

MISURE DI RESISTIVITÀ ELETTRICA SU TERRENI CEMENTATI E ALLEGGERITI: TECNICA SPERIMENTALE E PRIMI RISULTATI.

Filomena Sabatino

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Università degli Studi di Napoli Federico II

filomena.sabatino@unina.it

Rosanna Salone

Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

Università degli Studi di Napoli Federico II

rosanna.salone@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

Rosa Di Maio

Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

Università degli Studi di Napoli Federico II

rodimaio@unina.it

Marco Valerio Nicotera

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Università degli Studi di Napoli Federico II

nicotera@unina.it

Raffaele Papa

Terre Leggere s.r.l.

rafpapa@unina.it

Giacomo Russo

Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

Università degli Studi di Napoli Federico II

gjarusso@unina.it

Sommario

La nota descrive parte di un lavoro di ricerca finalizzato alla caratterizzazione fisico-chimica ed allo studio del comportamento meccanico di terreni cementati e alleggeriti (*Lightweight Cemented Soils*). Si presentano alcuni risultati preliminari di una sperimentazione di laboratorio che ha lo scopo di sviluppare alcune tecniche di indagine non distruttive da applicare per il controllo delle proprietà fisiche e meccaniche di questi materiali. In particolare, si discutono misure di resistività elettrica, appartenenti alla classe dei metodi geoelettrici, descrivendo la tecnica sperimentale con la quale esse vengono eseguite e riportando i primi risultati, ottenuti su miscele di terreno e cemento all'aumentare della percentuale di schiuma addizionata.

1. Introduzione

La gestione di grandi quantitativi di terreni provenienti da operazioni di scavo nell'ambito della realizzazione di opere di ingegneria civile può dare luogo a significative problematiche di natura tecnica ed ambientale soprattutto nel caso in cui tali materiali presentino proprietà fisiche e meccaniche tali da renderli inadatti al loro riutilizzo come materiali da costruzione (De Sarno, 2019). Le tecnologie sviluppate per la produzione di terreni cementati e alleggeriti (*Lightweight Cemented Soils*) costituiscono una possibile risposta alla necessità di perseguire il riutilizzo di terreni e rocce da scavo. Tali tecnologie in generale consistono nell'aggiungere una opportuna quantità di schiuma (una dispersione di bolle d'aria in una soluzione acquosa di tensioattivo), ad una miscela di terreno-cemento-acqua (Tsuchida & Egashira, 2004); per dettagli sulle caratteristiche chimico-fisiche e microstrutturali e per taluni aspetti del comportamento meccanico di alcuni LWCS si rimanda ad alcuni recenti articoli (De Sarno et al., 2019; Vitale et al., 2019). La nota descrive parte di un lavoro di ricerca finalizzato alla caratterizzazione fisico-chimica ed allo studio del comportamento meccanico di terreni cementati e alleggeriti. Si presentano alcuni risultati preliminari di una sperimentazione di laboratorio che ha lo scopo di sviluppare alcune tecniche di indagine non distruttive (prove ultrasoniche, misure di resistività elettrica, microtomografia a raggi X) da applicare per il controllo delle proprietà fisiche e meccaniche di questi materiali. In particolare, la nota è dedicata a descrivere misure di resistività elettrica (Hassain et al., 2019). Lo studio propone la descrizione della tecnica sperimentale e dei primi risultati riguardanti misure di resistività elettrica, eseguite su campioni al variare della percentuale di schiuma addizionata alla miscela terreno-cemento-acqua.

2. Materiali

Nell'indagine sperimentale sono stati utilizzati due terreni. Il primo è il caolino *Speswhite*, una argilla artificiale prodotta industrialmente (*Imerys Minerals Ltd*, UK), costituita da caolinite, con modeste quantità di quarzo e muscovite. Il secondo, denominato argilla di *Caposele*, è un'argilla con limo proveniente dal cantiere di uno scavo in galleria nel comune di Caposele (AV), ed è costituita dal punto di vista mineralogico da calcite, quarzo, montmorillonite e illite. Il legante idraulico impiegato è un cemento Portland, al calcare a rapido indurimento *CEM II/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.

3. Preparazione dei campioni e parametri di trattamento

La preparazione di un campione di terreno cementato e alleggerito in genere avviene in quattro fasi distinte. Nella prima fase il terreno viene miscelato con acqua allo scopo di ottenere il fango. 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 le bolle d'aria vengano fissate nella struttura del materiale e risultino poi come ulteriori vuoti.

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.

3.1 Sperimentazione

La sperimentazione descritta nel seguito è stata finalizzata alla misura della resistività elettrica dei terreni trattati oggetto di studio. I risultati sperimentali riportati sono stati ottenuti presso il laboratorio di Geofisica Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse dell'Università di Napoli Federico II.

3.2 Procedure sperimentali

Per preparare il fango, quantità note dei due terreni studiati (i.e. il caolino *Speswhite* e l'argilla di *Caposele*) essiccati in stufa e polverizzati sono stati miscelati con acqua distillata fino a raggiungere un contenuto d'acqua in peso pari al doppio del limite liquido (i.e. $2w_L$, valori pari rispettivamente, al 140% per il caolino e al 122% per l'argilla di Caposele). La boiaccia cementizia è stata preparata con un rapporto acqua/cemento (w_c/c) pari a 0.5. Per entrambe le tipologie di terreno 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.

Le misure di resistività elettrica sono state effettuate mediante un georesistivimetro *Syscal Pro* della *IRIS Instruments*, disponibile presso il laboratorio di Geofisica Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse dell'Università di Napoli Federico II. L'apparecchiatura consiste in un sistema multielettrodo *all-in-one* per misure di resistività elettrica e di polarizzazione indotta. Il *Syscal Pro* è composto di un ricevitore a 10 canali e di un trasmettitore interno da 250 W. Per realizzare la misura della resistività elettrica il georesistivimetro è alimentato con una batteria esterna. L'apparato sperimentale è poi completato dal campione sigillato nella fustella e da una bilancia per monitorarne il peso, così come riportato in Fig.1.

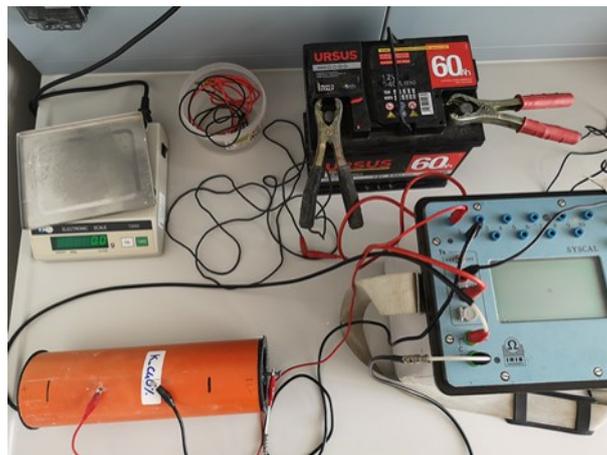


Fig. 1 Strumentazione per l'esecuzione della misura di resistività elettrica.

Nel campione di terreno sono infissi quattro elettrodi disposti secondo la configurazione o array di *Wenner*, che prevede il posizionamento degli elettrodi in linea ed equidistanti tra di loro. I due elettrodi esterni C_1-C_2 sono elettrodi di corrente, quelli interni P_1-P_2 sono elettrodi di potenziale, così come rappresentato nello schema di Fig. 2.

La strumentazione per l'esecuzione della misura di resistività elettrica comprende due sezioni: la prima, energizzante, serve ad immettere corrente attraverso gli elettrodi C_1-C_2 , la seconda, ricevente, serve alla misura della differenza di potenziale esistente agli elettrodi di tensione P_1-P_2 . L'intensità di corrente I circolante nel sistema energizzante è, per la legge di Ohm, dipendente dalla tensione V fornita dal georesistivimetro (fissata

pari a 50V) e dalla resistenza R_t del circuito. L'amperometro è connesso in serie al circuito energizzante e misura l'intensità di corrente circolante nel sistema. I cavi, invece, sono di tipo unipolare flessibile con una bassa resistenza ohmica, un alto isolamento ed elevata resistenza a trazione.

Gli elettrodi di corrente adoperati sono chiodi metallici di 10 cm di lunghezza, inseriti nel campione penetrando i tappi a chiusura ermetica presenti alle basi del campione. Gli elettrodi di tensione sono invece chiodi metallici di lunghezza pari a 5 cm. La lunghezza del campione è di 20 cm.

La misura della differenza di potenziale agli elettrodi di tensione dipende dall'intensità di corrente immessa, dalle caratteristiche elettriche del mezzo e dalla distanza che intercorre tra gli elettrodi. Inoltre, assume grande importanza la resistenza di contatto tra gli elettrodi di potenziale e il terreno. Una resistenza di contatto elevata comporta un valore di differenza di potenziale misurato inferiore rispetto al valore reale.

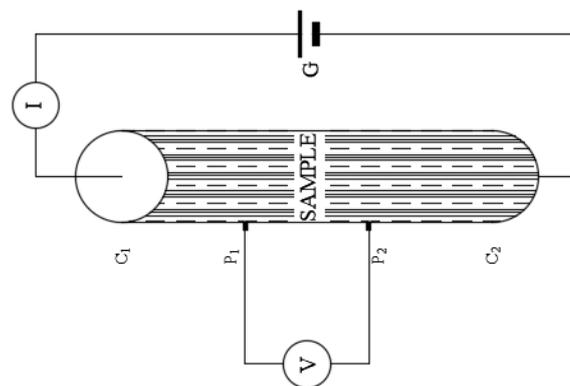


Fig. 2 Schema di funzionamento per la misura di resistività.

Per le due tipologie di terreno trattato, sono stati preparati tre campioni di terreno, ognuno a una differente percentuale di schiuma addizionata ($nf=0\%$, 20% e 40%). Per ogni campione sono state effettuate tre misure di resistività nell'arco della giornata, su un arco temporale di quattro mesi. Le misure di resistività elettrica sono state acquisite a partire dalle 24 ore successive alla preparazione del campione.

4. Risultati

Gli andamenti delle misure di resistività elettrica, al variare del tempo di acquisizione e in funzione delle miscele testate, sono riportati nei diagrammi di Fig. 3 e Fig.4 rispettivamente per il caolino *Speswhite* e l'argilla di *Caposele*.

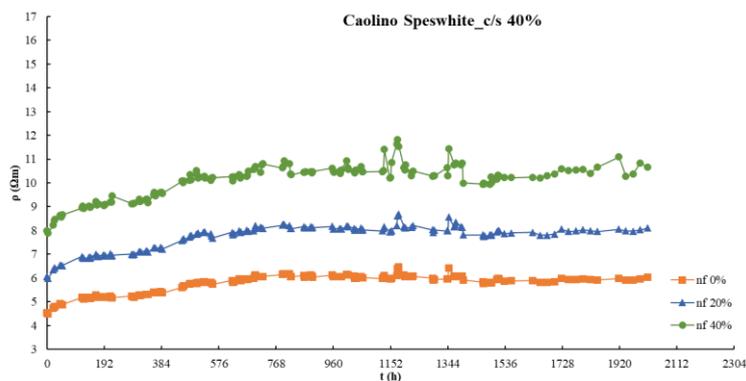


Fig. 3 Caolino Speswhite: misure di resistività elettrica nel tempo per le tre miscele sottoposte a prova.

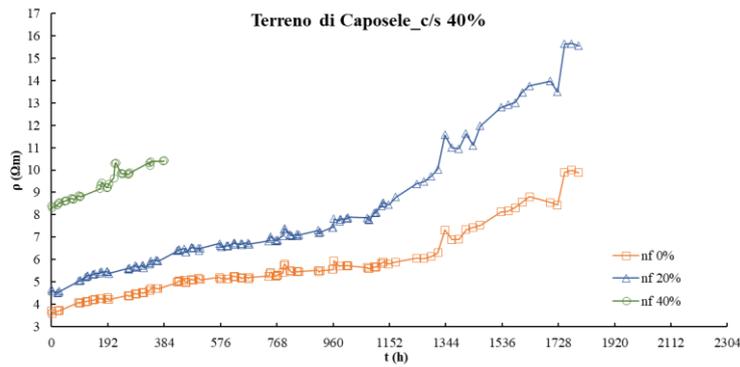


Fig. 4 Argilla di Caposele: misure di resistività elettrica nel tempo per le tre miscele sottoposte a prova.

Si nota come, per entrambe le tipologie di terreno studiato, i valori di resistività aumentano nel passaggio da un terreno cementato (nf 0%) a un terreno cementato e alleggerito (nf 20%, 40%), in modo tanto più evidente quanto maggiore è la percentuale di schiuma addizionata al sistema. Questo comportamento è giustificato dall'aumento di porosità prodotto da quantità crescenti di schiuma nel sistema terreno-acqua-cemento. all'aumentare della porosità, diminuisce la densità del campione e aumenta il valore di resistività elettrica misurato.

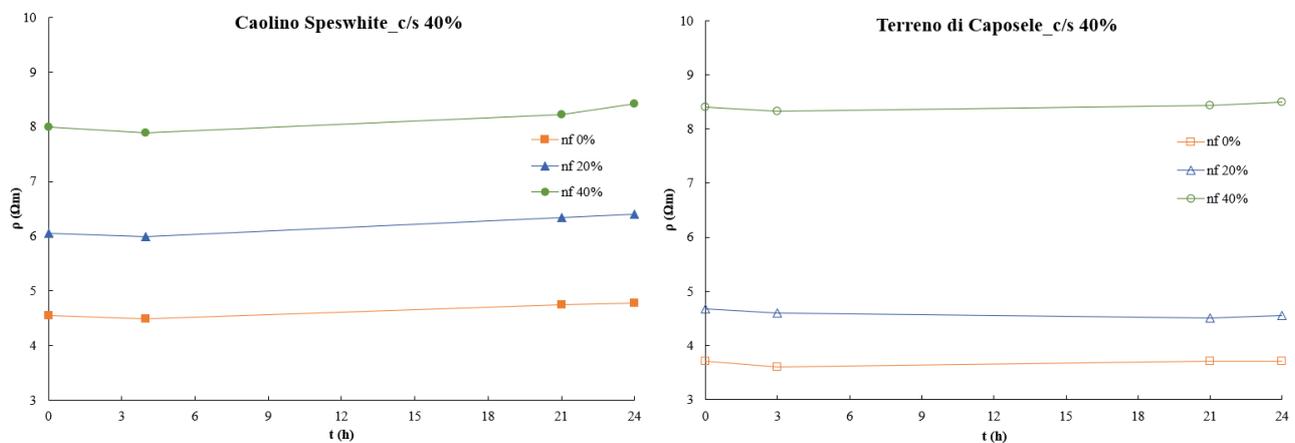


Fig. 5 Misure di resistività elettrica nelle prime 24 h. A sinistra, Caolino Speswhite; a destra, argilla di Caposele.

In Fig. 5, sono rappresentati gli andamenti delle misure di resistività elettrica nelle prime 24 ore. I diagrammi di sinistra e di destra fanno riferimento, rispettivamente, al caolino *Speswhite* e all'argilla di *Caposele* nelle diverse miscele testate. Come risulta dai grafici sopra riportati, le curve di resistività elettrica presentano un punto di minimo nelle prime quattro ore di acquisizione per aumentare gradualmente al trascorrere del tempo. È possibile spiegare questo comportamento alla luce del processo di formazione dei prodotti di idratazione del cemento presente nelle miscele analizzate. La diminuzione nei valori della resistività, nelle prime quattro ore, è verosimilmente imputabile all'immediata dissoluzione degli ioni solubili dalle particelle di cemento. La mobilitazione degli ioni favorisce la conducibilità elettrica, reciproco della resistività elettrica. Subito dopo questo periodo iniziale e fino alle 24 ore, si osserva una lieve risalita nei valori di resistività a causa della formazione delle prime fasi idrate, prodotto delle reazioni pozzolaniche. La progressiva idratazione del cemento riduce infatti la percentuale di acqua libera con una riduzione della mobilità ionica del sistema. Il comportamento descritto risulta essere in accordo con quello riportato in altri lavori di letteratura (Wei et al., 2012).

Dalle 24 ore in poi, come riportato nelle Fig. 3 e 4, si osserva l'aumento dei valori di resistività a seguito della progressiva formazione dei prodotti di idratazione. Per il caolino *Speswhite* (Fig. 3) i valori di resistività delle tre miscele si stabilizzano intorno a un valore costante all'aumentare del tempo di maturazione. Per l'argilla di *Caposele*, (Fig. 4), in corrispondenza di un tempo di maturazione di circa 1300 ore, si osserva un cambio di pendenza delle curve di resistività che indica un trend di più rapido aumento della resistività elettrica nel tempo. Per l'intervallo temporale di osservazione (quattro mesi), le curve non raggiungono un valore di resistività costante come osservato per il caolino *Speswhite*. L'andamento descritto è osservato per i due provini trattati con cemento in assenza di tensioattivo e con il 20% di schiuma. Per la miscela con il 40% di schiuma, la curva di resistività elettrica è riportata fino al tempo di maturazione pari a 381 ore, a partire dal quale si sono registrati problemi di acquisizione della misura.

5. Osservazioni conclusive

L'obiettivo di questo studio è quello di verificare l'applicabilità di una tecnica di indagine non distruttiva per la caratterizzazione fisico-chimica e meccanica di terreni cementati e alleggeriti. Nella nota sono riportati i primi risultati di misure di resistività elettrica di due diversi terreni, preparati con diverse percentuali di schiuma, in modo da indagare l'influenza delle caratteristiche mineralogiche dei terreni di partenza e dei parametri di trattamento sui valori di resistività elettrica misurati e sulla loro evoluzione nel tempo. I primi risultati evidenziano le potenzialità della tecnica sperimentale nel descrivere l'evoluzione chimico-fisica indotta dal legante nel terreno trattato, e dunque l'efficacia del trattamento. La resistività elettrica potrebbe rappresentare uno dei parametri rilevanti nelle applicazioni di sito nei controlli di qualità effettuati sui LWCS, al fine di verificare in maniera speditiva ed affidabile lo sviluppo dei prodotti di cementazione, e la conseguente idoneità del materiale trattato.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il dott. Mauro La Manna, gli studenti Leonardo De Luca, Flavia Ferriero e Felicia Donnino del Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse dell'Università degli Studi di Napoli Federico II per l'assistenza tecnica nello svolgimento delle misure di resistività elettrica.

Bibliografia

- De Sarno D. (2019). Microstructure and mechanical behaviour of cemented soils lightened by foam. Ph.D. Thesis, University of Napoli Federico II
- 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).
- Hossain S., Kibria G., Khan S., (2019). Site investigation using resistivity imaging. Taylor & Francis Group, London, UK.
- 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.
- Wei X., Lianzhen X., Zongjin L., (2012). "Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement", *Construction and Building Materials* 31, 341–346.