata una particella di cenere volante.



Elemento	Concentrazione (%)
Calcio	25,45
Potassio	1,66
Ferro	5,12
Silicio	6,46
Alluminio	6,64
Magnesio	0,92
Ossigeno	50,77
Zolfo	2,99

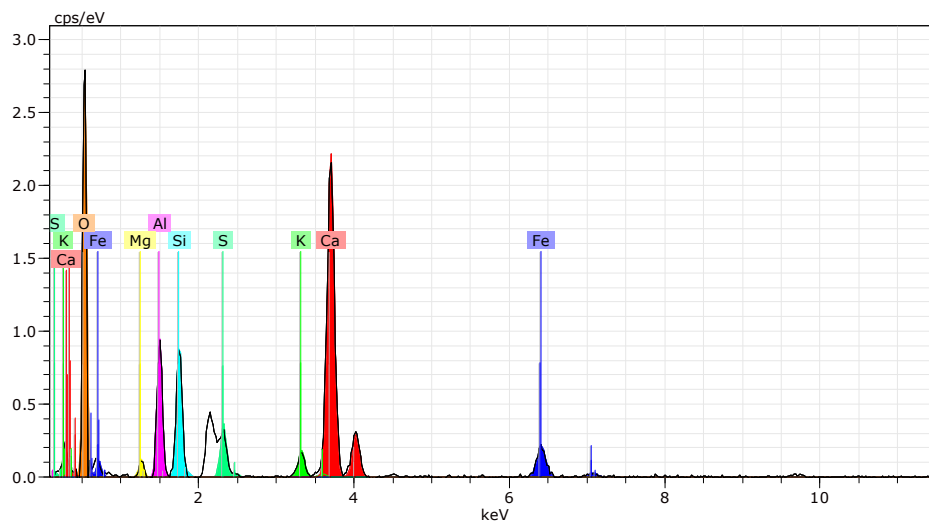
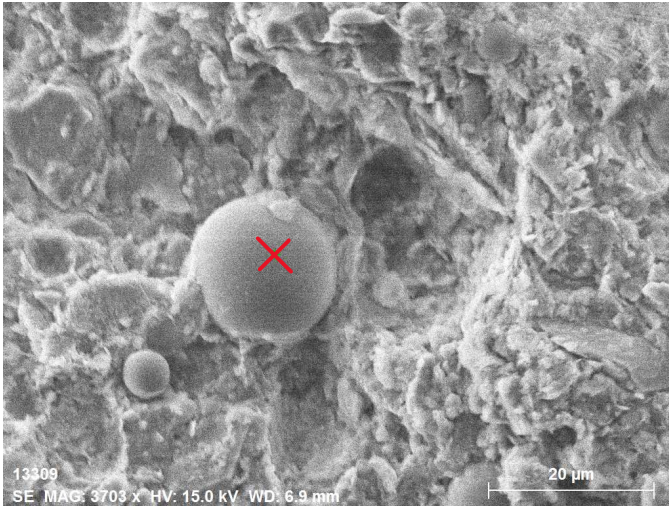


Figura 4.33 – Spettroscopia del terreno trattato (lamelle)



Elemento	Concentrazione (%)
Calcio	3,57
Potassio	2,29
Ferro	1,85
Silicio	27,46
Alluminio	18,11
Magnesio	0,86
Ossigeno	45,65
Zolfo	0,19

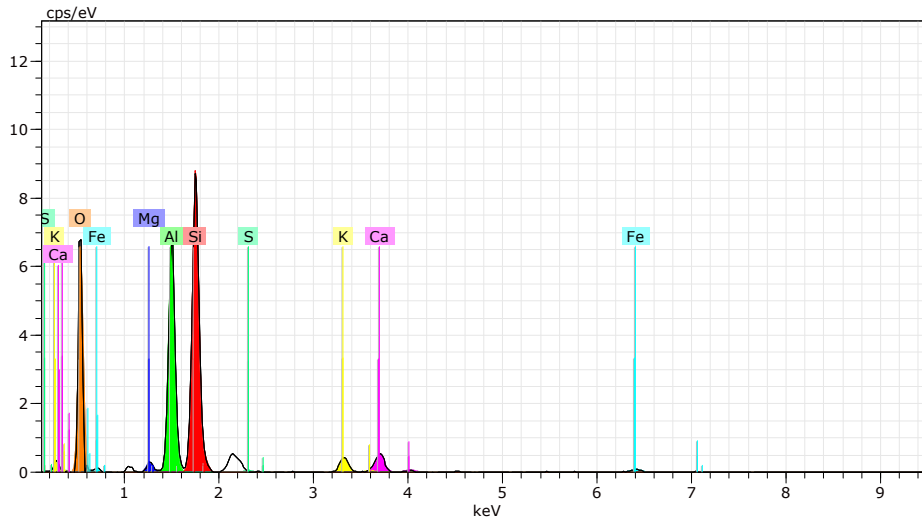


Figura 4.34 – Spettroscopia del terreno trattato (cenere volante)

L'unica differenza in termini di concentrazione tra le due analisi è rappresentata da una maggiore percentuale di calcio rilevata nei prodotti pozzolanici, mentre si evidenzia la prevalenza del silicio nel caso della cenere volante che non ha reagito. Infine, è interessante paragonare l'analisi EDS del terreno non trattato con quello additivato con i leganti (digrammi a torta in figura 4.37 e 4.38) e confrontare le relative immagini SEM con la stessa scala di ingrandimento.

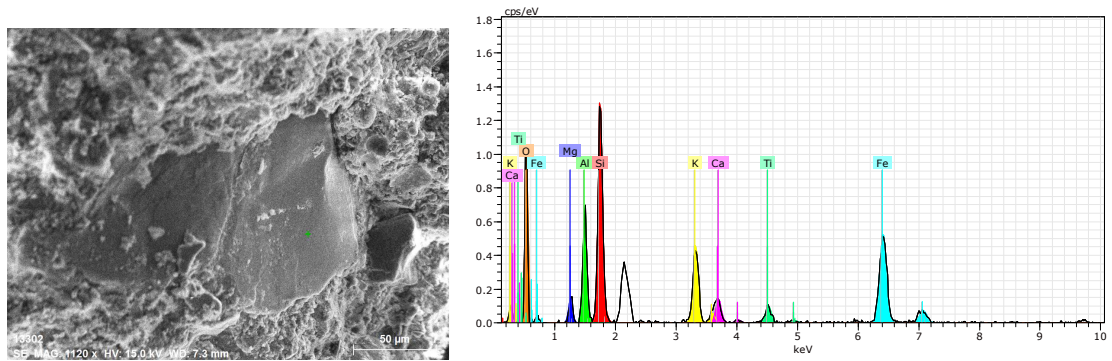


Figura 4.35 – Spettroscopia del terreno trattato

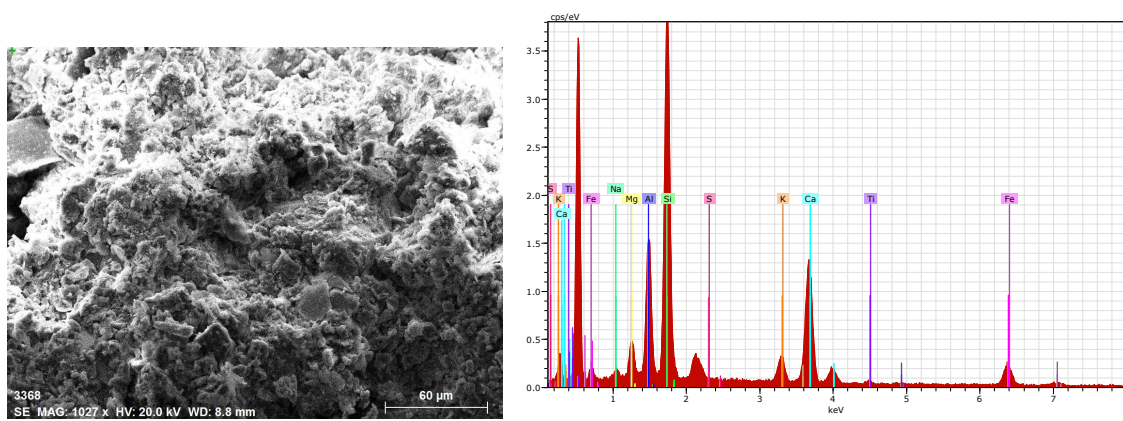


Figura 4.36 – Spettroscopia del terreno non trattato

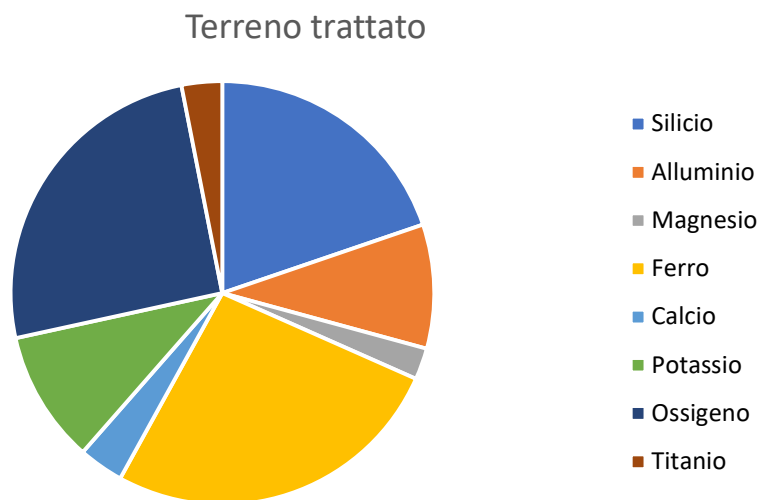


Figura 4.37 – Composizione chimica del terreno trattato (da EDS)

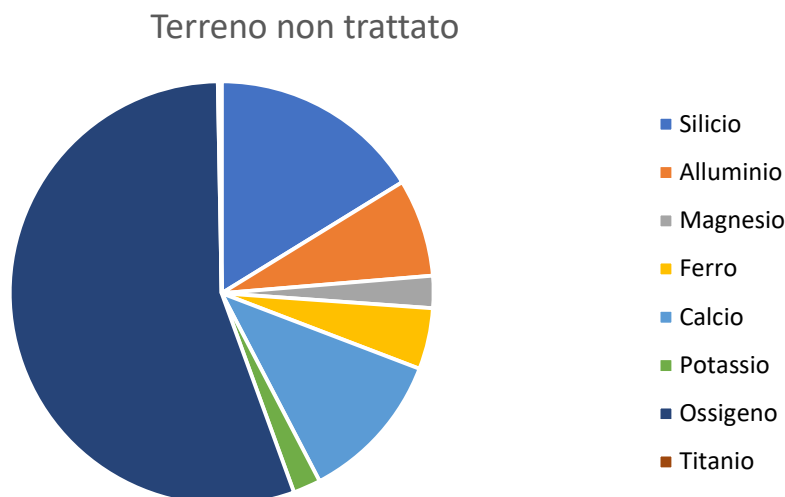


Figura 4.38 – Composizione chimica del terreno non trattato (da EDS)

## 4.5 Confronti con altre sperimentazioni

Precedentemente alle prove effettuate sulle miscele terra-calce-FA nell'ambito del presente lavoro di tesi, sempre all'Università Politecnica delle Marche era stata sperimentata l'aggiunta della sola cenere volante allo stesso terreno, con le stesse caratteristiche e metodologie.

Il trattamento con il 4% di fly ash aveva permesso l'ottenimento di un peso secco sufficientemente elevato. Inoltre, la ricerca aveva mostrato un aumento della permeabilità e una riduzione della compressibilità rispetto al terreno non trattato.

Nonostante i risultati avevano dimostrato un miglioramento delle qualità del materiale, il comportamento del terreno, soprattutto per quanto riguarda i cedimenti, era ancora ampiamente distante rispetto a quello ottenuto con l'aggiunta di un legante tradizionale, come la calce. Il motivo di questo miglioramento era stato testimoniato anche dalle osservazioni al SEM, che avevano mostrato che i prodotti pozzolanici non si erano sviluppati in modo significativo. Si era attribuita questa evenienza all'utilizzo di una quantità troppo bassa di cenere volante e alle condizioni ambientali non ottimali.

Al fine di migliorare le condizioni di stabilizzazione si è deciso di sperimentare l'aggiunta di una piccola quantità di calce in qualità di "attivatore" della cenere volante, come descritto nei paragrafi precedenti. Infatti, la calce crea un ambiente basico (pH circa pari a 12) che agevola le reazioni pozzolaniche, inoltre gli ioni calcio possono reagire con silicio e alluminio presenti nella cenere volante formando prodotti pozzolanici. Come atteso, il nuovo comportamento risulta più simile a quello

ottenuto con il 4% di calce, e notevolmente migliorato se confrontato con quello ottenuto con la singola fly ash.

In dettaglio, per quanto riguarda il peso secco, ricavato dalla prova Proctor, non si riscontrano grandi differenze tra la miscela terra-calce-FA e quella con la sola cenere volante, mentre il coefficiente di conducibilità idraulica è passato da un valore finale di  $6 \cdot 10^{-10}$  m/s ottenuto trattando il terreno con la sola fly ash a  $9 \cdot 10^{-9}$  m/s ottenuto aggiungendo anche il 2% di calce viva (vedi figura 4.39).

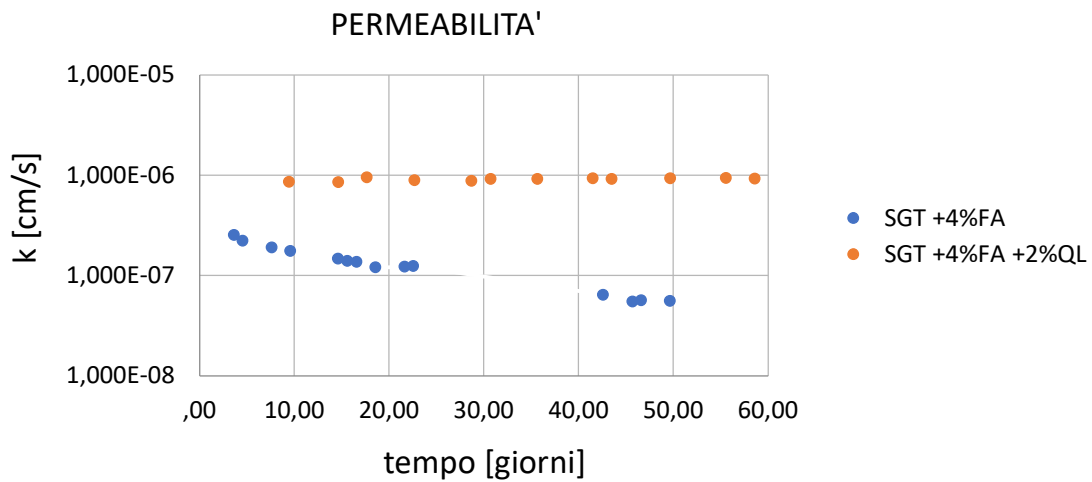


Figura 4.39 – Andamento conducibilità idraulica

I miglioramenti più evidenti sono stati ottenuti nella prova edometrica, dal punto di vista della compressibilità: i risultati mostrano (vedi figura 4.40) che aggiungendo alla fly ash anche il 2% di calce il cedimento massimo raggiunto è stato ulteriormente ridotto fino ad arrivare a una massima deformazione del 7% pari alla metà di quella ottenuta con la sola fly ash e tre volte inferiore a quella ottenuta per il solo terreno.

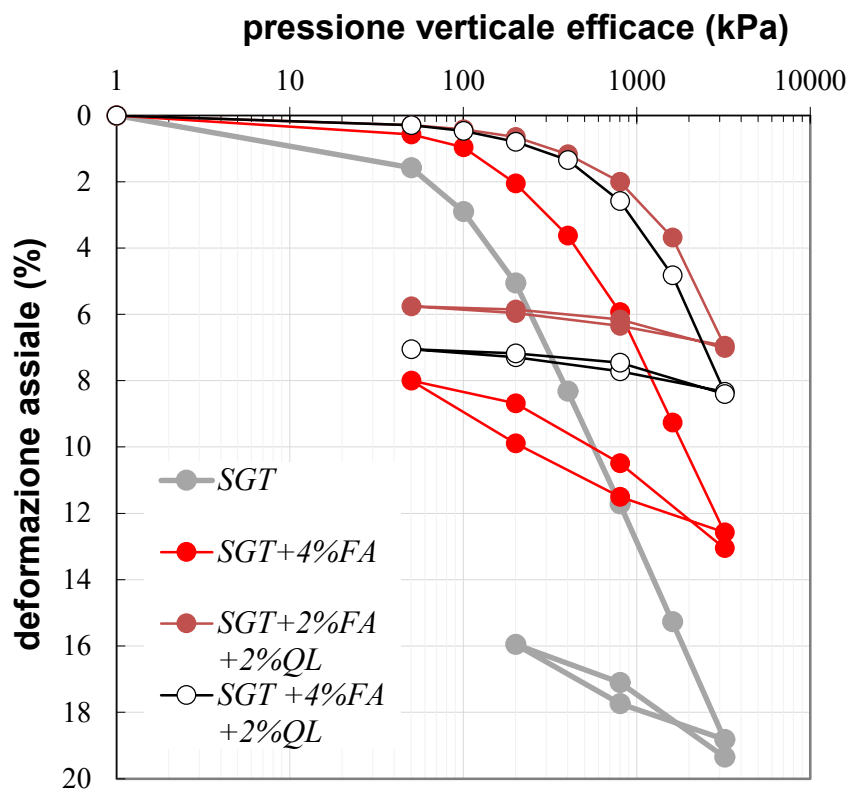


Figura 4.40 – Curve di compressibilità



## 5. Conclusioni

Le prove geotecniche eseguite nell'ambito del presente lavoro di tesi hanno dimostrato che l'aggiunta del 2% di cenere volante, combinata con il 2% di calce, ha notevolmente migliorato le caratteristiche dei campioni trattati, in particolare aumentando la conducibilità idraulica e riducendo la compressibilità del terreno limo-argilloso di partenza.

Dalla prova Proctor Standard si è ottenuto un peso specifico secco sufficientemente alto, superiore ai valori minimi richieste dalle comuni specifiche tecniche per lavori di stabilizzazione.

Il trattamento del terreno con la cenere volante ha aumentato la permeabilità a  $9 \cdot 10^{-9}$  m/s, valore superiore di due ordini di grandezza rispetto al terreno non trattato.

Le prove edometriche hanno evidenziato una generale riduzione dei cedimenti dimostrando l'efficacia del trattamento con calce e fly ash, il cui effetto, in termini di compressibilità, è paragonabile a quello delle miscele di terra con il 4% di calce viva. In particolare, nell'intervallo di carico verticale efficace compreso tra 1600 e 3200 kPa, la deformazione assiale del terreno trattato con calce e fly ash si è ridotta più del doppio rispetto al terreno non trattato. Nel campo di pressioni tipico delle applicazioni stradali (fino a 200kPa) il comportamento deformativo dei provini additivati presenta bassissimi livelli di deformazione assiale (1%).

Per completare l'analisi, è stata eseguita un'analisi SEM in cui si è stato possibile osservare la microstruttura del terreno trattato, individuando i prodotti di reazione pozzolanica. Tali prodotti sono stati osservati sia in forma amorfa, a coprire le particelle sferiche di fly ash che in forma cristallina con strutture aghiformi. Inoltre, mediante l'utilizzo della spettroscopia EDS è stato possibile accompagnare tali osservazioni con la rilevazione della composizione del materiale in termini di elementi chimici.

A conclusione della presente tesi, si può affermare che il trattamento del terreno combinando calce e cenere volante migliora il comportamento fisico-meccanico e idraulico del terreno di partenza. Quella delle miscele terra-calce-FA risulta quindi una strada percorribile e sostenibile dal punto di vista ambientale; altri approfondimenti sono necessari per ottimizzare le proporzioni dei leganti nel trattamento e per valutare l'effetto di fattori ambientali aggiuntivi (contenuto d'acqua, temperatura, stagionatura).

## Bibliografia e sitografia

- M. Di Sante, E. Fratolocchi, E. Pasqualini: *Le miscele terra-calce*. Aracne editrice
- E. Fratolocchi: *Dispense del corso di Geotecnica*. Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia
- M. Di Sante, I. Bellezza, D. Bernardo, E. Fratolocchi, F. Mazziere, F. Pasqualini: *Hydraulic conductivity and compressibility of soils treated with fly ash*. Università Politecnica delle Marche, Ancona Italy
- *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. ASTM international
- BibLus-net. <https://biblus.acca.it/>. Figura 3.18
- espertoCasaClima. <https://espertocasaclima.com/>. Figura 2.1
- Studio Ingegneria Buggè. <http://www.ingegneriabugge.it/>. Figura 3.9
- GEOSTRU. <https://www.geostru.eu/>. Figura 3.17

# Ringraziamenti

Queste righe le voglio dedicare a tutti coloro che mi hanno sostenuto nel mio percorso universitario, tra alti e bassi.

Ai miei genitori, per avermi motivato e incoraggiato soprattutto nei momenti più difficili e per avermi permesso di effettuare questi studi, che per me significano molto.

Ai miei nonni, che sono da sempre i miei più grandi sostenitori, anche chi era presente all'inizio di questo percorso e che ora non è più qui.

A tutti i miei parenti, per la vicinanza espressa.

Alla mia relatrice Marta Di Sante, per le conoscenze trasmesse, e per avermi seguito con dedizione durante il periodo di tirocinio e guidato nella stesura di questa tesi.

A tutti i miei amici da una vita, sempre presenti nei momenti del bisogno e fonte di ispirazione.

A tutti i miei colleghi dell'università, per aver condiviso con me le interminabili giornate di studio e per le risate tra una lezione e un'altra.

A me stesso, che nonostante le difficoltà, grazie alla dedizione e alla perseveranza è riuscito nel compimento di questo grande obiettivo.

Un grazie sincero a tutti.