

# Università degli Studi di Napoli Federico II



*Scuola Politecnica e delle Scienze di Base*

*Corso di laurea in*

*Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio*

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA, GEOTECNICA ED AMBIENTALE

SINTESI DELLA TESI

## **COMPORTAMENTO MECCANICO DI TERRENI ADDITIVATI CON CEMENTO AREATO**

*RELATORE:*

*Ch.mo Prof.*

*Ing. Gianfranco Urciuoli*

*CANDIDATA:*

*Antonella D'Acunto*

*M67/153*

*CORRELATORI:*

*Dott. Ing. Raffaele Papa*

*Dott. Ing. Enza Vitale*

*Ing. Domenico De Sarno*

ANNO ACCADEMICO  
2015/2016

## LIGHTWEIGHT TREATED SOIL

I terreni trattati alleggeriti, in inglese *Lightweight Treated Soil (LWTS)*, sono materiali prodotti artificialmente miscelando in determinate proporzioni: terra, legante idraulico (cemento), acqua e agente schiumogeno. Con tale procedura si ottiene un prodotto leggero e allo stesso tempo resistente ed è possibile risolvere problemi legati all'impatto ambientale, in quanto è possibile riutilizzare le terre di scavo, abbattendo così i costi finanziari ed ambientali per l'acquisto e il trasporto di materiale di cava e per lo smaltimento del terreno scavato.

La tipica struttura areata dei LWTS è dovuta alla presenza di bolle d'aria introdotte durante la preparazione della miscela mediante l'aggiunta di schiuma. La schiuma è una soluzione di acqua e tensioattivo, sottoposta ad agitazione tramite aria pressurizzata.

I tensioattivi hanno la funzione di ridurre la tensione superficiale dell'acqua e aumentare, così, la stabilità delle bolle; in tal modo, infatti, le bolle d'aria sono in grado di resistere alle forze fisiche e chimiche presenti durante la fase di miscelazione e pompaggio, restano intrappolate nel materiale e così ne aumentano la porosità e ne riducono la densità. Un'elevata concentrazione di tensioattivo aumenta la stabilità della schiuma; quest'ultima si definisce stabile se ha una durata di almeno 10 min. La caratteristica principale di questi materiali è il basso peso dell'unità di volume, funzione del quantitativo d'aria immesso nella miscela: i valori tipici sono compresi tra 5 e 15 kN/m<sup>3</sup>.

La resistenza meccanica a compressione monoassiale cresce con la densità del materiale, i valori tipici sono compresi nell'intervallo 0.1÷2 MPa, ma all'aumentare della pressione dell'aria diminuiscono sia la densità che la resistenza, mentre aumentano sia la porosità che la permeabilità del mezzo (valori di K compresi tra 10<sup>-4</sup> ÷ 10<sup>-8</sup> m/s).

## MIX PROPORTION DESIGN

Il "*Mix proportion design*", letteralmente "*progetto della miscela*", è il procedimento per il calcolo della composizione del calcestruzzo (*mix-composition*) in termini di kg/m<sup>3</sup> di cemento, acqua e inerti (per m<sup>3</sup> di calcestruzzo).

Quando si progetta la proporzione di miscela e schiuma è necessario impostare i valori di progetto, in modo da garantire la giusta viscosità e fluidità del terreno necessarie durante la posa in opera. Per quanto riguarda il terreno bisogna sceglierne il tipo e la quantità da trattare. Generalmente il tipo di terreno non è una vera e propria variabile di progetto, soprattutto se si vuole riutilizzare il materiale in sito. Per quanto riguarda il cemento bisogna fissarne la tipologia, la quantità ed il rapporto ponderale acqua/cemento. Infine bisogna fissare le variabili che riguardano la schiuma. Innanzitutto è necessario scegliere il tipo di tensioattivo; generalmente la casa produttrice del tensioattivo consiglia una concentrazione ottimale, proprio perché essa influenza la stabilità della schiuma.

Fissato il tipo di tensioattivo, le variabili di progetto riguardanti la schiuma sono quindi la densità e la quantità, che regolano la densità del mix finale. Le quantità dei singoli componenti del mix sono determinate mediante i calcoli, considerando due ipotesi di base:

- a) il volume d'aria nella miscela è pari al volume d'aria presente nella schiuma;
- b) non c'è variazione di volume causata da reazioni chimiche.

Il sistema considerato è costituito da due equazioni, rispettivamente un bilancio di massa e un bilancio di volume:

$$\begin{cases} m_c + m_a + m_f + m_t + m_w = \rho_{wet} \\ V_c + V_a + V_f + V_t + V_w = V_{TOT} \end{cases}$$

Dove i termini rappresentano le quantità per unità di volume di prodotto:

- $m_c$  è la massa di cemento;
- $m_a$  è la massa d'acqua che si deve aggiungere al cemento;
- $m_f$  è la massa di schiuma;
- $m_t$  è la massa di terreno;
- $m_w$  è la massa d'acqua che si deve aggiungere al terreno;
- $V_c$  è il volume di cemento;
- $V_a$  è il volume d'acqua che si deve aggiungere al cemento;
- $V_t$  è il volume di terreno;
- $V_w$  è il volume d'acqua che si deve aggiungere al terreno;
- $\rho_{wet}$  è la densità teorica del prodotto, allo stato fresco.

Dalla risoluzione di tale sistema si ricavano le espressioni per il calcolo della massa di cemento e della densità teorica:

$$m_c = (1 - V_f) / (1/\rho_c + m_a/m_c \cdot 1/\rho_w + m_t/m_c \cdot 1/s + m_w/\rho_w \cdot m_t/m_c)$$

$$\rho_{wet} = m_c \cdot [(1 + m_a/m_c + m_t/m_c + m_w \cdot m_t/m_c) + V_f \cdot \rho_f]$$

dove  $\rho_c$  è la densità del cemento ( $\text{kg/m}^3$ );  $s$  è il peso specifico del terreno ( $\text{kg/m}^3$ );  $w$  è il contenuto d'acqua assunto pari ad un valore compreso tra 1,5 ÷ 3 volte il limite liquido del terreno.

## SPERIMENTAZIONE - ANALISI DEL COMPORTAMENTO MECCANICO

Presso il *Laboratorio di Ingegneria Geotecnica* del *Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale* della *Scuola Politecnica e delle Scienze di Base Federico II* è stata eseguita una sperimentazione su terreno alleggerito: in una prima fase si è valutato l'effetto dell'utilizzo di un additivo, il cemento calcio-solfoalluminato, sul comportamento meccanico di un terreno trattato, e poi una seconda parte della sperimentazione è stata dedicata allo studio dell'evoluzione del comportamento meccanico del terreno trattato. Il primo mix è stato realizzato solo con l'aggiunta di tensioattivo alla miscela di terreno, acqua, e boiaccia cementizia. Nel caso in esame il terreno è assegnato, l'argilla di Caposele, con peso specifico pari a  $27.5 \text{ kN/m}^3$ ; limite liquido 60% e limite plastico 30%. Si è scelto cemento Portland alla pozzolana e schiuma Isocem (concentrazione di tensioattivo consigliata 2.5%), mentre la densità è stata fissata a  $75 \text{ g/l}$ . Successivamente è stato realizzato un nuovo mix, sempre con argilla di Caposele, cemento e tensioattivo, e in più la sostituzione del 15% di cemento Portland con calcio-solfoalluminato (CSA), additivo che riduce di molto i tempi di presa.

In entrambi i casi, note le quantità per  $\text{m}^3$  di materiale da realizzare e noto il volume totale da realizzare ( $0.012 \text{ m}^3$ ) si ricavano facilmente le quantità per il mix design. Sono stati realizzati 7 provini cilindrici ( $V_{\text{TOT}} = 0.012 \text{ m}^3$ ), con altezza pari a 20 cm e diametro pari a 9.5 cm; il mix design è riportato nelle seguenti tabelle:

1 $\text{m}^3$ di prodotto		
$m_c$	150	[kg]
$m_i$	326	[kg]
$V_w$	0.391	$[\text{m}^3]$
$V_f$	0.442	$[\text{m}^3]$

7 provini ( $V_{\text{TOT}} = 0.012 \text{ m}^3$ )		
$m_c$	1.8	[kg]
$m_i$	3.91	[kg]
$V_w$	0.0047	$[\text{m}^3]$
$V_f$	0.0053	$[\text{m}^3]$
$\gamma_f$	75	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

7 provini ( $V_{\text{TOT}} = 0.012 \text{ m}^3$ ) con CSA15%		
$m_c$	1.53	[kg]
$m_{\text{CSA15\%}}$	0.270	[kg]
$m_i$	3.91	[kg]
$V_w$	0.0047	$[\text{m}^3]$
$V_f$	0.0053	$[\text{m}^3]$
$\gamma_f$	75	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

E' stata monitorata la variazione del peso per unità di volume nel tempo, per 7 e 28 giorni di maturazione e sono state eseguite prove di espansione laterale libera (ELL). L'apparecchiatura è costituita da una pressa ad azionamento meccanico in grado di realizzare una velocità di avanzamento costante, compresa secondo la Normativa vigente tra lo 0,5 e il 2%  $[\text{mm}/\text{min}]$  dell'altezza iniziale del provino e funzione delle caratteristiche del materiale in esame.

Di seguito si riportano i risultati delle prove.

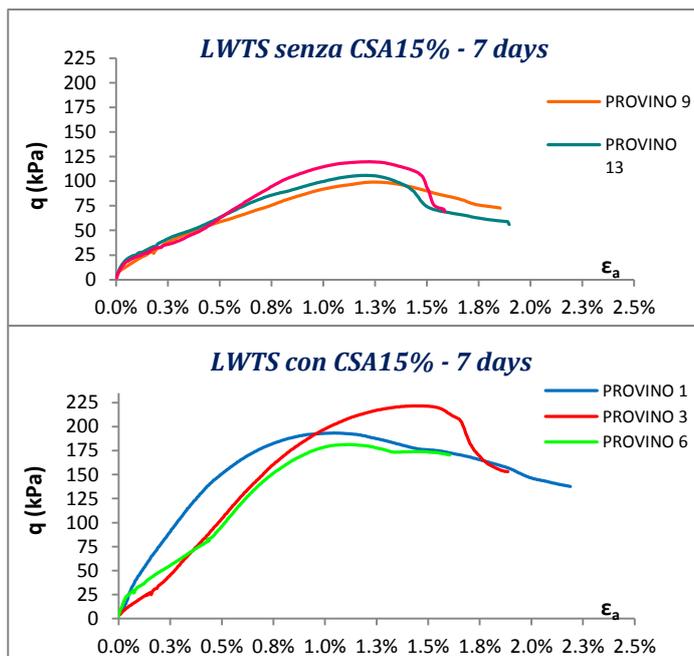


Figura 1: Prova ELL dopo 7 giorni di maturazione

<i>LWTS senza CSA15% 7 days</i>	$q_{max}$ [kPa]
PROVINO 9	99.2
PROVINO 13	106.0
PROVINO 14	119.8

<i>LWTS con CSA15% 7 days</i>	$q_{max}$ [kPa]
PROVINO 1	193.3
PROVINO 3	221.5
PROVINO 6	181.3

Dai risultati e dal confronto delle prove ELL a 7 giorni (Figura 1) si osserva che la resistenza dei provini testati senza l'aggiunta di CSA è inferiore rispetto quella dei provini realizzati con l'aggiunta di CSA.

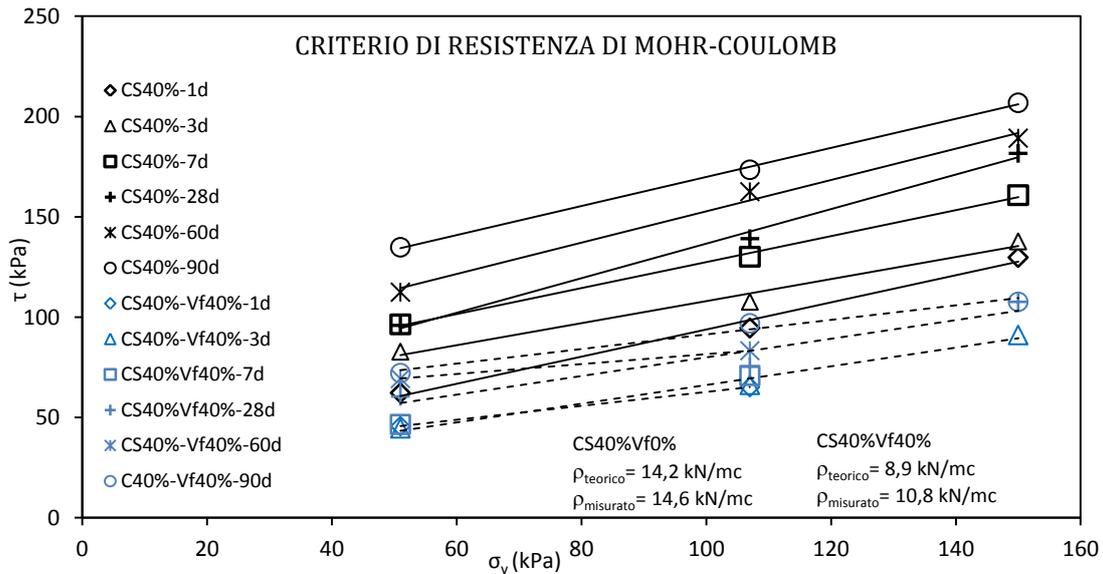
La seconda sperimentazione, iniziata a maggio 2016, rientra in un progetto sviluppato dalla società "TERRE LEGGERE s.r.l" in collaborazione con il DICeM dell'Università di Cassino.

E' un'attività di ricerca finalizzata alla caratterizzazione microstrutturale, reologica, fisica e meccanica dei terreni trattati con miscele fluide indurenti. A tal proposito i materiali utilizzati per la realizzazione dei provini sono stati scelti in modo da ridurre il numero di variabili in gioco, in particolare è stato usato:

- caolino Speswhite (peso specifico  $25.9 \text{ kN/m}^3$ , limite liquido 70%, limite plastico 32%);
- cemento Portland al calcare (CEM II/A-LL – 42.5R);
- tensioattivo (ISOCHEM S/L), con concentrazione 2.5% e densità fissata a 75 gr/l;

Per valutare la resistenza a taglio del materiale alleggerito si utilizza la macchina di taglio diretto, un'apparecchiatura formata da una cella quadrata, con pareti rigide, caratterizzata da un foro in cui verrà posta la scatola di Casagrande (6x6x2 cm). Sono state programmate diverse prove di taglio, sia a breve termine che a lungo termine, su diversi mix.

Per realizzare il mix design è stato fissato innanzitutto il contenuto d'acqua iniziale ( $w_0$ ) pari a 2 volte il limite liquido del caolino, dunque  $w_0=140\%$ ; poi il rapporto ponderale cemento/terreno ( $C/S=40\%$ ); il rapporto ponderale acqua/cemento ( $A/C=0.5$ ). E' stato quindi fatto variare il rapporto  $V_f/V_{tot}$  per valutare l'effetto della schiuma. E' stato testato il materiale senza schiuma e quello con il 40% di schiuma.



Confrontando tutti gli involucri di resistenza di picco, sia relativi alle prove sui provini senza schiuma che su quelli con schiuma, si nota che all'aumentare dei giorni di maturazione aumenta anche la coesione, mentre l'angolo d'attrito resta pressoché lo stesso. Dai risultati delle prove effettuate sui provini realizzati con il 40% di cemento, senza schiuma, si può osservare l'effetto del tempo di maturazione sulla resistenza del materiale (*Figura 2*):

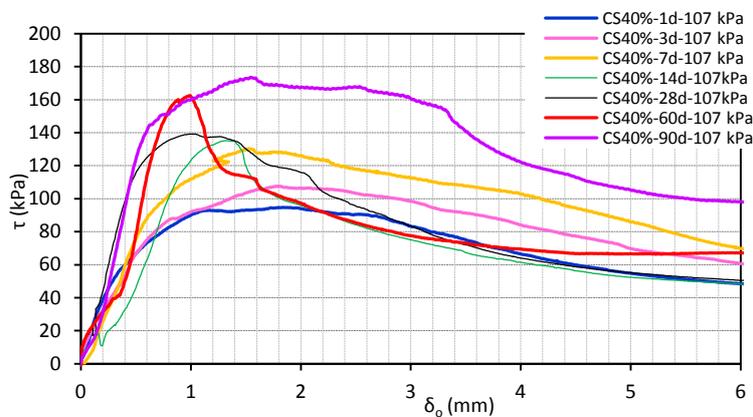
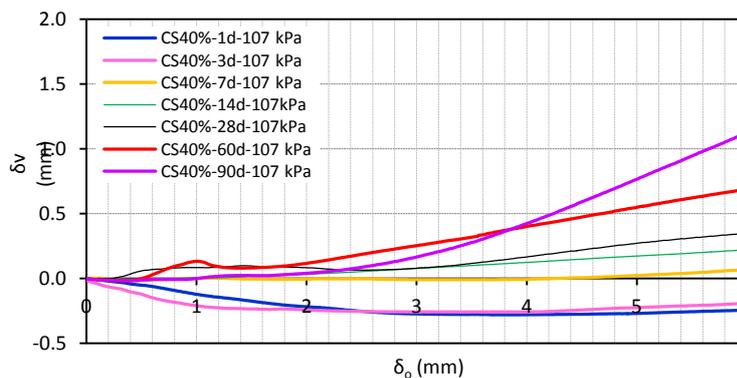


Figura 2: Comportamento instabile e dilatante - C/S 40%



A parità di tensione di confinamento, dal diagramma  $(\tau, \delta_o)$  si osserva che all'aumentare dei giorni di maturazione la resistenza di picco aumenta, ma i provini manifestano un comportamento instabile e dilatante, in quanto superata la resistenza di picco si verifica un decadimento della stessa verso un valore di plateau ed oltre il plateau la resistenza tende a mantenersi stabile solo per grandi spostamenti orizzontali  $(\delta_o)$ . Anche per i provini con la schiuma si può osservare l'effetto del tempo di maturazione (Figura 3): fissata una tensione di confinamento, il comportamento è pressoché stabile e contraente e all'aumentare del tempo di maturazione la resistenza di picco aumenta e per grandi deformazioni resta costante.

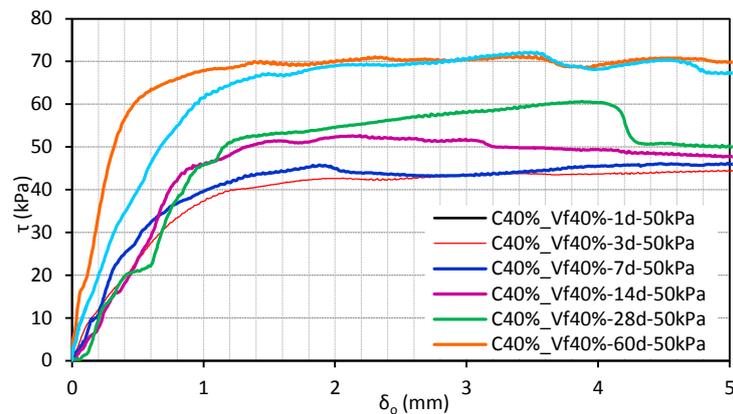
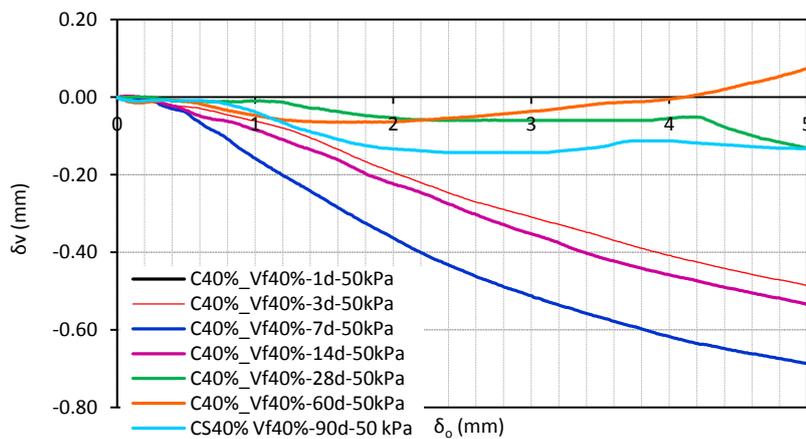


Figura 3: Comportamento stabile e contraente - C/S 40% e Vf 40%



## CONCLUSIONI

Le buone caratteristiche di resistenza a compressione dimostrate, unite al modesto peso, rendono i terreni alleggeriti particolarmente adatti per realizzare rilevati alleggeriti e come materiali di riempimento per cavità e scavi per la posa in opera di condotte, riempimento alle spalle dei muri e tante altre applicazioni di natura geotecnica, dove è possibile il riutilizzo dei materiali di scavo che andrebbero a discarica. Tutto ciò a vantaggio dell'ambiente: infatti i materiali utilizzati sono quelli che generalmente vanno a discarica.

I trattamenti eseguiti in questo lavoro di tesi rientrano in una più ampia sperimentazione in corso ed in particolare è stata posta l'attenzione sul miglioramento sia delle caratteristiche meccaniche a lungo termine che a breve termine. Si riportano quindi i risultati della sperimentazione eseguita.

### ➤ *PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE*

- La resistenza di un terreno alleggerito, rispetto alle procedure tradizionali, migliora se si sostituisce una parte di cemento Portland con una percentuale di additivo, nel caso specifico il cemento calcio-solfoalluminato (CSA); infatti i valori di resistenza di picco sono mediamente pari a circa 200 kPa sia dopo 7 giorni di maturazione che dopo 33 giorni e quindi risultano maggiori di quelli ottenuti in assenza di additivo (CSA) e rientrano nell'intervallo di valori suggerito in letteratura.
- Dopo 7 giorni di maturazione la resistenza e la rigidità del materiale realizzato con il cemento calcio-solfoalluminato è molto maggiore rispetto la resistenza del materiale senza CSA, ma tale differenza risulta minore dopo 33 giorni di maturazione.

<i>LWTS con CSA15% 7 days</i>	$q_{max}$ [kPa]
PROVINO 1	193.3
PROVINO 3	221.5
PROVINO 6	181.3

<i>LWTS con CSA15% 33 days</i>	$q_{max}$ [kPa]
PROVINO 4	152.9
PROVINO 5	270.4
PROVINO 7	176.6

<i>LWTS senza CSA15% 7 days</i>	$q_{max}$ [kPa]
PROVINO 9	99.2
PROVINO 13	106.0
PROVINO 14	119.8

<i>LWTS senza CSA15% 33 days</i>	$q_{max}$ [kPa]
PROVINO 10	108.13
PROVINO 11	132.85
PROVINO 12	134.49

➤ *PROVA DI TAGLIO DIRETTO*

– *Materiali realizzati con rapporto ponderale cemento/terreno (C/S) pari al 40%:*

- A parità di tensione di confinamento, all'aumentare del tempo di maturazione aumenta anche la resistenza di picco e i provini manifestano un comportamento instabile e dilatante.
- Dagli involuipi di rottura si nota che all'aumentare del tempo di maturazione aumenta anche la coesione, mentre l'angolo di resistenza al taglio si mantiene pressoché costante.

– *Materiali realizzati con 40% di schiuma e rapporto ponderale cemento/terreno pari al 40%:*

- Il comportamento è pressoché stabile e contraente.
- All'aumentare del tempo di maturazione la resistenza di picco aumenta.

Dal confronto dei risultati (*Figura 4*) si può affermare che a parità di tempo di maturazione, la resistenza di picco del materiale alleggerito è inferiore rispetto quella del materiale realizzato senza schiuma.

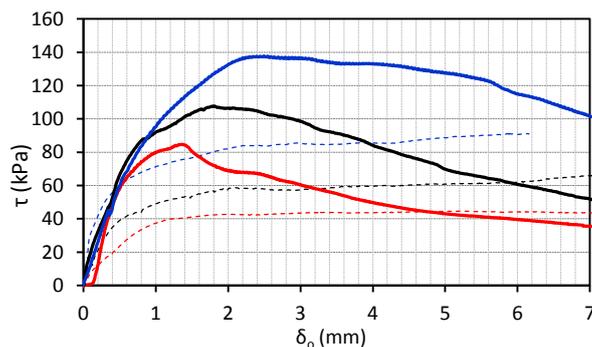
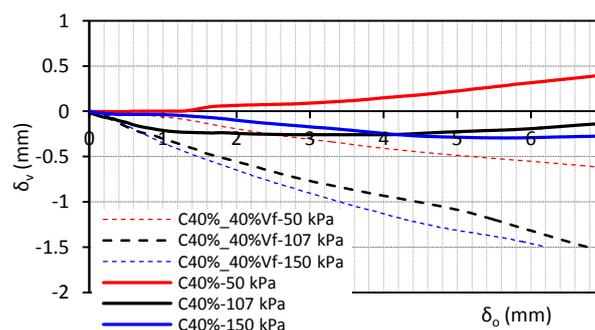


Figura 4: Confronto C40% e C40% Vf40% - 3 giorni di maturazione



In entrambi i casi, sia con schiuma che senza, dagli involuipi di rottura si nota che all'aumentare del tempo di maturazione la coesione cresce e l'angolo di attrito presenta una certa dispersione intorno ad un valore medio, indipendente dal tempo di maturazione. Nonostante tale riduzione, la resistenza di un terreno alleggerito è sufficiente per molte applicazioni geotecniche; infatti rispetto ad un terreno, tali materiali trattati presentano un peso dell'unità di volume minore e caratteristiche meccaniche migliori.