

## **MIGLIORAMENTO DELLA PREFORMANCE DEL DEEP SOIL MIXING CON ADDITIVI CHIMICI**

Salvatore Erminio

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

[e.salvatore@unicas.it](mailto:e.salvatore@unicas.it)

Arciero Michela

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

[michela.arciero@studentmail.unicas.it](mailto:michela.arciero@studentmail.unicas.it)

Modoni Giuseppe

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

[modoni@unicas.it](mailto:modoni@unicas.it)

Spagnoli Giovanni

*MBCC Group - Germany*

[giovanni.spagnoli@mbcc-group.com](mailto:giovanni.spagnoli@mbcc-group.com)

### **Sommario**

La plasticità dei terreni argillosi rende il loro consolidamento mediante Deep Soil Mixing (DSM) poco efficiente per via della loro capacità di congestionare gli utensili di taglio dei macchinari e formare zolle di materiale non trattato che influenzano negativamente le proprietà meccaniche delle colonne cementate.

Questo studio analizza gli effetti di additivi polidispersanti sulla lavorabilità e resistenza delle argille trattate con cemento per mezzo di un programma sperimentale che combina prove di consistenza, viscosità e di resistenza eseguite su campioni di caolino o bentonite addizionati con differenti proporzioni di cemento, acqua ed additivo. I risultati ottenuti hanno permesso di chiarire i fattori che disciplinano la modifica fisico-chimica del terreno e identificare il legame tra la composizione e le caratteristiche di viscosità e resistenza del materiale utilizzando come parametro interpretativo un indice di consistenza modificato per la presenza dell'additivo.

### **1. Introduzione**

Il consolidamento delle terre mediante DSM (DIN EN 14679 2005) viene eseguito introducendo nel sottosuolo utensili da taglio rotanti che disgregano la matrice originaria del terreno e lo miscelano con un legante cementizio per formare delle colonne di terreno cementato.

Sebbene la resistenza delle colonne sia influenzata da molteplici fattori tecnologici (tecnica di miscelazione, tipologia di cemento, rapporto acqua/cemento della miscela), essa principalmente dipende dalle caratteristiche del terreno originario (Kitazume and Terashi 2013). Tipicamente i terreni granulari tendono a sviluppare la resistenza più alta mentre i terreni plastici valori significativamente più bassi. Kitazume and Terashi (2013) riportano valori di resistenza a compressione non confinata (UCS) misurati nelle argille circa la metà di quelli osservati nelle sabbie, nonostante contenuti di cemento quattro volte più elevati. La causa di questo effetto indesiderato è stata identificata nella scarsa omogeneità di trattamento che si ottiene nei terreni plastici (e.g. Egorova et al. 2017). Infatti, la forte attitudine di questi materiali ad intasare gli utensili da taglio produce la formazione di zolle di materiale non trattato che riducono la resistenza della colonna cementata a valori confrontabili con quella del materiale naturale. Questo effetto solitamente viene mitigato praticamente adottando velocità di risalita delle aste molto ridotte ed elevate energie di miscelazione, oppure in alternativa migliorando la lavorabilità del terreno naturale per mezzo di additivi chimici (Freitag et al., 1961).

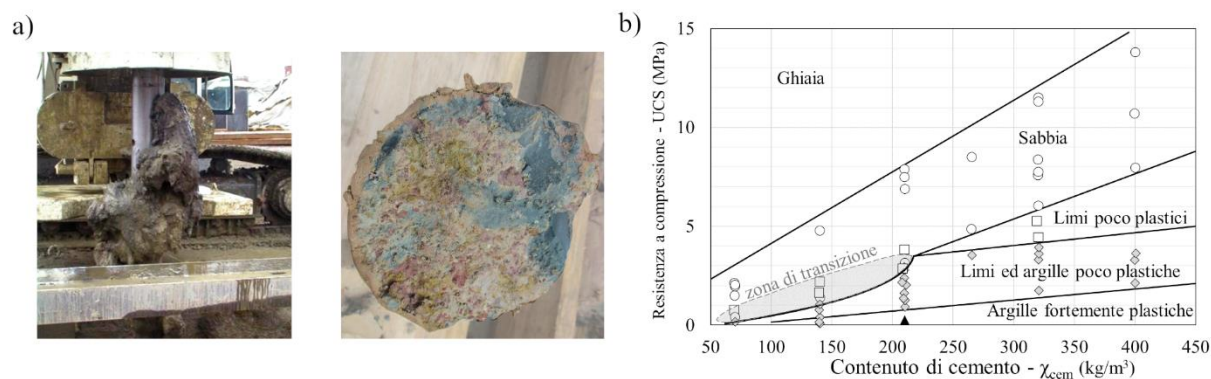


Figura 1. a) Congestione degli utensili da taglio; b) grumi d'argilla nella matrice cementata di un campione estratto da una colonna DSM; c) valori tipici della resistenza uniassiale dei terreni consolidati con DSM (modificata da Szymkiewicz et al., 2015).

Il presente studio analizza l'efficacia di un additivo chimico polidispersante nel migliorare la lavorabilità delle argille mediante una vasta campagna sperimentale eseguita su due terreni di riferimento a differente plasticità (caolino e bentonite). Prove di consistenza, di viscosità e di resistenza sono state eseguite su provini confezionati con diverse proporzioni di additivo, acqua e cemento al fine di ricercare i meccanismi di modificazione del terreno e le dipendenze tra le variabili.

## 1 La sperimentazione

### 1.1 I materiali

L'additivo chimico adottato nel presente studio è un dispersante polimerico per argille (ACP) composto da una soluzione acquosa di policondensato solfonato combinato con un acido poliacrilico. Alla scala microscopica l'introduzione di questo tipo di composti nelle argille produce due differenti effetti repulsivi tra le particelle: il primo di tipo elettrochimico dovuto all'incremento della densità di carica superficiale delle particelle ed il secondo di tipo fisico causato dalla formazione di catene polimeriche che si interpongono tra le particelle allontanandole (Wermuth, 2011).

Allo scopo di investigare gli effetti dell'ACP su terreni con differente plasticità, il programma sperimentale è stato realizzato su due argille estratte per applicazioni industriali: un caolino speswhite extrafine proveniente dall'Inghilterra sudoccidentale ed una bentonite sodica estratta dall'isola greca di Milos. Le proprietà chimico-fisico dei due materiali sono raccolte in Tabella 1.

Il cemento adottato è di tipo pozzolanico EN 197-1 CEM IV/B (P) 32.5 R.

Tabella 1. Composizione chimica delle due argille studiate (limite plastico ( $w_p$ ) e limite liquido ( $w_L$ ) determinati con lo standard ASTM D4318).

Terreno	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	$w_p$ (%)	$w_L$ (%)	Indice di attività
Bentonite	56.0	18.0	8.0	3.0	2.5	5.3	1.5	55	352	2.97
Caolino	47.0	38.0	-	-	-	-	-	28	60	0.32

### 1.2 Effetti sulla consistenza

L'effetto fisico più evidente dell'ACP è la modificazione della consistenza del terreno. In Figura 3 vengono mostrati campioni di caolino (a) e bentonite (b) preparati secondo la procedura Harvard (ASTM International, 1970) con un contenuto d'acqua corrispondente ad un indice di consistenza  $I_c=50\%$  ed immersi in un primo caso in acqua distillata, nel secondo in una soluzione acquosa di ACP confezionata per ottenere una concentrazione di prodotto  $\chi=16\%$  (definita come rapporto in peso tra prodotto e terreno asciutto). Dopo 24 ore, l'acqua libera è stata rimossa rivelando una struttura flocculata per il caolino immerso in acqua ed una consistenza liquida per il caolino immerso nella soluzione di ACP. La bentonite immersa in acqua ha presentato un rigonfiamento significativo dovuto all'assorbimento della quasi totalità fluido, mentre quella immersa nella soluzione di ACP ha mostrato un rigonfiamento molto più contenuto.

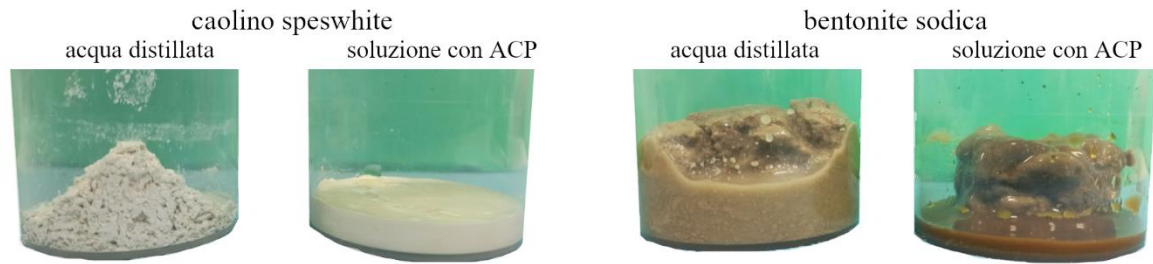


Figura 3 Confronto tra campioni di caolino (a) e bentonite (b) immersi in acqua distillata o in soluzione acquosa di ACP.

Questi effetti sono stati quantificati in termini di variazione dei limiti di consistenza (ASTM D4318) all'aumentare del quantitativo di prodotto. Nel presente studio si considera come contenuto d'acqua il rapporto tra il peso della fase liquida (acqua + ACP) ed il peso della fase solida (terreno). I risultati mostrati in Figura 4.a1 per il caolino e Figura 4.b1 per la bentonite mostrano che l'additivo non induce modificazioni sostanziali sul limite plastico ( $w_p$ ) mentre genera una riduzione notevole del limite liquido ( $w_L$ ). Sulla base dei risultati raccolti, per quantificare la consistenza del materiale in funzione della modificazione di  $w_L$  e  $w_p$  indotta dal prodotto è stata introdotta una nuova variabile, definita in Equazione 1, dove:  $w_L^*$  e  $w_p^*$  sono i limiti di consistenza calcolati in funzione del contenuto di ACP (Figura 4.a1 e Figura 4.b1).

$$I_c^* = \frac{w_L^* - w}{w_L^* - w_p^*} \quad (1)$$

Le Figure 4.a2 e 4.b2 mostrano per i due materiali la relazione combinata tra contenuto d'acqua  $w$ , concentrazione di additivo  $\chi$  e consistenza  $I_c^*$ . Una data consistenza può essere quindi essere ottenuta modificando indifferentemente il contenuto d'acqua o di additivo nel terreno.

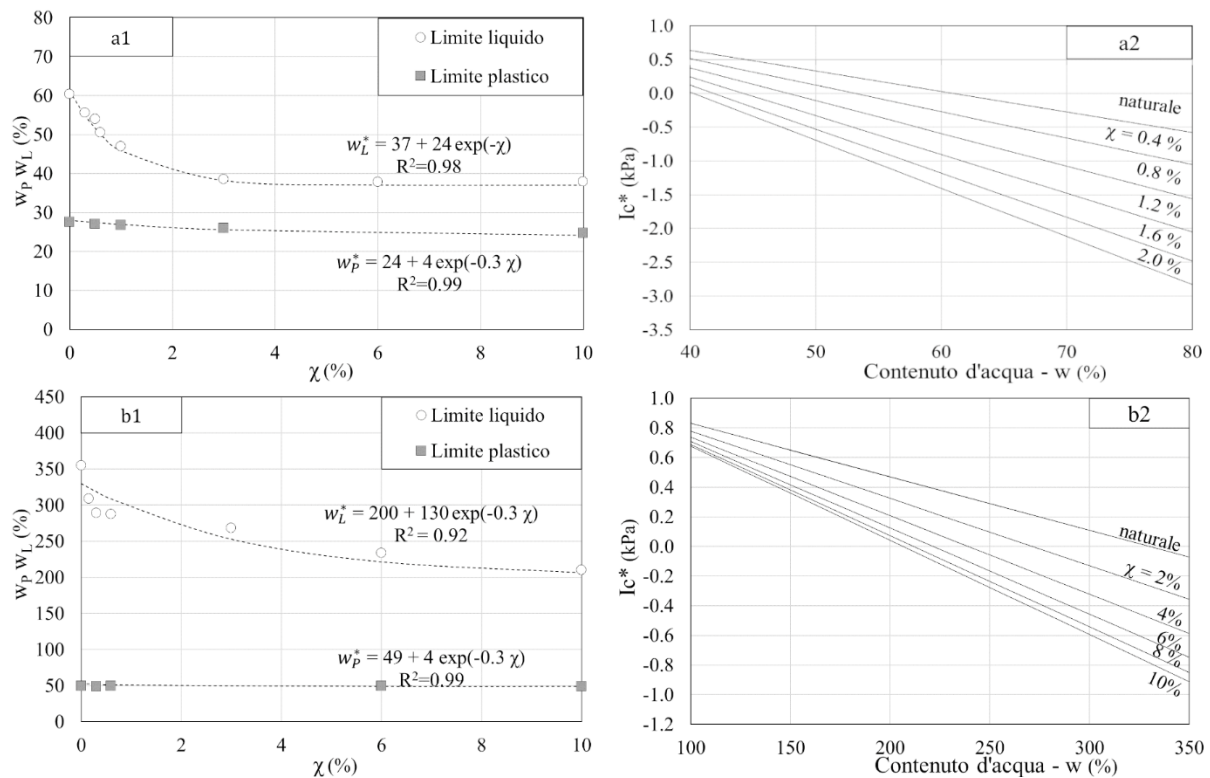


Figura 4 a1-b1) Modificazione dei limiti di consistenza in funzione della concentrazione di additivo, a2-b2) Indice di consistenza modificato  $I_c^*$  per differenti valori di contenuto d'acqua e percentuale di ACP. (a: caolino, b: bentonite).

### 1.3 Effetti sulla lavorabilità

Allo scopo di quantificare gli effetti del cambiamento di consistenza dovuto all'additivo sulla lavorabilità dei materiali, campioni di caolino e bentonite confezionati con differenti proporzioni di acqua ed ACP sono stati sottoposti a prove di viscosità mediante un viscosimetro HAAKE VT 500 equipaggiato con sensore SV DIN 53019 (Figura 5.a). Il principio della prova viscosimetrica, illustrato sinteticamente in Figura 5.b, consiste praticamente nell'introdurre il materiale da testare nell'intercapedine formata da un cilindro interno rotante ed un contenitore esterno e misurare la coppia necessaria per ruotare il cilindro con una prefissata velocità angolare. La prova viene ripetuta per diversi valori di velocità del rotore in modo da analizzare la relazione tra velocità di distorsione  $\dot{\gamma}$  e tensione tangenziale mobilizzata  $\tau$  (Figura 5.b). In Figura 5.c si riportano a titolo di esempio i risultati dei test condotti sulla bentonite per un contenuto d'acqua  $w=300\%$  e concentrazione di ACP crescente.

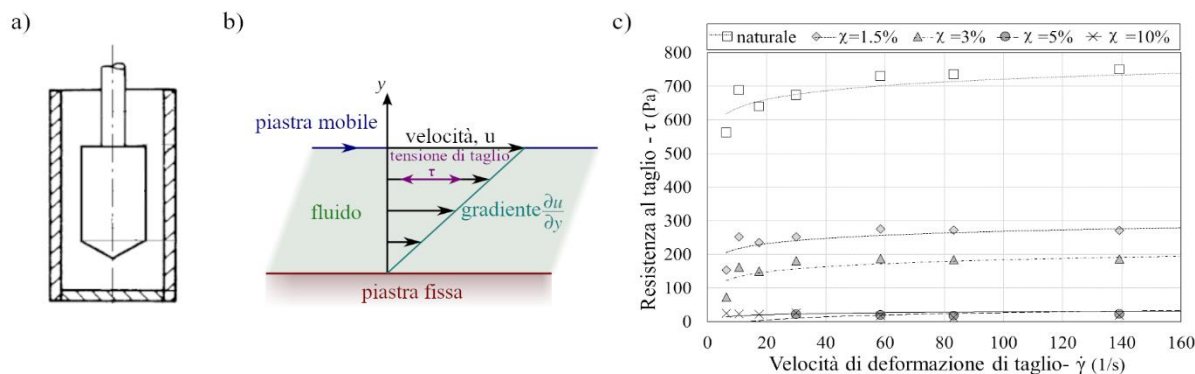


Figura 5 Prove di viscosità (a. apparecchiatura di misura, b. principio della misura di viscosità, c. risultati delle prove di viscosità condotti sulla bentonite con contenuto d'acqua  $w=300\%$  e crescenti concentrazioni di ACP).

Al fine di correlare la variazione di viscosità con la composizione del materiale, gli andamenti sperimentali riportati in Figura 5.c per la bentonite sono stati interpolati con la funzione riportata in Equazione 2 dove  $\dot{\gamma}_{ref}$  rappresenta un valore di riferimento per la velocità di distorsione ( $=1/s$ ),  $\mu$  è un fattore di forma che traduce la dipendenza tra tensione di taglio  $\tau$  e velocità di distorsione  $\dot{\gamma}$  e  $\tau_0$  è un valore di riferimento del taglio.

$$\tau = \tau_0 \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{ref}} \right)^\mu \quad (2)$$

Allo scopo di ampliare il campo di misure a composizioni che portano la consistenza del materiale a valori non compatibili con l'apparecchiatura viscosimetrica, i risultati ottenuti sono stati integrati con quelli ottenuti mediante prove scissometriche di laboratorio (ASTM D4648-16). I risultati acquisiti sono proposti in Figura 6 in termini di resistenza al taglio  $\tau_0$  in funzione dell'indice di consistenza  $I^*_C$ . Si osserva come per i due materiali una data resistenza a taglio corrisponda a differenti indici di consistenza, più alto per la bentonite che per il caolino.

### 1.4 Effetti sulla resistenza

L'influenza dell'ACP sulla resistenza del terreno trattato è stata studiata analizzando inizialmente gli effetti del prodotto sul solo cemento, dopodiché esaminandone gli effetti sul mix terreno-cemento.

Per entrambi i casi gli effetti sono stati quantificati in termini di resistenza a compressione non confinata (UCS) misurata su campioni cilindrici (75x150mm) testati con una velocità di schiacciamento di 0.2mm/min in accordo con la ASTM D1633-00 (2000).

La prima serie di test è stata eseguita su campioni preparati mescolando il cemento con una miscela formata dai quantitativi di ACP ed acqua necessari per ottenere un contenuto d'acqua  $w=30\%$  ed una concentrazione di additivo  $\chi=16\%$ . In Figura 7 si espone l'evoluzione della resistenza al crescere dei giorni di stagionatura per il materiale confezionato con e senza additivo. Sono stati confezionati due campioni gemelli per ogni composizione. Sebbene la resistenza ultima del materiale misurata dopo 43 giorni di stagionatura sia molto simile, il cemento trattato con l'additivo mostra una più rapida evoluzione della resistenza, probabilmente imputabile all'ambiente fortemente alcalino indotto dall'aggiunta di ACP.

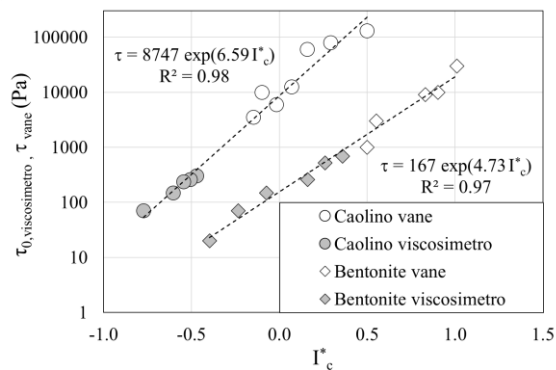


Figura 6 Resistenza al taglio iniziale del materiale in funzione dell'indice di consistenza  $I_c$ .

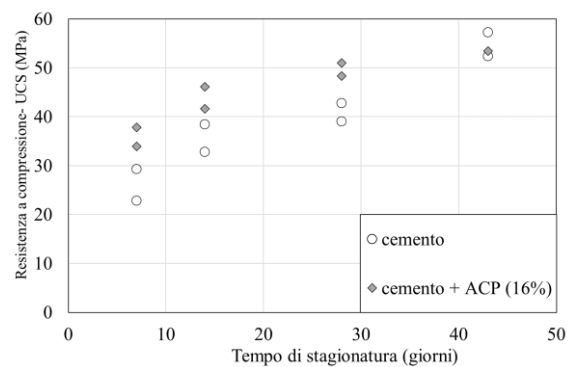


Figura 7 Effetto dell'ACP sulla resistenza a compressione non confinata del cemento.

La seconda serie di prove è stata condotta su campioni di caolino o bentonite confezionati con differenti quantitativi di acqua, prodotto e cemento. Il terreno asciutto è stato mescolato con una miscela composta dal prescritto quantitativo ACP ( $\chi=0.0-1.5-3.0\%$  per il caolino,  $\chi=0.0-5.0-10.0\%$  per la bentonite) e la quantità di acqua necessaria per raggiungere il voluto contenuto d'acqua iniziale ( $w=30-50-70\%$  per il caolino,  $w=150-200-300\%$  per la bentonite). Il composto così ottenuto è stato successivamente mescolato con una miscela cementizia caratterizzata da  $\varepsilon_c=17\%$  per il caolino e  $\varepsilon_c=46\%$  per la bentonite (equivalente al tipico dosaggio di  $220\text{kg/m}^3$  adottato nelle applicazioni di DSM) e rapporto acqua cemento  $w_c/c=1$ . Tale procedura è stata concepita per simulare un intervento di DSM in cui venga eseguito il pretrattamento del terreno in fase di discesa delle aste e l'iniezione della miscela cementizia in fase di risalita.

In Figura 8 si riportano i risultati ottenuti in termini di resistenza UCS in funzione della concentrazione di prodotto. I punti riportati in figura rappresentano il valore medio della resistenza misurata su due campioni gemelli confezionati per ogni composizione. I risultati mostrano un generale decremento della resistenza all'aumentare del contenuto d'acqua e di prodotto. Considerando gli effetti dell'ACP osservati sul solo cemento, tale riduzione di resistenza è imputabile al rilascio di acqua provocato dalla modificazione dei limiti di consistenza per la presenza dell'additivo.

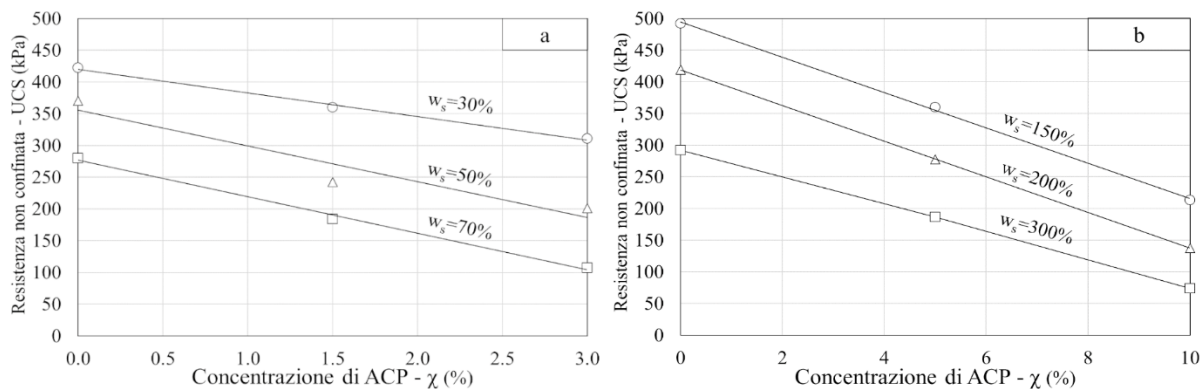


Figura 8 Effetto dell'ACP sulla resistenza a compressione non confinata del caolino (a) e della bentonite (b) misurata dopo 28 giorni di stagionatura su campioni confezionati con un contenuto di cemento  $\varepsilon_c=17\%$  per il caolino,  $\varepsilon_c=46\%$  per la bentonite e rapporto acqua cemento  $w_c=1$ .

Per meglio indagare quest'aspetto sono stati eseguiti ulteriori test di schiacciamento su campioni confezionati con contenuto d'acqua costante  $w=50\%$  per il caolino e  $w=200\%$  per la bentonite, trattati con differenti concentrazioni di ACP ( $\chi=0.0-0.4-1.5-3.0\%$  per il caolino,  $\chi=0.0-4.0-5.0-10.0\%$  per la bentonite), cemento ( $\varepsilon_c=17-26-35\%$  per il caolino e  $\varepsilon_c=46-68-91-114\%$ ) e rapporti acqua cemento ( $w_c=0-1$ ). I risultati diagrammati in Figura 9.a per il caolino e Figura 9.b per la bentonite mostrano un generale decremento della resistenza al crescere del contenuto di ACP ed un incremento della stessa all'aumentare della quantità cemento ed alla riduzione del rapporto acqua cemento  $w_c=0$  (aggiunta di cemento in polvere al terreno pretrattato con ACP).



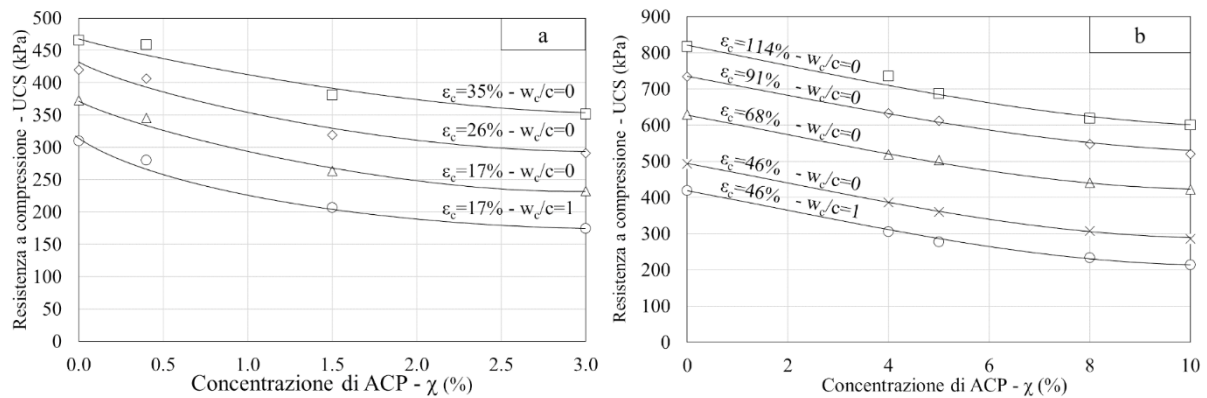


Figura 9 Effetto dell'ACP sulla resistenza non confinante del caolino (a) e bentonite (b) trattati con differenti concentrazioni di prodotto, cemento e rapporto acqua cemento per un fissato contenuto d'acqua ( $w=50\%$  per il caolino,  $w=200\%$  per la bentonite)

## 2 Conclusioni

Le prove di consistenza hanno mostrato come l'additivo riducendo l'attrazione tra le particelle argillose e l'acqua provochi alla macroscale una riduzione sostanziale del limite liquido del materiale.

Le prove scissometriche e di viscosità hanno permesso di individuare per le due argille studiate un'unica relazione tra resistenza a taglio e consistenza del materiale che può essere adottata per determinare con una data apparecchiatura la consistenza necessaria per rendere il terreno lavorabile e di conseguenza fissare i quantitativi di acqua e prodotto necessari.

Le prove di schiacciamento hanno sottolineato come il rilascio di acqua indotto dalla modificazione del limite liquido con il prodotto abbia un effetto negativo sulla resistenza. Tale riduzione può essere recuperata adottando quantitativi di cemento più elevati oppure riducendo il rapporto acqua cemento della miscela cementizia.

## 3 Bibliografia

- ASTM D1633 – 00 (2000). Standard Test Method for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- ASTM D4318 - 17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM D4648 / D4648M-16, Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM International (1970). Materials Committee on Soil, & Rock for Engineering Purposes. Special procedures for testing soil and rock for engineering purposes (Vol. 479).
- DIN EN 14679 (2005). Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau). Tiefreichende Bodenstabilisierung. Berlin: Beuth Verlag (in German).
- Egorova, A. A., Rybak, J., Stefaniuk, D., & Zajęczkowski, P. (2017, October). Basic aspects of deep soil mixing technology control. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 245, No. 2, p. 022019). IOP Publishing.
- Freitag D.R., Kozan, G.R. and Stouffer J.D. 1961. Summary reviews of soil stabilization processes: Report 6: Mixing Principles, Techniques and Equipment. Army Engineer Waterways Experiment Stations, Corps of Engineers, Vicksburg, USA.
- Nicholson P.G. (2005). Soil Improvement and Ground Modification Methods. Butterworth Heinemann, Oxford.
- Szymkiewicz, F., Barrett, A. G., Marino, J. P., Le Kouby, A., and Reiffsteck, P. (2015). "Assessment of strength and other mechanical properties of the Deep Mixing material". Proc. Conference Deep Mixing 2015, San Francisco, USA.
- Wermuth, C. G. (Ed.). (2011). The practice of medicinal chemistry. Academic Press.