

EVOLUZIONE DEL COMPORTAMENTO IDRO-MECCANICO DI UNA SABBIA DI QUARZO DALLO STATO SATURO ALLO STATO ASCIUTTO

Marco Rosone

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
marco.rosone@unipa.it*

Vincenzo Buttice

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
vincenzo.buttice@unipa.it*

Maurizio Ziccarelli

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
maurizio.ziccarelli@unipa.it*

Alessio Ferrari

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria;
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratory of Soil Mechanics.
alessio.ferrari@unipa.it*

Sommario

La nota presenta i risultati di un lavoro sperimentale condotto con lo scopo di analizzare il comportamento idro-meccanico di una sabbia quarzosa per un ampio intervallo del grado di saturazione. Per analizzare le caratteristiche di ritenzione del materiale e per investigare la relazione tra la tensione di snervamento e la suzione di matrice sono state eseguite prove edometriche a suzione controllata e a contenuto d'acqua costante. I risultati ottenuti mostrano che la tensione di snervamento della sabbia non aumenta monotonamente con la suzione. Tale andamento è caratterizzato da un punto di massimo e da valori della tensione di snervamento sostanzialmente coincidenti per la condizioni satura e asciutta. Questo aspetto, non considerato finora dai modelli elasto-plastici per i terreni non saturi, conferma una delle principali ipotesi della classica Meccanica dei Terreni, secondo cui il comportamento meccanico di mezzi granulari saturi e asciutti è lo stesso se descritto in termini di tensioni efficaci.

1. Introduzione

Gli effetti della suzione sulle proprietà idrauliche e sulla resistenza al taglio delle sabbie non sature (es. Donald, 1956; Bishop & Donald, 1961; Lins & Schanz, 2005) sono ben noti in letteratura; tuttavia, poche ricerche fino ad ora si sono concentrate sul comportamento volumetrico dei mezzi granulari nello stato parzialmente saturo. In particolare, sono disponibili un numero davvero molto limitato di evidenze sperimentali sulla caratterizzazione della tensione di snervamento dei terreni sabbiosi non saturi (ad es. Lawton et al., 1989; Vilar & Rodrigues, 2011; Ferrari et al., 2013).

La valutazione delle condizioni di snervamento anche nel campo non saturo consente di prevedere il possibile verificarsi di deformazioni plastiche sotto varie condizioni ambientali, anche estreme. In questo ambito, la capacità di prevedere il comportamento idromeccanico dei terreni sabbiosi quando si avvicinano alle condizioni asciutte è fondamentale nelle zone classificate come aride o sub-aride, come l'area mediterranea, in cui l'evaporazione durante l'estate potrebbe causare il completo

essiccamento del terreno negli strati più superficiali.

Come è noto, il classico approccio della Meccanica dei Terreni prevede che il comportamento di un terreno sabbioso asciutto sia simile a quello di un terreno saturo, a condizione che la risposta idromeccanica sia descritta in termini di tensioni efficaci. A tal proposito, Donald (1956) ha dimostrato che la resistenza al taglio disponibile dei terreni sabbiosi non saturi tende, dopo un aumento iniziale, alla resistenza al taglio in condizioni di completa saturazione quando la suzione raggiunge valori elevati. Un comportamento simile dovrebbe attendersi anche per l'evoluzione della tensione di snervamento con la suzione ma, a conoscenza degli autori, tale evidenza sperimentale non è stata ancora fornita. Per di più, i modelli elasto-plastici che descrivono il comportamento volumetrico dei terreni non saturi, formulati sia in termini di tensione media netta (Alonso et al., 1990; Wheeler & Sivakumar, 1995; Sun, et al., 2000; Rampino et al., 2000; Georgiadis et al., 2003) che in termini di tensioni efficaci (Wheeler et al., 2003; Sun & Sun, 2010; Nuth & Laloui, 2007), prevedono per un dato valore di deformazione plastica volumetrica cumulata un aumento monotono della tensione di snervamento con la suzione (*Loading-Collapse Curve, LC*). Questa assunzione implica che la tensione di snervamento allo stato asciutto coincide con il massimo valore ottenibile e risulta certamente maggiore di quella relativa alla condizione satura.

Per far luce su questo aspetto, nella presente nota viene presentato un lavoro sperimentale volto a valutare l'evoluzione della tensione di snervamento di una sabbia di quarzo nell'intero intervallo del grado di saturazione. Pertanto, con questo scopo, sono state condotte prove edometriche a suzione controllata e a contenuto d'acqua costante.

2. Materiali e metodi sperimentali

Il programma sperimentale presentato in questo lavoro comprende la determinazione della curva di ritenzione idrica in essiccamento, nonché l'esecuzione di prove edometriche a suzione controllata e a contenuto d'acqua costante (Butticè et al., 2020; Butticè, 2021). La sabbia di quarzo utilizzata in questa ricerca ha una granulometria compresa tra 0.07 e 0.85 mm ($C_u = 1.4 \div 1.6$) e peso specifico pari a 26 kN/m³. I provini da sottoporre a prova in edometro a suzione controllata sono stati preparati in condizioni di completa saturazione, utilizzando il metodo della pluviazione in acqua. La sabbia asciutta è stata versata, attraverso un imbuto, all'interno di anello edometrico riempito d'acqua. Tale operazione è stata eseguita per gradi, al fine di verificare l'uniformità della distribuzione della sabbia all'interno dell'anello edometrico (diametro $d = 33$ mm e altezza $h = 11$ mm). Al termine della procedura, ogni strato di sabbia è stato livellato e l'altezza del campione è stata misurata per verificare il valore dell'indice di porosità raggiunto. La stessa procedura sperimentale è stata seguita per la preparazione dei provini su cui è stata determinata la curva di ritenzione, con la sola differenza delle dimensioni dell'anello ($d = 60$ mm e $h = 20$ mm).

I provini per le prove edometriche a contenuto d'acqua costante sono stati preparati mediante compattazione manuale del materiale precedentemente umidificato. Tre strati di sabbia sono stati compattati in un anello edometrico avente $d = 56$ mm e $h = 20$ mm. Per ridurre al minimo il fenomeno dell'evaporazione durante la preparazione dei provini, la sabbia umida necessaria per ogni strato è stata conservata in piccoli barattoli di vetro chiusi ermeticamente. La sabbia è stata versata in piccole quantità (25 g al massimo) per ottenere una stesura uniforme dello strato. Al termine della compattazione dell'ultimo strato, è stata verificata l'altezza del provino e la regolarità della superficie. L'indice di porosità iniziale per tutte le prove condotte è stato pari a 0.77.

Per effettuare il controllo della suzione di matrice s nell'intervallo $s = 0 \div 20$ kPa è stata utilizzata la tecnica della colonna negativa d'acqua. Una membrana microporosa di cellulosa (spessore 0.1 mm, dimensione dei pori pari a 0.45 μ m, valore di ingresso dell'aria pari a 250 kPa e permeabilità pari a $2 \cdot 10^{-8}$ m/s) è stata posta tra il terreno e la piastra di drenaggio inferiore della cella edometrica. Quest'ultima è stata collegata ad una buretta per imporre una pressione negativa all'acqua di porosità del terreno.

Per determinare la curva di ritenzione idrica, la suzione è stata aumentata per step successivi, mantenendo una tensione verticale totale costante pari 1.75 kPa. Ogni fase di equalizzazione alla suzione imposta si è considerata conclusa al raggiungimento della condizione stazionaria, caratterizzata da un contenuto d'acqua costante. Nel corso di tali prove non è stata misurata una variazione significativa del volume del provino, tanto che esse possono essere considerate a indice di porosità costate. Le variazioni del contenuto d'acqua dei provini sono state monitorate attraverso una buretta (avente risoluzione in termini di contenuto d'acqua pari a $\pm 0.7\%$), la cui posizione è stata continuamente regolata per mantenere un valore costante della suzione imposta. Per tenere conto dell'effetto dell'evaporazione e correggere i risultati delle prove, è stata utilizzata una seconda buretta di monitoraggio identica alla precedente. Gli spostamenti verticali sono stati misurati attraverso l'utilizzo di un LVDT (risoluzione 1 μm) e corretti tenendo conto della deformazione dell'apparecchiatura.

Lo stesso set-up sperimentale è stato utilizzato per eseguire le prove edometriche e determinare l'evoluzione della tensione di snervamento con la suzione. Il carico, applicato attraverso un sistema a leve, è stato incrementato per step successivi da un minimo di 30 kPa a un massimo di 12 MPa, mentre la suzione veniva mantenuta costante. Complessivamente sono state eseguite nove prove a suzione controllata. Tutti i test sono stati condotti in una stanza a temperatura controllata ($T=21\text{ }^{\circ}\text{C}$) mentre l'umidità relativa della stanza è stata semplicemente monitorata (in media pari al 40%).

In parallelo, sono state condotte diciannove prove edometriche a contenuto d'acqua costante. I contenuti d'acqua dei provini erano compresi nell'intervallo $w = 2.4\div 21.4\%$. I provini sono stati installati in celle edometriche convenzionali in cui due dischi impermeabili sono stati sostituiti alle tradizionali piastre porose. Inoltre, l'intera cella è stata isolata dall'ambiente esterno per mezzo di una membrana impermeabile. Cinque provini sono stati preparati utilizzando una sabbia asciutta. Il carico verticale è stato aumentato per step successivi fino al valore massimo corrispondente a 6 MPa. Il contenuto d'acqua è stato misurato sia all'inizio che alla fine di ogni prova, per verificare che non si fosse verificata un'evaporazione significativa. La variazione massima del contenuto d'acqua misurato è stata inferiore allo 0.4%. Per effetto delle deformazioni volumetriche indotte dal carico, le variazioni del grado di saturazione sono state limitate all'intervallo $0.3\div 4.9\%$, tanto che le prove possono essere considerate a grado di saturazione quasi costante.

3. Analisi dei risultati

La curva di ritenzione di principale essiccamento della sabbia di quarzo è rappresentata in Fig. 1a in termini di grado di saturazione (S_r) e suzione di matrice (s). I punti sperimentali sono stati interpolati utilizzando l'espressione della curva di ritenzione nella forma di Van Genuchten (1980):

$$S_r = S_{r,res} + \frac{1 - S_{r,res}}{\left[1 + (\alpha s)^n\right]^m} \quad (1)$$

dove $S_{r,res}$ è il grado di saturazione residuo (pari a 0.01), α è un parametro di fitting legato all'inverso del valore di ingresso dell'aria mentre n e m sono dei parametri di fitting che intervengono sull'inclinazione della curva. I parametri che consentono una migliore interpolazione della curva sono i seguenti $\alpha = 0.46\text{ kPa}^{-1}$, $n = 3.38$, $m = 0.74$ e $S_{r,res} = 0.01$.

La Fig. 1b mostra una selezione dei risultati delle prove edometriche a suzione controllata che consente di seguire l'evoluzione della tensione di snervamento con la suzione. In particolare, le curve edometriche si riferiscono alla condizione satura ($s = 0$), alla condizione parzialmente satura ($s = 4, 5$ e 9 kPa) e alla condizione asciutta. A questi ultimi campioni, sulla base della curva di ritenzione riportata in Fig. 1a, è stata assegnata una suzione pari a $s = 16.6\text{ kPa}$ corrispondente al grado di saturazione residuo del materiale ($S_r = 0.01$).

La tensione di snervamento di ciascuna prova edometrica è stata determinata con il metodo di Boone

(2010) che, rispetto agli altri metodi presenti in letteratura, è meno suscettibile a problemi di scala e lascia una minore incertezza sull'interpretazione dei risultati. Atkinson (1990) suggerisce di utilizzare il termine snervamento solo per descrivere la fine campo elastico delle deformazioni, secondo il significato classico di snervamento nella plasticità. Come è noto, la tensione di snervamento di un terreno granulare non dipende solo dalla massima tensione verticale efficace che il terreno ha sostenuto in passato, ma è strettamente legata alla densità relativa. Difatti, è noto che risulta possibile raggiungere un valore molto elevato di densità relativa senza che si eserciti una reale compressione, ad esempio vibrando il campione. Nell'intervallo di tensione efficace esplorato (fino a 12 MPa), si ritiene che il meccanismo di snervamento sia associato principalmente al riarrangiamento delle particelle (Vaughan, 1988; Coop et al., 1993; McDowell & Bolton, 1998; Nakata et al., 2001; Mesri & Vardhanabhuti, 2009) e che il processo di frantumazione dei grani sia limitato. Per mettere in evidenza questo aspetto, in Fig. 2a vengono riportate le distribuzioni granulometriche di due provini sottoposti a prova (tensione verticale massima pari a 6 e 12 MPa) e di una sabbia di quarzo vergine. Dal confronto, risulta evidente come l'incremento della porzione più fine della sabbia sia al massimo dell'ordine del 2%. Tale risultato conferma l'ipotesi fatta in precedenza riguardo all'effetto della frantumazione dei grani sul meccanismo di deformazioni dei provini costituiti da sabbia di quarzo.

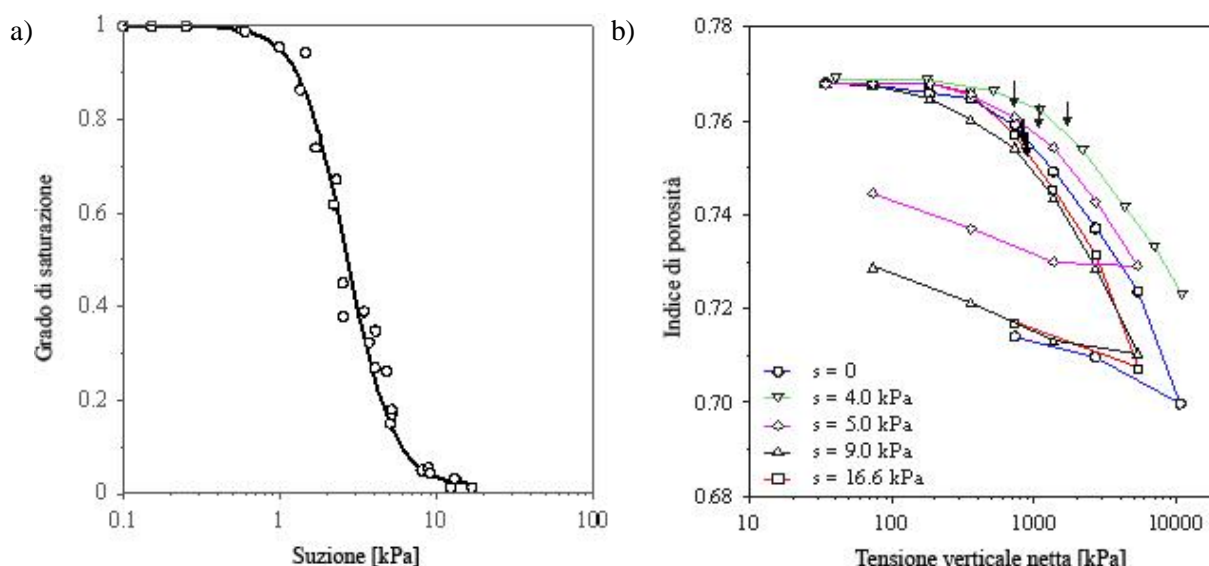


Fig 1. a) Curva di ritenzione della sabbia di quarzo (indice di porosità di riferimento $e = 0.77$); b) Selezione dei risultati delle prove edometriche a suzione controllata eseguite sulla sabbia di quarzo.

Nella Fig. 2b vengono riportati i valori della tensione di snervamento in funzione della suzione di matrice applicata. Nello stesso diagramma vengono riportati anche i punti relativi alle prove a contenuto d'acqua costante. In questo ultimo caso, la suzione è stata determinata ricavando il valore della suzione corrispondente al grado di saturazione medio del provino attraverso la curva di ritenzione idrica della sabbia riportata in Fig. 1a; a questo proposito è opportuno mettere in evidenza che, nell'intervallo del grado di saturazione esplorato con le prove a contenuto d'acqua costante, la curva di ritenzione sul piano semilogaritmico risulta essere sub-verticale. Pertanto, piccoli errori accidentali nella determinazione del grado di saturazione non hanno causato errori significativi nella determinazione della suzione dei provini. I risultati riportati in Fig. 2b mostrano chiaramente che la tensione di snervamento non aumenta monotonamente con la suzione. Dopo un incremento iniziale, si osserva un massimo della tensione di snervamento, seguito da una continua riduzione fino al raggiungimento della condizione asciutta. Inoltre, dalle prove effettuate risulta che la tensione di snervamento in condizioni di completa saturazione è quasi coincidente con la tensione di snervamento allo stato asciutto.

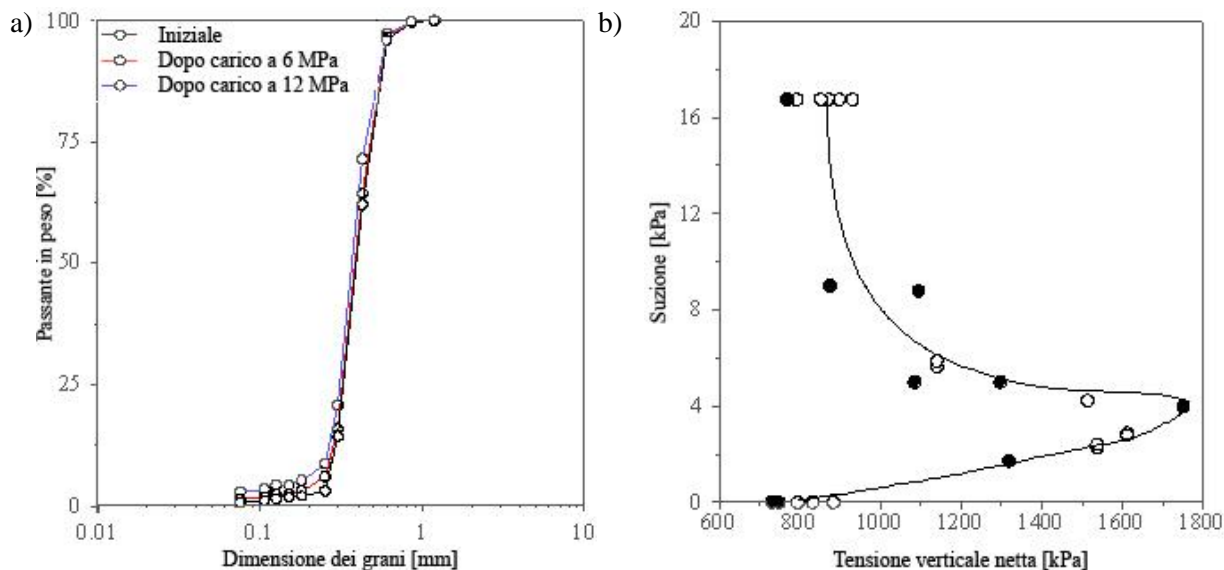


Fig 2. a) Distribuzione granulometrica dei provini di quarzo prima e dopo la prova edometrica a suzione controllata; b) Andamento della tensione di snervamento ottenuta da prove edometriche a contenuto d'acqua costante (simboli bianchi) e da prove a suzione controllata (simboli neri) in funzione della suzione applicata.

4. Conclusioni

La nota ha presentato i risultati di un'estesa campagna sperimentale volta a valutare l'evoluzione della tensione di snervamento di una sabbia quarzosa dalla condizione di completa saturazione a quella di completo essiccamento. In particolare, l'evoluzione della tensione di snervamento in condizioni edometriche è stata quantificata per diversi livelli di suzione ritenuti significativi per il materiale investigato. Attraverso i risultati ottenuti, è stato messo in evidenza che, a differenza di quanto previsto dai classici modelli elasto-plastici per terreni non saturi, la tensione di snervamento non aumenta monotonamente con la suzione. Difatti, la *Loading-Collapse curve* ottenuta per la sabbia di quarzo investigata, è inizialmente crescente, presenta un punto di massimo e poi decresce fino alle condizioni asciutte. Tale andamento dimostra che la tensione di snervamento per la condizione satura sostanzialmente coincide con quella ricavata nelle condizioni asciutte. Nonostante siano già presenti in letteratura diverse definizioni della *Loading-Collapse curve* per una ampia varietà di terreni (ad esempio Wheeler & Sivakumar, 1995; Maatouk et al., 1995; Sharma, 1998; Sun et al., 2003; Thu & Rahardjo, 2007; Lerouiel & Barbosa, 2000; Airò Farulla et al., 2010; Vilar & Rodrigues 2011; Ferrari et al., 2013), tale peculiarità non era stata ancora messa in evidenza a causa della mancanza di punti sperimentali per bassi valori del grado di saturazione. Questo andamento della tensione di snervamento con la suzione risulta più coerente con quanto osservato per altre proprietà geotecniche delle sabbie non sature (ad esempio per la resistenza al taglio e per la conducibilità idraulica, Donald, 1956; Bishop & Donald, 1961; Lins & Schanz, 2005) e potrà essere incluso nei modelli costitutivi che ne vogliano descrivere il comportamento in tutto l'intervallo di variazione del grado di saturazione.

Bibliografia

- Airò Farulla C., Ferrari A., Romero E. (2010). "Volume change behaviour of a compacted scaly clay during suction changes. *Can. Geotechnical. J.* 47 No. 6, 688-703.
- Alonso E.E., Gens A., Josa A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils". *Géotechnique* 40, 3, 404-430.
- Atkinson J.H. (1990) "Discussion of session 1.2.". Proc. of the conf. on Engineering Geology of Weak Rock, Leeds, Balkema, Rotterdam, p. 150.
- Boone S.J. (2010), "A critical reappraisal of "preconsolidation pressure" interpretations using the oedometer

test". *Can. Geotechnical. J.* 47, 3, 281-296.

Butticè V. (2021). "Volumetric behaviour of soils experiencing wide changes in the degree of saturation". Ph.D. thesis. Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italy.

Butticè V., Ferrari A., Rosone M. (2020). "Yielding of a quartz sand from saturated to dry state". E3S Web Conf. 195, 03038.

Coop M.R., Lee I.K. (1993). "The behaviour of granular soils at elevated stresses". Predictive Soil Mechanics Wroth Memorial Symposium: Predictive soil mechanics, London, 186-198.

Donald I.B. (1956). "Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressure". 2nd Australia – New Zealand Conf. Soil Mech. Found Eng. Christchurch, New Zealand. 200-205.

Ferrari A., Eichenberger J., Laloui L. (2013). "Hydro-mechanical behaviour of a volcanic ash". *Géotechnique* 63, 11, 1433-1446.

Georgiadis K., Potts D.M., Zdravkovic L. (2005). "Three-Dimensional constitutive model for partially and fully saturated soils". *Int. J. Geomechanics ASCE*, 5, No.3, 244.

Lawton E. C., Fragaszy R.J., Hardcastle J. H (1989). "Collapse of compacted clayey soils". *ASCE J. of geotech. Eng.* 115, 9, 1252-1267.

Leroueil S., Barbosa P. S. (2000). "Combined effect of fabric, bonding and partial saturation on yielding of soils". Proc. of the Asian Conf. on Unsaturated Soils, (UNSAT-Asia 2000).

Lins Y., Schanz T. (2005). "Determination of hydro-mechanical properties of sand". Unsaturated Soils: Experimental Studies. Springer Proc.in Physics (Ed T. Schanz) 93, Springer, Berlin, Heidelberg.

Maatouk A., Leroueil S., La Rochelle P. (1995). "Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil". *Géotechnique* 45, No. 3, 465-477.

McDowell G.R., Bolton M.D. (1998). "On the micromechanics of crushable aggregates". *Géotechnique*, 48, 5, 667-679.

Mesri, G., Vardhanabhuti, B. (2009). "Compression of granular materials". *Can. Geotech. J.* 46, 369-392

Nakata Y, Kato Y, Hyodo M, Hyde AFL, Murata H (2001). "One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength". *Soil and Foundation* 41, 2, 39-51.

Nuth M., Laloui L. (2007). "New insight into the unified hydro-mechanical constitutive modelling of unsaturated soils". Proc. of the 3rd Asian Conf. on Unsaturated soils (UNSAT-ASIA 2007) Nanjing, China.

Rampino C., Mancuso C., Vinale F. (2000). "Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil". *Can. Geotech. J.* 37, 748-763.

Sharma R. S. (1998). "Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays". Ph.D. thesis. University of Oxford, England.

Sun D.A., Matsuoka H., Yao Y.P., Ichihara W. (2000). "An elasto-plastic model for unsaturated soil in three-dimensional stress". *Soils and foundations* 40, No. 3, 17-28.

Sun W., Sun D., Li J. (2010). "Elastoplastic modelling of hydraulic and mechanical behaviour of unsaturated expansive soils". Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils, GeoShanghai 2010 Int.Conf. ASCE.

Thu T.M., Rahardjo H., Leong E., (2007). "Soil water characteristic curve and consolidation behaviour for a compacted silt". *Can. Geotechnic. J.* 44, 226-275.

Van Genuchten M.T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil". *Soil Sci Soc Am J* 44, No. 5, 892-898.

Vaughan P.R. (1988). "Characterising the mechanical properties of the in-situ residual soil". 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore, Balkema, Rotterdam, 2, 469-87.

Vilar O.M., Rodrigues R.A. (2011). "Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by rising water table". *Can. Geotechnic. J.* 48, 226-233.

Wheeler S.J., Sharma R.S., Buisson M.S.R. (2003). "Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils". *Geotechnique* 53, 1, 41-54

Wheeler S.J., Sivakumar V. (1995). "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil". *Géotechnique* 46, 1 35-53.