

RESISTENZA A TAGLIO DI UN' ARGILLA A SCAGLIE COMPATTATA NON SATURA

Camillo Airò Farulla
Università degli Studi di Palermo
airo@unipa.it

Marco Rosone
Università degli Studi di Palermo
rosone@unipa.it

Sommario

Si presentano i risultati di una ricerca sperimentale riguardante lo studio della resistenza a taglio di un'argilla a scaglie compattata non satura. Per evidenziare gli effetti della suzione sulla resistenza a taglio, i risultati di alcune prove di compressione triassiale a suzione controllata eseguite su un gruppo di provini in condizioni di parziale saturazione, sono posti a confronto con quelli ottenuti da prove di compressione triassiale eseguite sullo stesso materiale in condizioni di completa saturazione.

Introduzione

Le argille a scaglie, molto diffuse nell'Italia Meridionale e in Sicilia, sono argille fortemente sovraconsolidate, caratterizzate da una struttura "complessa", costituita da un fitto reticolo di discontinuità che intersecandosi suddividono il materiale in scaglie di dimensioni variabili dal millimetro al centimetro. Le scaglie sono, pertanto, frammenti di argilla molto consistente o dura, generalmente di forma irregolare e a spigoli vivi, fortemente interconnesse tra loro. Per le loro caratteristiche fisiche e strutturali le argille a scaglie possono essere compattate al contenuto naturale d'acqua, generalmente inferiore al limite di plasticità, ottenendo un materiale di bassa permeabilità e di elevata resistenza a taglio.

Da diversi anni sono state sviluppate e sono in corso di svolgimento presso il Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale (DICA) dell'Università di Palermo, numerose ricerche sperimentali per la caratterizzazione delle argille a scaglie siciliane sia come materiali da costruzione che nella loro sede naturale, in condizioni di completa e parziale saturazione. La presente nota si inquadra nell'ambito di questa ricerca e riferisce sulle caratteristiche della resistenza a taglio di un'argilla a scaglie compattata non satura al variare della suzione di matrice.

Materiale impiegato nella sperimentazione

Per la sperimentazione è stata impiegata un'argilla a scaglie avente limite di liquidità $w_l = 0.62$, indice di plasticità $I_p = 0.39$, peso specifico dei grani $\gamma_s = 27.07 \text{ kN/m}^3$. Dopo essere stata essiccata all'aria (contenuto d'acqua igroscopico $w_h = 0.045$) l'argilla, è stata parzialmente disgregata, selezionando il passante allo staccio N° 4 ASTM ($d = 4.75 \text{ mm}$). Il materiale selezionato è stata umidificato e compattato dinamicamente ottenendo: $w = 15\%$ e $\gamma_d = 17.5 \text{ kN/m}^3$. E' stata adottata una tecnica di costipamento tipo Harvard, opportunamente modificata, con l'impiego di una fustella cilindrica avente diametro $d = 38 \text{ mm}$ e altezza $h =$

76 mm. I provini utilizzati per la sperimentazione nelle condizioni iniziali si situano sempre alla sinistra dell'ottimo ($w_{opt} = 17\%$).

Misure della suzione eseguite con il metodo della carta di filtro e con lo psicrometro a specchio (dewpoint method) su provini preparati con modalità identica a quella descritta, hanno fornito valori della suzione di matrice dell'ordine di 2000 kPa per $w \cong 0.15$, con valori della suzione osmotica $\Psi_\pi \cong 300-400$ kPa (Airò Farulla et al., 2010a).

A livello microscopico l'argilla presenta una struttura ad aggregati con distribuzione della densità del diametro di ingresso dei pori di tipo bimodale, caratteristica dei materiali a doppia porosità (Airò Farulla et al., 2010b).

Apparecchiatura sperimentale

L'apparecchiatura triassiale utilizzata, comprendente una versione modificata della cella di Bishop e Wesley, consente l'esecuzione di prove a percorso di carico e suzione controllati; la suzione è controllata per mezzo della tecnica della traslazione degli assi, utilizzando il metodo della sovrappressione dell'aria. Sulla base inferiore della cella, collegata al sistema della pressione dell'acqua u_w , una piastra porosa ad alto valore di ingresso della pressione dell'aria ($HAEV = 5$ bar) costituisce l'interfaccia con la fase liquida e ne consente il drenaggio, mentre sulla base superiore del provino una piastra porosa a basso valore della pressione di ingresso dell'aria assicura la continuità tra l'aria all'interno del provino e l'aria proveniente dal circuito alla pressione u_a .

Le deformazioni assiali sono calcolate sulla base delle misure degli spostamenti all'esterno della cella per mezzo di un trasduttore LVDT. Le deformazioni radiali sono determinate controllando il livello d'acqua nella cella interna (bicchiere) ove è posto il provino; le variazioni di livello sono legate alle deformazioni radiali del provino. Un trasduttore differenziale di pressione misura la differenza di pressione, ovvero il dislivello dell'acqua, tra una buretta di riferimento e il bicchiere. Un sistema analogo, collegato al circuito di drenaggio, consente la misura della variazione del contenuto d'acqua. Piccole variazioni di temperatura, dell'ordine di $\pm 1^\circ\text{C}$ o poco più, possono influenzare notevolmente la misura delle deformazioni radiali (Rosone, 2011).

Programma sperimentale

Sono state eseguite prove di compressione triassiale a suzione controllata, facendo variare i valori della suzione di matrice, $s = u_a - u_w$, e della pressione media netta, p_{net} , rispettivamente, nell'intervallo compreso tra 50 e 200 kPa. I provini sono stati sottoposti ad una fase iniziale di equalizzazione ($p_{net} = 50$ kPa e $s = 50$ kPa), a una successiva fase di essiccamento a pressione di confinamento costante ($s = 100-200$ kPa, $p_{net} = 50$ kPa) e infine a una fase di compressione isotropa ($p_{net} = 100-200$ kPa) a suzione costante. Dalla condizione di stato tensionale uniforme, è stata avviata la rottura a suzione costante in condizioni drenate (velocità di deformazione $v = 0.028$ mm/h). I percorsi delle tensioni applicate sono illustrate nel diagramma di figura 1.

A causa della lunghezza dei tempi necessari per il completamento delle fasi di imbibizione ed essiccamento, alcune prove sono state eseguite con modalità multi-stage, mantenendo costante il valore della suzione e incrementando quello della pressione media netta. Con riferimento al diagramma di figura 1, sono state eseguite con la tecnica multi-stage le prove A5-A8 ($s = 100$ kPa, $p_{net} = 100-200$ kPa) e A6- A9 ($s = 200$ kPa, $p_{net} = 100 - 200$ kPa). Per verificare l'affidabilità della tecnica per il materiale in esame, la prova A7 ($p_{net} = 200$ kPa e $s = 50$ kPa) è stata ripetuta sia in modalità multi-stage che in modalità ordinaria, verificando un ottimo accordo tra i risultati relativi alle due prove.

Per evidenziare gli effetti della suzione sulla resistenza a taglio, sono state eseguite 4 prove di

compressione triassiale *CID* sull'argilla a scaglie compattata portata a saturazione con l'applicazione di una "back pressure", $u_{w,0} = 400$ kPa, e pressioni efficaci di confinamento $\sigma'_3 = 50 \div 300$ kPa.

Analisi dei risultati

Nella fase di equalizzazione iniziale ($p_{net} = 50$ kPa e $s = 50$ kPa), i provini hanno rigonfiato assorbendo acqua. Il grado di saturazione finale è variato tra 0.83 e 0.89. L'indice di porosità e e il grado di saturazione S sono rimasti costanti nella fase di drying fino a $s = 100$ kPa, e hanno subito una piccola riduzione quando la suzione è stata incrementata al valore $s = 200$ kPa, ($\Delta e \cong 0.02 \div 0.05$; $\Delta S \cong 1 \div 2$ %).

Le deformazioni volumetriche misurate nelle successive fasi di compressione isotropa a $p_{net} = 100$ kPa sono state molto ridotte ($\Delta \varepsilon_v \leq 0.05$ %). Nel caso della prova A7, la compressione isotropa a $p_{net} = 200$ kPa ha indotto una significativa deformazione volumetrica in conseguenza della quale il provino ha raggiunto la quasi completa saturazione ($\Delta \varepsilon_v \cong 3$ %; $S = 0.99$).

Nei diagrammi delle figure 2, 3 e 4 sono rappresentati in funzione della deformazione assiale ε_a , i valori dello sforzo deviatorico q , della deformazione volumetrica ε_v e del grado di saturazione misurati durante la fase della rottura; ciascun gruppo di diagrammi si riferisce a prove eseguite a suzione costante facendo variare p_{net} nell'intervallo 50-200 kPa.

L'analisi dei diagrammi indica un comportamento a rottura dei provini di tipo duttile, con raggiungimento della tensione deviatorica massima per valori della deformazione assiale compresi tra 10% e 12 %, a deformazioni volumetriche costanti. Il meccanismo di rottura si sviluppa senza localizzazione delle deformazioni.

Le prove eseguite in multi-stage (A8 e A9) sono caratterizzate da una elevata rigidità iniziale, a causa del ciclo di scarico-ricarico della tensione deviatorica per effetto dell'incremento della tensione di confinamento al valore $\sigma'_{3,net} = 200$ kPa.

Le deformazioni volumetriche nella fase di rottura sono di contrazione con valori compresi nell'intervallo $\varepsilon_v = 1 \div 2.5$ % per suzione di matrice pari a $s = 50$ kPa e $s = 100$ kPa, mentre per $s = 200$ kPa sono stati misurati valori nell'intorno di $\varepsilon_v \cong 1$ %.

Per quanto riguarda le variazioni di contenuto d'acqua si è osservato un comportamento variabile in funzione della suzione di matrice applicata. Per $s = 50$ kPa, il provino A1 ($p_{net} = 50$ kPa) durante la fase di rottura incrementa il contenuto d'acqua, mentre il provino A7 ($p_{net} = 200$ kPa) per effetto della deformazione volumetrica espelle sempre acqua. Il provino A4 ($p_{net} = 100$ kPa) ha un comportamento intermedio perché dopo una fase iniziale in cui ha espulso acqua, successivamente ha assorbito acqua. Il grado di saturazione, durante queste prove, tende ad aumentare raggiungendo alla rottura i valori $S = 0.88 \div 1$.

Nei provini con suzione $s = 100$ kPa, ad una prima fase in cui il contenuto d'acqua aumenta, ne segue una in cui il flusso si inverte. Solo il provino A8 ($p_{net} = 200$ kPa) a fine prova ha un contenuto d'acqua maggiore di quello iniziale. Il grado di saturazione, per effetto delle deformazioni volumetriche di contrazione, aumenta variando nel campo $S = 0.86 \div 0.97$.

I provini con suzione di matrice pari a $s = 200$ kPa hanno un comportamento diverso dai precedenti in quanto mantengono costante il grado di saturazione durante tutta la fase di rottura con $S = 0.82 \div 0.86$. I provini, in particolare, sono soggetti ad un flusso di acqua di espulsione e a deformazioni volumetriche di compressione in condizioni di grado di saturazione costante.

Le curve di ritenzione dell'argilla a scaglie compattata, per l'indice di porosità considerato ($e = 0.55-0.65$), indicano che il valore della pressione di ingresso dell'aria (*AEV*) risulta compreso nel campo di suzione $s = 100 \div 200$ kPa.

In figura 5 sono riportati i percorsi di tensione delle prove di compressione triassiale sul piano

(p_{net} , q). Si riportano anche i risultati delle prove di compressione triassiale drenate eseguite sull'argilla a scaglie compattata saturata. Gli involucri di rottura corrispondenti ai valori di suzione applicati sono lineari e caratterizzati da equazioni del tipo (Wheeler & Sivakumar, 1995): $q = M(s) p_{net} + \mu(s)$.

Al variare della suzione il parametro $M(s)$ rimane praticamente costante, dal momento che i valori calcolati variano tra 0.79 e 0.89, mentre $\mu(s)$ varia in maniera non lineare.

I cerchi del Mohr ottenuti dalle prove eseguite sono riportati in figura 6. Assumendo che l'angolo di resistenza a taglio ϕ' sia lo stesso di quello del materiale saturo, tracciando gli involucri per i valori di suzione $s = 50 - 100 - 200$ kPa, si ricavano i valori della coesione intercetta, c , rappresentati in funzione di s nel diagramma di figura 7.

Nell'ipotesi di rappresentare nel piano τ , σ_{vnet} , $s = u_a - u_w$, la resistenza a taglio dell'argilla compattata non satura con un involucro piano (Fredlund & Rahardjo, 1993), di equazione:

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b + \sigma_{vnet} \tan \phi'$$

dal diagramma di figura 7 è possibile ricavare i valori di c' e ϕ^b interpolando i punti ivi rappresentati con un involucro lineare di equazione $c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$.

Le misure, tuttavia, evidenziano i limiti di un tale approccio. Infatti, finché la suzione non supera il valore di sfondamento dei menischi per la porosità considerata, ovvero fino a quando il grado di saturazione rimane unitario, il valore dell'angolo ϕ^b risulta molto prossimo al valore di ϕ' , concordemente al criterio di Mohr-Coulomb per i terreni saturi. Superato tale valore, l'incremento di resistenza offerto dalla suzione è sempre meno pronunciato e il valore di c corrispondente a $s = 200$ kPa si situa ben al di sotto dell'involucro con pendenza ϕ' (figura 7). Come ben noto, tale comportamento può essere spiegato sulla base della progressiva scomparsa nel provino delle zone che permangono sature durante l'essiccamento. In definitiva, l'involucro piano rappresenta solo un'approssimazione dell'andamento dell'involucro reale con riferimento a intervalli di variazione della suzione di ampiezza limitata.

La resistenza a taglio del materiale può essere rappresentata in maniera più aderente alla realtà adottando un involucro curvilineo. Nel caso in esame, i risultati sperimentali possono essere interpolati secondo un criterio di resistenza iperbolico, che assicura che le tangenti alle curve τ - s (corrispondenti a un prefissato valore di σ_{vnet}) per $s = 0$, siano inclinate di un angolo pari all'angolo di resistenza al taglio del terreno saturo, del tipo:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \frac{s}{\cot \phi' + \frac{s}{c^*}}$$

L'interpolazione, eseguita con il metodo dei minimi quadrati, ha fornito: $c^* = 227$ kPa. Il distacco dall'involucro relativo al terreno saturo è evidente per valori di suzione compresi tra 100 e 200 kPa

Conclusioni

Nella nota sono stati discussi i risultati di una ricerca sperimentale riguardante la caratterizzazione della resistenza a taglio di un'argilla a scaglie compattata non satura al variare della suzione di matrice, eseguendo prove di compressione triassiale a suzione controllata anche in modalità multi-stage.

Tracciando gli involucri di rottura per valori della suzione di matrice pari a 50, 100 e 200 kPa si è verificato che l'effetto della suzione sulla resistenza a taglio è marcatamente non lineare. Per suzione pari a 50 e 100 kPa il materiale a rottura è saturo e l'effetto di un aumento di suzione è equivalente ad un aumento di tensione efficace di pari entità. Per suzione pari a 200 kPa, l'effetto della suzione è meno pronunciato. Tale risultato è in buon accordo con la pressione di ingresso dell'aria (AEV) che compete alle curve di ritenzione di provini della

stessa argilla compattata, aventi indice di porosità dello stesso ordine di grandezza di quello dei provini esaminati.

Bibliografia

- Airò Farulla, C., Battiato, A., Ferrari, A. (2010a). The void ratio dependency of the retention behaviour for a compacted clay. In *Unsaturated Soils*, pp. 417-422.
- Airò Farulla, C., Ferrari A., Romero E. (2010b). Volume change behaviour of a compacted scaly clay during cyclic suction changes. *Can. Geotech. J.* 47: 688-703.
- Alonso, E.E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40(3): 405-430.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. J. Wiley, New York.
- Rosone, M. (2011). Resistenza a taglio di un'argilla a scaglie compattata non satura. Tesi di dottorato Università Mediterranea di Reggio Calabria – Università degli Studi di Palermo.
- Wheeler S.J., Sivakumar V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique* 45, No.1 pp.35-53.

Tabella 1. Caratteristiche iniziali dei provini.

Provino	γ_d (g/cm ³)	w (%)	S_i	e_0	p_{net} (kPa)	s (kPa)
A1	17.46	15.2	0.77	0.55	50	50
A2	17.30	14.6	0.71	0.58	50	100
A3	17.26	14.9	0.72	0.57	50	200
A4	17.48	15.0	0.75	0.56	100	50
A5	17.26	15.0	0.72	0.58	100	100
A6	17.55	14.8	0.74	0.55	100	200
A7bis	17.46	15.4	0.78	0.55	200	50
S16	17.55	15.0	0.77	0.54	50	0
S18	17.46	14.7	0.73	0.55	200	0
S19	17.26	15.4	0.75	0.57	100	0
S20	17.06	15.2	0.72	0.58	300	0

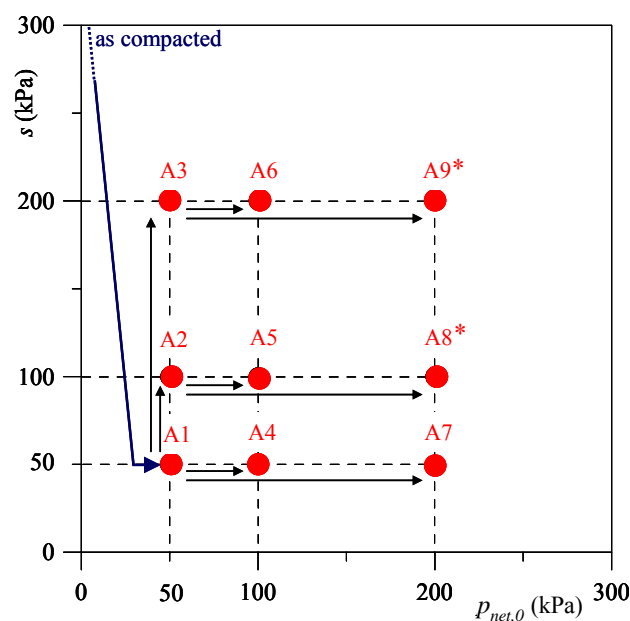


Figura 1. Percorsi di carico ($p_{net,0}$, s) delle fasi di equalizzazione e di compressione triassiale (*prove multi-stage).

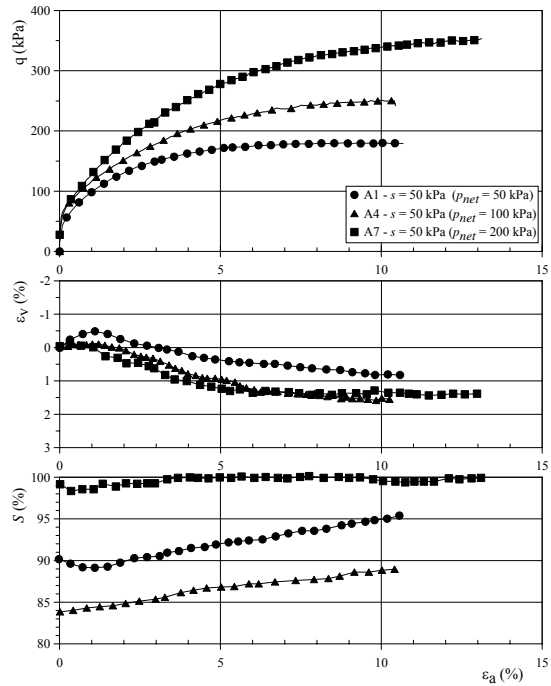


Figura 2 Risultati della fase di rottura per $s = 50$ kPa

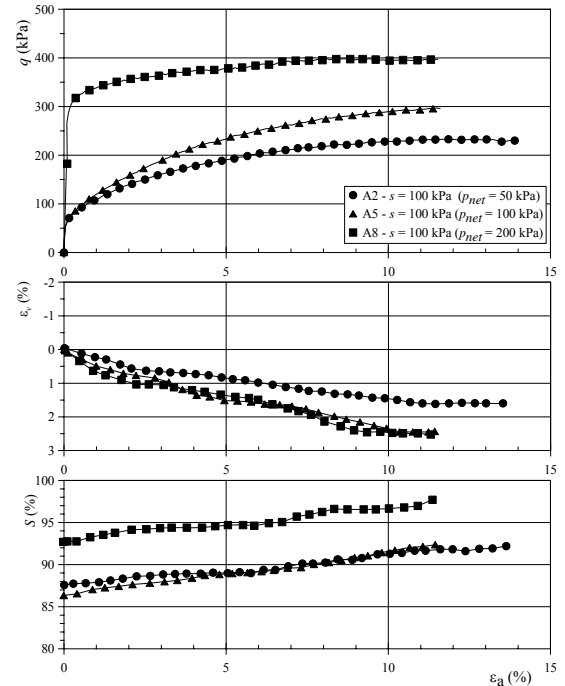


Figura 3. Risultati della fase di rottura per $s = 100$ kPa.

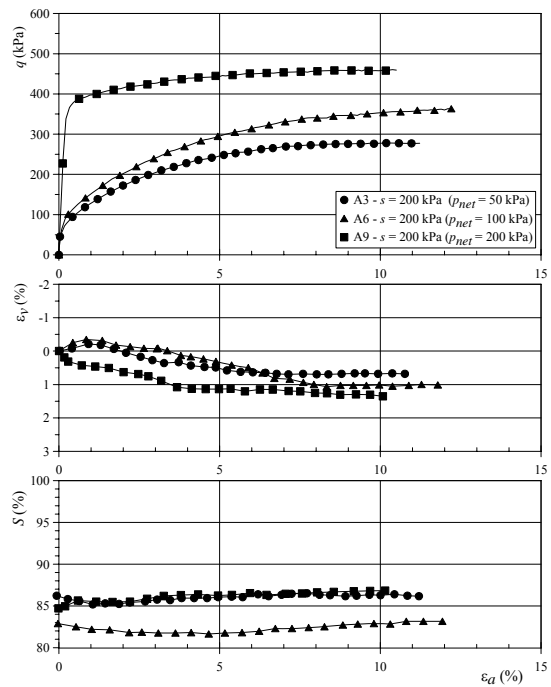


Figura 4. Risultati della fase di rottura per $s = 200$ kPa

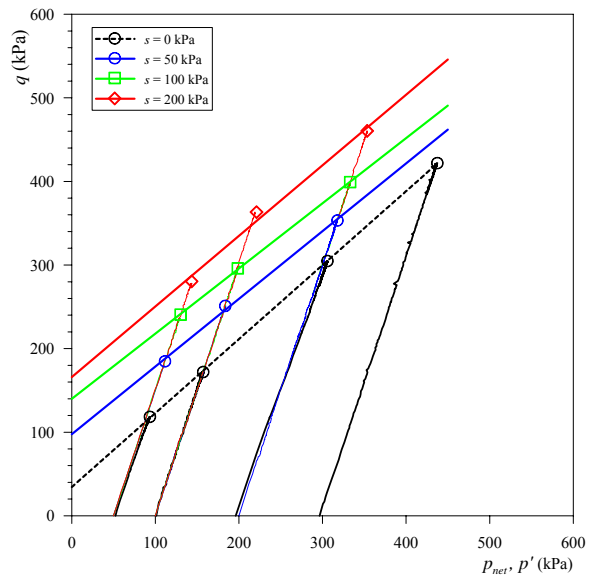


Figura 5. Percorsi di tensione nel piano (p_{net}, q) delle prove di compressione triassiale.

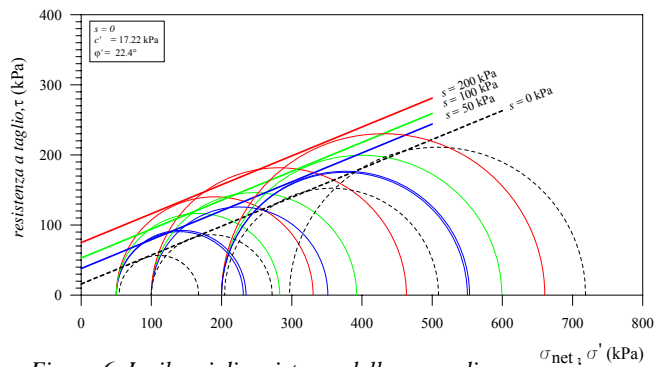


Figura 6. Involupi di resistenza delle prove di compressione triassiale a suzione controllata.

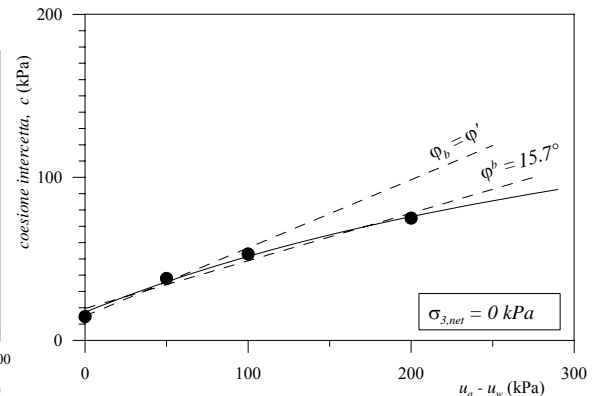


Figura 7. Variazione della "coesione intercetta" con la suzione di matrice.