

STUDIO PRELIMINARE SULLA STABILIZZAZIONE DEI TERRENI UTILIZZANDO UN SOTTOPRODOTTO DELL'INDUSTRIA DEL MARMO COME SOSTITUTO DI UN LEGANTE INDUSTRIALE

Francesco Moscato (francesco.moscato01@unipa.it)

Marco Rosone (marco.rosone@unipa.it)

Clara Celauro (clara.celauro@unipa.it)

Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, 90128 Palermo, Italy

ABSTRACT. Negli ultimi decenni, è stata posta una sempre crescente attenzione alla sostenibilità ambientale nella costruzione delle infrastrutture di trasporto. In questo contesto, la tecnica di stabilizzazione a calce si pone come una soluzione particolarmente interessante per i vantaggi tecnici, economici e ambientali correlati. Tuttavia, l'uso di leganti quali calce o cemento potrebbe compromettere la sostenibilità di questa tecnica, a causa dell'impatto ambientale legato ai loro cicli produttivi. Questa ricerca mira ad esplorare la possibilità di migliorare la sostenibilità della stabilizzazione utilizzando un legante "riciclato", poiché derivante da un sottoprodotto dell'industria marmifera siciliana. In coerenza con il mix design tipicamente condotto con le calce da produzione industriale, è stata eseguita la valutazione dei valori di pH e dei limiti di Atterberg delle miscele terra-legante riciclato. Successivamente sono state eseguite compattazioni Proctor su miscele a diverso contenuto di legante e, infine, sugli stessi campioni sono stati eseguiti test meccanici preliminari.

1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio, la crescente consapevolezza dell'importanza di sviluppo sostenibile è diventata un punto cardine nel campo dell'ingegneria civile. L'impatto delle attività umane sull'ambiente è notevole in termini di consumo di materie prime e si stanno sviluppando nuove strategie per raggiungere i più alti standard di sviluppo sostenibile. Nel contesto della progettazione di opere infrastrutturali è noto come la necessità di adottare scelte progettuali inerenti ai principi di economicità, sostenibilità e validità tecnica è essenziale. Le operazioni di scavo/riporto per la realizzazione di scavi in galleria e/o trincee e la realizzazione di rilevati sono causa di notevoli costi, consumo di risorse naturali ed emissioni di CO₂ [1]. La necessità di rispondere a queste problematiche richiede l'adozione di metodologie che consentano la realizzazione di opere che garantiscano alte caratteristiche prestazionali tramite l'adozione di metodi che rispondano ai requisiti di economicità e sostenibilità. La stabilizzazione a calce, come noto, è un'opzione valida e idoneamente sperimentata che consente di alterare le caratteristiche geo-meccaniche di terre argillose provenienti da attività di scavo, permettendone il loro utilizzo come materiali da costruzione [2]. Questo permette di minimizzare allo stesso tempo il fabbisogno di materiali idonei da costruzione ed il conferimento in discarica dei materiali escavati ritenuti non idonei al reimpiego in cantiere. Il processo chimico di interazione tra calce e terra è costituito da azioni a breve e lungo termine. Tra le azioni a breve termine vi sono le modifiche delle caratteristiche geotecniche del terreno argilloso in termini di riduzione di plasticità e contenuto d'acqua e miglioramento della lavorabilità. Le azioni di lungo termine derivano dai processi pozzolanici che si sviluppano tra gli ioni calcio ed i componenti mineralogici dell'argilla in ambiente fortemente basico garantendo alte prestazioni meccaniche nel lungo tempo [3]. Nonostante questa pratica si avvalga del principio di circolarità e di sviluppo sostenibile, i leganti aerei o idraulici adoperati derivano da processi industriali che non possano definirsi altrettanto sostenibili. Si rende quindi necessaria la ricerca di nuove possibili alternative ai comuni leganti in commercio, quali calce e cemento, soprattutto orientando la ricerca tra i vari sottoprodotti derivanti dai processi industriali. Una opzione potrebbe trovarsi tra i sottoprodotti derivanti dalla lavorazione delle pietre ornamentali di natura carbonatica. Uno di questi è il fango di segazione, composto prevalentemente da carbonato di calcio in sospensione acquosa, ottenuto come scarto dai processi di taglio delle rocce estratte. Finora, pochi ricercatori hanno sviluppato studi sperimentali sul riutilizzo dei sottoprodotti del marmo nella pratica comune della stabilizzazione dei terreni ai fini della costruzione stradale [4] e per quanto riguarda l'uso efficace di questo materiale in sostituzione della calce viva nella stabilizzazione chimica dei terreni argillosi esiste una lacuna nella ricerca scientifica. La semplice aggiunta di polvere di marmo ad un terreno a grana fine fornisce una stabilizzazione per correzione granulometrica. La calcinazione (cioè il processo termico di conversione del carbonato di calcio in ossido di calcio) è invece necessaria laddove si debbano utilizzare sottoprodotti a base di calcio in sostituzione dei leganti convenzionali [5]. Questo lavoro preliminare si pone come obiettivo quello della valutazione dello scarto dell'industria del marmo come sostituto efficace alla calce viva per il processo di stabilizzazione. Inizialmente è stato valutato il metodo di processazione del fango di segazione,

ottenendo tramite calcinazione una polvere composta da ossido di calcio. Successivamente sono state effettuate prove di pH per la valutazione del Contenuto Iniziale di Calce (CIC) e i limiti di Atterberg su miscele terra-polvere di marmo. Infine, sulla base dei risultati ottenuti dalle modifiche di pH e di plasticità delle miscele sono state selezionate tre miscele per le prove di compattazione Proctor ed Indice di Portanza Immediato (IPI). I risultati preliminari hanno dimostrato la potenzialità dell'utilizzo di un sottoprodotto derivante da processi industriali dell'industria marmifera al fine di modificare le proprietà di una terra argillosa.

2. MATERIALI E METODI

L'argilla naturale impiegata nel piano sperimentale è stata reperita presso un sito di costruzione in provincia di Trapani (Sicilia, Italia). Le caratteristiche geotecniche, riportate in Tabella 1, la rendono idonea per il trattamento a calce secondo quanto stabilito da EN 14227-11. Il fango di segazione del marmo è stato prelevato da una cava di estrazione nel territorio di Custonaci (TP), territorio nel quale viene estratto e lavorato il famoso "Perlato di Sicilia". Le caratteristiche di questa particolare roccia carbonatica la rendono molto richiesta nel mercato mondiale dei materiali lapidei di pregio e la conseguente produzione è elevata. Il fango di segazione del marmo è un sottoprodotto ottenuto dai processi di taglio delle rocce estratte, dove il taglio avviene tramite lame diamantate e getti d'acqua. Un approccio di economia circolare è necessario al fine di trovare un impiego idoneo a questo sottoprodotto. 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 [6]. Il fango del marmo è stato essiccato all'aria in laboratorio permettendone l'evaporazione dell'acqua, successivamente è stato frantumato e reso passante al setaccio 425 μm . La formazione dell'ossido di calcio (CaO), essenziale per lo sviluppo delle reazioni di breve e lungo termine, si ottiene tramite calcinazione del carbonato di calcio (CaCO₃). La polvere di marmo ottenuta è stata quindi calcinata in fornace ad una temperatura di 900 °C per tre ore, impostando una rampa di riscaldamento/raffreddamento di 10°C al minuto. La polvere di marmo calcinata (PMC) è stata rifrantumata e conservata in contenitori a tenuta stagna.

Tabella 1- Caratteristiche geotecniche della terra argillosa

Caratteristiche	Unità di misura	Valore
Frazione argillosa	(%)	58.4
Frazione limosa	(%)	39.5
Frazione sabbiosa	(%)	2.1
Massa specifica	(-)	2.69
Contenuto naturale d'acqua	(%)	19.7
Limite di Liquidità w_L	(%)	59.2
Limite di Liquidità w_p	(%)	29.5
Indice di Plasticità PI	(%)	29.7
Contenuto di solfati SO ₄	(%)	0.15
Contenuto di sostanza organica	(%)	0.50
pH a 25 °C	(-)	8.41

Il consumo iniziale di calce (CIC) rappresenta la quantità minima di legante da aggiungere al terreno per avviare lo scambio cationico e lo sviluppo di reazioni pozzolaniche. Questa quantità minima è definita precisamente come la percentuale di legante che corrisponde a un aumento del pH fino a 12.4. Il CIC è stato determinato seguendo una procedura standardizzata basata sugli studi di Eades e Grim [7]. La determinazione del limite di liquidità e di plasticità (w_L e w_p) delle miscele, effettuata entro un'ora dalla preparazione, è stata effettuata su campioni preparati con percentuali crescenti di polvere di marmo calcinata. La sperimentazione ha previsto la formulazione di tre miscele, la prima contenente il contenuto minimo di polvere di marmo ottenuto dal CIC, seguito da una miscela intermedia contenente 1,5 volte il CIC e infine una miscela con il contenuto massimo di legante pari al doppio del CIC. Le miscele dello studio preliminare sono state compattate dinamicamente applicando un'energia Proctor standard, secondo la norma EN 13286-2; successivamente, sugli stessi campioni al contenuto d'acqua risultante dalla compattazione è stato valutato l'Indice di Portanza Immediato (IPI), entro 90 minuti dalla miscelazione secondo la procedura standardizzata indicata in EN 13286-47.

3. RISULTATI

Il consumo iniziale di calce (CIC) è stato determinato secondo la metodologia di Eades e Grim, per una serie di campioni di argilla trattati con percentuali crescenti di polvere di marmo. Come evidenziato in Figura 1, il contenuto minimo di legante necessario per mantenere un pH di 12.4 è risultato essere pari al 2.5. Questo valore è stato scelto come punto di partenza per la formulazione delle miscele, rappresentando il contenuto minimo di legante necessario per avviare le reazioni di breve termine e stabilire l'ambiente alcalino necessario per lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche. I risultati delle prove dei limiti di Atterberg sono stati valutati entro un'ora dalla fase di miscelazione. La Figura 1 mostra anche l'evoluzione dei limiti di plasticità e liquidità oltre che dell'indice di plasticità (IP) all'aumentare del contenuto di polvere di marmo. L'argilla non trattata è caratterizzata da un limite di liquidità, w_L , del 60% e un indice di plasticità, IP, del 30%, il che porta a classificare, secondo la classica classificazione di Casagrande, la terra come ad alta plasticità. L'IP diminuisce significativamente e immediatamente con l'aggiunta del legante, fino a mantenersi costante a partire dal valore del CIC e la plasticità cambia da alta a bassa, secondo la classificazione di Casagrande. L'immediata diminuzione della plasticità è il risultato delle reazioni a breve termine che coinvolgono lo scambio cationico e l'aggregazione delle particelle argillose. L'osservazione dell'andamento dei limiti di Atterberg fornisce un altro possibile modo per definire il consumo iniziale di calce. In particolare, la modifica dell'indice di plasticità può essere valutata all'aumentare del dosaggio di legante, al fine di individuare il dosaggio minimo che porta a una condizione di stabilità, senza ulteriori riduzioni della plasticità per dosaggi superiori. Dai dati riportati in Figura 1, si può notare come i risultati basati sul test del pH di Eades e Grim sono ben confermati.

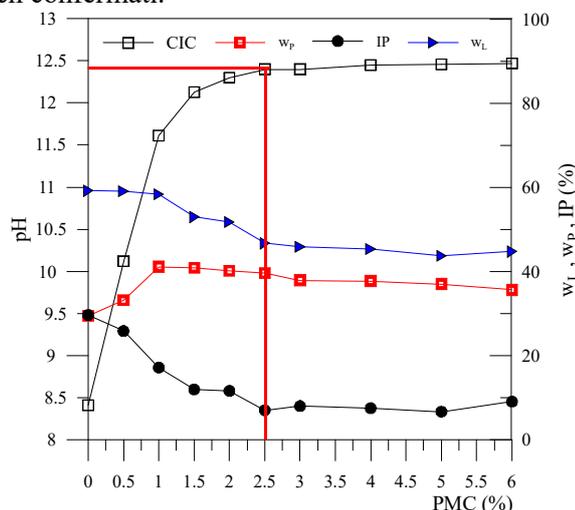


Fig. 1- Risultati test CIC e analisi dei limiti di Atterberg per miscele a contenuto crescente di polvere di marmo.

La Figura 2 mostra le curve derivate dalle prove per analizzare le proprietà di compattazione e la capacità portante offerte dalle miscele. Queste curve forniscono indicazioni preziose per stabilire i valori di riferimento durante la fase costruttiva, in particolare per quanto riguarda la densità secca massima (γ_{dopt}) e il contenuto d'acqua ottimale (w_{opt}). L'analisi delle curve di compattazione dimostra una tendenza costante alla riduzione di γ_{dmax} e un incremento dell'umidità ottima w_{opt} all'aumentare del dosaggio di polvere calcinata rispetto alla miscela non trattata, a parità di energia di compattazione. Il trattamento delle terre con leganti modifica, infatti, le caratteristiche di compattazione, con effetto immediato dopo l'aggiunta del legante al terreno. In Figura 2 sono rappresentati i risultati delle prove di portanza immediata. I valori di IPI per l'argilla non trattata sono inferiori a quelli dei campioni trattati, per tutti i dosaggi indagati di legante. In particolare, l'IPI per le miscele varia tra valori sono compresi tra il 7% e il 19%. Per tutte le miscele studiate, i valori più alti sono stati ottenuti per i valori più bassi del contenuto d'acqua indagato, suggerendo così che il contenuto d'acqua ottimale per questa caratteristica è inferiore a quello ricavato dallo studio di compattazione. I valori della densità massima e dell'indice di portanza immediata (IPI) corrispondenti al contenuto d'acqua ottimale sono riportati nella Tabella 2. Poiché le prove sono state effettuate subito dopo la compattazione, il contributo benefico del trattamento non è ancora evidente. Infatti, con il passare del tempo, ci si aspetta che le proprietà meccaniche delle miscele miglioreranno ulteriormente, e in modo significativo, grazie alla formazione dei prodotti pozzolanici.

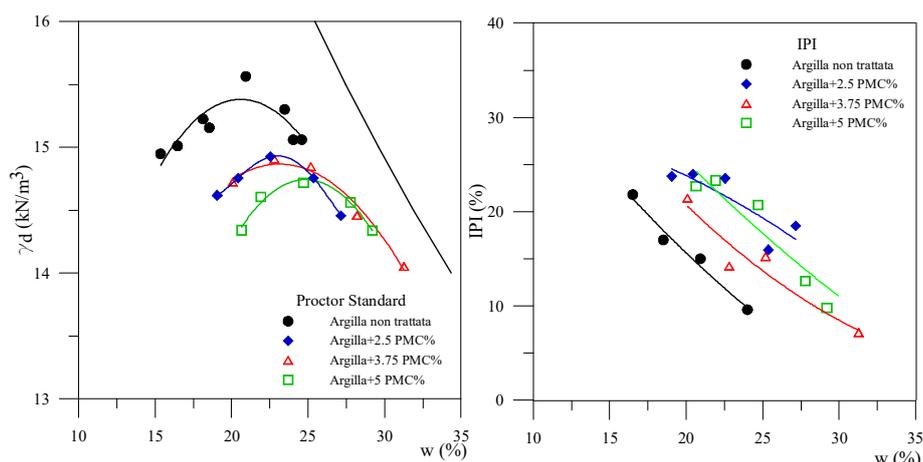


Fig. 2-Curve di compattazione Proctor Standard e di Indice di Portanza Immediato.

Tabella 2-Valori ottimali dei test di compattazione e IPI delle miscele.

Campioni	w _{OPT} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	IPI _{OPT} (%)
Argilla non trattata	21.0	15.6	15.0
Argilla + 2.5 PMC%	22.7	14.9	23.5
Argilla + 3.75 PMC%	23.0	14.8	15.2
Argilla + 5 PMC%	24.8	14.7	20.7

4. CONCLUSIONI

La sperimentazione portata avanti da questo studio ha analizzato la potenzialità del fango di segazione del marmo come alternativa alla calce viva per stabilizzare i terreni argillosi provenienti dagli scavi. L'attenzione di questa ricerca si estende alla sua applicabilità in vari contesti costruttivi, tra cui rilevati stradali, ferroviari e aeroportuali, nonché strati di sottofondo, fondazioni di pavimentazioni e movimenti di terra in generale. I risultati hanno mostrato che le miscele presentano un comportamento del tutto paragonabile a quello ottenuto con l'impiego di un legante convenzionale. L'analisi delle variazioni di plasticità conseguenti all'aggiunta di quantità crescenti di legante ha rivelato un'alterazione significativa dell'indice di plasticità, che si stabilizza costantemente a partire dal dosaggio minimo individuato dal CIC. Le valutazioni di laboratorio hanno inoltre evidenziato un miglioramento della capacità portante immediata. I risultati preliminari suggeriscono che i fanghi del marmo offrono un'alternativa sostenibile e valida alla calce viva industriale. Tuttavia, sono essenziali ulteriori ricerche per esaminare le implicazioni a lungo termine, compresi gli effetti sul comportamento idromeccanico, la resistenza al gelo e al disgelo, la risposta ai cicli di bagnatura/essiccazione, i cambiamenti microstrutturali [3] e le considerazioni ambientali come le emissioni di CO₂ [2].

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 materialLS – INSPIRED SOULS.

5. BIBLIOGRAFIA

- Airò Farulla C, Celauro B, Celauro C, Rosone M (2014) Field Test of Lime Treatment of Clayey Soils for Railways and Road Works. *Ingegneria Ferroviaria* 69:729–752.
- Celauro C, Corriere F, Guerrieri M, Lo Casto B (2015) Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transp Res D Transp Environ* 34:41–51.
- Rosone M, Farulla A, Ferrari A, et al (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.
- Okagbue CO, Onyebi TUS (1999) Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction. *Eng Geol* 53:371–380
- Siddique S, Jang JG, Gupta T (2021) Developing marble slurry as supplementary cementitious material through calcination: Strength and microstructure study. *Constr Build Mater* 293.
- Megna B, Badagliacco D, Sanfilippo C, Valenza A (2021) Physical and mechanical properties of sustainable hydraulic mortar based on marble slurry with waste glass. *Recycling* 6.
- Eades JL, Grim RE (1966) A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. *Highway Research Record* 139.