

UN MODELLO DI CURVA DI RITENZIONE PER TERRENI ARGILLOSI COMPATTATI

Gabriele Della Vecchia
Politecnico di Milano
gabriele.dellavecchia@polimi.it

Cristina Jommi
Delft University of Technology
C.Jommi@tudelft.nl

Anne-Catherine Dieudonné
Université de Liège, FNRS Brussels
ac.dieudonne@ulg.ac.be

Sommario

La nota presenta un modello di curva di ritenzione che tiene conto dell'evoluzione della struttura bimodale delle argille compattate lungo percorsi di carico idro-meccanico generalizzati. Nel modello, i meccanismi di ritenzione intra- e inter-aggregato vengono simulati separatamente utilizzando l'espressione analitica di van Genuchten (1980). Il modello di ritenzione permette di derivare un modello di distribuzione della dimensione dei pori, che può essere calibrato attraverso dati sperimentali di porosimetrie a intrusione di mercurio. La procedura, applicata a dati ottenuti da prove effettuata su Boom clay compattata, consente di mettere in evidenza l'evoluzione dei parametri della curva di ritenzione in funzione dello stato idro-meccanico del materiale, sia a livello globale che a livello micro-strutturale. Le previsioni del modello di ritenzione così ottenuto vengono infine confrontate con dati sperimentali dello stesso materiale ottenuti con tecniche differenti.

1. Introduzione

Negli ultimi anni molta attenzione è stata posta a livello europeo sul comportamento dei materiali argillosi compattati, con riferimento al loro utilizzo come barriere per lo stoccaggio di rifiuti in formazioni rocciose. In questo contesto, i materiali argillosi sono soggetti a sollecitazioni di diversa natura. Il materiale compattato, inizialmente in condizioni non sature, è soggetto a imbibizione a causa del materiale roccioso circostante, che può trovarsi in condizione sature. Durante questo processo, l'argilla compattata tende a rigonfiare e, nel caso il rigonfiamento sia impedito, a sviluppare tensioni di compressione. In ogni caso, al processo di imbibizione è legata una variazione delle proprietà che regolano il trasporto di fluidi nel mezzo (Villar & Lloret 2002; Ye et al. 2009).

Tra gli aspetti che influenzano significativamente la risposta ingegneristica delle barriere argillose, la curva di ritenzione ha sicuramente un ruolo di prim'ordine. I lavori di Romero et al. (1999), Cuisinier & Laloui (2004), Della Vecchia (2009), Monroy et al. (2010), Wang et al. (2012) mettono in evidenza come il comportamento idraulico delle argille compattate sia ben interpretabile attraverso il quadro concettuale dei materiali a doppia struttura. Evidenze sperimentali, ottenute sia attraverso microscopia a scansione che porosimetrie a intrusione di mercurio, mettono in evidenza chiaramente la presenza di una struttura composta di aggregati e di vuoti inter-aggregato (macropori). Gli aggregati a loro volta sono dei mezzi porosi, caratterizzati al loro interno da vuoti intra-aggregato (micropori). Nonostante la netta influenza della struttura sul comportamento idro-meccanico delle argille compattate, non sono molti i modelli di curva di ritenzione presenti in letteratura che ne tengono esplicitamente conto. Recentemente, la presenza di due livelli strutturali è stata esplicitamente presa in considerazione nel lavoro di Zhang & Chen (2005). In questo modello tuttavia non è inclusa la natura evolutiva della microstruttura, che varia significativamente a seguito di sollecitazioni idro-meccaniche. L'influenza dell'evoluzione della microstruttura delle argille compattate

sulle proprietà di ritenzione è stata esplicitamente intradotta nei lavori di Simms & Yanful (2002), Romero et al (2011) e Della Vecchia et al. (2013).

In questa nota viene presentato un modello di curva di ritenzione che, affiancato al corrispondente modello di evoluzione della funzione di densità dei pori, si propone di modellare il comportamento idraulico dei materiali argillosi compattati, prendendo in considerazione esplicitamente l'evoluzione del dominio micro- e macro-strutturale. Il modello viene calibrato e validato sulla base di dati sperimentali ottenuti su un'argilla compattata di media attività, detta Boom clay (Della Vecchia, 2009).

2. Un modello di curva di ritenzione legato alla distribuzione di densità dei pori

Il modello di curva di ritenzione proposto da Della Vecchia (2009) e Romero et al. (2011), sviluppato per tenere in conto l'evoluzione della microstruttura durante percorsi idro-meccanici è strutturato formalmente attraverso la definizione di un regime di ritenzione 'intra-aggregato', sempre attivo, ma dominante a suzioni elevate (cioè maggiori di un valore limite s_m) e caratterizzato dall'essere indipendente dall'indice dei vuoti, e da un regime di ritenzione 'inter-aggregato', attivo per suzioni inferiori a s_m . Nel modello, la dipendenza del valore di entrata dell'aria dall'indice dei vuoti e dalla dimensione degli aggregati è introdotta implicitamente imponendo la continuità della funzione di ritenzione e della sua derivata per il valore di suzione s_m .

Il modello presentato in questa nota è viceversa concepito per tenere in conto della struttura aggregata delle argille compattate esplicitamente, sovrapponendo due curve di ritenzione elementari, ciascuna caratteristica di un dominio strutturale. In particolare, il dominio di ritenzione di ciascun livello strutturale è definito attraverso la semplice equazione di van Genuchten (1980). L'indice dei vuoti riempito d'acqua e_w (rapporto tra volume dell'acqua e il volume delle particelle solide) viene semplicemente ottenuto come somma dell'indice dei vuoti riempito d'acqua della micro-struttura e_{wm} (rapporto tra volume d'acqua presente nella micro-struttura e il volume delle particelle solide) e quello della macro-struttura e_{wM} (rapporto tra volume d'acqua presente nella macro-struttura e il volume delle particelle solide):

$$e_w(s) = e_{wm} + e_{wM} = e_m[1 + (\alpha_m s)^{n_m}]^{-m_m} + (e - e_m)[1 + (\alpha_M s)^{n_M}]^{-m_M} \quad (1)$$

dove e e e_m sono rispettivamente l'indice dei vuoti totale e della micro-struttura, α è un parametro legato al valore di entrata dell'aria e n e m sono due parametri di calibrazione del modello. In particolare n è legato al tasso di desaturazione della curva, mentre m è legato alla curvatura della curva di ritenzione per alti valori di suzione. I pedici m e M stanno per microstruttura e macrostruttura, rispettivamente.

Partendo dall'espressione della curva di ritenzione, attraverso il legame tra suzione s e il diametro equivalente dei pori R fornito dall'equazione di Washburn (sotto l'ipotesi di mezzo poroso costituito da tubi cilindrici), è possibile ottenere la corrispondente funzione di distribuzione della densità dei pori, PSD. Facendo riferimento per semplicità ad un mezzo monomodale, ovvero caratterizzato da un singolo livello strutturale e quindi da un solo meccanismo di ritenzione, il legame tra la distribuzione cumulata dei pori, $F(R)$, la densità di probabilità dei pori, $f(R)$, e la curva di ritenzione espressa in termini di saturazione, $Sr(s)$, è semplicemente

$$F(R) = \int_{R_{min}}^R f(r) dr = Sr(s) \quad (2)$$

La funzione di distribuzione della dimensione dei pori, (pore size density function), PSD, può essere ottenuta attraverso la relazione

$$PSD = \frac{de}{d \log(r)} = ef(R) \cdot R \cdot \ln(10) \quad (3)$$

E' evidente come una variazione dei parametri α , n e m non solo implica una variazione nelle previsioni del modello di curva di ritenzione del materiale, ma implica necessariamente anche una diversa distribuzione della dimensione dei pori del materiale. In particolare, nel piano PSD - log r, dove con r si indica il raggio equivalente dei pori, la variazione di ciascun parametro è legata ad una specifica tipologia di evoluzione della distribuzione dei pori, come evidenziato nelle Figure 1a, 1b e 1c, ottenute per semplicità considerando un solo livello strutturale. In particolare, il parametro α è legato alla posizione sull'asse r della moda della PSD, mentre n e m sono legate all'ampiezza e alla norma della distribuzione della dimensione dei pori.

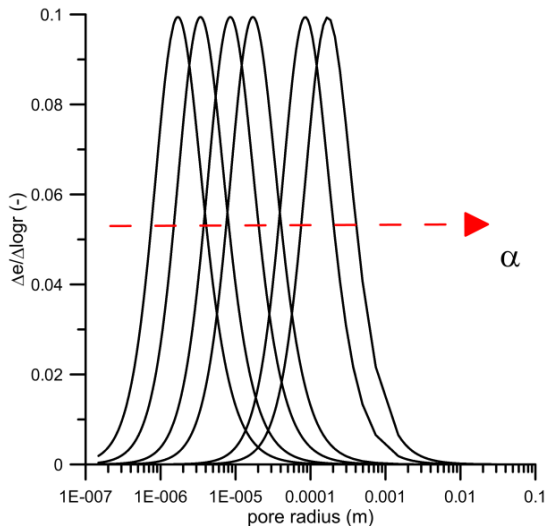


Fig 1a. Effetto del parametro α sulla distribuzione della dimensione dei pori.

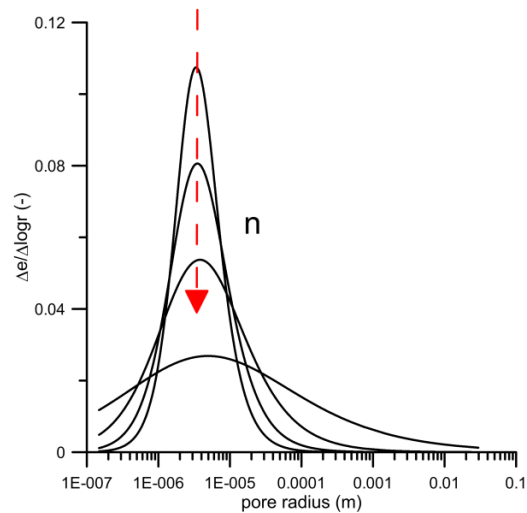


Fig 1b. Effetto del parametro n sulla distribuzione della dimensione dei pori.

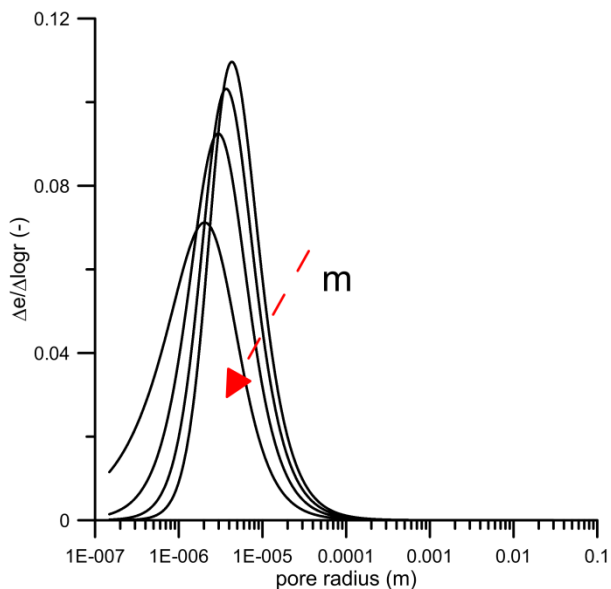


Fig 1c. Effetto del parametro m sulla distribuzione della dimensione dei pori.

3. Calibrazione del modello di distribuzione dei pori

Il modello di distribuzione della dimensione dei pori è stato calibrato a partire dai dati di porosimetria a intrusione di mercurio su Boom clay presentati da Della Vecchia (2009). In particolare i dati sperimentali in termini di PSD, ottenuti su provini soggetti a diversi percorsi di carico idro-meccanico, sono stati utilizzati per la calibrazione del modello di distribuzione delle dimensioni dei pori definito dalle equazioni (2) e (3). L'evoluzione della dimensione degli aggregati è stata introdotta attraverso una legge di evoluzione di e_m con il contenuto in acqua simile concettualmente a quella proposta da Romero et al. (2011), ma modificata in modo da avere una legge di evoluzione continua di e_m con e_w :

$$e_m = \beta_0 e_w^2 + \beta_1 e_w + e_{m,0}, \quad (4)$$

dove β_0 e β_1 sono due parametri che quantificano il rigonfiamento degli aggregati e $e_{m,0}$ è l'indice dei vuoti intra-aggregato del materiale secco. I valori ottenuti per la Boom clay sono $\beta_0 = 0.2$, $\beta_1 = 0.05$ e $e_{m,0} = 0.33$.

La calibrazione è stata quindi effettuata cercando di mantenere fisso il valore del maggior numero di parametri possibile, e cercando di mettere in evidenza la dipendenza dei parametri evolutivi dalle variabili di stato idro-meccaniche. I dati presentati in figura 2a evidenziano gli effetti di percorsi di imbibizione sulla distribuzione dei pori del materiale a partire dalle condizioni di compattazione (as-compacted, provino BCC2, $e_0 = 0.97$, $e_{w0} = 0.38$ e $s_0 = 2000$ kPa). Il provino BCC4 è stato sottoposto a un processo di saturazione a volume costante, mentre i provini BCC9 e BCC26 sono stati sottoposti a saturazione in edometro a diversi livelli di pressione verticale, rispettivamente 10 kPa (rigonfiamento libero) e 600 kPa. Si può notare la distribuzione bimodale delle dimensioni dei pori del provino as-compacted, caratterizzata da due picchi, facenti riferimento ai pori intra-aggregato (micro) e inter-aggregato (macro). Si nota inoltre la tipica distribuzione monomodale dei provini saturati, sia in condizioni di rigonfiamento libero che in condizioni isocore. In entrambi, la monomodalità è dovuta alla riduzione della frequenza dei pori inter-aggregato conseguente all'incremento delle dimensioni degli aggregati saturi che rigonfiano al crescere del contenuto in acqua, invadendo parte della struttura porosa inter-aggregato. L'ulteriore riduzione dei pori inter-aggregato del provino BCC6 è dovuta al 'collasso' della macro-struttura legato al processo di imbibizione a un livello tensionale più elevato (600 kPa). Le previsioni del modello a seguito del processo di calibrazione sono riportati in figura 2b.

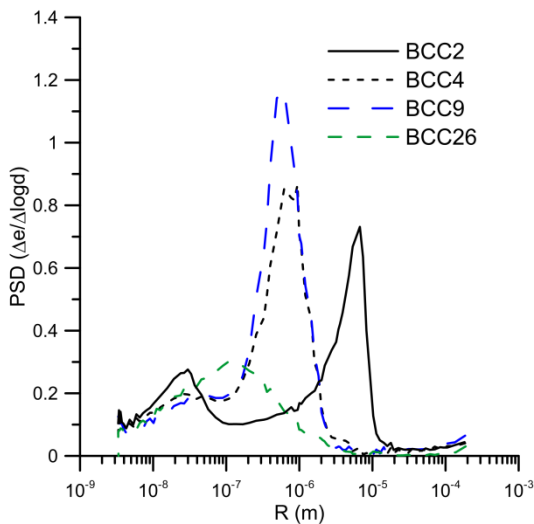


Fig 2a. Boom clay compattata: effetto di processi di imbibizione sulla PSD.

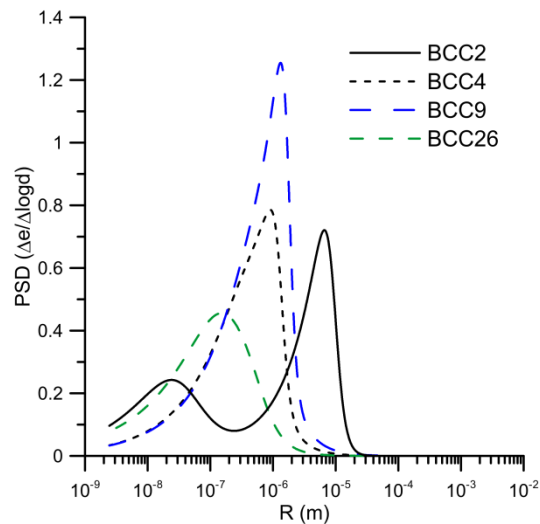


Fig 2b. Calibrazione del modello su processi di imbibizione.

L'effetto sulla distribuzione della dimensione dei pori di processi di compressione meccanica a contenuto in acqua costante è riportato in Figura 3a: si può notare come, per i livelli tensionali indagati, l'effetto di variazione dell'indice dei vuoti dovuto a processi di tipo meccanico influenza essenzialmente i pori inter-aggregato, mantenendo praticamente inalterata la distribuzione dei pori intra-aggregato. Un effetto analogo viene ottenuto con la calibrazione del modello, il cui esito è riportato in Figura 3b. Il provino BCC13 è stato compattato analogamente al provino BCC2, e successivamente sottoposto a prova triassiale in condizioni non drenate, arrivando alla fine del percorso di carico ad un indice dei vuoti $e = 0.90$. Il provino BCC27 è stato viceversa sottoposto a compressione edometrica a contenuto in acqua costante fino a un indice dei vuoti $e = 0.95$. Risultati analoghi sono stati ottenuti su diverse argille compattate, tra cui si possono citare la London clay (Monroy et al. 2010), la FoCa clay (Lloret et al. 2003), lo Speswhite kaolin (Tarantino & DeCol 2008) e l'argilla a scaglie di Palermo (Airò Farulla et al. 2011, Della Vecchia et al. 2012).

La fase di calibrazione ha messo in mostra che alcuni parametri possono essere considerati costanti (ad esempio n_m , m_m e m_M), mentre altri mostrano una significativa dipendenza dallo stato del materiale. Un esempio di correlazione è riportato in figura 3, dove viene evidenziata una dipendenza esponenziale tra $1/\alpha_m$ (ovvero il valore di entrata dell'aria nei micropori) e l'indice dei vuoti microstrutturale e_m . È interessante notare che una relazione dello stesso tipo è stata individuata anche attraverso il processo di calibrazione effettuato sui dati di porosimetrie effettuate su provini di London clay compattata (Monroy et al. 2010).

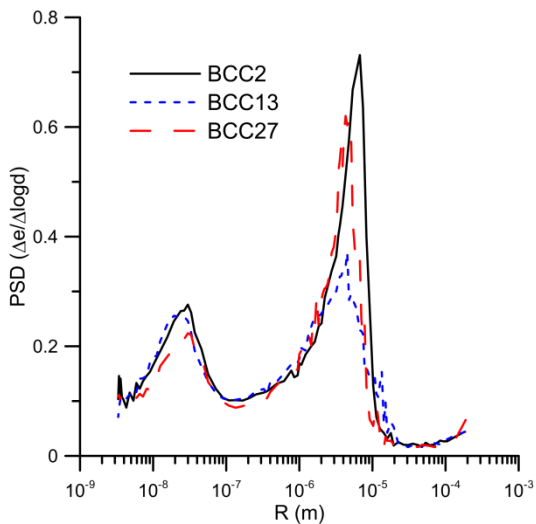


Fig 3a. Boom clay compattata: effetto di processi di compressione meccanica sulla PSD.

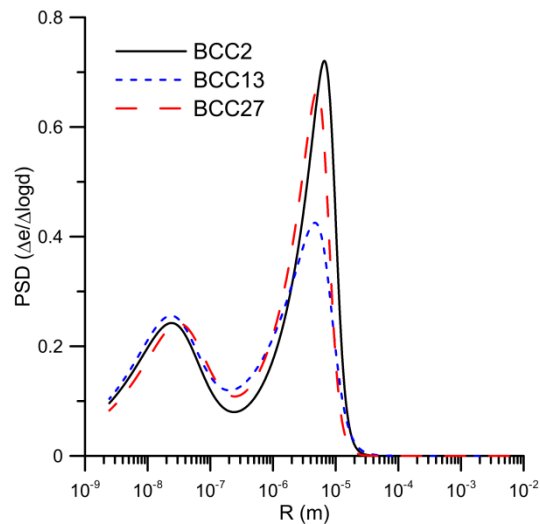


Fig 3b. Calibrazione del modello su processi di imbibizione.

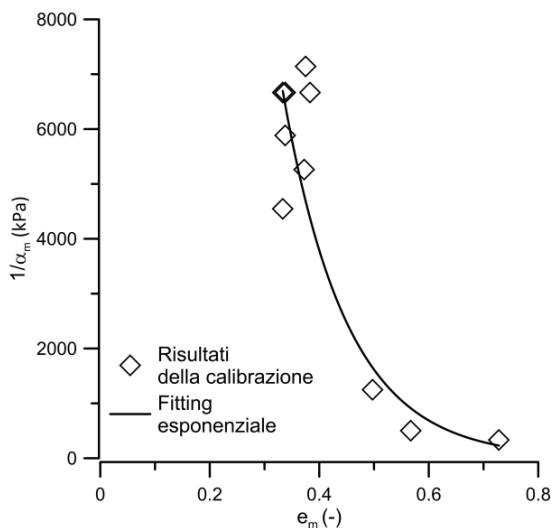


Fig 4. Evoluzione del valore di entrata dell'aria della microstruttura $1/\alpha_m$ in funzione dell'indice dei vuoti intra-aggregato.

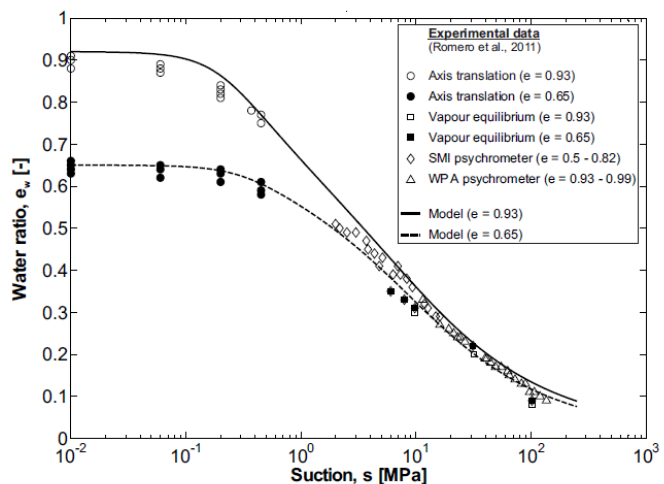


Fig 5. Confronto tra dati sperimentali e previsioni del modello per Boom clay compattata (ramo di essiccazione) a due indici dei vuoti ($e=0.97$ e $e=0.65$)

4. Validazione del modello di curva di ritenzione

I dati di ritenzione presentati da Romero et al. (2011) sono stati utilizzati per validare il modello di curva di ritenzione ottenuto calibrandone i parametri con la procedura descritta. Si noti che, poiché le prove di porosimetria a intrusione di mercurio vengono effettuate introducendo nel mezzo poroso un fluido non bagnante (mercurio), con uscita di fluido bagnante (aria), i valori numerici individuati per i parametri fanno riferimento al ramo di essiccazione della curva di ritenzione. Caratteristica fondamentale del modello presentato è quella di incorporare le leggi di variazione dei parametri individuate in fase di calibrazione. Per ciascun valore di contenuto in acqua e di indice dei vuoti, si ottiene così un valore di suzione corrispondente al solo stato corrente, calcolato con valori dei parametri che differiscono da quelli ottenuti durante la fase di calibrazione effettuata con riferimento a stati diversi. Le capacità predittive del modello si possono apprezzare in Figura 5. La simulazione numerica è stata ottenuta mantenendo costanti i parametri $n_m = 1.65$, $m_m = 0.35$, $n_M = 2.0$, $m_M = 0.16$ e facendo variare $1/\alpha_m$ e $1/\alpha_M$ con leggi esponenziali in funzione dell'indice dei vuoti microstrutturale e dell'indice dei vuoti totale. È interessante notare come il modello, a partire dalle

informazioni sulle PSD, è in grado di simulare propriamente l'incremento del valore di entrata dell'aria al diminuire dell'indice dei vuoti e la tendenza a una relazione univoca tra suzione e contenuto in acqua per alti valori di suzione, indipendentemente dal valore di indice dei vuoti totale. Viceversa, per bassi valori di suzione, la dipendenza dalle sollecitazioni meccaniche è evidente.

5. Conclusioni

Nella nota è presentato un modello di curva di ritenzione per materiali argillosi compattati. Il modello è concepito sovrapponendo capacità di ritenzione della micro- e della macro-struttura, e consente di riprodurre gli effetti dell'evoluzione della struttura tipicamente bimodale in funzione del percorso tensionale idromeccanico. Al modello di ritenzione è associata una teorica distribuzione delle dimensioni dei pori, dipendente dagli stessi parametri che descrivono le caratteristiche di ritenzione del materiale. La distribuzione, confrontata con i risultati di prove di porosimetria a intrusione di mercurio, permette di calibrare i parametri della curva di ritenzione. Il percorso di modellazione è stato esemplificato con dati sperimentali su provini di Boom clay compattata. L'analisi della distribuzione delle dimensioni dei pori e della sua evoluzione ha messo in luce la dipendenza di alcuni parametri della curva di ritenzione dallo stato globale e microstrutturale del provino, suggerendo leggi di evoluzione che sono state utilizzate durante la fase di confronto tra dati sperimentali di ritenzione e modello. Il modello proposto è in grado di simulare alcune caratteristiche peculiari del comportamento delle argille compattate, come l'aumento della dimensione degli aggregati al crescere del contenuto in acqua, l'aumento del valore di entrata dell'aria al decrescere dell'indice dei vuoti inter-aggregato e l'esistenza, per alti valori di suzione, di una parte di curva pressoché indipendente dall'indice dei vuoti.

Riferimenti bibliografici

- Airò Farulla C., Battiato A., Ferrari A. (2011). "The void ratio dependency of the retention behaviour for a compacted clay". In Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated soils, Barcelona, 417–422.
- Cuisinier O., Laloui L. (2004). "Fabric evolution during hydromechanical loading of a compacted silt", *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 28, 483–499.
- Della Vecchia G. (2009). "Coupled hydro-mechanical behaviour of compacted clayey soils". Ph. D. thesis, Politecnico di Milano.
- Della Vecchia G., Airò Farulla C., Jommi C. (2012). "Modelling the water retention domain of a compacted scaly clay. In Unsaturated Soils": In Proc. 2nd Eur. Conf. on Unsaturated soils, Napoli, 55–62.
- Della Vecchia G., Jommi C., Romero E. (2013). "A fully coupled elastic-plastic hydromechanical model for compacted soils accounting for clay activity", *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 37, 503–535.
- Lloret A., Villar M., Sanchez M., Gens A., Pintado X., Alonso E. (2003). "Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes". *Géotechnique* 53, 27–40.
- Monroy R., Zdravkovic L., Ridley A. (2010). "Evolution of microstructure in compacted London clay during wetting and loading". *Géotechnique* 60, 105–119.
- Romero E., Gens A., Lloret A. (1999). "Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay". *Engineering Geology* 54, 117–127.
- Romero E., Della Vecchia G., & Jommi C. (2011). "An insight into the water retention properties of compacted clayey soils". *Géotechnique* 61, 313–328.
- Simms P., Yanful E. (2002). "Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distribution". *Géotechnique* 52, 269–278.
- Simms P., Yanful E. (2004). "Estimation of soil-water characteristic curve of clayey till using measured pore-size distribution". *J. Environ. Engng.* 130, 847–854.
- Tarantino A., De Col E. (2008). "Compaction behaviour of clay" *Géotechnique* 58, 199–213.
- van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils" *Soil Sci. Soc. Am.* 44, 892–898.
- Villar M., Lloret, A. (2002). "Variation of the intrinsic permeability of expansive clays upon saturation". In K. Adachi & M. Fukue (Eds.), *Clay Science for Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, . 259–266.
- Wang Q., Tang A., Cui Y., Barnichon J., Ye W. (2012). "Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration". *International Journal of Applied Clay Science.*
- Ye W., Cui Y., Qian L., Chen B. (2009). "An experimental study of the water transfer through confined compacted gmz bentonite". *Engineering Geology* 108, 169–176.
- Zhang L., Chen Q. (2005). "Predicting bimodal soil-water characteristic curves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131 (5),666-670.