



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

Effetti del contenuto d'acqua sulla compressibilità di una terra
trattata con eggshell lime

Effects of water content on the compressibility of an eggshell lime
treated soil

RELATORE: Prof.ssa Marta Di Sante

TESI DI LAUREA DI:

CORRELATORE: Prof.ssa Evelina Fratalocchi

Edoardo Gabrielli

Anno Accademico 2023-2024

SOMMARIO

SOMMARIO	3
CAPITOLO 1 OGGETTO E SCOPO DELLA TESI	4
CAPITOLO 2 STATO DELL'ARTE	6
2.1 Stabilizzazione con calce	6
2.1.1 Verifica idoneità	6
2.1.2 Reazioni chimiche terra-calce.....	8
2.1.3 Miglioramento delle proprietà del terreno	10
2.1 Stabilizzazione con eggshell lime	11
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI SPERIMENTALI.....	12
3.1 Materiali.....	12
3.1.1 Terreno oggetto di studio.....	12
3.1.2 Eggshell lime	14
3.1.3 Calce commerciale.....	16
3.2 Metodi sperimentali	17
3.2.1 Confezionamento campioni	17
3.2.2 Prova di compressione edometrica a incremento di carico.....	20
3.2.3 Microscopio elettronico a scansione.....	23
CAPITOLO 4 RISULTATI SPERIMENTALI	24
4.1 Addensamento.....	24
4.2 Compressibilità	25
4.3 Microstruttura	32
CAPITOLO 5 CONCLUSIONI	39
BIBLIOGRAFIA	40

Capitolo 1

OGGETTO E SCOPO DELLA TESI

Lo scopo del presente lavoro di tesi è analizzare le caratteristiche di deformabilità di una miscela compattata ottenuta trattando un terreno limo-argilloso con calce prodotta a partire dai gusci d'uovo di scarto di un biscottificio.

L'impiego di questa calce alternativa si inserisce nel contesto della sostenibilità della progettazione e della valorizzazione dei rifiuti, un tema sempre più centrale nell'ingegneria così come negli interventi di miglioramento dei terreni. Essendo un materiale di scarto riutilizzato, dunque un sottoprodotto, la calce da gusci d'uovo offre potenziali vantaggi sia economici che ambientali rispetto ai leganti tradizionali.

Nel capitolo 2 viene presentato lo stato dell'arte, delineando brevemente le attuali conoscenze sulle miscele terra-calce e sul loro comportamento meccanico, con particolare attenzione alle più recenti ricerche in ambito geotecnico e ambientale.

Successivamente, nel capitolo 3, si descrivono nel dettaglio i materiali impiegati e vengono inquadrati le metodologie adottate per la preparazione dei campioni e l'esecuzione delle prove sperimentali. In particolare, viene descritto il processo di produzione della calce a partire dai gusci d'uovo riepilogando anche le verifiche di idoneità eseguite sul prodotto finito.

I provini di terreno sono stati confezionati con il 4% in peso di legante, mediante compattazione statica a diverso contenuto d'acqua e sono stati successivamente sottoposti a prove edometriche a incremento di carico per valutarne la risposta alla compressione in condizioni di deformazione monodimensionale.

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 stessa quantità di calce commerciale, al fine di verificare l'efficacia della calce da gusci d'uovo e valutarla come alternativa sostenibile ai leganti classici.

Inoltre, è stata condotta un'analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM), per indagare la microstruttura della miscela e determinarne la composizione chimica attraverso microanalisi EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectoroscopy), fornendo così un'interpretazione più approfondita del comportamento macroscopico.

Il capitolo 4 raccoglie e discute i risultati delle indagini sperimentali, concludendo con una valutazione complessiva sull'efficacia della calce da gusci d'uovo nel miglioramento delle proprietà di deformabilità del terreno oggetto di studio.

Capitolo 2

STATO DELL'ARTE

2.1 Stabilizzazione con calce

La stabilizzazione delle terre con calce è una tecnica ampiamente utilizzata e studiata per migliorare le proprietà meccaniche e fisiche dei terreni, rendendoli più adatti a diverse applicazioni ingegneristiche. Questa metodologia, basata sull'aggiunta di calce viva o idrata, sfrutta reazioni chimiche come lo scambio cationico e le reazioni pozzolaniche per incrementare la resistenza, ridurre la plasticità e migliorare la durabilità del terreno. Nel corso degli anni, numerosi studi hanno esplorato sia l'efficacia di leganti tradizionali (come calce e cemento commerciali) sia le potenzialità di alcuni leganti alternativi (come le ceneri volanti, la loppa d'altoforno o la calce da gusci d'uovo), offrendo una panoramica completa sulle diverse applicazioni e sui progressi tecnologici in questo ambito.

2.1.1 Verifica idoneità

La verifica di idoneità di un terreno per il trattamento con calce è un passaggio cruciale nel processo di stabilizzazione. Questo step iniziale consente di determinare se il terreno in esame possiede le caratteristiche chimiche e fisiche necessarie per reagire efficacemente con la calce e ottenere i miglioramenti desiderati. La corretta progettazione è dunque costituita da più fasi e prevede un'estensiva sperimentazione di laboratorio, suddivisibile in più fasi.

Identificazione del terreno in esame.

Si determinano preliminarmente la curva granulometrica e l'indice di plasticità del terreno da trattare e si verifica che la curva ricada nel fuso indicante l'idoneità e che l'indice di plasticità risulti superiore al 10%. Si determina inoltre il contenuto di sostanza organica e di solfati verificando che entrambe le sostanze siano presenti in bassissime quantità.

Scelta del tipo di calce.

La scelta del tipo di calce dipende dal contenuto naturale d'acqua del terreno e dalle condizioni ambientali, che includono sia fattori meteorologici che antropici.

Quando il terreno presenta un'elevata umidità naturale o si prevede un incremento durante i lavori a causa di precipitazioni, e se l'area non è eccessivamente ventosa né vi sono centri abitati nelle immediate vicinanze, è preferibile utilizzare l'ossido di calcio (calce viva) come legante. Al contrario, se il terreno ha un basso contenuto d'acqua e vi sono rischi per persone o cose, è consigliabile optare per l'idrato di calcio (calce spenta o idrata).

Determinazione del consumo iniziale di calce.

Si determina il consumo iniziale di calce, CIC secondo lo standard ASTM C997, che rappresenta la percentuale di calce necessaria ad esaurire le reazioni a breve termine ed innescare le reazioni pozzolaniche e costituisce pertanto un valore di soglia al di sotto del quale non è assicurata la buona riuscita del trattamento di stabilizzazione. Tale test è basato sulla misura del pH di miscele in forma di slurry composte da terra, calce e acqua in diverse proporzioni e nell'identificare il valore di CIC ovvero la minor percentuale di calce in grado di garantire un pH maggiore o uguale a 12.4. Ovvero la percentuale minima in grado di elevare il pH della miscela terra/calce a 12,40.

Scelta delle percentuali di calce e sperimentazione di laboratorio sulla miscela terreno-calce.

Questa fase rappresenta il cuore della progettazione della stabilizzazione a calce. Le percentuali di tentativo vanno scelte basandosi sul valore di CIC e aumentando quest'ultimo di uno o due punti percentuali. Le miscele confezionate in laboratorio con tali percentuali di legante vanno compattate e sottoposte ad una serie di prove di laboratorio da selezionare a seconda del tipo di opera da realizzare. In tutti i casi è opportuno tracciare le curve di compattazione Proctor (usualmente con energia Proctor standard) e ricavare, da campioni confezionati in prossimità dell'ottimo di umidità, i provini da sottoporre a prove geotecniche, quali:

- Prove di compressione edometrica
- Prove di conducibilità idraulica
- Prove di resistenza a taglio o compressione

Qualora i provini ottenuti dai campioni confezionati con la percentuale di tentativo forniscano risultati sufficienti, si fissa tale percentuale come percentuale di progetto per la fase di laboratorio, $P_{d,lab}$; al contrario se i risultati non sono soddisfacenti, si può optare di continuare la sperimentazione utilizzando la stessa percentuale di tentativo ma compattando secondo la procedura Proctor Modificata, oppure aumentando la percentuale di calce.

Vanno quindi ripetute le prove di laboratorio fino a quando non si trova la percentuale che soddisfa i requisiti richiesti.

Una volta individuata la percentuale di progetto per la fase di laboratorio, l'ultima fase implicherebbe l'allestimento di un campo prova che comporterebbe la realizzazione in grande scala della miscela con opportuni incrementi alla $P_{d,lab}$ in grado di tener conto delle condizioni di miscelazione e compattazione in sito che sono tipicamente meno controllate di quelle in laboratorio.

2.1.2 Reazioni chimiche terra-calce

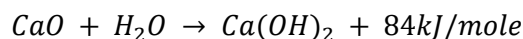
Aggiungendo calce ad una terra con componente argillosa si verificano due processi chimici distinti:

- il primo è lo scambio cationico accompagnato dall'aggregazione (detta anche flocculazione) delle particelle argillose che produce miglioramenti immediati a livello di plasticità, lavorabilità, resistenza immediata e proprietà sforzo deformazione;
- il secondo processo è costituito dalla reazione pozzolanica, processo il cui decorso dipende fortemente dalla temperatura e dal tempo e che, formando composti cementizi di varia natura, aumenta la resistenza a lungo termine delle miscele compattate e la loro durabilità.

Questi due processi, se viene usata calce viva, sono preceduti dalla reazione di idratazione. In particolari condizioni può avvenire la reazione di carbonatazione se la calce aggiunta reagisce con l'anidride carbonica presente nell'aria.

Reazione di idratazione

La molecola di ossido di calcio presenta una grande affinità all'acqua e reagisce con quest'ultima formando il corrispondente idrossido, secondo la reazione:



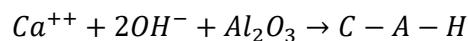
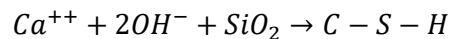
La reazione è fortemente esotermica e causa una riduzione dell'acqua interstiziale dovuta essenzialmente a due fattori: il consumo d'acqua dovuta alla stechiometria della reazione da un lato e dall'altro la perdita d'acqua per evaporazione causata dal calore di reazione. Tutto ciò porta ad un generale essiccamento. Ciò che si ottiene è il sopracitato "drying" o essiccamento del terreno [6]. Di conseguenza, l'uso della calce viva per abbassare il tenore d'acqua può essere applicato a qualsiasi terra della quale si desidera, in tal modo, aumentarne la lavorabilità, indipendentemente dalla sua natura.

Scambio cationico e aggregazione

Quando la calce viene aggiunta al terreno, i cationi di calcio (Ca^{2+}) liberati dall'idratazione della calce sostituiscono i cationi meno stabili presenti sulle superfici delle particelle argillose, come sodio, potassio o magnesio. L'aggiunta di calce al terreno provoca un aumento del pH dell'acqua interstiziale (pH della soluzione satura acqua-calce è di 12,40), che a sua volta attiva nuovi siti di scambio sulla superficie delle particelle di argilla. Questo favorisce lo scambio tra gli ioni calcio (Ca^{2+}) e gli ioni presenti sulla superficie delle particelle argillose, quali sodio, potassio o idrogeno. La maggiore concentrazione di elettroliti nell'acqua interstiziale riduce il doppio strato elettrochimico delle particelle di argilla, permettendo loro di aggregarsi e formare strutture più orientate attraverso la flocculazione. Questo processo, noto come "lime modification", si completa in un periodo compreso tra 24 e 96 ore, modificando la tessitura del terreno e rendendolo più stabile alle variazioni di volume.

Reazione pozzolanica

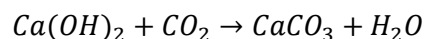
La calce e l'acqua reagiscono con la silice e l'allumina presenti nei terreni argillosi a formare vari composti cementizi che modificano le proprietà meccaniche del terreno aumentandone la resistenza. Se viene aggiunta alla terra una sufficiente quantità di calce, il pH della miscela aumenta fino al valore di 12.40. Tali condizioni, fortemente alcaline, sono insolite per terreni, in cui i valori di pH si attestano normalmente tra 5 e 8.5; in condizioni di pH elevato (maggiore di 9) aumenta molto la solubilità della silice e dell'allumina. La silice e l'allumina presenti nella terra reagiscono con gli ioni calcio secondo le seguenti reazioni



Avviene così la formazione di silicati e alluminati di calcio idrati (C-S-H e C-A-H) molto stabili che si comportano come un cemento naturale: legano le particelle di terreno tra loro conferendogli una struttura più rigida e resistente.

Carbonatazione

La carbonatazione è una reazione che dovrebbe essere evitata, questa avviene quando la calce aggiunta con la terra, anziché reagire con essa, reagisce con l'anidride carbonica presente nell'aria o nelle sue stesse porosità e forma carbonato di calcio secondo la reazione:



Il carbonato di calcio è una sostanza poco solubile e vincola la calce in modo da non consentirne la reazione con i materiali pozzolanici. Questa reazione avviene quando il terreno

non ha una sufficiente frazione argillosa o quando il quantitativo di calce aggiunto è eccessivo [5]. Per evitare l'insorgere di tale reazione è opportuno seguire la giusta sequenza e rapidità nelle procedure esecutive di costruzione [6].

2.1.3 Miglioramento delle proprietà del terreno

L'aggiunta di calce al terreno porta a una serie di miglioramenti delle sue proprietà fisiche e meccaniche, articolati in due fasi principali. La prima fase, chiamata "lime modification", avviene nelle prime 24-96 ore e comporta effetti immediati. La seconda fase, nota come "lime stabilization", produce benefici a lungo termine.

Gli effetti a breve termine, dovuti principalmente allo scambio cationico e all'aggregazione delle particelle, includono:

- Il cambiamento dei limiti di Atterberg,
- La modifica della distribuzione granulometrica
- La variazione della curva di compattazione Proctor
- L'aumento dell'indice CBR (California Bearing Ratio)

Gli effetti a lungo termine riconducibili alla reazione pozzolanica comprendono:

- L'aumento della resistenza
- L'aumento del modulo di elasticità e del valore del coefficiente di Poisson
- La durabilità

Il successo della stabilizzazione del terreno con calce è determinato da una serie di fattori che influenzano le reazioni chimiche e le proprietà finali del materiale trattato. Tra i principali, si evidenziano il tipo di terreno, il dosaggio di calce, l'umidità, il tempo di stagionatura e la temperatura. Questi parametri, se opportunamente gestiti, possono ottimizzare l'efficacia del trattamento, migliorando significativamente le caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno stabilizzato.

2.1 Stabilizzazione con eggshell lime

La calce e il cemento Portland sono da tempo scelte comuni e affidabili per la stabilizzazione del terreno grazie al loro costo contenuto, alla semplicità di applicazione, alla disponibilità di standard e linee guida sul trattamento e alla ormai nota capacità di migliorare le prestazioni del suolo. Tuttavia, il loro utilizzo comporta notevoli impatti ambientali. La produzione di una tonnellata di calce e cemento genera rispettivamente circa 1,28 e 1 tonnellata di CO₂ per tonnellata di legante prodotto, contribuendo significativamente alle emissioni di gas serra e ai costi energetici. Inoltre, il loro impiego è associato a effetti negativi sull'ambiente, tra cui attività estrattive, emissioni di polveri, alterazioni del paesaggio, contaminazione delle acque sotterranee, inquinamento acustico ed erosione del suolo.

L'uso dei residui industriali a scopo di stabilizzazione si sta evolvendo a causa della crescente scarsità di risorse e dell'aumento dei costi per lo smaltimento in discarica. In questo contesto, la produzione di calce a partire dai gusci d'uovo rappresenta una delle opzioni più praticabili e sostenibili grazie alla loro composizione (CaCO₃) e alla loro abbondanza e disponibilità. La produzione globale di uova ha raggiunto 87 milioni di tonnellate nel 2022 [3], con una produzione totale di gusci d'uovo di 8,9 milioni di tonnellate [4]. Sebbene la produzione di calce dai gusci d'uovo richieda un elevato consumo di energia termica e di emissioni di CO₂ per la fase di cottura (simile a quella della calce da calcare), la maggiore sostenibilità del processo di produzione è garantita perché permette di evitare:

- il prelievo di calcare dalle cave,
- le emissioni di CO₂ dovute al trasporto,
- lo smaltimento dei gusci d'uovo.

Secondo vari studi citati da Di Sante et al. [2], la calce viva e altre varianti di calce hanno mostrato risultati promettenti in termini di resistenza e stabilità del suolo, grazie alla composizione chimica dei gusci, che risulta essere del tutto simile al calcare utilizzato per produrre calce e cemento. Tuttavia, gli studi mostrano risultati variabili: mentre la calce tradizionale presenta proprietà superiori in alcune applicazioni, la calce derivante dai gusci d'uovo ha evidenziato prestazioni positive in termini di resistenza alla compressione e stabilità volumetrica. Anche l'uso combinato di calce viva e calce naturale ha prodotto risultati comparabili, con significativi incrementi di resistenza a compressione e incrementi del modulo di elasticità dei terreni stabilizzati.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI SPERIMENTALI

3.1 Materiali

3.1.1 Terreno oggetto di studio

Il terreno oggetto di studio proviene dalla località di San Giovanni Teatino (SGT), in provincia di Chieti ed è un terreno argilloso, classificato come terreno argilloso di bassa plasticità o argilla magra (CL) ed è composto da una percentuale di fine pari al 97%, il 39% di frazione argillosa e una percentuale di sabbia pari al 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 (Figura 3-1) si ottiene mettendo in relazione la dimensione dei grani in millimetri e la percentuale di trattenuto o passante delle particelle attraverso il setaccio corrispondente.

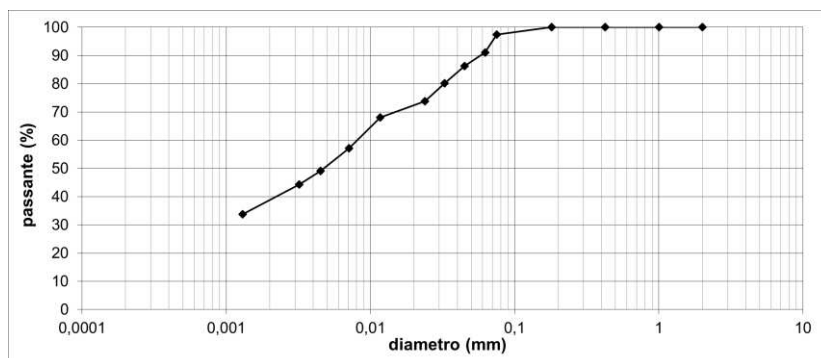


Figura 3-1 Curva granulometrica del terreno

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. Le caratteristiche del terreno oggetto di studio sono riepilogate in Tabella 3-1

Tabella 3-1 Caratteristiche del terreno oggetto di studio

Caratteristiche	Terreno SGT
Sabbia (%)	3
Fine (%)	97
Clay (<2 μ m, %)	39
Limite liquido (%)	40
Indice di plasticità (%)	20
CIC - % CaO commerciale	2

3.1.2 Eggshell lime

Nel corso della presente sperimentazione è stata utilizzata calce prodotta da gusci d'uovo. La produzione della calce a partire dai gusci d'uovo segue un processo simile a quello della tradizionale calce, ma utilizza i gusci d'uovo come fonte di carbonato di calcio, quindi varia la materia prima, che anziché essere una risorsa esauribile (roccia calcarea) è uno scarto di lavorazione, quindi un sottoprodotto (gusci d'uovo). Il processo seguito per la produzione della calce in questione è il seguente: i rifiuti di gusci d'uovo di gallina (guscio più membrana) sono stati raccolti presso un biscottificio locale. I gusci sono stati lavati e poi essiccati in forno a 100°C per 24 ore, quindi frantumati e passati attraverso un setaccio di 1,0mm. Dopo la frantumazione, sono state condotte analisi XRD e TGA.

L'analisi XRD eseguita sui gusci d'uovo frantumati ed essiccati a 100°, ha evidenziato la sola presenza di calcite, CaCO_3 (Figura 3-2

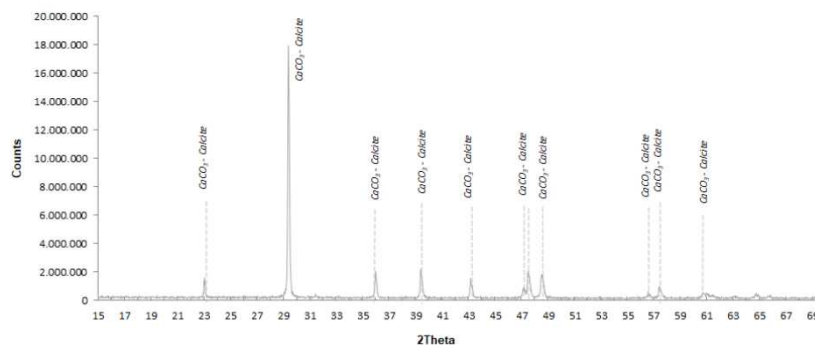
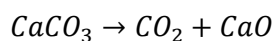


Figura 3-2 Spettro XRD dei gusci d'uovo

L'analisi TGA è stata condotta applicando una progressione di riscaldamento di 10°C/min fino al raggiungimento della temperatura di 1100°C ed ha evidenziato tre fasi principali di perdita di massa:

1. Da 507-698°C: rilascio della materia organica (membrana), con perdita di 1,8% del peso.
2. Da 698.792°C: decomposizione del carbonato di calcio (CaO) con rilascio di CO_2 , causando una perdita di 23,7% del peso
3. >792°C: ulteriore perdita di 4,5% del peso fino a 1100°C

Sulla base di questi dati, è stato stabilito di calcinare i gusci a 900°C per 3 ore, con una rampa di riscaldamento di 10°C/min. Dopo il raffreddamento graduale in forno spento, la perdita di massa complessiva è stata circa del 30%. La calcinazione è un processo in cui il carbonato di calcio si scinde in anidride carbonica e ossido di calcio (calce viva).



I risultati della diffrazione a raggi X eseguita immediatamente dopo la calcinazione sono riportati in Figura 3-3. Dopo 30 giorni di conservazione in busta chiusa, l'analisi XRD ha rivelato, oltre all'ossido di calcio, CaO , anche la presenza di portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e una piccola quantità di calcite (CaCO_3), dovute probabilmente all'idratazione dell'ossido di calcio a causa dell'umidità atmosferica e alla carbonatazione per reazione con CO_2 . L'umidità libera è risultata inferiore allo 0,1%, rispettando lo standard ASTM C977-18 ($\leq 2\%$).

Dal punto di vista granulometrico, il materiale soddisfa i requisiti per la calce viva e idrata per il trattamento delle terre poiché non vi è trattenuto al setaccio n. 200 ASTM, con apertura di 75 μm . Per valutare la reattività della calce, il materiale è stato idratato in un rapporto 1:4 (solido/liquido) monitorando la temperatura dello slurry ottenuto, mantenuto in agitazione tramite un vortice. La temperatura è aumentata fino a 28,7°C nei primi 20 minuti, risultando inferiore al requisito minimo di 30°C per la calce viva. Questa minore reattività è stata attribuita alla parziale idratazione della calce viva a causa dei processi sopra descritti.

Sono state individuate tre fasi di idratazione a diverso tasso di aumento di temperatura:

- 2,5°C/min nella prima fase,
- 0,3°C/min nella seconda,
- 0,5°C/min fino ai 20 minuti.

Non si sono formati grumi durante la reazione e il residuo di calce viva dopo l'idratazione è stato 0,84%, ben al di sotto del limite massimo ammesso per la stabilizzazione dei terreni (10%).

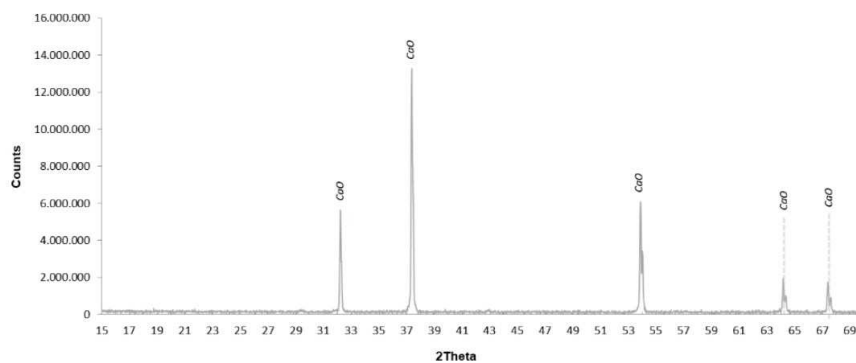


Figura 3-3 Spettro XRD dell'EL immediatamente dopo la calcinazione

Ulteriori dettagli nella produzione di calce da gusci d'uovo sono riportati in [2]

3.1.3 *Calce commerciale*

Nella sperimentazione, i risultati ottenuti trattando il terreno con la calce da gusci d'uovo sono stati confrontati con i risultati del trattamento dello stesso terreno con calce viva commerciale. 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).

3.2 Metodi sperimentali

3.2.1 Confezionamento campioni

La terra può essere impiegata quale materiale per la costruzione delle opere 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. Fra tali metodi riveste particolare 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 può essere variato 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 la variazione del peso di volume secco γ_d , in funzione del contenuto d'acqua w (Figura 3-4), 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 in questo caso 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. [4]

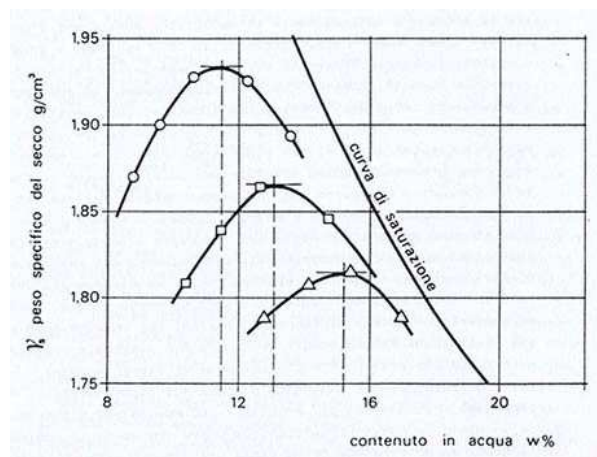


Figura 3-4 Curva Proctor

Per la compattazione dei campioni, si è deciso di adottare un metodo non convenzionale rispetto alla tradizionale compattazione Proctor. Questo perché la compattazione Proctor standard richiede una quantità di terreno compresa tra 700 e 800 grammi, mentre il terreno disponibile per le prove era limitato. Per questo motivo, abbiamo optato per la compattazione statica, una tecnica che consente di lavorare con una quantità significativamente inferiore di materiale (circa 80 grammi), garantendo comunque il livello di addensamento individuato attraverso la compattazione dinamica prevista per il metodo Proctor.

Quindi il procedimento utilizzato per il confezionamento dei campioni con la compattazione statica prevede le seguenti fasi:

1. **Preparazione del terreno.** Il terreno essiccato all'aria viene macinato per ottenere una granulometria omogenea.
2. **Aggiunta di acqua.** Si aggiunge acqua in quantità sufficiente per raggiungere il contenuto di umidità desiderato. Il terreno viene poi posto in un sacchetto sigillato ermeticamente e lasciato riposare per almeno 6 ore (preferibilmente 24 ore) per consentire il completo assorbimento dell'acqua.
3. **Verifica dell'umidità.** Dopo il riposo, si preleva un campione di terreno per controllarne l'umidità, essiccandolo in forno a 105°C. Se il contenuto d'acqua misurato corrisponde al valore target previsto, si procede con l'aggiunta della calce.
4. **Aggiunta della calce.** Viene aggiunto il 4% di calce da gusci d'uovo su peso secco di terreno, mescolando accuratamente il terreno e la calce. Il quantitativo del 4% è giustificato da dei test preliminari che sono stati svolti sul terreno in esame. In particolare, il test che è stato eseguito per la determinazione del consumo iniziale di

calce è quello normato dallo standard ASTM C977-18 ed il suo valore dipende dalle caratteristiche del terreno. Il consumo iniziale di calce (come descritto nel paragrafo 2.1.1) è definito come la minima percentuale di calce necessaria per raggiungere un pH di 12.40, che per il terreno in esame e la calce di gusci d'uovo, corrisponde a un valore pari al 3%. [2]

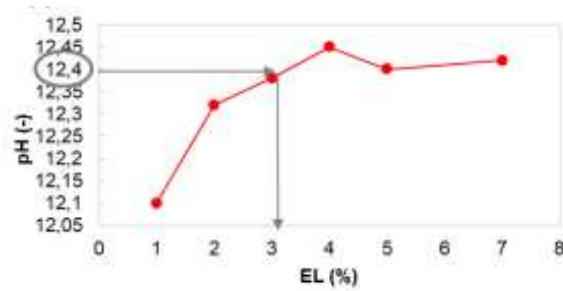


Figura 3-5 Determinazione del Consumo iniziale di Calce

5. **Calcolo della quantità di terreno da inserire nella fustella.** Per determinare la quantità di terreno da inserire nella fustella è stata eseguita un'interpolazione lineare utilizzando come riferimento una curva Proctor Standard già tracciata, determinata sperimentalmente. In particolare, è stata impiegata l'equazione della funzione polinomiale che descrive la relazione tra il contenuto d'acqua (w) del terreno additivato con EL al 4% e la densità secca (γ_d).

La procedura di calcolo è stata la seguente:

- il valore di γ_d è stato calcolato sostituendo il valore di w (ottenuto dai passaggi precedenti) nell'equazione della curva di tendenza polinomiale (Figura 3-6)

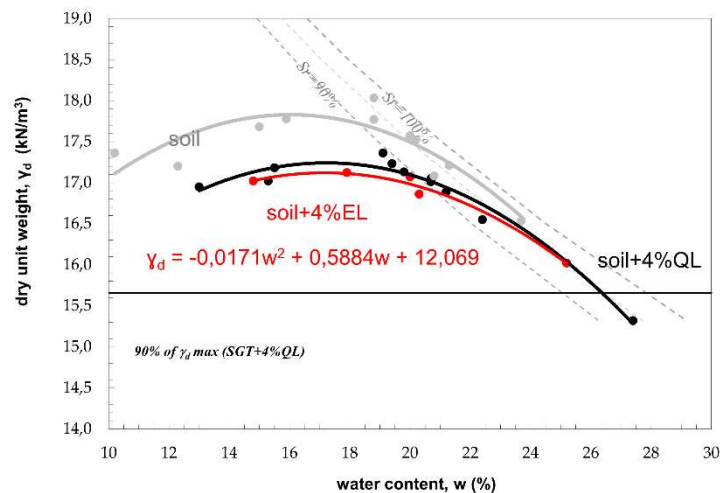


Figura 3-6 Curva Proctor ed equazione di tendenza

- Il peso secco (P_s) del campione è stato ottenuto moltiplicando la densità secca per il volume della fustella (V):

$$P_s = \gamma_d \cdot V$$

Questo valore rappresenta la quantità di terreno secco, che sarà presente all'interno della fustella.

- Il peso dell'acqua (P_w) è stato calcolato, utilizzando la seguente relazione:

$$P_w = P_s \cdot \frac{w}{100}$$

Questo valore corrisponde alla quantità d'acqua presente nel campione in funzione del contenuto d'acqua e della densità secca.

- Infine, il peso totale del terreno umido (P_t) da inserire nella fustella è stato ottenuto sommando il peso secco (P_s) e il peso dell'acqua (P_w).

$$P_t = P_s + P_w$$

Questo valore rappresenta la massa complessiva del campione, comprensiva della frazione solida e dell'acqua, che deve essere inserita nella fustella per eseguire la prova di compattazione

L'utilizzo della curva di tendenza polinomiale ha permesso di stimare con precisione la densità secca del terreno in funzione del contenuto d'acqua e, conseguentemente, di calcolare la quantità di materiale da inserire nella fustella per ciascuna condizione di prova.

3.2.2 Prova di compressione edometrica a incremento di carico

Le prove di compressione edometrica consentono di:

- determinare la relazione tensione-deformazione che descrive le proprietà di compressibilità e di rigonfiamento per effetto di variazioni dello 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 e immerso in acqua, viene sottoposto a una sollecitazione verticale con le deformazioni radiali impedito. Il drenaggio verticale è garantito dalla presenza delle pietre porose sulle basi inferiore e superiore del provino. Nella presente sperimentazione, la carta filtro non è stata interposta per evitare di includere nel calcolo dei cedimenti lo schiacciamento

della stessa. Prima di dare inizio alla prova si misurano le dimensioni dell'anello, si registra la sua tara e il peso umido del provino.

Mediante un sistema di pesi (Figura 3-7), si applicano successivi incrementi di tensione verticale, σ_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 ore, 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 per ciascun gradino di carico, 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 3-7 Edometro manuale

Ogni incremento è mantenuto per 24 ore 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 δ_{100} che viene determinato graficamente dall'intersezione tra la retta tangente al punto di flesso e quella che interpola l'ultimo tratto della curva. Tale cedimento è chiamato cedimento di fine consolidazione primaria e gli corrisponde un certo tempo, definito t_{100} ;
- Consolidazione secondaria, successiva alla primaria, di natura viscosa.

Questa risulta la più diffusa procedura di interpretazione della curva cedimenti-tempo, attraverso la costruzione di Casagrande, con cui è possibile determinare l'aliquota del cedimento primario. Il metodo di Casagrande non può essere utilizzato quando la curva cedimenti-tempo non presenta un punto di flesso ben definito, in questi casi si utilizza la 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%.

Il principale risultato della prova edometrica è la curva di compressibilità, nella quale si mette in relazione l'indice dei vuoti (e) con il logaritmo delle tensioni efficaci ($\log \sigma'$) oppure la deformazione assiale, (ϵ) 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 CR, lungo il ramo di ricarico iniziale;
- indice di compressibilità CC, lungo la retta di normal-consolidazione;
- indice di rigonfiamento CS, 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.

3.2.3 *Microscopio elettronico a scansione*

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 di elettroni ad elevata energia. Dalla interazione tra fascio 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 prevede che un fascio di elettroni 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.

Capitolo 4

RISULTATI SPERIMENTALI

4.1 Addensamento

Come descritto nel capitolo precedente, la compattazione non è stata eseguita con il metodo Proctor standard (dinamico) ma mediante compattazione statica calibrata per raggiungere il livello di densità della miscela (in funzione del contenuto d'acqua) stabilita con la curva Proctor. La compattazione statica ha prodotto provini comparabili con quelli ricostruiti tramite compattazione Proctor Standard.

Si è deciso di indagare le caratteristiche di compressibilità dei campioni di miscela corrispondenti alla parte umida (ramo wet) della curva Proctor quindi con valori di umidità al di sopra dell'optimum, in totale sono stati confezionati quattro provini, le cui caratteristiche sono riepilogate in Tabella 4-1. Si osserva una sistematica riduzione del contenuto d'acqua a seguito dell'aggiunta di calce, tale riduzione è principalmente dovuta alla reazione di idratazione dell'ossido, in cui l'acqua viene legata chimicamente e persa per evaporazione poiché la reazione è fortemente esotermica.

Per il provino SGT-4 è stato ritenuto necessario calcolare “a ritroso” l'umidità iniziale, in quanto si è osservata un valore anomalo del contenuto d'acqua determinato al momento del confezionamento.

La procedura adottata è stata la seguente: il valore di umidità post-prova edometrica è stato considerato attendibile, poiché ottenuto essiccando completamente il campione a fine prova. Dato che il peso secco non varia, conoscendo con precisione il peso umido iniziale, è stato possibile determinare il peso dell'acqua nella condizione iniziale. Considerando che il contenuto d'acqua percentuale è definito dalla formula $w = \frac{P_{H_2O}}{P_S}$, si è ottenuto un valore di umidità iniziale w_i pari al 28,8% (valore asteriscato in Tabella 4-1).

Tabella 4-1 Caratteristiche dei provini oggetto di studio

Provino	Umidità prima della calce (%)	Umidità dopo l'aggiunta di 4% EL (%)	Umidità dopo la prova (%)	Peso di volume secco (g/cm ³)
SGT-1	28	23,79	20,90	1,59
SGT-2	20	18,70	19	1,65
SGT-3	25,1	23	19,64	1,67
SGT-4	32,2	28,80*	20,80	1,49

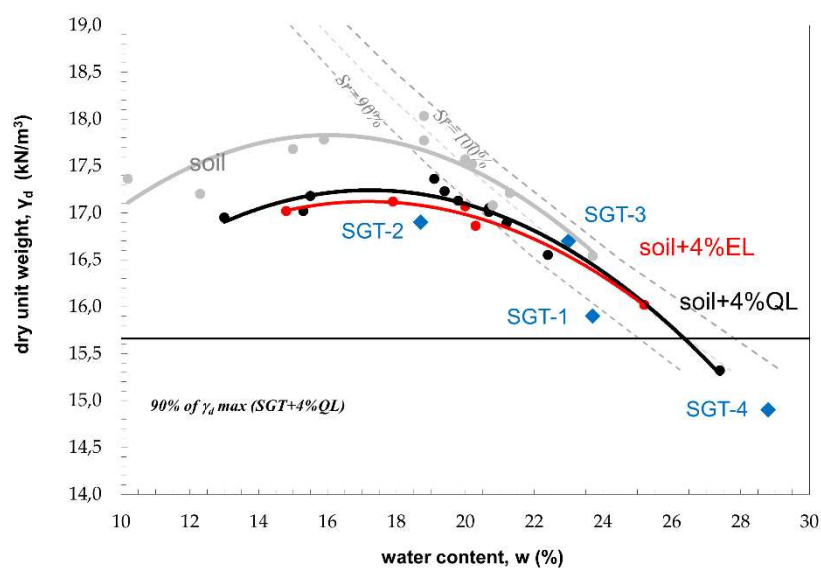


Figura 4-1 Curve Proctor, in blu i provini confezionati mediante compattazione statica

4.2 Compressibilità

I provini di terreno trattati con l'aggiunta di eggshell lime sono stati sottoposti a prova di compressione edometrica dopo 7 giorni di stagionatura con una pressione efficace iniziale di 25kPa. Successivamente, sono state applicate pressioni verticali efficaci comprese tra 50 e 3200 kPa, al termine della quale sono state tracciate le curve di compressibilità, che mettono in relazione la pressione verticale efficace applicata con la deformazione assiale espressa in forma percentuale.

In questo lavoro sono stati testati quattro provini additivati con il 4% di calce da gusci d'uovo (nominati con l'acronimo SGT – numero progressivo del campione), ciascuno con diverso contenuto d'acqua. I risultati sono stati confrontati tra di loro e con tre provini di riferimento: uno non trattato, uno trattato con calce commerciale, e uno con eggshell lime. I valori ottenuti sono riportati in Tabella 4-2.

Per interpretare i risultati ottenuti dalle prove di compressione edometrica e tracciare le relative curve di compressibilità sono stati utilizzati due metodi, descritti nel capitolo 3.2.2.

Il metodo più utilizzato è stato la costruzione di Casagrande, in cui i risultati della prova edometrica vengono rappresentati graficamente tramite la curva cedimenti tempo, se la curva presenta un punto di flesso ben definito, è possibile individuare l'aliquota del cedimento primario permettendo di distinguere le fasi di consolidazione primaria e secondaria con la costruzione mostrata in Figura 4-2.

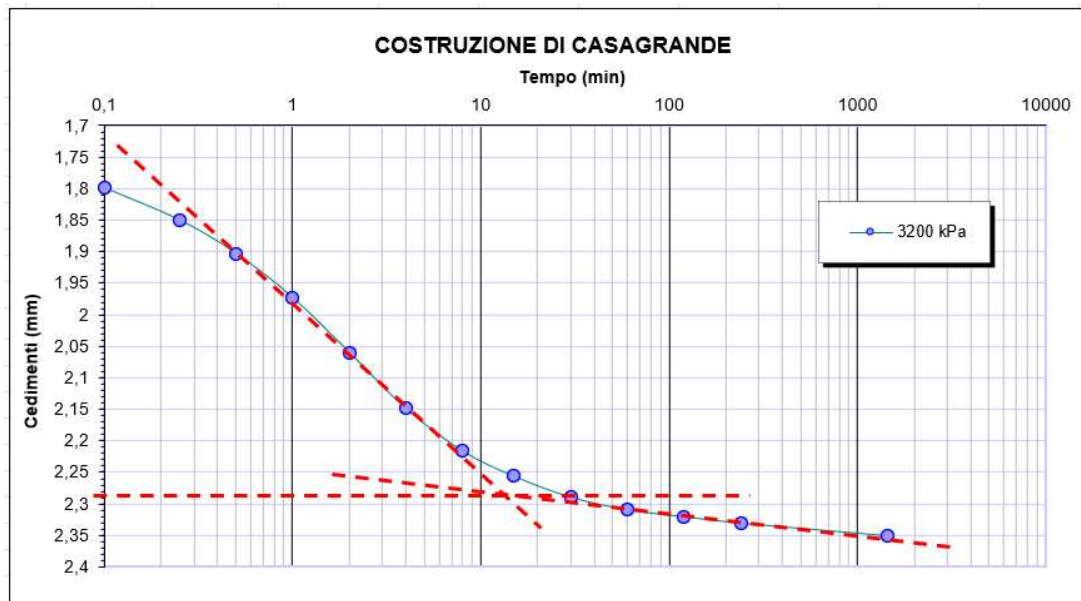


Figura 4-2 Costruzione di Casagrande relativa al campione SGT-3 per il calcolo del cedimento primario con carico di 3200 kPa

Nel caso il punto di flesso non sia chiaramente identificabile, come nel caso del campione SGT-2 sottoposto ad un carico di 1600 kPa, si può utilizzare invece la costruzione di Taylor (Figura 4-3). In questo modo, come descritto nel capitolo 3.2.2, i cedimenti vengono riportati in funzione della radice quadrata del tempo, e il cedimento di fine consolidazione è quello corrispondente al tempo t_{90} . Questo valore si determina graficamente come il punto di intersezione tra la retta interpolatrice e una seconda retta ottenuta incrementando del 15% le ascisse della prima.

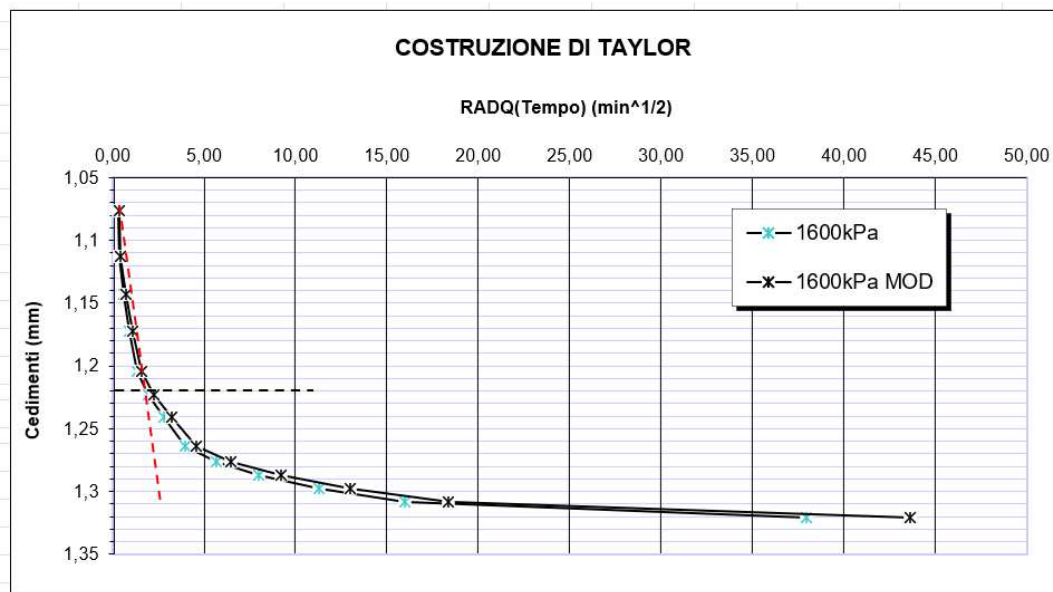


Figura 4-3 Costruzione di Taylor relativa al campione SGT-2 per il calcolo del cedimento primario con carico di 1600 kPa

Tabella 4-2 Deformazione assiali

	Contenuto d'acqua w (%)	Deformazione assiale a $\sigma_v=50$ kPa (%)	Deformazione assiale a $\sigma_v=100$ kPa (%)	Deformazione assiale a $\sigma_v=3200$ kPa (%)
Untreated soil	17	1,58	2,90	18,82
Soil + 4%QL	18,7	0,37	0,75	7,25
Soil + 4%EL	20,3	0,58	0,96	10,58
SGT-1	23,7	0,58	0,99	11,48
SGT-2	18,7	0,21	0,52	11,73
SGT-3	23	0,76	1,57	12,05
SGT-4	28,8	0,74	1,42	20,45

Andando ad analizzare i risultati in forma grafica sul piano deformazione assiale-pressione verticale efficace (Figura 4-4) si evidenzia, a parità di contenuto d'acqua, una significativa riduzione dei cedimenti rispetto al terreno non trattato a seguito dell'aggiunta dei leganti. L'effetto dell'aggiunta di calce da gusci d'uovo si può paragonare a quello della calce commerciale nel range di pressioni verticali efficaci che vanno da 0 a 200 kPa, che oltretutto sono quelle che si riscontrano nei casi più comuni di applicazioni di ingegneria civile e edile di opere in terra (rilevati stradali, dighe e argini, berme).

Il terreno non trattato presenta una deformazione assiale a 3200 kPa pari al 19%, mentre, a parità di contenuto d'acqua, con l'aggiunta di calce commerciale (4% QL) si registra una riduzione della deformazione assiale fino al 7% cioè, una riduzione percentuale del 62%, ottenendo il risultato migliore nel ridurre la compressibilità agli alti carichi (Figura 4-6 (a)).

Nel caso della calce derivata dai gusci d'uovo (4% EL), considerando un range di contenuti d'acqua 18-24%, la deformazione assiale a 3200 kPa si attesta in un intervallo compreso tra il 10 e il 12% cioè, una riduzione percentuale di circa il 37%.

Per il provino SGT-4, confezionato con il contenuto d'acqua più alto ($w=28,8\%$) si registra un cedimento massimo comparabile con quello ottenuto per il terreno non trattato con un contenuto d'acqua del 17% (Figura 4-6 (b)). Tale maggiore compressibilità è probabilmente dovuta al minor peso di volume secco e quindi alla maggiore porosità iniziale. C'è da dire però che anche in questo caso la calce da gusci d'uovo si è rivelata efficace nel ridurre la deformazione ai bassi carichi (50 kPa e 100 kPa). In ogni caso, è possibile affermare che la deformabilità è influenzata del contenuto d'acqua e, in particolare, tende a diminuire al diminuire del contenuto d'acqua di compattazione.

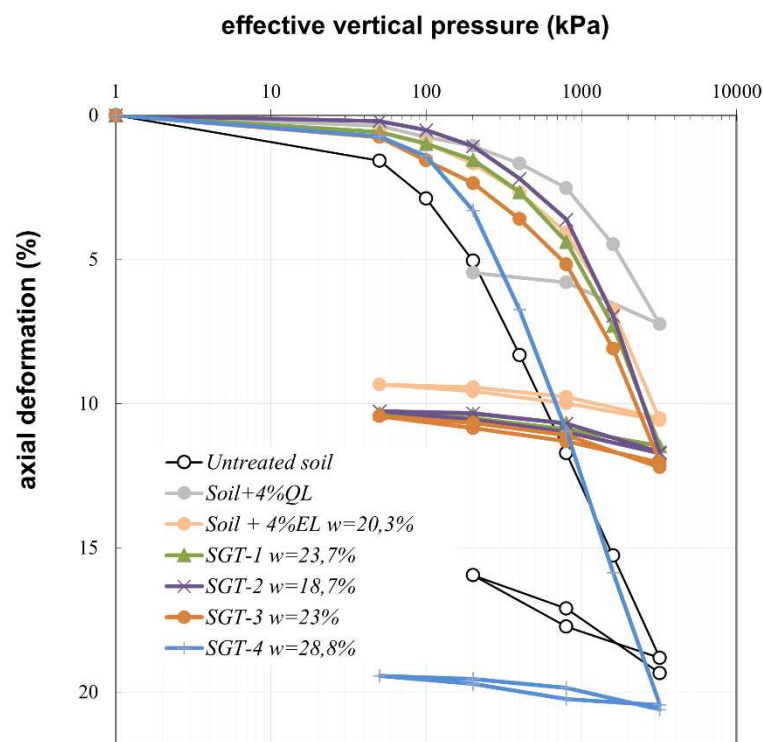


Figura 4-4 Curve di compressibilità

Analizzando la prima parte della curva di compressibilità edometrica, in corrispondenza delle basse pressioni verticali applicate, si nota un andamento simile per tutti i campioni trattati. Le differenze sono meno marcate tra i terreni trattati con calce commerciale e calce derivata dai gusci d'uovo e una più bassa influenza del contenuto d'acqua. Questo intervallo di pressioni efficaci è però quello più rilevante per lo studio in esame, poiché è paragonabile a quello tipico delle opere in terra.

Il terreno non trattato presenta una deformazione assiale pari a 1,58% a 50 kPa e 2,90% a 100 kPa. Con l'aggiunta di calce commerciale (4% QL), si registra una riduzione significativa della deformazione assiale, che scende a 0,37% a 50 kPa e 0,75% a 100 kPa, corrispondente a una riduzione percentuale rispettivamente del 76% e 74% (Figura 4-6 (a)).

Nel caso della calce derivata dai gusci d'uovo (4% EL), la deformazione assiale media è pari a 0,57% a 50 kPa e 1,09% a 100 kPa, con una riduzione percentuale media del 63% e 62% rispetto al terreno non trattato. Sebbene l'efficacia sia inferiore rispetto alla calce commerciale, si osserva comunque un importante miglioramento nella riduzione della compressibilità.

Analizzando i provini trattati con calce da gusci d'uovo ma con contenuti d'acqua differenti, si nota che SGT-2 ($w=18,7\%$) presenta le migliori prestazioni tra tutte le miscele, con una deformazione assiale di 0,21% a 50 kPa e 0,52% a 100 kPa, che corrisponde a una riduzione percentuale dell'87% e 82% rispetto al terreno non trattato. ottenendo il risultato migliore nel limitare la compressibilità a bassi carichi.

Al contrario, i campioni confezionati con contenuto d'acqua più elevato (SGT-1, SGT-3, SGT-4) evidenziano una maggiore deformazione assiale a tutti i livelli di carico rispetto a SGT-2. Ciò suggerisce che un eccesso di acqua nel sistema porta a una disposizione delle particelle di terreno fine meno flocculata e più dispersa che può limitare la cementazione tra le particelle ad opera delle reazioni pozzolaniche indotte dalla calce da gusci d'uovo, riducendo l'efficacia del trattamento. Di conseguenza, quando si utilizza questa tipologia di calce, è fondamentale controllare il contenuto d'acqua affinché sia vicino all'optimum, permettendo così di ottenere una maggiore riduzione della compressibilità. Valori più elevati di w portano invece a prestazioni inferiori.

In particolare, il provino con il contenuto d'acqua più elevato, SGT-4 ($w=28,8\%$), mostra una deformazione maggiore, pari a 0,74% a 50 kPa e 1,42% a 100 kPa, rilevando così una inferiore efficacia del trattamento. Tuttavia, rispetto al terreno non trattato, si ottiene comunque una riduzione della deformabilità del 53% e 51% rispettivamente a 50 e 100 kPa di pressione verticale applicata (Figura 4-6(b)).

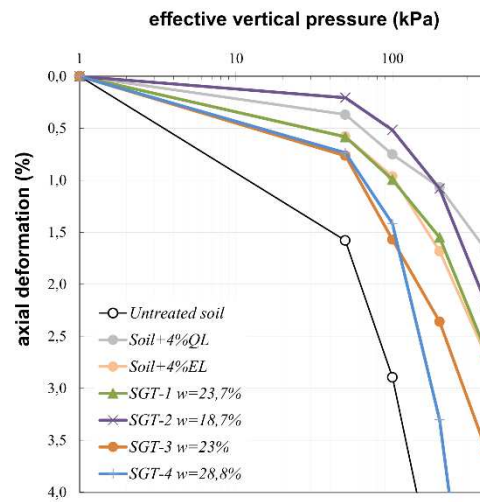


Figura 4-5 Curve di compressibilità, ingrandimento sulle pressioni minori di 400 kPa

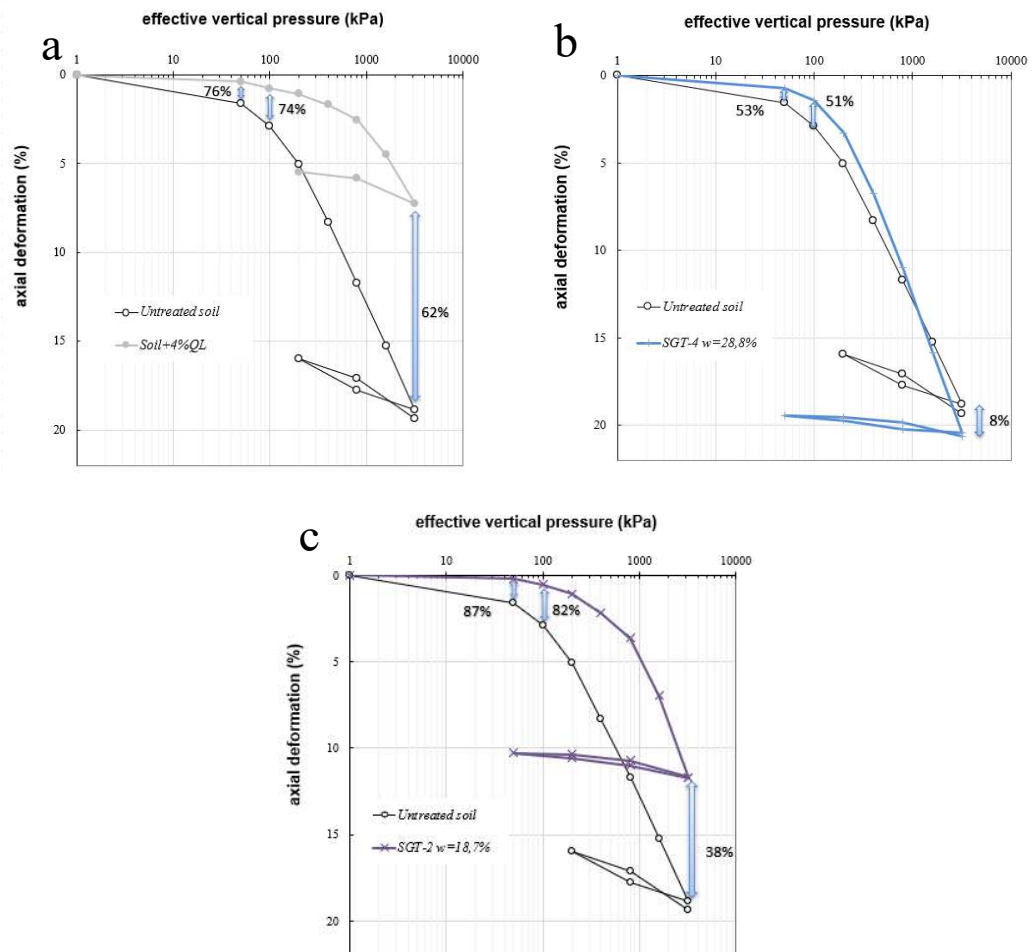


Figura 4-6 Confronto della riduzione della deformazione percentuale tra i diversi trattamenti rispetto al terreno non trattato: (a) 4% QL, (b) SGT-4, (c) SGT-2.

Analizzando invece la fase di scarico e ricarico, si osserva un miglioramento per tutti i provini trattati con calce. Al contrario, nel caso del terreno non trattato, il tratto di scarico tensionale presenta una pendenza più accentuata (Figura 4-7), il che indica una maggiore tendenza al rigonfiamento. Questo significa che, una volta rimosso il carico, il terreno recupera una parte della deformazione subita, espandendosi in modo più marcato.

Nei provini trattati con calce non si distinguono differenze significative nella pendenza tra quelli trattati con calce commerciale e calce da gusci d'uovo. Nei campioni trattati il ciclo di carico e scarico genera deformazioni inferiori, ovvero una minore tendenza al rigonfiamento quando scaricati. Questo suggerisce che il terreno ha acquisito una maggiore rigidità, diventando meno soggetto a variazioni volumetriche in risposta ai cicli di tensione.

L'origine di questo comportamento è da attribuire alla presenza della calce, che induce reazioni chimiche con i minerali argillosi, formando legami che irrigidiscono la struttura del terreno.

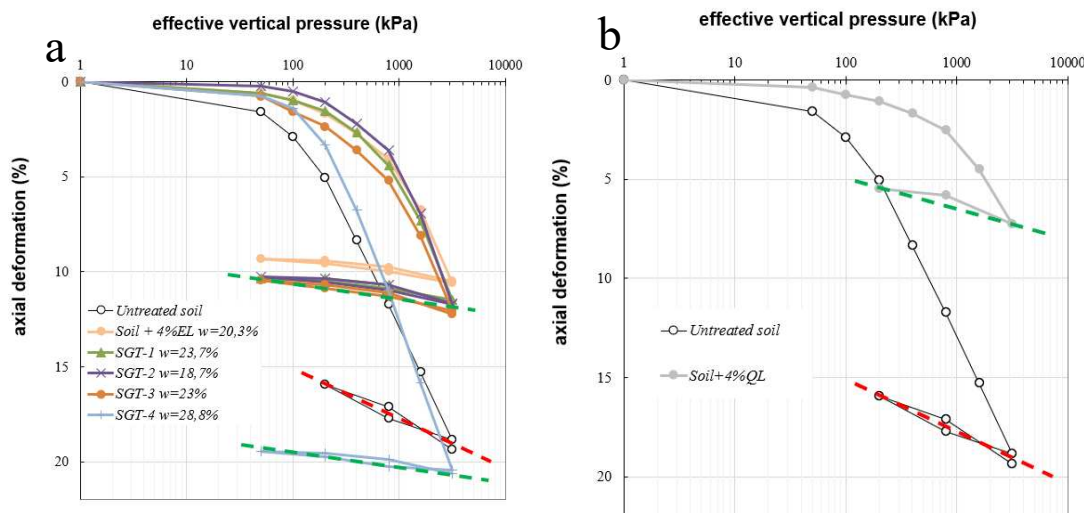


Figura 4-7 Pendenza della curva di scarico della deformazione assiale, indicativa della rigidità residua del materiale: (a) EL; (b) QL

4.3 Microstruttura

Al termine della prova edometrica, parte dei provini è stata osservata al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM). In particolare, sono stati osservati due provini: SGT-2 e SGT-3, trattati con il 4% di Eggshell Lime e con contenuti d'acqua rispettivamente pari a 18,7% e 23%. Preliminarmente, sono stati osservati anche un campione di calce commerciale e un campione di calce derivante dai gusci d'uovo. I campioni sono stati sottoposti essiccamento all'aria per 24 ore e successiva doratura prima dell'osservazione al microscopio.

Relativamente ai campioni di calce, sia commerciale che derivante da gusci d'uovo, dalle immagini ottenute si individua una elevata omogeneità del materiale in entrambi i casi. Per confermare questa osservazione, è stata eseguita una spettroscopia a raggi X, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) su campioni ingranditi rispettivamente a 1000x e 2500x. In entrambi gli ingrandimenti, la distribuzione degli elementi presenti risulta molto simile, confermando anche a livello visivo l'omogeneità del campione (Figura 4-8 e Figura 4-9).

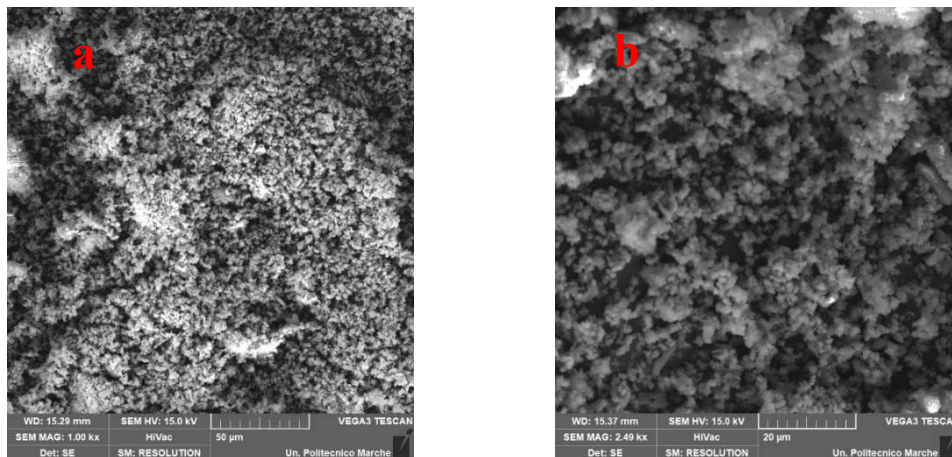


Figura 4-8 Immagini SEM della calce commerciale a diversi ingrandimenti:

(a) 1000x (b) 2500x

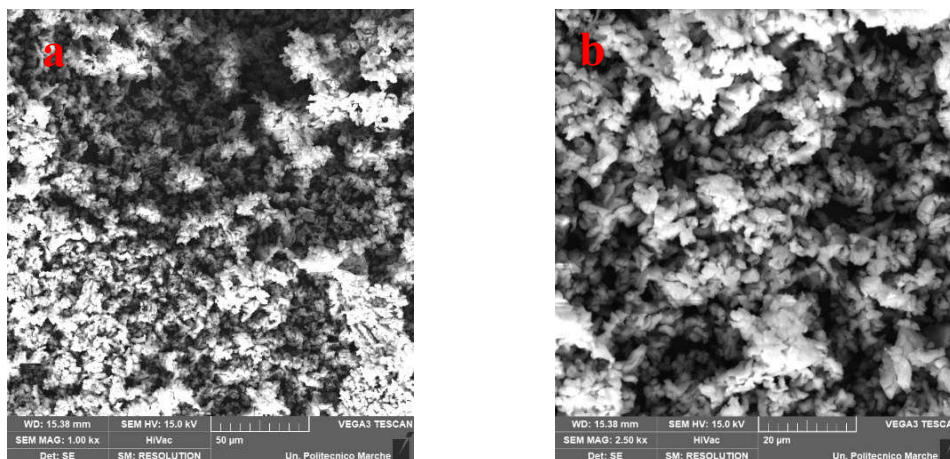


Figura 4-9 Immagini SEM della calce da gusci d'uovo a diversi ingrandimenti:
(a) 1000x (b) 2500x

Dall'analisi EDS, si osserva che il rapporto tra le quantità di calcio e ossigeno rilevate è di circa 2:1, il che suggerisce che la calce ha la forma di idrossido di calcio (calce spenta), la cui formula chimica è $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Si precisa che la spettroscopia SEM non rileva l'idrogeno, poiché quest'ultimo non emette raggi X rilevabili in modo significativo. Questo è dovuto al fatto che l'idrogeno, avendo un solo elettrone, non produce fotoni di energia misurabili con questa tecnica.

Le analisi quantitative riportate nella Tabella 4-3 confermano che la composizione della calce derivante dai gusci d'uovo è quella della calce idrata:

Tabella 4-3 Spettroscopia calce derivante dai gusci d'uovo

	Composizione in massa (%)	Composizione in massa rif. peso atomico (%)
<i>O</i>	43,54	65,89
<i>Ca</i>	54,46	34,11

Analogamente, la composizione della calce commerciale mostra lo stesso rapporto tra i pesi riferiti alla massa atomica, suggerendo anche in questo caso la presenza di calce sottoforma di calce idrata. In tal caso si rileva anche una minima presenza di magnesio che può essere attribuita a delle impurità minerali, tra cui la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ che è un minerale comunemente presente nei depositi di calcare. Se il calcare di partenza contiene dolomite, una parte di essa si decompone durante la calcinazione, lasciando ossido di magnesio (MgO) nel

prodotto finale. Inoltre, alcuni produttori possono aggiungere piccole quantità di magnesio per modificare le proprietà della calce.

Tabella 4-4 Spettroscopia calce commerciale

	Composizione in massa (%)	Composizione in massa rif. peso atomico (%)
<i>O</i>	44,78	66,45
<i>Ca</i>	53,04	31,42
<i>Mg</i>	2,18	31,42

L'osservazione dei provini, sia di calce commerciale che di calce ottenuta dai gusci d'uovo, conferma quindi la loro somiglianza in termini di composizione chimica. Al contrario, in termini di tessitura, confrontando i due tipi di calce a parità di ingrandimento (Figura 4-8 (a) con Figura 4-8 (b)), si osserva che la calce commerciale presenta una tessitura più fine, con cristalli di dimensioni minori.

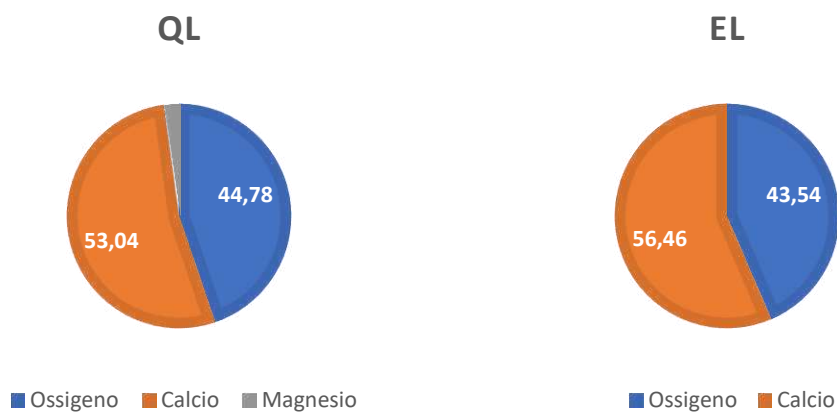


Figura 4-10 Composizione chimica della calce commerciale e della calce derivante da gusci d'uovo

L'analisi al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) nei campioni SGT-2 e SGT-3 ha consentito sia di analizzare la struttura dei campioni sia di eseguire analisi chimiche. Nell'immagine analizzata in Figura 4-11 si osservano strutture aghiformi, tipiche dei silicati e degli alluminati di calcio idrati prodotti dalle reazioni pozzolaniche. Queste formazioni sono infatti il risultato delle reazioni tra la calce e i componenti argillosi del terreno, in particolare silice e allumina. Le strutture aghiformi unitariamente ai prodotti di reazione di tipo amorfo, svolgono un ruolo chiave come composti cementanti. La loro presenza contribuisce significativamente alla riduzione della compressibilità del terreno di partenza rilevata con le prove di compressibilità edometrica precedentemente discusse, grazie alla formazione di fasi idratate stabili come i silicati di calcio (C-S-H) e gli alluminati di calcio idrati (C-A.H). Questi prodotti agiscono come cementi naturali, legando tra loro le particelle del terreno e conferendogli una struttura più rigida e coesa.

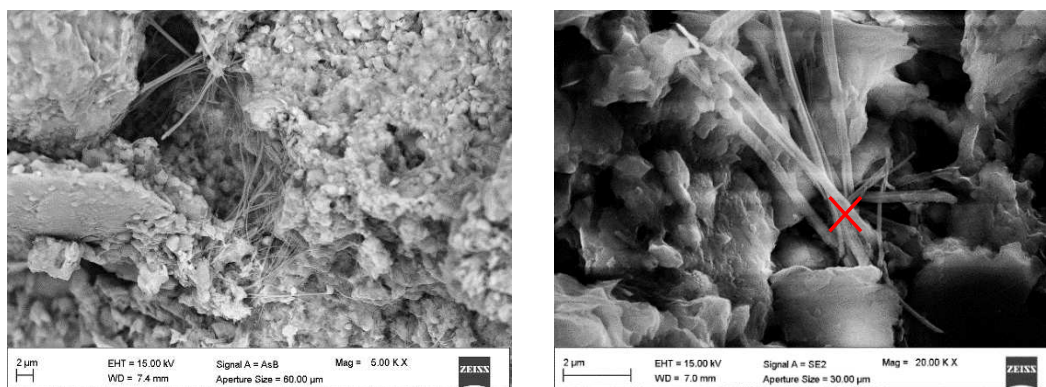


Figura 4-11 Immagini al SEM dei prodotti della reazione pozzolanica dopo la prova edometrica della miscela SGT-2

Tabella 4-5 Analisi EDS su strutture aghiformi eseguita nel punto indicato con una croce di colore rosso in Figura 4-11

	Composizione in massa (%)	Composizione in massa rif. peso atomico (%)
<i>Zolfo</i>	1,09	0,70
<i>Calcio</i>	17,06	8,84
<i>Potassio</i>	1,33	0,70
<i>Silicio</i>	11,83	8,66
<i>Alluminio</i>	6,67	5,15
<i>Magnesio</i>	1,31	1,11
<i>Sodio</i>	0,34	0,30
<i>Ferro</i>	2,97	1,09
<i>Ossigeno</i>	57,15	73,45

Il confronto tra la microstruttura del terreno non trattato (Figura 4-12) e quello additivato con calce da gusci d'uovo (Figura 4-13) risulta di particolare interesse. L'analisi EDS consente

anche di evidenziare le variazioni nella composizione chimica indotte dal trattamento, mentre l'osservazione delle immagini, acquisite alla stessa scala di ingrandimento, permette di analizzare le differenze nella tessitura tra le due condizioni.

È evidente la mutazione della struttura che, a parità di ingrandimento (Figura 4-11 e Figura 4-12), mostra nel campione trattato la presenza di cavità che si originano a seguito della flocculazione delle particelle argillose. Tra le pareti di tali cavità inter-aggregato, si sviluppano le strutture cristalline aghiformi precedentemente analizzate con dimensioni che vanno dai 2 ai 10 micron di lunghezza. Il campione trattato inoltre presenta una tessitura spugnosa dovuta ai prodotti amorfi di reazione.

Tabella 4-6 Analisi EDS sul terreno non trattato

	Composizione in massa (%)	Composizione in massa rif. peso atomico (%)
<i>Silicio</i>	35,22	0,40
<i>Alluminio</i>	14,53	21,99
<i>Calcio</i>	27,04	17,54
<i>Ferro</i>	11,30	6,59
<i>Magnesio</i>	4,29	5,75
<i>Potassio</i>	4,85	4,04
<i>Sodio</i>	1,64	2,32
<i>Titanio</i>	0,74	0,50
<i>Zolfo</i>	0,40	40,86

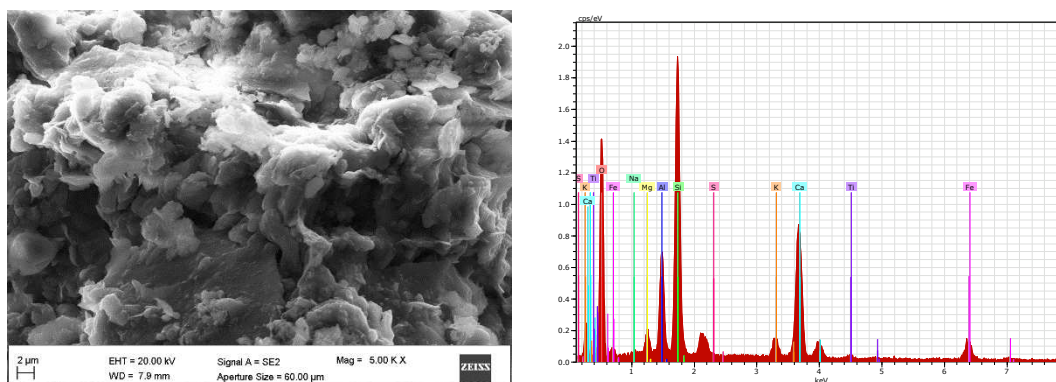


Figura 4-12 Spettroscopia del terreno non trattato

Tabella 4-7 Analisi EDS sul terreno trattato (SGT-2)

	Composizione in massa (%)	Composizione in massa rif. peso atomico (%)
<i>Zolfo</i>	4,59	5,33
<i>Calcio</i>	70,92	66,01
<i>Potassio</i>	1,91	1,82
<i>Silicio</i>	6,43	8,54
<i>Alluminio</i>	9,48	13,10
<i>Magnesio</i>	0	0
<i>Sodio</i>	0	0
<i>Ferro</i>	4,75	3,17
<i>Cloro</i>	1,93	2,03

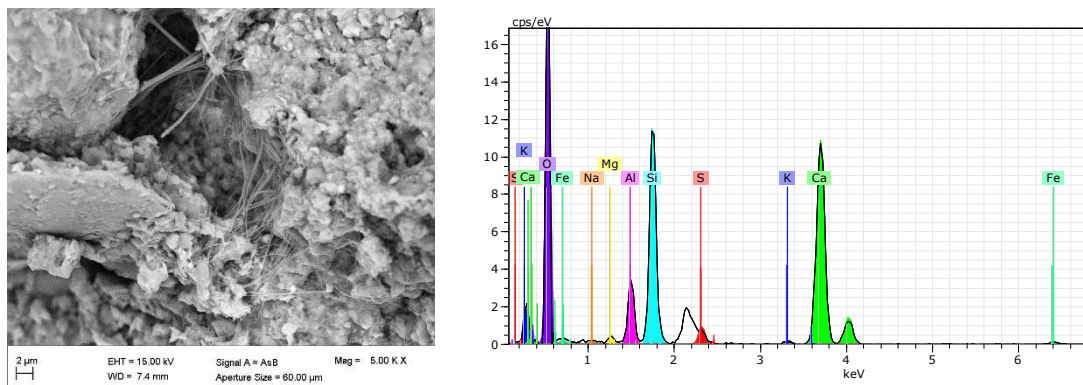


Figura 4-13 Spettroscopia del terreno trattato (SGT-2)

L'aumento relativo del contenuto di calcio rispetto agli altri elementi presenti (silicio, alluminio) è ovviamente coerente con l'aggiunta della calce, che fornisce una ulteriore fonte di Ca^{2+} .

L'analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) e la spettroscopia a dispersione di energia (EDS, Tabella 4-8) hanno permesso inoltre di identificare la presenza di portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nei campioni analizzati. L'immagine mostra strutture lamellari e cristalline e pseudo-esagonali tipiche della portlandite, con particelle ben definite e sovrapposte, indicative della sua formazione e crescita nel materiale (Figura 4-14).

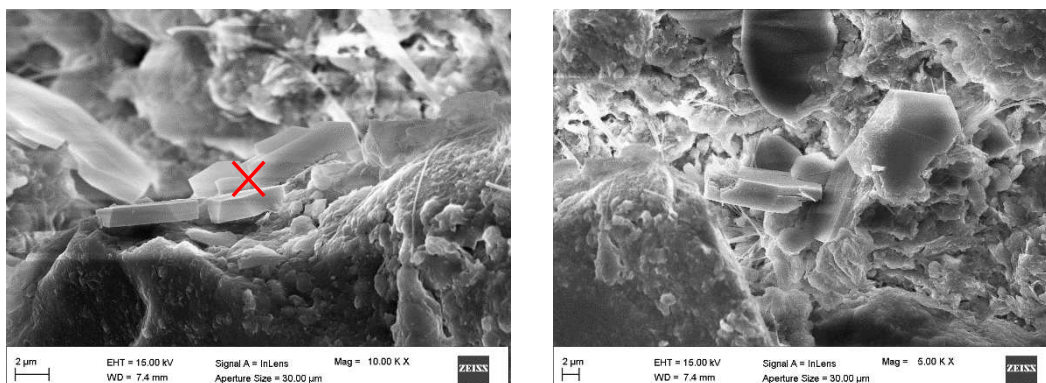


Figura 4-14 Cristalli di portlandite in diversi punti del campione SGT-2

Tabella 4-8 Analisi EDS sul cristallo di portlandite

	Composizione in massa (%)	Composizione in massa rif. peso atomico (%)
<i>Calcio</i>	45,23	27,69
<i>Potassio</i>	0,66	0,41
<i>Silicio</i>	3,02	2,64
<i>Alluminio</i>	3,97	3,61
<i>Magnesio</i>	0	0
<i>Sodio</i>	0	0
<i>Ferro</i>	2,97	1,30
<i>Cloro</i>	3,99	2,76
<i>Ossigeno</i>	40,17	61,59

Capitolo 5

CONCLUSIONI

Le prove geotecniche condotte nel presente lavoro di tesi hanno dimostrato che l'aggiunta del 4% di calce ottenuta da gusci d'uovo migliora significativamente le caratteristiche meccaniche del terreno limo-argilloso, riducendone la compressibilità.

In particolare, le prove edometriche hanno evidenziato una generale riduzione dei cedimenti a seguito del trattamento, confermandone l'efficacia. I risultati ottenuti risultano paragonabili a quelli ottenuti con il 4% di calce commerciale. In particolare, nell'intervallo di pressioni verticali efficaci comprese tra 1600 e 3200 kPa, la deformazione assiale del terreno trattato con calce da gusci d'uovo si è ridotta del 37% rispetto a quella del terreno non trattato, a parità di contenuto d'acqua di compattazione. Nel campo di pressioni tipico delle applicazioni stradali (fino a 200kPa) i provini additivati e compattati a diversi contenuti d'acqua hanno mostrato livelli di deformazione assiale estremamente contenuti ($\leq 0,8\%$).

L'analisi al microscopio elettronico a scansione ha permesso di osservare la microstruttura del terreno trattato, evidenziando la presenza di prodotti di reazione pozzolanica sia in forma amorfa che cristallina, con strutture aghiformi, tipiche dei gel C-S-H e la presenza di cristalli di portlandite.

Inoltre, la spettroscopia EDS ha consentito di determinare e analizzare la composizione chimica dei campioni analizzati.

In conclusione, il trattamento del terreno con calce da gusci d'uovo si è rivelato efficace nel migliorare il comportamento fisico-meccanico del materiale di partenza, a condizione di individuare il range di contenuti d'acqua ottimali e di operare entro tale intervallo. Tuttavia, per terreni con elevato contenuto d'acqua e sottoposti ad alte pressioni, il trattamento ha mostrato limitata efficacia per elevate pressioni verticali, mentre per pressioni più basse ha comunque garantito una riduzione significativa della deformabilità.

BIBLIOGRAFIA

1. M. Di Sante, E. Fratalocchi, E. Pasqualini: *Le miscele terra-calce*. Aracne editrice (2016)
2. M. Di Sante, I. Bellezza, M. Del Cane, E. Fratalocchi, M. K. Khan, F. Mazziere, R. Cosentini, M. Rosone *Eggshell Lime For Soil Treatment*
3. Shahbandeh, M.: Egg production worldwide 1990-2022. <https://www.statista.com/statistics/263972/egg-production-worldwide-since-1990/#:~:text=The%20production%20volume%20of%20eggs,increased%20by%20over%20100%20percent.> (2022)
4. P. Colombo, F. Colleselli, *Elementi Di Geotecnica*. Zanichelli (1996)
5. H. F. Wintekhorn, S. Pamuku: *Lime stabilization in: Foundation Engineering Handbook*, 2 ed., Van Nostrand Reinhold (1991)
6. Transportation Research Board, state of the art report 5: Lime stabilization – Reactions, properties, design and construction, Washington (1987)