

DURABILITÀ DI TERRENI CEMENTATI E ALLEGGERITI: TECNICA SPERIMENTALE E RISULTATI.

Filomena Sabatino

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Università degli Studi di Napoli Federico II*
filomena.sabatino@unina.it

Marco Valerio Nicotera

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Università degli Studi di Napoli Federico II*
nicotera@unina.it

Enza Vitale

*Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse
Università degli Studi di Napoli Federico II*
enza.vitale@unina.it

Giacomo Russo

*Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse
Università degli Studi di Napoli Federico II*
gjarusso@unina.it

Olivier Cuisinier

*Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée
École Nationale Supérieure De Géologie
Université de Lorraine*
Olivier.Cuisinier@univ-lorraine.fr

Sommario

La nota descrive parte di una attività di ricerca finalizzata alla caratterizzazione fisico-chimica e allo studio del comportamento meccanico di terreni cementati e alleggeriti. In particolare, si presentano i risultati relativi ad una indagine sperimentale sulla durabilità di questi materiali. La sperimentazione ha comportato l'esecuzione di prove meccaniche su campioni preventivamente sottoposti a cicli di wetting-drying allo scopo di valutare l'evoluzione e l'eventuale decadimento della risposta meccanica.

1. Introduzione

Il riutilizzo di terreni provenienti da operazioni di scavo rappresenta una strategia progettuale di estremo interesse nell'ottica di minimizzare l'impatto ambientale delle opere e garantirne la sostenibilità. I terreni cementati e alleggeriti (LWCS), ottenuti aggiungendo schiuma a una miscela di terreno-cemento-acqua con proprietà autolivellanti e un ridotto peso dell'unità di volume, sono adoperati in differenti applicazioni geotecniche (i.e. rilevati, rinterri alle spalle di opere di sostegno, riempimento di cavità urbane e di scavi) (Tsuchida & Egashira, 2004; Watabe et al., 2011). Considerazioni sul comportamento meccanico e una visione dettagliata delle caratteristiche fisico-chimiche e della microstruttura dei LWCS

sono riportate in alcuni recenti studi (De Sarno et al., 2019; Vitale et al., 2020). Tuttavia, un aspetto ancora poco investigato in letteratura risulta essere quello della durabilità dei LWCS. In natura i terreni sono soggetti a periodici cicli di wetting-drying a causa dell'alternanza della stagione piovosa e di quella asciutta. L'azione dei cicli di wetting-drying va ad influenzare il comportamento meccanico dei terreni e le loro performances in diverse applicazioni geotecniche e geo-ambientali (Chen & Ng, 2013). Molti studi si sono concentrati sull'effetto dei cicli di wetting-drying sui terreni parzialmente saturi, evidenziando la presenza di deformazioni volumetriche irreversibili (Nowamooz & Masrouri, 2009). Altri ancora si sono occupati dell'effetto dei cicli di wetting-drying sui cementi cellulari alleggeriti (LCC), ponendo l'accento sulla riduzione di resistenza del materiale a causa di fenomeni di rigonfiamento e ritiro prodotti dall'alternanza ciclica delle due fasi. A ciò consegue un degrado della struttura del materiale in termini di fabric e bonding, con progressiva formazione di fessure sulla superficie del materiale (Neremitkornburi et al., 2014). La nota descrive parte di un lavoro di ricerca finalizzato alla caratterizzazione fisico-chimica e allo studio del comportamento meccanico di terreni cementati e alleggeriti. In particolare, si presentano i risultati relativi allo studio della durabilità del trattamento dei materiali oggetto di studio, attraverso l'applicazione di cicli di wetting-drying e lo svolgimento di prove meccaniche finalizzate a valutare l'evoluzione e l'eventuale decadimento della risposta meccanica. Lo studio propone la descrizione delle procedure sperimentali adottate e dei risultati ottenuti mediante prove di compressione uniassiali e triassiali che hanno permesso di valutare il degrado del comportamento meccanico dei LWCS.

2. Materiali

Per la sperimentazione come terreno da trattare è stato utilizzato il caolino *Speswhite*, un'argilla artificiale prodotta industrialmente (*Imerys Minerals Ltd*, UK), costituita da caolinite, con modeste quantità di quarzo e muscovite. Il legante idraulico impiegato è un cemento Portland, al calce a rapido indurimento *CEM III/A-LL 42.5 R* prodotto dalla *Buzzi Unicem*. L'agente schiumogeno è una miscela di tensioattivi anionici e non ionici *ISOCEM/S* prodotto dalla *Isoltech s.r.l.* ed è stato utilizzato ad una concentrazione del 2.5%; la schiuma impiegata, avente un peso dell'unità di volume (γ_{foam}) pari a 0.8 kN/m³, è stata prodotta con un apposito generatore di schiuma insufflando aria alla pressione di 3.2 bar nella soluzione acqua/tensioattivo.

2.1 Parametri di trattamento

Un campione di terreno cementato e alleggerito viene preparato in quattro fasi distinte. Nella prima fase viene ottenuto il fango, miscelando il terreno con acqua. Nella seconda fase viene preparata la boiaccia di cemento mescolando il cemento anidro con acqua. Nella terza fase la boiaccia viene aggiunta al fango e miscelata con esso fino ad ottenere un impasto omogeneo; va precisato che si opera secondo questa sequenza per ottenere una più soddisfacente idratazione del cemento che invece sarebbe più difficile ottenere aggiungendo direttamente cemento anidro al fango. La quarta fase prevede la preparazione della schiuma e la sua aggiunta alla miscela terreno-cemento-acqua precedentemente prodotta. La schiuma viene preparata insufflando aria in pressione in una soluzione di acqua e tensioattivo. L'aggiunta di una opportuna quantità di schiuma permette di regolare la porosità e di ottenere un materiale di elevata leggerezza. Il fenomeno di presa e indurimento del cemento garantisce che la porosità indotta dalla schiuma venga mantenuta a costituire una porosità aggiuntiva a quella propria della matrice solida.

I parametri di trattamento da regolare per la realizzazione di questi materiali sono: il quantitativo d'acqua da utilizzare per la preparazione del fango, che viene comunemente indicato tramite contenuto d'acqua gravimetrico (w_{slurry}), il cui valore nelle applicazioni più frequenti varia nell'intervallo compreso tra 1.5 e 3 volte il limite liquido w_L del terreno da utilizzare; il rapporto in peso cemento/terreno (c/s); il rapporto acqua/cemento (w_c/c) per la produzione della boiaccia cementizia; la frazione volumetrica di schiuma (n_f), pari al rapporto tra il volume di schiuma e il volume totale della miscela.

3. Metodi

L'indagine sperimentale descritta nel seguito ha come obiettivo lo studio della durabilità del trattamento per il terreno oggetto di studio. I risultati sperimentali riportati sono stati ottenuti presso il *Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée – LEMTA*, della Scuola Nazionale Superiore di Geologia dell'Università della Lorena (Nancy, Francia).

3.1 Preparazione dei provini

Per la preparazione del fango, una quantità nota di caolino *Speswhite* è stata miscelata con acqua distillata fino a raggiungere un contenuto d'acqua in peso pari al doppio del limite liquido (i.e. $2w_L$, pari al 140%). La boiaccia cementizia è stata preparata con un rapporto acqua/cemento (w_c/c) pari a 0.5. Sono state preparate miscele con due differenti quantitativi di schiuma ($n_f = 20\%$, 40%). Inoltre, è stata prodotta e testata anche una miscela ottenuta senza l'aggiunta di schiuma. I provini di materiale sono stati confezionati in apposite fustelle in PVC e sigillati in esse in modo da evitare perdite di acqua durante lo sviluppo delle reazioni pozzolaniche. La maturazione dei provini è durata sei mesi.

3.2 Procedure sperimentali

L'attività sperimentale è stata suddivisa in tre fasi distinte. Nella prima si è imposta una condizione iniziale a tutti i provini, attraverso una fase di drying. Nella seconda fase i provini sono stati sottoposti a cicli di wetting e drying. Infine, nella terza ed ultima fase sono state eseguite le prove meccaniche (i.e. prove di compressione uniassiale e prove triassiali).

L'apparecchiatura utilizzata per lo svolgimento della fase di drying è la camera climatica "*Weiss WKL 100/+10*", con capacità pari a 100 litri, intervallo di temperatura da $+10^\circ\text{C}$ a $+180^\circ\text{C}$ e di umidità relativa da 10% a 98%. Le prove di compressione uniassiale sono state svolte sull'apparecchiatura *2/M – 10 kN MTS ReNew Systems*. La velocità di schiacciamento è pari a 1.05 mm/min. Le prove triassiali sono state svolte nell'apparecchiatura *Stress-path Triaxial Cell Wille Geotechnik*, dotata di due sensori interni per la misura delle deformazioni locali, sia assiali sia radiali. La velocità di deformazione è stata fissata pari a 0.1 mm/min e le prove sono state svolte a tre diverse tensioni di confinamento pari a 50, 100 e 150 kPa.

Le prove di compressione uniassiale e quelle triassiali sono state eseguite su provini alle tre diverse condizioni di stress climatico descritte nel dettaglio del paragrafo successivo.

3.2.1 Cicli di wetting-drying

L'esecuzione della prima fase di drying avviene in camera climatica, all'interno della quale si hanno temperatura e umidità relativa controllate, rispettivamente pari a 20°C e 50%. La seconda fase vede l'applicazione di due tipologie di cicli di wetting-drying, che si differenziano per i valori di umidità relativa fissati pari al 50% e al 90%, rispettivamente per il primo e secondo tipo di ciclo di wetting-drying. In entrambi i casi, il numero di cicli è pari a tre e il valore della temperatura è di 20°C .

Nel dettaglio, i cicli di wetting-drying sono stati realizzati secondo due passaggi. Il primo riguarda la fase di wetting che viene eseguita per completa immersione in acqua dei provini, a una temperatura di 20°C per una durata pari a due giorni. Il secondo riguarda la fase di drying che viene fatta in camera climatica, per una durata di cinque giorni, andando a fissare i parametri di umidità relativa e temperatura, così come mostrato in Tab 1. La durata di un ciclo completo è di una settimana.

	Temperatura (°C)	UR (%)	Durata (giorni)	Modalità
Wetting	20	-	2	Immersione in acqua
Drying	20	50	5	Camera climatica
		90		

Tab 1. Parametri cicli di wetting-drying

3.2.2 Misure di suzione

Per ciascun campione sottoposto a prova al termine dei cicli di wetting-drying e prima dell'esecuzione delle prove meccaniche si è eseguita una misura di suzione totale. Le misure di suzione totale sono state effettuate attraverso lo strumento "WP4C Dewpoint PotentiaMeter", prodotto dalla Meter Group. Il WP4C utilizza la tecnica dello specchio raffreddato al punto di rugiada per misurare la suzione totale di un campione, andando a determinare l'umidità relativa dell'aria in equilibrio termodinamico con il campione di terreno contenuto nella camera di misura termoregolata e sigillata dello strumento. Come noto il valore dell'umidità relativa è direttamente legato a quello della suzione totale, mediante l'equazione di Kelvin.

$$\Psi = (RT / M) \ln(p/p_0)$$

Dove: Ψ è la suzione totale del terreno espresso in MPa, R è la costante universale dei gas (8.31 J/ mol K), T è la temperatura assoluta in gradi Kelvin, M è la massa molare dell'acqua, p è la pressione di vapore dell'aria, p_0 è la pressione di saturazione del vapore alla temperatura del campione.

4. Risultati

I risultati delle prove di compressione uniaassiale svolte su provini di caolino SW con un rapporto c/s = 40% e con due differenti percentuali di schiuma addizionata (nf=0% e 20%), sono riportati in Fig 1. In entrambi i grafici, le curve riportate si riferiscono a tre diverse condizioni di prova conseguenti a tre diverse storie di stress climatico considerate: la prima condizione si riferisce a campioni testati al 50% di UR dopo una sola fase di essiccamento (i.e. nello stato di riferimento iniziale per tutti i provini); la seconda condizione si riferisce anche essa a campioni testati al 50% di UR ma dopo tre cicli completi di wetting-drying; la terza condizione prevede invece un valore di UR pari al 90% al termine di tre cicli completi di wetting-drying.

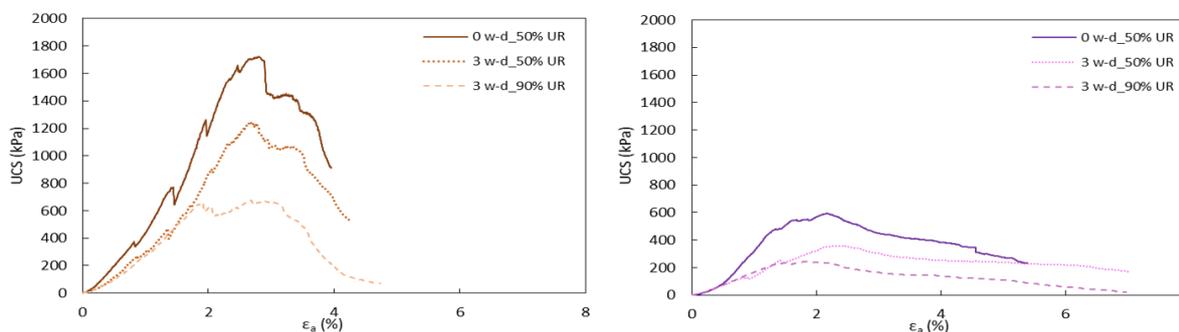


Fig 1. Prove di compressione uniaassiale. A sinistra, caolino SW c/s 40% nf 0%.

A destra, caolino SW c/s 40% nf 20%.

È possibile notare una riduzione della resistenza a compressione non confinata e della rigidità nel passaggio dal caolino SW cementato a sinistra, a quello cementato e alleggerito a destra. Questo comportamento è dovuto all'aggiunta di schiuma nel sistema terreno-cemento-acqua. In particolare, è interessante notare l'effetto degli stress climatici su entrambe le miscele testate. Infatti, nel passaggio

dalla condizione iniziale di drying a quelle con tre cicli wetting-drying, si nota una progressiva riduzione della resistenza a compressione non confinata e della rigidezza, tanto più evidente quanto maggiore è il valore del parametro umidità relativa fissato nelle due tipologie di cicli wetting-drying.

In seguito alle misure di suzione effettuate sui provini sottoposti a prove di compressione uniassiale, è possibile rappresentare i valori di resistenza a compressione uniassiale in funzione dei valori di suzione. Inoltre, quest'ultimi sono riportati in funzione del contenuto d'acqua gravimetrico misurato per ciascun provino di miscela testata. In Fig 2 sono illustrati, rispettivamente a sinistra e a destra, i due grafici appena citati.

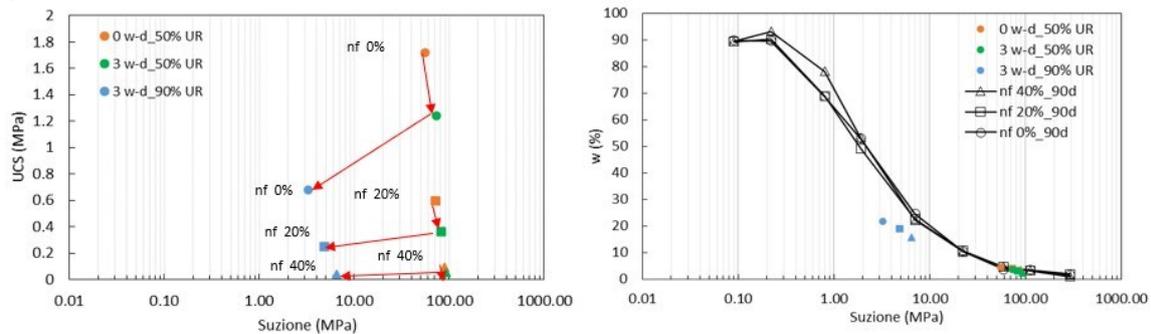


Fig 2. Misure di suzione. A sinistra, in relazione alla resistenza a compressione non confinata. A destra, in relazione al contenuto d'acqua gravimetrico.

Se si considera il grafico di sinistra, confrontando la condizione di solo drying (i.e. indicatori di colore arancione) e quella con tre cicli di wetting-drying (i.e. indicatori di colore verde) a parità di umidità relativa, si nota una riduzione di resistenza a compressione non confinata. Inoltre, facendo riferimento al grafico di destra, si vede come tra le due diverse condizioni poste in esame i valori di suzione misurati sulle sei miscele siano pressoché simili tra di loro. Di conseguenza, è possibile ascrivere la diminuzione di resistenza osservata all'effetto del numero di cicli di wetting-drying applicati. Al contrario, se si confrontano le due condizioni con tre cicli wetting-drying a due differenti valori di umidità relativa pari al 50% (i.e. indicatori di colore verde) e al 90% (i.e. indicatori di azzurro), la riduzione di resistenza osservata si ritiene dovuta a una diminuzione del valore di suzione misurato sulle sei miscele testate. Questo effetto è confermato dal grafico di destra, in cui si nota come i valori di suzione per la condizione con tre cicli wetting-drying al 90% di umidità relativa siano inferiori rispetto alla condizione a parità di numero di cicli, ma a un valore di umidità relativa pari al 50%.

I risultati delle prove triassiali sono riportati in Fig 3, in termini di involucri di rottura nel piano $\sigma_1 - \sigma_3$. Nel grafico vengono confrontate le due miscele di caolino SW con le due differenti percentuali di porosità artificiale addizionata (i.e. nf 20% e 40%), entrambe sottoposte alle due condizioni di cicli di wetting-drying. La diminuzione di resistenza osservata per le due miscele al passaggio tra le due condizioni di stress climatico, rispettivamente con il 50% e il 90% di umidità relativa, è dovuta all'effetto della suzione. In Tab 2., si riportano i valori di suzione in funzione del valore di umidità relativa, quelli di coesione di angolo di attrito. È possibile collegare la riduzione di resistenza dei materiali trattati sottoposti ai cicli di wetting-drying alla diminuzione della suzione, così come visibile in tabella.

Mix	UR (%)	Suzione (MPa)	c (kPa)	Φ (°)
Nf 20%	50	82.9	169.3	39.6
	90	4.9	116.0	43.4
Nf 40%	50	92.9	81.3	34.9
	90	6.5	131.0	15

Tab 2. Valori di suzione, coesione e angolo di attrito.

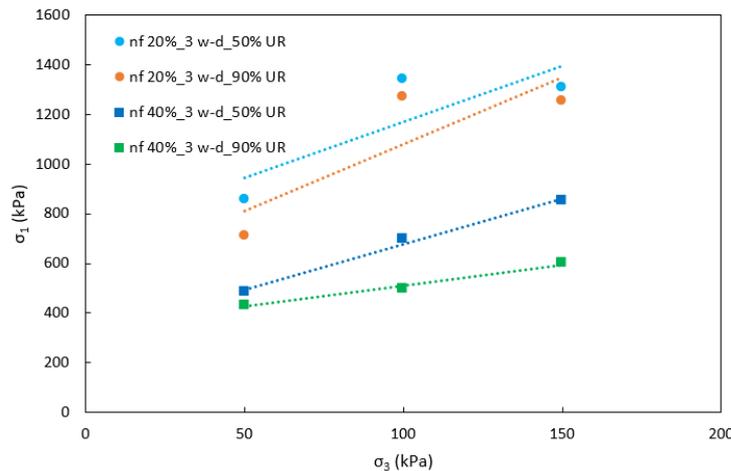


Fig 3. Involuppi di rottura.

5. Osservazioni conclusive

La durabilità delle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni cementati e alleggeriti è stata studiata attraverso prove meccaniche su provini sottoposti a cicli di wetting-drying. In particolare, nella nota sono riportati i risultati delle prove di compressione uniassiale e delle prove triassiali eseguite su provini di caolino Speswhite cementato e alleggerito, dopo essere state sottoposti in camera climatica a cicli di wetting-drying di differente ampiezza. I fattori che incidono sull'evoluzione della risposta meccanica dei materiali sono principalmente il numero di cicli wetting-drying e lo stato di parziale saturazione. L'indagine sperimentale, tuttora in fase di esecuzione, è pertanto mirata ad approfondire il ruolo della suzione sul comportamento meccanico del materiale. La stessa tipologia di prove consentirà di estendere lo studio della durabilità del trattamento anche di un terreno di origine naturale.

Bibliografia

- Chen R., Ng C.W.W. (2013). Impact of wetting–drying cycles on hydro-mechanical behavior of an unsaturated compacted clay. *Applied Clay Science* 86, 38–46.
- De Sarno D., Vitale E., Deneele D., Nicotera M.V., Papa R., Russo G., Urciuoli G. (2019). Effects of cement and foam addition on chemo-mechanical behaviour of lightweight cemented soil (LWCS). *E3S Web of Conferences* 92 (11006)
- Neramitkornburi A., Horpibulsuk S., Shen S. L., Chinkulkijniwat A., Arulrajah A., Disfani M. M. (2014). Durability against wetting–drying cycles of sustainable Lightweight Cellular Cemented construction material comprising clay and fly ash wastes. *Construction and Building Materials* 77, 41–49.
- Nowamooz H., Masrouri F. (2009). Shrinkage/swelling of compacted clayey loose and dense soils. *C. R. Mécanique* 337, 781–790.
- Tsuchida T., Egashira K., (2004). *The Lightweight Treated Soil Method: New Geomaterials in Coastal Areas*. Taylor & Francis Routledge.
- Vitale E., Deneele D., Russo G., De Sarno D., Nicotera M.V., Papa R., Urciuoli G. (2020). “Chemo-mechanical behaviour of lightweight cemented soils”, *Acta Geotechnica* 15, 933–945.
- Watabe Y., Saegusa H., Shinsha H., Tsuchida T. (2011). Ten year follow-up study of air-foam treated lightweight soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 164, 189-200.