

EFFETTO DELLA SUZIONE E TENSIONE DI CONFINAMENTO SULLA RESISTENZA A TAGLIO DI UNA MISCELA SABBIO-LIMOSA COSTIPATA

Elena Dodaro¹, Gianmario Sorrentino², Roberta Ventini³, Giulia M.B. Viggiani², Guido Gottardi¹

¹*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*
elena.dodaro2@unibo.it, guido.gottardi2@unibo.it

²*Department of Engineering, University of Cambridge*
gs581@cam.ac.uk, gv278@cam.ac.uk

³*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Napoli, Federico II*
roberta.ventini@unina.it

Sommario

La presente nota illustra sinteticamente le fasi di esecuzione e le modalità interpretative di prove triassiali consolidate drenate (TXCD) condotte su una miscela di sabbia e limo argilloso, costipata in condizioni di parziale saturazione. I test a controllo di suzione sono stati eseguiti mediante un'apparecchiatura triassiale a doppia parete, il cui piedistallo è stato equipaggiato con una pietra porosa a elevato valore di ingresso d'aria, al fine di prevenire il fenomeno di cavitazione all'interno delle linee di drenaggio. Nel corso delle prove la suzione target è stata imposta attraverso la tecnica della traslazione degli assi e la variazione di volume dei provini stimata mediante un dispositivo cilindrico a doppia camera, in grado di correlare tali modificazioni alle letture di un sensore di spostamento induttivo (LVDT). I risultati della campagna di indagine, comparati ai corrispettivi ottenuti da prove effettuate in condizioni sature, evidenziano che la suzione contribuisca in maniera significativa alla resistenza a taglio dei terreni e che il suo effetto vari in maniera non lineare in funzione del grado di saturazione e della tensione di confinamento.

1. Introduzione

La determinazione della resistenza a taglio dei terreni costituisce un aspetto cruciale nell'ambito di numerose applicazioni dell'Ingegneria Civile, tra cui la progettazione e valutazione delle condizioni di sicurezza, a breve e a lungo termine, di fondazioni, scavi, opere di sostegno e infrastrutture in terra utilizzate per la regimazione idraulica. Grazie ai costanti avanzamenti tecnologici e delle apparecchiature utilizzate per la compattazione dei materiali da costruzione, non di rado i pendii artificiali risultano caratterizzati da un elevato grado di addensamento. È il caso, ad esempio, dei rilevati arginali fluviali, i quali vengono usualmente costipati per migliorarne le caratteristiche di resistenza e ridurre la permeabilità ai moti di filtrazione. I materiali che costituiscono tali opere in terra sperimentano, per la maggior parte della vita utile, stati di parziale saturazione, a causa delle continue fluttuazioni dei livelli idrometrici delle acque ritenute, delle precipitazioni atmosferiche e dei fenomeni evapo-traspirativi che interessano le porzioni più superficiali. Questi aspetti, generalmente trascurati nella pratica professionale, risultano tuttavia di estrema rilevanza per un'accurata stima delle caratteristiche di filtrazione, dei parametri di ritenzione e della resistenza mobilitata su possibili superfici di scorrimento. Negli ultimi decenni numerosi studi sperimentali sono stati condotti al fine di investigare l'influenza della suzione sulla resistenza a taglio dei terreni (Lu e Likos, 2004; Cattoni et al., 2005; Alonso et al., 2007; Khalili et al., 2010; Fredlund et al., 2012; Ng et al., 2017), tuttavia limitate indagini riguardanti la caratterizzazione idro-meccanica di terreni costipati in condizioni di

parziale saturazione si annoverano in letteratura. In tale contesto, la presente nota intende analizzare i risultati di una serie di prove triassiali a stress-path controllato, effettuata su una miscela sabbio-limosa compattata all'ottimo Proctor standard (ASTM D698-12, 2021). Il range di suzione investigato varia fra 0 (condizione satura) e 50 kPa e la tensione netta applicata fra 50 e 300 kPa; l'intervallo di pressione interstiziale negativa selezionato per lo studio risulta rappresentativo delle variazioni indotte da cicli di drying/wetting stagionali o legati a eventi di piena, ai quali è tipicamente soggetto un rilevato arginale.

2. Proprietà dei materiali testati e modalità di preparazione dei campioni

Una miscela costituita dal 70% in peso di *Sabbia del Ticino* (TS) e dal 30% di *Argilla di Pontida* (PON), adottata nell'ambito del progetto PRIN2017 RedReef (*Risk Assessment of Earth Dams and River Embankment to Earthquakes and Floods*) per la realizzazione del rilevato arginale di un modello fisico rappresentativo degli argini fluviali degli affluenti del fiume Po, ed estesamente caratterizzata in Ventini et al. 2021, è oggetto della presente indagine sperimentale. La TS è una sabbia uniforme da grossolana a media, costituita da frammenti spigolosi e particelle di forma tondeggianti. La PON, invece, è un limo argilloso a bassa plasticità depositato in ambiente lacustre post-glaciale e reperibile presso una cava di materiale fine nei pressi di Bergamo. Le distribuzioni granulometriche dei materiali sono riportate in Figura 1, mentre le principali proprietà fisiche in Tabella 1.

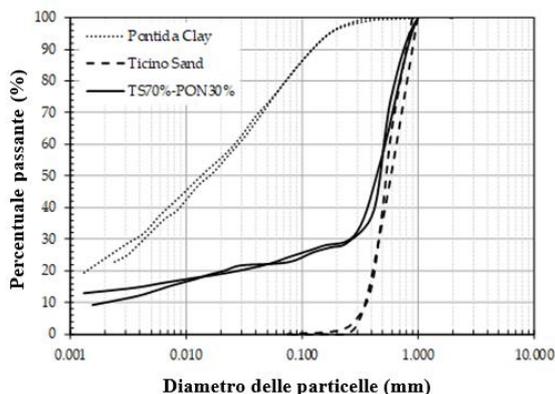


Figura 1. Distribuzioni granulometriche dei materiali testati.

Soil	TS4	PON	TS70%-PON30%
γ_{min} kN/m ³	13,64	-	13,48
γ_{max} kN/m ³	16,67	-	21,30
e_{min}	0,574	-	0,236
e_{max}	0,923	-	0,953
G_s	2,671	2,744	2,684
D_{50} mm	0,574	0,015	0,458
U_c	1,83	-	246,06
LL %	-	23,61	17,66
PL %	-	13,13	10,23
PI %	-	10,48	7,42

Tabella 1. Valori medi delle proprietà fisiche e dei principali indici geotecnici

Al fine di riprodurre in laboratorio condizioni di addensamento simili a quelle dei terreni arginali di sito, la preparazione dei provini triassiali è stata eseguita mediante compattazione con il metodo del *moist tamping* in tre strati, all'ottimum Proctor standard (peso secco dell'unità di volume $\gamma_d = 20,6$ kN/m³; contenuto d'acqua $w = 8,8\%$). La suzione misurata post costipamento è risultata pari a circa 5 kPa, corrispondente a un grado di saturazione dell'82%. La ricostruzione del provino è avvenuta direttamente sul piedistallo di base dell'apparecchiatura triassiale, all'interno di una fustella di diametro pari a 38 mm e altezza di 76 mm; una guaina impermeabile era stata preventivamente disposta al suo interno.

3. Test triassiali a controllo di suzione: setup sperimentale e procedura di prova

3.1 L'apparecchiatura triassiale a stress-path controllato

Le prove triassiali a controllo di suzione sono state svolte presso il *National Research Facility for Infrastructure Sensing* (NRFIS), afferente al Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Cambridge (UK). Il sistema triassiale impiegato per svolgere le prove in oggetto, schematicamente rappresentato in Figura 2, consiste in:

- una *cella triassiale a doppia parete*, costituita da un cilindro interno in vetro entro il quale si installa il provino di terreno e uno coassiale esterno in materiale acrilico (Perspex). Sulla linea

di drenaggio che collega le due celle, è interposto un dispositivo, denominato *Volume Change Device*, deputato alla misurazione delle variazioni di volume totale del provino.

- un *pedistallo di base* equipaggiato con una *pietra porosa a elevato valore di ingresso d'aria* (HAEV = 3 bar), in grado di separare la fase liquida da quella gassosa e prevenire il fenomeno di cavitazione all'interno delle linee di drenaggio;
- un *telaio di carico*, con capacità pari a 50 kPa per l'applicazione della sollecitazione di taglio, attrezzato con un *data logger* per l'acquisizione dei dati di prova (entità del carico, spostamenti e pressione neutra);
- una *cella di carico*, posta a contatto con la testa del provino e collegata a un pistone di diametro pari a 25 mm;
- due *attuatori di pressione idraulici* e uno *pneumatico* deputati rispettivamente al controllo della pressione interstiziale del provino (u_w), della tensione di confinamento (σ_3) e della pressione dell'aria (u_a), necessaria per l'applicazione della suzione;
- un *sensore induttivo di spostamento* (LVDT) connesso rigidamente al pistone, per la registrazione delle variazioni di altezza del provino;
- un *trasduttore di pressione* di capacità pari a 10 bar, installato sulla linea delle pressioni interstiziali, per la misura delle PWP;
- un *software* per l'acquisizione, il monitoraggio e l'elaborazione in tempo reale dei dati di prova.

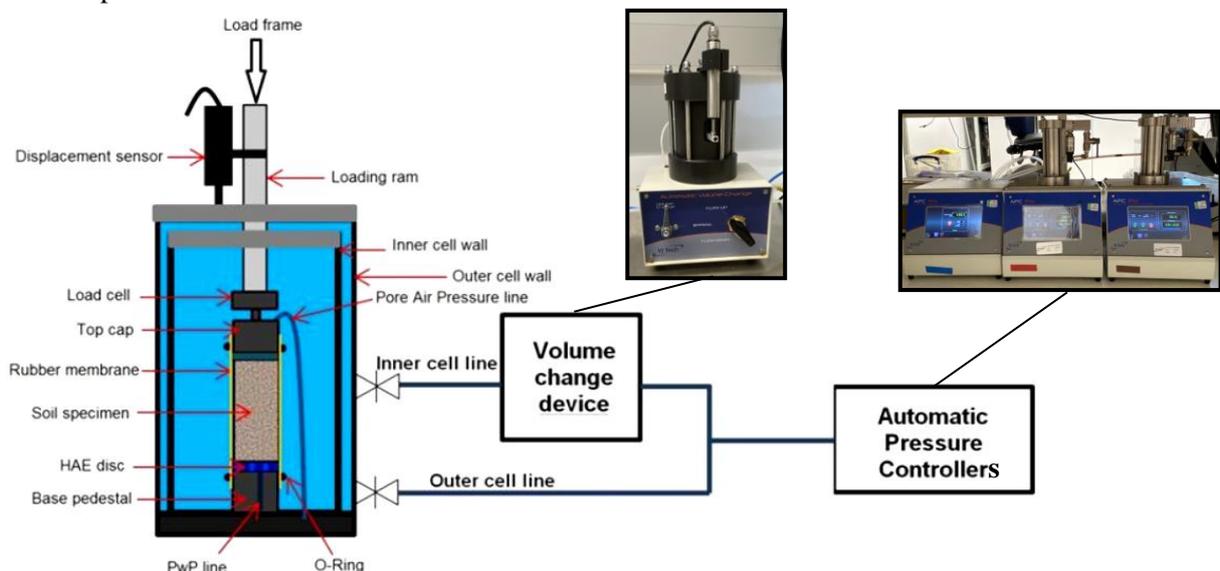


Figura 2. Schema semplificato dell'apparecchiatura triassiale a doppia parete (modificato da VJ Tech, 2020).

3.2 Misurazione delle variazioni di volume

Nei sistemi triassiali standard, impiegati per testare provini di terreno in condizioni sature, la variazione di volume (ΔV) dei campioni può essere semplicemente assimilata alla quantità di fluido entrante o uscente dagli stessi, essendo l'acqua un fluido incompressibile. Al contrario, una delle maggiori difficoltà insite nell'esecuzione di prove triassiali a controllo di suzione consiste proprio nella determinazione della variazione di volume dei provini non saturi, in quanto i vuoti risultano solo parzialmente riempiti d'acqua, mentre il resto del volume è occupato dall'aria. Di conseguenza, applicando un incremento della tensione di confinamento, si verificherà fuoriuscita di acqua dal campione e, contestualmente, una riduzione delle dimensioni complessive, dovuta alla compressione dell'aria. Pertanto, una corretta stima del ΔV richiede sia la misurazione del volume di acqua entrante/uscente dal campione, che del volume totale dello stesso. A tale scopo, nei sistemi triassiali a doppia parete vengono adottati i seguenti accorgimenti: (i) i due compartimenti vengono riempiti di acqua deareata e soggetti alla medesima tensione di confinamento, in modo da sottoporre la cella interna a una pressione differenziale nulla, impedendone la deformazione; (ii) un dispositivo, denominato *Volume Change Device* (mostrato in Figura 2), viene installato sulla linea di drenaggio che

collega la cella interna a quella esterna. L'apparecchiatura, di forma cilindrica e costituita da due camere indipendenti, incorpora un meccanismo idraulico in grado di azionare un pistone, inducendone il movimento verso l'alto o il basso, in funzione della direzione del flusso. Lo spostamento del pistone è proporzionale al volume dell'acqua movimentato, per cui, a seguito di un attento processo di calibrazione, è possibile correlare le due grandezze, ottenendo una stima molto accurata della variazione del volume totale del campione.

3.3 Procedure di prova

Dal momento che non esistono procedure standardizzate per l'esecuzione di test triassiali su terreni insaturi, vi è un'elevata possibilità di adattare le modalità di prova alle esigenze sperimentali, al fine di riprodurre le condizioni di sito. Similmente alle tradizionali prove triassiali, diverse tipologie di test possono essere condotte in condizioni non sature (Fredlund e Rahardjo, 2012): prove consolidate drenate (CD) o a suzione costante (CS), consolidate non drenate con misurazione delle pressioni interstiziali (CU), a contenuto d'acqua costante (CW), test non drenati, test di compressione in assenza di confinamento (UC). L'involuppo di rottura che più comunemente viene utilizzato per l'interpretazione delle prove CS, CW e CU è rappresentato dal criterio di Mohr-Coulomb esteso (Fredlund et al. 1978):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

Dove τ è la resistenza al taglio, c' la coesione efficace, σ la tensione normale, u_a la pressione dell'aria, u_w la pressione interstiziale, ϕ' l'angolo di resistenza al taglio efficace e ϕ^b l'angolo che rappresenta il tasso di incremento di resistenza a taglio dovuto alla suzione di matrice. Nel presente studio sono state condotte prove di tipo CD/CS; si descrive di seguito la procedura di prova applicata.

In seguito alla saturazione del disco poroso HAEV posto sul piedistallo di base, mediante applicazione di una sottopressione (nel caso in esame pari a 40 kPa) per 24 ore e alla preparazione del campione, una pietra porosa secca e il *top cap* vengono disposti sulla testa del provino, per l'applicazione della pressione dell'aria. Successivamente entrambe le celle vengono riempite di acqua deareata e si verifica che all'interno delle linee di drenaggio non vi sia aria intrappolata e che il pistone non risulti in contatto con la testa del provino.

La prima fase del test CD, detta di *equalizzazione*, prevede il raggiungimento di una suzione target attraverso l'applicazione del noto metodo della traslazione degli assi (Hilf, 1956). La tecnica consiste nell'imporre il livello desiderato di tensione media netta ($\sigma - u_a$) e suzione ($u_a - u_w$), agendo sui valori delle pressioni totali, dell'aria e dell'acqua e imponendo valori positivi per quest'ultima. In tal modo, si scongiura il rischio di cavitazione all'interno delle linee di drenaggio e risulta inoltre possibile misurare la pressione neutra tramite trasduttori convenzionali. La fase di equalizzazione si conclude quando non si osserva alcuna variazione di volume del campione. La suzione raggiunta durante tale processo viene mantenuta costante nel corso di tutta la prova.

La seconda fase del test consiste nella *consolidazione* del campione sotto una certa tensione di confinamento. Il provino, soggetto a specifici valori di suzione e tensione media netta, viene lasciato drenare per il tempo necessario a dissipare le sovrappressioni interstiziali, generate dall'aumento di pressione di cella. Tale fase si conclude quando le variazioni di volume del campione risultano trascurabili. La consolidazione eseguita nel corso del presente studio è di tipo *isotropico*.

L'ultima fase della prova triassiale CD è quella di *taglio in condizione drenate*: il provino viene compresso a drenaggi aperti, mantenendo la suzione e la tensione di confinamento costanti, fino al raggiungimento del massimo valore di deviatore, oppure di un valore soglia di deformazione assiale, generalmente pari al 20-25%. L'avanzamento del pistone in fase di compressione è avvenuto a controllo di deformazione assiale, a una velocità di 0,013 %/min.

4. Risultati delle prove e discussione

In questa sezione vengono sinteticamente presentati i risultati delle prove triassiali a controllo di suzione e comparati a quelli ottenuti sotto le medesime tensioni nette di confinamento in condizioni sature. Le prove TXCD in condizioni di totale saturazione sono state condotte nel laboratorio di

Ingegneria Geotecnica dell'Università di Napoli Federico II, mediante l'apparecchiatura triassiale di tipo Bishop & Wesley, su provini aventi le medesime dimensioni di quelli parzialmente saturi ($d=38$ mm; $h=76$ mm). La campagna sperimentale prevedeva complessivamente 12 prove, di cui:

- sei eseguite in condizioni sature (suzione $s=0$ kPa) con tensioni di confinamento di 50, 75, 100, 150, 200 e 300 kPa;
- tre in presenza di una suzione pari a 30 kPa, con tensioni di confinamento pari a 150, 200 e 300 kPa;
- tre con un livello di suzione pari a 50 kPa, con tensioni di confinamento di 75, 150 e 200 kPa.

In Figura 3 viene mostrato l'andamento della tensione deviatorica, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$, in funzione della deformazione assiale, ϵ_a , a differenti livelli di suzione e di tensione netta di confinamento. Le curve tensione-deformazione rappresentate in Fig. 3a mostrano un comportamento tipico per un materiale sabbioso denso: lo sforzo deviatorico cresce in funzione della deformazione assiale, raggiungendo un picco di resistenza intorno al 4-5% di ϵ_a ; in seguito, si osserva una decrescita fino al raggiungimento dello stato critico. Le Figure 3b e 3c mostrano, invece, i risultati delle prove triassiali non sature. A parità di tensione di confinamento, i picchi deviatorici registrati nel corso delle prove svolte in condizioni sature risultano quasi sempre inferiori rispetto ai corrispettivi osservati durante i test condotti in regime di parziale saturazione, proprio per effetto della suzione matriciale. In generale incrementi di suzione e tensione di confinamento si traducono in picchi deviatorici significativamente più elevati e, di conseguenza, in una resistenza a taglio maggiore. L'aumento di suzione non sembra tuttavia influenzare la forma della curva sforzi-deformazioni.

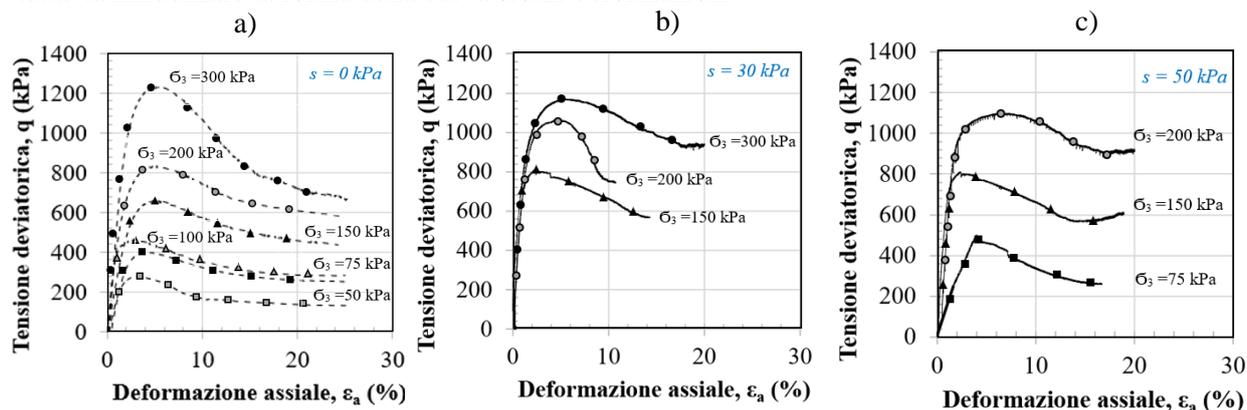


Figura 3. Andamento della tensione deviatorica in funzione della deformazione assiale, in presenza di differenti tensioni di confinamento e livelli di suzione: a) $s=0$ (condizioni sature); b) $s=30$ kPa; c) $s=50$ kPa.

In Figura 4 sono invece rappresentate le *critical state lines* (CSLs) e le *peak state lines* (PSLs) che interpolano rispettivamente i valori di tensione deviatorica, q , e di tensione media efficace, $p' = (\sigma_1 - 2\sigma_3)/3 - u_a$, registrati in corrispondenza della massima tensione deviatorica e dello stato critico, nel caso delle prove triassiali effettuate in condizioni sature e con un livello di suzione pari a 50 kPa. Le CSLs e le PSLs non sature risultano parallele a quelle sature, come già evidenziato in Wang et al. (2002); di conseguenza la pendenza della retta, M , e il coefficiente λ risultano indipendenti dalla suzione di matrice e possono essere determinati dalla CSL satura. Inoltre, la traslazione verso l'alto delle rette non sature rispetto al caso $s=0$ kPa suggerisce l'insorgenza di una coesione apparente.

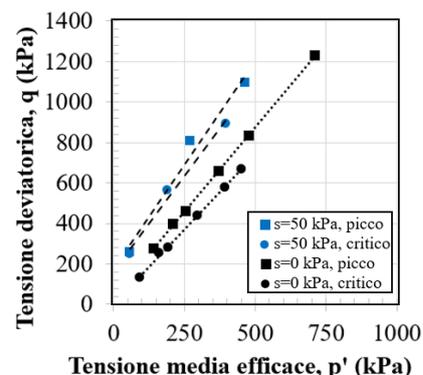


Figura 4. Rappresentazione della CSL e della PSL nel caso $s=0$ kPa e $s=50$ kPa.

5. Conclusioni

Una serie di prove triassiali standard e a controllo di suzione è stata condotta su una miscela sabbio-limoso costipata, allo scopo di investigare gli effetti della suzione di matrice e della tensione di confinamento sulla resistenza a taglio dei terreni impiegati per la realizzazione di infrastrutture in terra. Lo studio comparativo si è basato su 12 prove triassiali, di cui sei condotte in condizioni sature, impiegando un'apparecchiatura triassiale tradizionale e altrettante in presenza di livelli di suzione costanti, pari rispettivamente, per ciascuna terna, a 30 e 50 kPa. Queste ultime sono state effettuate mediante l'impiego di un sistema triassiale a doppia parete, equipaggiato con una pietra porosa a elevato valore di ingresso d'aria, imponendo la suzione target con la tecnica della traslazione degli assi. I risultati dei test hanno evidenziato un significativo incremento della resistenza a taglio del terreno in esame, all'aumentare della suzione matriciale e della tensione di confinamento. Le PSLs e le CSLs non sature, rappresentate sul piano q-p', sono risultate parallele a quelle sature e traslate verso valori crescenti di tensione deviatorica. Ulteriori indagini sperimentali saranno condotte su provini parzialmente saturi, applicando stati di suzione e tensione netta di confinamento variabili, al fine di simulare con maggiore attendibilità l'interazione terreno-atmosfera e i cicli di essiccamento/imbibizione, cui sono tipicamente soggette le opere in terra, quali dighe e argini fluviali.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito delle attività del progetto PRIN 2017 denominato Risk Assessment of Earth Dams and River Embankment to Earthquakes and Floods (REDREEF, prot. 2017YPMBWJ), finanziato dal Ministero dell'Istruzione, della Università e della Ricerca, oggi Ministero dell'Università e della Ricerca.

Bibliografia

- Alonso E., Iturralde F. O., Romero E. (2007). "Dilatancy of Coarse Granular Aggregates." In *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Springer, Berlin, 119–135.
- ASTM D698-12. (2021). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))." ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Cattoni E., Cecconi M., Jommi C. (2005). "Soil Dilatancy and Suction: Some Remarks on Their Mutual Effects on the Shear Strength of Granular Soils". Proc. 11th Int. Conf. on Computers Methods and Advances in Geomechanics, Torino.
- Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A. (1978). "The shear strength of unsaturated soil". *Canadian Geotechnical Journal* 15(3), 313–321.
- Fredlund, D. G., Rahardjo H., Fredlund M.D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley and Sons Inc., New York.
- Hilf, J. W. (1956). "An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils". Doctoral diss., University of Colorado, Boulder.
- Khalili, N., S. Zargarbashi. (2010). "Influence of hydraulic hysteresis on effective stress in unsaturated Soils." *Géotechnique*, 60 (9), 729–734.
- Lu N., Likos W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. Wiley and Sons Inc., New York.
- Ng C.W.W., Sadeghi H., Jafarzadeh F. (2017). "Compression and Shear Strength Characteristics of Compacted Loess at High Suctions", *Canadian Geotechnical Journal*, 54 (5), 690–699.
- Ventini R., Dodaro E., Gragnano C.G., Giretti D., Pirone M. (2021). Experimental and numerical investigations of a river embankment model under transient seepage conditions. *Geosciences* 11 (5), 192.
- Wang Q., Pufahl D.E., Fredlund D.G. (2002). A study of critical state on an unsaturated silty soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 213-218.