

Stabilizzazione dei terreni con un legante sostenibile da fanghi di segazione del marmo: prime evidenze sperimentali

F. Moscato, M. Rosone & C. Celauro

Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, Palermo.

ABSTRACT: Oggi la sostenibilità ambientale guida la progettazione delle infrastrutture. La stabilizzazione dei terreni argillosi consente certamente di riutilizzare materiali provenienti da attività di scavo, riducendo il consumo di risorse naturali e l'impatto legato ai trasporti. Tuttavia, l'uso dei leganti come calce e cemento, altamente impattanti dal punto di vista delle emissioni di CO₂, costituisce un limite della sostenibilità di questa tecnica; per tale motivo, è utile ricercare alternative tra i sottoprodotti industriali. Il presente studio propone l'uso di fanghi da segazione di marmo, il cui smaltimento rappresenta un problema ambientale. Dopo una caratterizzazione dello scarto, è stato studiato il processo di conversione del sottoprodotto, attraverso calcinazione. Le miscele sono state sottoposte a prove di compattazione, portanza immediata, compressione semplice, rigonfiamento e compressione edometrica. I risultati mostrano come il legante innovativo offra nel breve termine prestazioni comparabili a quelle dei leganti tradizionali dimostrando il suo potenziale per la stabilizzazione dei terreni argillosi per l'impiego nei manufatti stradali e ferroviari.

1 INTRODUZIONE

Nel settore delle grandi infrastrutture di trasporto, la ricerca di soluzioni progettuali orientate al risparmio di materie prime non rinnovabili e alla sostenibilità ambientale è ormai diventata una priorità. Ad esempio, durante la costruzione dei manufatti stradali e ferroviari, le operazioni di movimenti terra comportano un aumento delle emissioni di CO₂, costi non indifferenti ed un elevato consumo di risorse naturali (Airò Farulla et al. 2014). Nel rispetto dei requisiti di economicità e sostenibilità si rende, quindi, necessario trovare metodologie progettuali che comunque permettano di realizzare opere ad alte prestazioni. La stabilizzazione a calce migliora le proprietà geomeccaniche dei terreni argillosi, ed è una soluzione sostenibile usata da decenni (Celauro et al. 2010). Questo approccio permette il riutilizzo diretto dei materiali di scavo per la costruzione di rilevati e sottofondi, riducendo sia l'approvvigionamento di nuovi materiali da costruzione sia lo smaltimento in discarica (Celauro et al. 2015). Le modifiche a livello chimico e microstrutturale derivanti dall'interazione tra la calce e i minerali argillosi possono essere suddivise in azioni di breve e lungo termine (Bell 1996). Tra le azioni di breve termine vi sono le modifiche delle caratteristiche geotecniche del terreno argilloso in termini di riduzione di plasticità e contenuto d'acqua, nonché il miglioramento della lavorabilità e l'aumento della resistenza. Queste modifiche derivano principalmente da due reazioni: la prima riguarda lo scambio cationico tra gli ioni calcio e i cationi presenti sulle superfici delle particelle di argilla, che altera la configurazione del doppio strato idrato diffuso e modifica la densità della carica elettrica circostante, favorendo lo sviluppo del secondo effetto, ovvero la flocculazione delle particelle. Le azioni di lungo termine derivano dai processi pozzolanici che si innescano tra gli ioni calcio liberi e i fillosilicati presenti nell'argilla. In ambiente basico (pH > 12.4), questi minerali solubilizzano e favoriscono la formazione di gel cementanti che legano tra loro le particelle argillose, assicurando elevate prestazioni meccaniche nel tempo (Rosone et al. 2016; Vitale et al. 2016).

Nonostante questa tecnica promuova circolarità e sviluppo sostenibile, l'uso di leganti tradizionali comporta un significativo consumo di risorse non rinnovabili, con un impatto diretto sull'esaurimento delle materie prime (Marinho et al. 2025). Si rende quindi necessaria la ricerca di nuove possibili alternative ai comuni leganti in commercio, soprattutto orientando la ricerca tra i vari sottoprodotti a base di calcio derivanti da processi industriali (Behnood 2018).

La presente ricerca propone la rivalutazione di un sottoprodotto derivante dall'industria marmifera siciliana come sostituto di un legante industriale per la tecnica della stabilizzazione, analizzando gli effetti a breve termine che esso provoca a una argilla naturale proveniente da attività di scavo. Nella zona di Custonaci (Trapani, Sicilia), infatti, viene estratto il "Perlato di Sicilia"; le caratteristiche di questa particolare roccia carbonatica la rendono molto richiesta nel mercato mondiale dei materiali lapidei di pregio, con un fatturato stimato a €100 milioni e una esportazione pari a circa il 90% del marmo ottenuto (Capitano et al. 2017). Dal materiale totale estratto (3×10^6 ton/anno), soltanto il 20÷25% viene destinato al mercato, mentre il restante è considerato di scarto. Di questo, una parte è solida e non classificata come rifiuto, mentre il fango di segazione è classificato come rifiuto speciale non pericoloso e viene quindi smaltito in discarica. Il fango di segazione del marmo, composto prevalentemente da carbonato di calcio in sospensione acquosa, deriva dal taglio delle rocce con lame diamantate e getti d'acqua, generando annualmente circa 2×10^5 tonnellate di scarto. Lo smaltimento in discarica è costoso e rappresenta un problema ambientale, poiché le particelle fini possono infiltrarsi nel terreno circostante riempiendone i pori riducendone la permeabilità e aumentando il rischio di frane, mentre l'infiltrazione nel sottosuolo può causare la contaminazione delle falde acquifere (Rizzo et al. 2008). Studi precedentemente condotti hanno dimostrato come questo sottoprodotto sarebbe in grado di replicare un tradizionale legante per la produzione di malte cementizie, poiché se opportunamente calcinato ottiene le medesime caratteristiche di un legante idraulico (Megna et al. 2021).

Finora, alcuni ricercatori hanno sviluppato studi sperimentali sulla efficacia dei sottoprodotti del marmo nella tecnica della stabilizzazione dei terreni per le finalità delle costruzioni stradali (Okagbue and Onyeobi 1999), ma la semplice aggiunta di carbonato di calcio a un terreno a grana fine fornisce soltanto una correzione granulometrica, non apportando profondi cambiamenti nella microstruttura dei terreni. La calcinazione è, invece, necessaria laddove si debbano utilizzare sottoprodotti a base di calcio in sostituzione dei leganti convenzionali (Siddique et al. 2021). Per tale motivo, nello studio proposto è stato dapprima valutato il metodo di conversione del fango di segazione, per ottenere tramite calcinazione una polvere composta principalmente da ossido di calcio. Successivamente sono state effettuate letture di pH per la valutazione del Consumo Iniziale di Calce (CIC) e la determinazione dei limiti di Atterberg su miscele terreno-polvere di marmo calcinata. Infine, sulla base dei risultati ottenuti sono state selezionate tre miscele per le prove di compattazione Proctor, indice di portanza immediato, edometriche e compressione assiale non confinata.

2 MATERIALI E METODI

2.1 *Materiali*

L'argilla utilizzata proviene da scavi nella provincia di Trapani (Sicilia, Italia). La composizione granulometrica è costituita da sabbia ($f_s=2\%$), limo ($f_l=40\%$), e argilla ($f_a=58\%$) con limiti di liquidità e plasticità pari a $w_L=59\%$ e $w_P=29\%$ e indice di plasticità $IP=30\%$, classificata come argilla con limo (A7-6, secondo EN 11531-1:2024). Dal punto di vista mineralogico è composta da calcite, quarzo e caolinite, individuati tramite diffrattometria a raggi X (XRD).

Il fango da segazione di marmo (FM), prelevato da una cava a Custonaci (TP), presentava un contenuto d'acqua pari al 40% ed è stato essiccato all'aria in laboratorio. Successivamente, è stato frantumato manualmente in un mortaio e setacciato a 425 micron, ottenendo una polvere fine (polvere di marmo, PM). Le analisi XRD e spettrofotometrica (XRF) hanno confermato la presenza predominante di carbonato di calcio, con un contenuto di ossido di calcio (CaO) del 56.98% e una perdita al fuoco (Loss on ignition - LOI) del 42.33%, valori molto vicini a quelli teorici del carbonato di calcio puro. La lieve discrepanza nei valori è probabilmente attribuibile alla presenza di impurità, come confermato dai bassi contenuti di ossidi di magnesio, alluminio e silicio. L'analisi termogravimetrica condotta sulla PM ha mostrato un'unica e consistente perdita di massa corrispondente a circa 800 °C dovuta alla dissociazione del carbonato di calcio e perdita di CO₂.

2.2 Metodologia sperimentale

La sperimentazione è iniziata con la calcinazione della polvere di marmo (PM) a 900 °C per tre ore in fornace, con velocità di riscaldamento/raffreddamento di 10°C/min. Da questo processo è stata ottenuta la polvere di marmo calcinata, PMC, che ha dimostrato un contenuto di ossido di calcio libero (CaO) tale da poter essere utilizzato come legante, stimato all'84% sulla base dell'analisi XRF e pari a 83% sulla base come residuo per analisi termogravimetrica. Successivamente, è stato determinato il consumo iniziale di calce (CIC), in accordo con gli studi di Eades e Grim (Eades and Grim 1966), definito come la quantità minima di legante necessaria per ottenere un ambiente alcalino ($\text{pH} > 12.4$) in grado di attivare lo scambio cationico e il conseguente innesco delle reazioni pozzolaniche. Per la prova sono state composte delle miscele di argilla, acqua e legante con dosaggio crescente ottenuto come percentuale sul peso secco di argilla. I componenti sono stati inseriti in contenitori di vetro e messi a condizionare in bagno termostatico a 25 °C, la lettura del pH è stata effettuata dopo un'ora dalla miscelazione.

Successivamente, la variazione della plasticità è stata studiata tramite la determinazione degli indici di Atterberg su campioni composti a crescenti quantità di PMC (0%-6%), un'ora dopo la miscelazione con argilla e acqua. Sulla base del CIC, confermato dallo studio sul cambiamento della plasticità, sono state formulate tre miscele con dosaggi crescenti (CIC, $1.5 \times \text{CIC}$ e $2 \times \text{CIC}$) per le prove di compattazione Proctor ad energia standard ($E = 0.6 \text{ MJ/m}^3$), eseguita secondo EN 13286-2. I campioni sono stati umidificati 24 ore prima delle prove aggiungendo acqua distillata all'argilla disgregata, mentre i dosaggi di PMC sono stati miscelati manualmente e meccanicamente poco prima della compattazione per garantire una distribuzione uniforme.

Successivamente alla fase di miscelazione, i campioni sono stati vagliati attraverso uno staccio di apertura 16 mm, trasferiti in contenitori ermetici e lasciati riposare per un'ora prima di effettuare il costipamento. Dopo la rasatura e pesatura dei campioni, gli stessi sono stati capovolti ed è stato determinato sullo stesso campione, appena compattato, l'indice di portanza immediata. Il punzonamento è avvenuto quindi sul primo strato compattato ed entro 90 minuti dalla miscelazione.

Avendo ottenuto le informazioni circa il costipamento ottimale delle miscele, queste sono state caratterizzate dal punto di vista del rigonfiamento in acqua, in termini di compressibilità e di resistenza alla compressione non confinata, offerti dalle reazioni di breve termine. Tutti i test sono stati svolti su campioni confezionati all'ottimo Proctor un'ora dopo la miscelazione. Con le stesse tempistiche sono stati confezionati dei provini per la prova edometrica, aventi $h = 20 \text{ mm}$ e $d = 56 \text{ mm}$, uno dell'argilla non trattata e tre rispettivamente per le tre miscele indagate. Inizialmente i provini sono stati sommersi con acqua distillata, applicando una tensione verticale totale pari a $\sigma_v = 10 \text{ kPa}$. L'acqua distillata è stata aggiunta nella vaschetta dell'edometro 120 secondi dopo l'applicazione dello stesso carico. In questa fase sono stati monitorati i rigonfiamenti fino alla loro completa stabilizzazione. Quindi, il carico è stato aumentato, con progressione geometrica fino alla tensione massima di 4915 kPa. Al termine dell'applicazione dall'ultimo incremento è stata avviata la fase di scarico fino alla tensione verticale di inizio prova (10 kPa).

La prova di compressione non confinata è stata eseguita su provini cilindrici ($h = 76 \text{ mm}$; $d = 38 \text{ mm}$) di argilla non trattata e delle miscele indagate. I provini sono stati confezionati in tre stati, simulando la compattazione Proctor in maniera statica. I test sono stati eseguiti subito dopo il confezionamento e portati a rottura con una velocità di deformazione pari a 1.70%/min.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

In Figura 1-a è rappresentata la curva che descrive l'andamento della variazione di pH in funzione del contenuto di legante. Dall'analisi dei dati riportati, si è osservato che il consumo iniziale di calce (CIC), necessario per garantire un valore di $\text{pH} = 12.4$, corrisponde al 2.5%.

Parallelamente, l'analisi dei limiti di Atterberg (Figura 1-b), ha confermato che a partire dal valore del CIC, il limite di plasticità e l'indice di plasticità non subiscono variazioni significative.

In accordo con gli studi di Hilt e Davidson (Hilt and Davidson 1960), è possibile affermare che questo valore rappresenti il minimo necessario affinché possa avvenire il processo della stabilizzazione.

Questi risultati rivestono un ruolo fondamentale circa l'ottimizzazione del processo di stabilizzazione dei terreni. Il valore ottenuto da tali prove costituisce un parametro per la determinazione della quantità minima necessaria con lo scopo di raggiungere gli obiettivi desiderati in termini di modifiche chimico-fisiche, garantendo al contempo un uso efficiente delle risorse e riducendo eventuali sprechi. Il valore di pH pari a 12.4 rappresenta un indice di raggiungimento di un ambiente alcalino idoneo per avviare i processi pozzolanici che si svilupperanno tra gli ioni calcio liberi in soluzione, gli ossidi di alluminio e silicio presenti nell'argilla e l'acqua. Inoltre, l'assenza di variazione nell'indice di plasticità, oltre tale valore, suggerisce che il sistema raggiunge una configurazione iniziale stabile, suggerendo che l'aggiunta di ulteriore legante non sia necessaria per migliorare ulteriormente le proprietà geotecniche del materiale trattato. A partire dal valore del CIC sono state formulate tre miscele con contenuto di polvere di marmo calcinata pari rispettivamente a CIC, 1.5×CIC e 2×CIC, aggiunta in percentuale rispetto al peso secco dell'argilla.

Nella Figura 2 sono riportati i risultati delle prove di compattazione Proctor Normale (a) e dell'indice di portanza immediato (b) sulle tre miscele formulate e sul non trattato. I risultati evidenziano che aggiungendo la PMC viene ridotto gradualmente il massimo peso secco dell'unità di volume, ovvero quello alle condizioni ottime di compattazione, rispetto a quello del non trattato pari a $\gamma_d=15.50 \text{ kN/m}^3$, arrivando ad un valore pari a $\gamma_d=14.75 \text{ kN/m}^3$ per la miscela con la percentuale più alta 2×CIC.

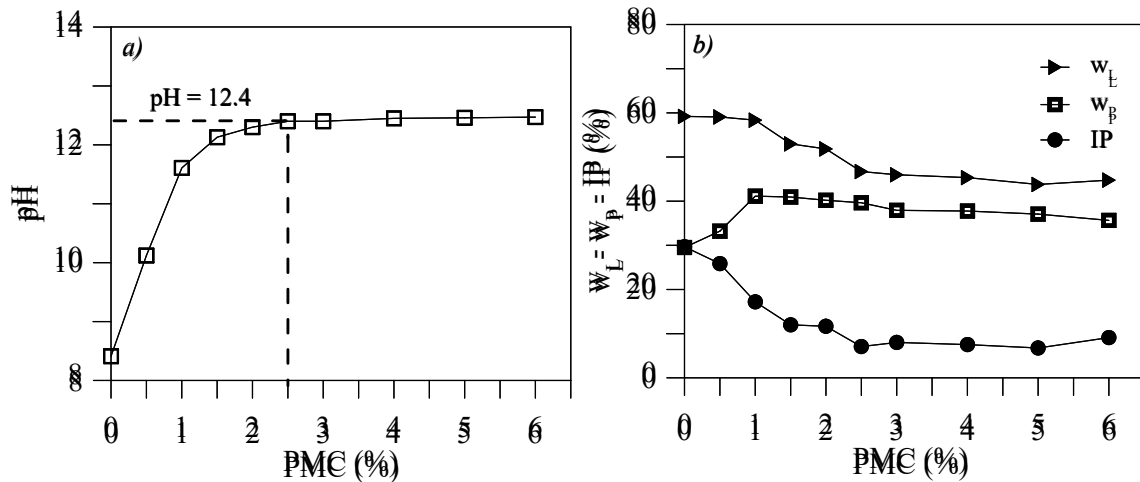


Figura 1. a) Variazione del pH e b) degli indici di Atterberg in funzione del contenuto di PMC.

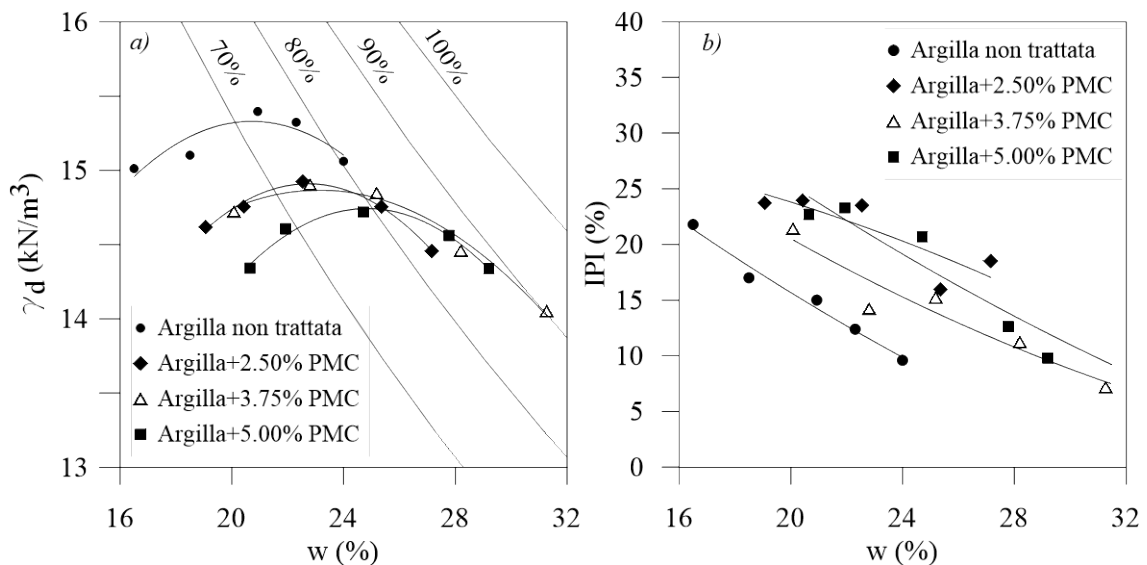


Figura 2. a) Curve Proctor Standard e b) Indice di Portanza Immediato (IPI) in funzione del contenuto d'acqua.

Il contenuto ottimale d'acqua si sposta verso contenuti d'acqua crescenti, come è tipico dei terreni trattati con calce, a causa dei processi di idratazione del legante e alle modifiche microstrutturali indotte nel breve termine (Hussain and Dash 2016). È bene sottolineare che l'aggiunta di legante riduce immediatamente il contenuto iniziale d'acqua nell'argilla. Per il materiale in studio è stato riscontrato circa l'1.50% di riduzione per punto percentuale di legante aggiunto.

Questa riduzione deve essere tenuta in conto durante le fasi di miscelazione in situ al fine del raggiungimento del contenuto ottimale d'acqua. Si riscontra che tutte le miscele indagate hanno un grado di saturazione compreso tra il 70% e l'80% in condizioni ottimali. In Figura 2-b è possibile notare il miglioramento della portanza immediata offerto dalle miscele trattate con PMC rispetto all'argilla non trattata. L'aggiunta del legante aumenta fin da subito la resistenza del terreno e, di conseguenza, la sua capacità di supportare carichi immediati. In particolare, i valori di IPI variano in funzione dell'umidità del campione: riducendo l'umidità rispetto all'ottimo Proctor, si raggiunge il contenuto ottimale di acqua per ottenere le migliori prestazioni in termini di portanza immediata.

In Figura 3 sono riportate le curve di rigonfiamento (a) e di compressione edometrica (b) eseguite sull'argilla non trattata e sulle tre miscele indagate. Nella fase iniziale di saturazione ad una tensione verticale totale pari a $\sigma_v = 10$ kPa (Figura 3-a), si nota una significativa riduzione dei valori di rigonfiamento uniassiale nei campioni trattati con PMC rispetto all'argilla non trattata, evidenziando una notevole riduzione della suscettibilità all'acqua, come mostrato in Tabella 1.

Le curve edometriche in Figura 3-b evidenziano che il trattamento con PMC comporta una minore variazione dell'indice di porosità durante la fase di carico. Inoltre, il cedimento massimo si riduce all'aumentare del dosaggio di legante. Questi risultati confermano che l'aggiunta di PMC migliora il comportamento meccanico e limita le deformazioni volumetriche del terreno rispetto al materiale non trattato. Dalle curve e - $\log \sigma_v$ sono state ricavate le tensioni di snervamento con il metodo di Casagrande (Tabella 1), i risultati mostrano che il campione non trattato presenta una tensione di snervamento significativamente più bassa rispetto a quelle delle miscele trattate con PMC. Queste ultime evidenziano valori progressivamente crescenti all'aumentare del dosaggio di legante. A partire da questi valori, le pendenze delle rette vergini determinate nei campioni trattati sono quasi le stesse di quella dell'argilla non trattata. Gli indici di compressibilità, C_c , ottenuti nei campioni trattati attingono valori compresi tra $C_c=0.23 \div 0.31$ e non cambiano profondamente rispetto a quello riscontrato nell'argilla non trattata, pari a $C_c=0.26$. Nel tratto di scarico, è stato valutato per l'argilla non trattata un indice di rigonfiabilità, C_s , pari a $C_s=0.07$ più che doppio rispetto ai valori ottenuti nei campioni trattati compresi tra $C_s=0.02 \div 0.009$.

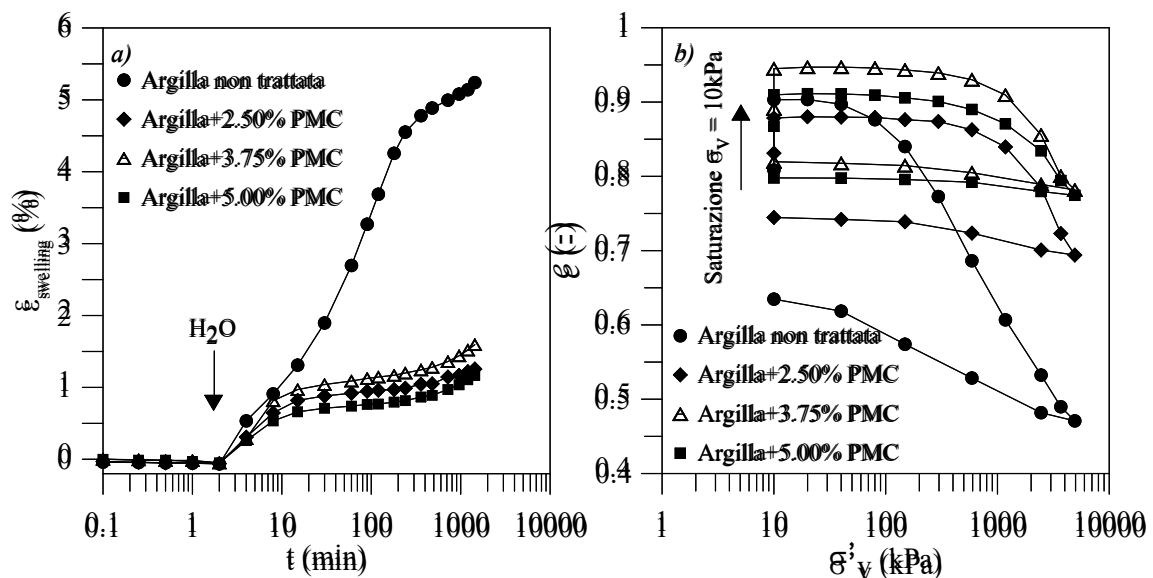


Figura 3. a) Andamento del rigonfiamento uniassiale nel tempo e b) curve carico-scarico di compressione edometrica.

Tabella 1. Risultati di rigonfiamento e compressione edometrica.

Parametro	Non trattato	+2.50% PMC	+3.75% PMC	+5.00% PMC
$\epsilon_{swelling}$ (%)	5.24	1.25	1.59	1.16
$\Delta e_{swelling}$ (-)	0.095	0.047	0.054	0.042
Δe_{Finale} (-)*	-0.432	-0.185	-0.163	-0.135
ρ_{max} (mm)	3.73	1.49	1.15	0.99
$\sigma'_{v, max}$ (kPa)	126	1660	1820	1906

*Differenza tra l'indice di porosità al massimo carico e post swelling.

Si è riscontrato che l'aumento della percentuale di PMC migliora significativamente il comportamento idro-meccanico dell'argilla, riducendo sia il rigonfiamento iniziale sia il cedimento sotto carico. La riduzione del rigonfiamento è attribuibile agli effetti di breve termine poiché sottoposta a prova subito dopo la compattazione dei provini. La riduzione dei cedimenti sotto carico è sicuramente attribuibile allo sviluppo di legami cementanti sviluppati prima e nel corso della prova.

L'analisi dei risultati delle prove di compressione assiale non confinata riportati in Figura 4 e condotte su quattro miscele (argilla non trattata e trattate con percentuali crescenti di PMC), evidenzia un comportamento meccanico fortemente influenzato dalla presenza della PMC. Le prove sono state effettuate a un'ora dalla compattazione dei campioni, una scelta che consente di valutare le modifiche delle proprietà meccaniche del materiale subito dopo l'applicazione della PMC, quindi in assenza di prodotti pozzolanici. Tutte le prove sono state condotte in condizione non drenate. Il campione di argilla non trattata mostra una resistenza massima pari a $\sigma_a=375$ kPa e riflette le proprietà tipiche di un materiale altamente plastico, caratterizzato da un comportamento di rottura di tipo duttile. Al contrario, nei campioni trattati, l'aggiunta della PMC produce una crescita progressiva delle proprietà meccaniche.

Il provino trattato con la percentuale più bassa di PMC riscontra una resistenza assiale massima ($\sigma_a=367$ kPa) di poco inferiore a quella dell'argilla non trattata, ma mostra un comportamento meno duttile. I campioni di argilla trattata alla percentuale più alta di PMC raggiungono il valore di resistenza massimo più alto, pari a $\sigma_a=671$ kPa. Oltre all'incremento della resistenza assiale, si osserva un aumento progressivo del modulo di Young con l'aumentare della percentuale di PMC, valutato sulla tangente al tratto iniziale. Nel campione di argilla non trattata, il modulo di Young risulta pari a $E_t=41$ MPa, mentre per i campioni trattati si registrano valori crescenti pari a $E_t=58$ MPa, $E_t=54$ MPa, fino a $E_t=75$ MPa man mano che si considera un contenuto di PMC crescente. I risultati evidenziano quindi che l'aumento della resistenza assiale è proporzionale alla quantità di PMC impiegata, confermando la sua capacità di modificare rapidamente le caratteristiche microstrutturali e la resistenza del terreno trattato rispetto all'argilla naturale.

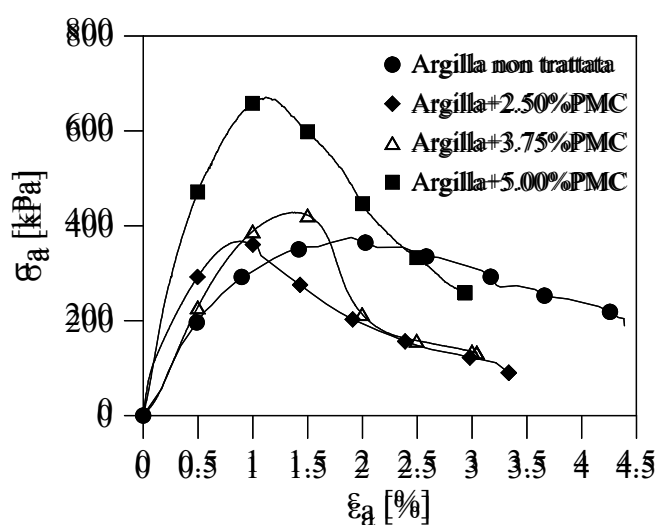


Figura 4. Risultati delle prove di compressione assiale non confinata.

4 CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta nell'ambito di questo studio ha analizzato l'applicabilità del fango di segazione del marmo – opportunamente pretrattato - come potenziale sostituto di un legante industriale tradizionale per la stabilizzazione di terreni argillosi derivanti da attività di scavo. I risultati ottenuti evidenziano le modifiche immediate indotte dalle reazioni a breve termine nelle miscele. In particolare, l'aggiunta del 2.5% di PMC ha favorito la creazione un ambiente alcalino, condizione necessaria per l'attivazione di reazioni a breve termine che hanno portato a una marcata riduzione della plasticità del terreno trattato. Questa variazione dell'indice di plasticità si è stabilizzata, risultando invariata per incrementi ulteriori di PMC. Per quanto riguarda le caratteristiche di compattazione, le miscele trattate con PMC hanno mostrato un comportamento analogo a quello conosciuto nei terreni trattati con calce. Si è riscontrata, infatti, una riduzione del peso massimo secco per unità di volume e un aumento del contenuto ottimale d'acqua rispetto agli stessi parametri del terreno non trattato.

Circa le valutazioni della portanza immediata, le prove sui campioni compattati dinamicamente hanno dimostrato un miglioramento rispetto al terreno non trattato, confermando il potenziale del PMC nel migliorare la risposta offerta in condizioni di carico immediato. L'interazione tra gli ioni calcio e quelli presenti nell'argilla ha comportato una minore suscettività all'acqua in termini di rigonfiamento assiale nei campioni trattati per effetto della saturazione. Inoltre, è stata osservata una significativa diminuzione della compressibilità del terreno, accompagnata da un incremento della resistenza meccanica misurata attraverso prove di compressione non confinata.

Queste prove hanno dimostrato che sia la resistenza che la rigidità subiscono modifiche sostanziali rispetto ai parametri riscontrati nell'argilla non trattata, con un miglioramento globale delle prestazioni meccaniche. Nel complesso, tali risultati preliminari mettono alla luce il potenziale del legante ottenuto dai fanghi di segazione del marmo come alternativa sostenibile e valida alle calce commerciali, grazie alla capacità di produrre immediate modifiche nel comportamento geomeccanico del terreno.

Tuttavia, per valutare pienamente l'efficacia di questa soluzione alternativa e innovativa, sarà necessario indagare l'evoluzione nel tempo delle caratteristiche geomeccaniche, accompagnate da una analisi del cambiamento della microstruttura.

RINGRAZIAMENTI

Ente finanziatore: progetto finanziato dall'Unione Europea - NextGenerationEU – Piano Nazionale Resistenza e Resilienza (PNRR) - Missione 4 Componente C2 Investimento 1.1 – Avviso N. 104 del 2 febbraio 2022 del Ministero dell'Università e della Ricerca; Award Number: codice progetto: 2022EFFE52, decreto di concessione del finanziamento n. 961 del 30 giugno 2023, CUP: I53D23001710006, titolo progetto: INnovative and Sustainable Stabilization Processes Involving REcycled SOils and Used materialS – INSPIRED SOULS.

5 BIBLIOGRAFIA

- Airò Farulla, C., Celauro, B., Celauro, C. and Rosone, M., 2014. Field test of lime treatment of clayey soils for railways and road works. *Ingegneria Ferroviaria* 69(9), pp. 729–752.
- Behnood, A., 2018. Soil and clay stabilization with calcium and non calcium-based additives: A state of the art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics* 17, pp. 14–32.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Elsevier Eng. Geology* 42, pp. 223–237.
- Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G. and Ferrante, P., 2017. Toward a holistic environmental impact assessment of marble quarrying and processing: proposal of a novel easy-to-use IPAT-based method. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(3).
- Celauro, B., Bevilacqua, A., Lo Bosco, D. and Celauro, C., 2010. Costruzione dei rilevati stradali e ferroviari: valutazione delle metodologie di progetto delle terre trattate con calce. *MECCANICA DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE* 1(3), pp. 123–145.
- Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M. and Lo Casto, B., 2015. Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 34, pp. 41–51.

- Eades, J.L. and Grim, R.E., 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Record* 139.
- Hilt, G.H. and Davidson, D.T., 1960. Lime fixation in clayey soils. *Highway Research Board Bulletin* 262, pp. 20–32.
- Hussain, M. and Dash, S.K., 2016. The influence of lime on the compaction behaviour of soils. *Environmental Geotechnics* 3(5), pp. 346–352.
- Marinho, J.F.V., Nascimento, H.C.B., Nóbrega, A.C.V., Marinho, E.P. and Lima, N.B.D., 2025. Ecological mortars produced from sustainable hydrated lime obtained from biomass ash. *Next Sustainability* 5, p. 100067.
- Megna, B., Badagliacco, D., Sanfilippo, C. and Valenza, A., 2021. Physical and mechanical properties of sustainable hydraulic mortar based on marble slurry with waste glass. *Recycling* 6(2).
- Okagbue, C.O. and Onyeobi, T.U.S., 1999. Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction. *Engineering Geology* 53, pp. 371–380.
- Rizzo, G., D'Agostino, F. and Ercoli, L., 2008. Problems of soil and groundwater pollution in the disposal of 'marble' slurries in NW Sicily. *Environmental Geology* 55(5), pp. 929–935.
- Rosone, M., Airò Farulla, C., Ferrari, A., Torta, C. and Celauro, C., 2016. Suction controlled drying and wetting cycle effects on the volumetric behaviour of a lime-treated high plasticity clay. In: *E3S Web of Conferences* 9(6):14020.
- Siddique, S., Jang, J.G. and Gupta, T., 2021. Developing marble slurry as supplementary cementitious material through calcination: Strength and microstructure study. *Construction and Building Materials* 293.
- Vitale, E., Deneele, D., Russo, G. and Ouvrard, G., 2016. Short-term effects on physical properties of lime treated kaolin. *Applied Clay Science* 132–133, pp. 223–231.

SOIL STABILISATION USING A SUSTAINABLE BINDER FROM MARBLE SLUDGE: PRELIMINARY EXPERIMENTAL EVIDENCE

Keywords: soil stabilisation, clay soil, marble powder, sustainable infrastructure

Environmental and economic sustainability has increasingly become a central focus in infrastructure development. Soil stabilisation allows the reuse of excavated materials, thereby reducing the use of natural resources and the impact of transport. However, the use of high-impact binders, such as lime and cement, constrains the sustainability of this technique. Within the framework of the circular economy, attention is focused on alternatives binders derived from industrial by-products, particularly those based on calcium carbonate. This study investigates the potential use of marble sludge, the disposal of which poses significant environmental challenges. After a characterisation of the waste material, the calcination process was studied. Formulated mixtures were subjected to mechanical tests including compaction, immediate bearing capacity, compression, swelling and compressibility. The findings show that the innovative binder offers short term performance comparable to those of commercial binders, demonstrating its potential for stabilising clay soils for use in roads and railways construction.