

## **MODELLAZIONE DELLA CURVA DI RITENZIONE IDRICA DEI GEOCOMPOSITI BENTONITICI**

Giulia Guida

*Università degli Studi di Roma Tor Vergata*

[giulia.guida@uniroma2.it](mailto:giulia.guida@uniroma2.it)

Asli Senem Acikel

*Kadir Has University – Istanbul - Turchia*

[asliacikel@gmail.com](mailto:asliacikel@gmail.com)

Gabriele Della Vecchia

*Politecnico di Milano*

[gabriele.dellavecchia@polimi.it](mailto:gabriele.dellavecchia@polimi.it)

### **Sommario**

I geocompositi bentonitici (GCL) sono diffusamente usati come elementi di rivestimento impermeabile nelle discariche. La bassa permeabilità dei GCL è dovuta ad uno strato interno composto da bentonite racchiuso tra due geotessili. I geocompositi bentonitici sono tipicamente installati in condizioni non sature, e lasciati idratare in sito prelevando umidità dagli strati di terreno con i quali sono posti in contatto. A governare la velocità d'idratazione e il contenuto d'acqua finale sono le proprietà di ritenzione sia del geocomposito che del terreno sottostante. Il comportamento di ritenzione idraulica dei GCL è tuttavia complesso non solo a causa dei diversi materiali che lo compongono (la bentonite e i geotessili), ma anche dalla loro interazione. In questo lavoro si propone un modello concettuale per la curva di ritenzione idrica dei geocompositi bentonitici in grado di tener conto dei diversi contributi: (i) la curva di ritenzione idrica dello strato di bentonite caratterizzato da un doppio ordine di porosità; (ii) la curva di ritenzione dei geotessili; (iii) i vincoli volumetrici imposti dalle caratteristiche di fabbricazione.

### **1. Introduzione**

I geocompositi bentonitici sono una valida alternativa agli strati di argilla comunemente utilizzati per il rivestimento delle discariche. Essi sono infatti facilmente trasportabili in rulli, sono velocemente installabili in sito (Fig.1a) e hanno prestazioni migliori come barriere sia in termini idraulici che di contenimento dei contaminanti. I geocompositi bentonitici (Fig.1b) sono composti da un sottile strato di bentonite (granulare o polverizzata) di 5-10 mm compresa tra due geotessili, tessuti o non tessuti, solitamente legati insieme da cuciture (Beddoe *et al.* 2010). Le cuciture servono a rendere gli strati solidali e a limitare le variazioni di volume della bentonite. Le prestazioni ottimali dei geocompositi si verificano per determinati livelli di contenuto d'acqua. Siccome per motivi di trasporto e installazione, lo strato di bentonite del geocomposito è inizialmente secca (grado di saturazione tra il 5-10%), è di notevole importanza che esso venga idratato fino al raggiungimento di un grado di saturazione di almeno l'80% (Rowe, 2020). Il geocomposito s'idrata sottraendo umidità allo strato di terreno sottostante attraverso fenomeni di risalita capillare e diffusione di vapore acqueo (Seiphoori *et al.* 2016). La riduzione della permeabilità in seguito all'idratazione è dovuta al rigonfiamento dei minerali smectitici costituenti la bentonite, che rendono il materiale simile a un gel.

In questo lavoro si propone un modello di ritenzione per il geocomposito bentonitico in grado di tener conto dei singoli costituenti, geotessili e bentonite, e della loro interazione. Il modello è stato poi validato mediante confronto con alcune curve di ritenzione di letteratura.



Fig 1. a) Installazione dei geocompositi; b) Struttura del geocomposito bentonitico. (<https://www.temacorporation.com>, <http://www.geoflum.it>)

## 2. Modelli di curva di ritenzione

La curva di ritenzione è una delle proprietà fondamentali per la previsione del comportamento dei terreni non saturi. Generalmente i modelli di curva di ritenzione sono formulati come un'unica relazione tra suzione (definita come differenza tra pressione dell'aria e pressione dell'acqua) e grado di saturazione o contenuto d'acqua (e.g. van Genuchten, 1980; Fredlung & Xing, 1994). Alcuni di essi tengono conto dell'influenza dell'indice vuoti (e.g. Gallipoli et al., 2003). Tuttavia, quando si ha a che fare con argille compatte, caratterizzate da una doppia porosità (intra-aggregato e inter-aggregato), l'influenza della microstruttura e della sua evoluzione al variare del contenuto d'acqua sulle proprietà di ritenzione è significativa (Romero *et al.* 2011; Dieudonne *et al.* 2017; Della Vecchia *et al.* 2015).

I geocompositi bentonitici sono caratterizzati da tre ordini di porosità: quella dei geotessili, più il doppio ordine di porosità della bentonite, inter-aggregato (macro) e intra-aggregato (micro) (Figura 2a). Tale struttura porosa multi-scala comporta la coesistenza di diversi meccanismi idraulici che governano il comportamento di ritenzione, prevalentemente di adsorbimento all'interno degli aggregati e prevalentemente capillare nei pori inter-aggregato e all'interno dei geotessili. Gli elementi che maggiormente condizionano le curve di ritenzione dei geocompositi bentonitici sono il tipo di bentonite, la struttura del geocomposito e il livello di confinamento (Beddoe *et al.*, 2010; Acikel *et al.*, 2015). Le evidenze sperimentali mostrano come durante il processo d'idratazione, al crescere del contenuto d'acqua, lo strato di bentonite si espanda infiltrandosi nei vuoti dei geotessili, modificando, se le condizioni di vincolo lo permettono, anche il volume dell'intero geocomposito.

L'idea di base di questo studio è quella di formulare due modelli di ritenzione distinti, per la bentonite e per i geotessili, combinandoli opportunamente tra loro per generare il modello di ritenzione idrica del geocomposito bentonitico complessivo.

### 2.1 Modello di curva di ritenzione per i geotessili

I geotessili sono generalmente formati da fibre di polipropilene intrecciate tra loro, hanno uno spessore di qualche millimetro, un'elevata porosità e un ridottissimo valore di entrate dell'aria ( $<1\text{kPa}$ ). Il meccanismo di ritenzione per questo tipo di materiali è governato dalla capillarità. Il modello di ritenzione adottato per i geotessili è semplicemente quello di van Genuchten:

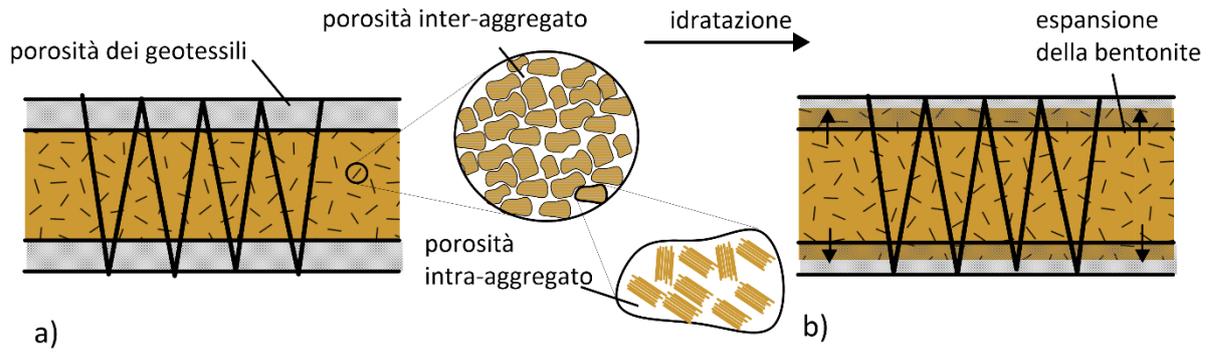


Fig 2. a) Schema della microstruttura del geocomposito con i tre ordini di porosità; b) modello concettuale di idratazione.

$$S_r^g = \left( 1 + \left( \frac{s}{P_g} \right)^{n_g} \right)^{-m_g} \quad (1)$$

dove  $s$  è la suzione di matrice,  $P_g$  è il valore di entrata dell'aria e  $n_g$  e  $m_g$  sono parametri di modello. La Figura 3.a riporta la calibrazione della curva di ritenzione del geotessile a partire da dati sperimentali di Bouazza *et al.* (2006), relativi a un geotessile non tessuto avente una porosità  $\phi_g=0.9$  e una densità delle fibre che lo compongono di  $\rho_g=1.3 \text{ t/m}^3$ . I parametri della curva di ritenzione adottati in questo lavoro sono riportati in Tabella 1.

## 2.2 Modello di curva di ritenzione per la bentonite

La curva di ritenzione della bentonite viene modellata considerando due ordini di porosità (Della Vecchia *et al.* 2015; Dieudonne *et al.* 2017): quello interno agli aggregati (micro-struttura), e quello tra gli aggregati (macro-strutturale). La distribuzione globale dei pori è definita come una composizione del contributo micro- e macro-strutturale.

Considerando la doppia porosità, il grado di saturazione  $S_r^b$  della bentonite si definisce per mezzo della relazione:

$$S_r^b = \frac{e_b^m}{1+e_b} S_r^{b,m} + \frac{e_b^M}{1+e_b} S_r^{b,M} \quad (2)$$

dove  $e_b^m$ ,  $e_b^M$ ,  $e_b$  sono gli indici dei vuoti macro (intra-aggregato), micro (inter-aggregato) e totale,  $S_r^{b,m}$  e  $S_r^{b,M}$  sono i gradi di saturazione della micro e macro-porosità rispettivamente. La curva di ritenzione relativa alla macro-porosità è definita da una funzione di Van Genuchten, essendo le forze di capillarità la fenomenologia prevalente:

$$S_r^{b,M} = \left( 1 + \left( \frac{s}{P_b} \right)^{n_b} \right)^{-m_b} \quad (3)$$

dove  $s$  è la suzione di matrice,  $P_b$  è il valore di entrata dell'aria e  $n_b$  e  $m_b$  sono parametri di modello.

La curva di ritenzione relativa alla microporosità si assume governata dal fenomeno dell'adsorbimento isoterma secondo l'equazione (4):

$$S_r^{b,m} = \exp[-(C_{ads}s)^{n_{ads}}] \quad (4)$$

dove  $C_{ads}$  è legato alla suzione corrispondente all'entrata di aria nei vuoti intra-aggregato e assume valori tra  $0.018-0.0018 \text{ MPa}^{-1}$ .

L'evoluzione della microstruttura con il contenuto d'acqua è descritta dalla seguente legge di variazione:

$$e_b^m = e_{b,0}^m + \frac{(1-e_b)\beta_0}{\beta_1} [1 - \exp(-\beta_1 e_w)] \quad (5)$$

dove  $e_{b,0}^m$  è l'indice dei vuoti microscopico a contenuto d'acqua nullo,  $\beta_0$  e  $\beta_1$  sono parametri di modello dipendenti dall'attività dell'argilla e  $e_w = (S_r^{b,m} e_b^m + S_r^{b,M} e_b^M)$  è l'indice dei vuoti riempiti d'acqua (o water ratio nella letteratura anglosassone), dipendente dal grado di saturazione e dall'indice dei vuoti micro- e macro-strutturale.

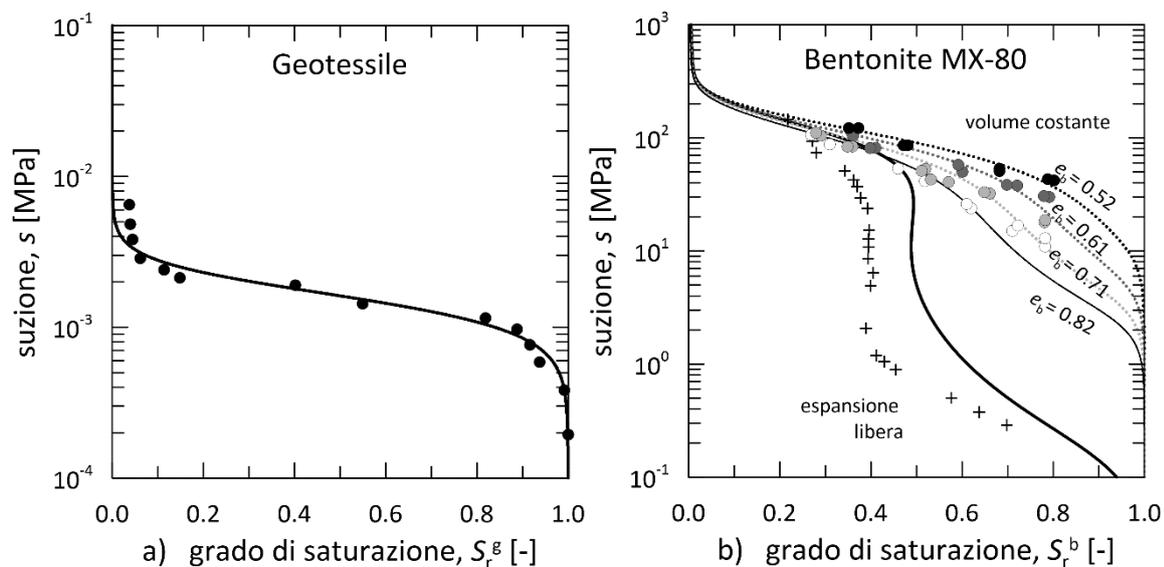


Fig 3. Calibrazione delle curve di ritenzione per a) i geotessili e b) la bentonite MX80 a volume costante e espansione libera.

| Geotessile |       |       | Bentonite MX-80 |           |         |             |           |         |       |       |
|------------|-------|-------|-----------------|-----------|---------|-------------|-----------|---------|-------|-------|
| $P_g$      | $m_g$ | $n_g$ | $\beta_0$       | $\beta_1$ | $e_0^m$ | $C_{ads}$   | $n_{ads}$ | $P_b$   | $m_b$ | $n_b$ |
| 0.5 kPa    | 1.70  | 3.20  | 0.30            | 1.30      | 0.28    | 0.007 1/MPa | 1.80      | 1.6 MPa | 0.25  | 3.10  |

Tab. 1. Parametri di modello della curva di ritenzione del geotessile e della bentonite

Figura 3.b riporta la calibrazione della curva di ritenzione della bentonite sui dati sperimentali di Villar (2004) e Seiphoori *et al.* (2016). Il modello è stato calibrato sulle curve di ritenzione ottenute in condizione di espansione impedita a quattro differenti indici dei vuoti (0.52, 0.61, 0.71 e 0.82) ed è stato quindi utilizzato per predire la curva di ritenzione in condizioni di espansione libera (assumendo una relazione tra indice dei vuoti e suzione come riportato dagli autori). Il confronto tra dati sperimentali e simulazione numerica mostra un ottimo accordo dal punto di vista qualitativo, seppure con una sovrastima del grado di saturazione dal punto di vista quantitativo nel caso della prova a espansione libera. I parametri del modello sono riportati in Tabella 1. Confrontando la curva di ritenzione del geotessile con quelle della bentonite emerge come il geotessile inizi a desaturarsi per suzioni di più di tre ordini di grandezza inferiori di quelle della bentonite, mostrando quindi delle capacità di ritenzione minori. La curva di ritenzione della bentonite invece, in confronto a quella del geotessile, è caratterizzata da un andamento bimodale dato dalla sovrapposizione dei contributi micro e macroscopici (Equazione 1). In particolare, il contributo microscopico influenza l'andamento della curva di ritenzione ad alte suzioni, mentre quello macroscopico l'andamento della curva a suzioni inferiori. Le curve rappresentate, a prescindere dalla densità del materiale e dai vincoli meccanici, tendono a sovrapporsi ad alte suzioni, poiché a governare la risposta del materiale è principalmente il contributo legato all'adsorbimento. A basse suzioni invece la risposta è molto dipendente dalle condizioni meccaniche, quindi dal fatto che il materiale sia libero di espandere o meno. Nel caso di espansione libera, l'idratazione comporta sia un'incremento del volume degli aggregati che un rigonfiamento complessivo del provino. Nel caso di variazioni di volume impedito invece, l'aumento della microporosità implica un decremento della macro-porosità a causa del vincolo cinematico imposto.

### 2.1 Modello di curva di ritenzione per i geotessili

La curva di ritenzione del geocomposito è ottenuta combinando opportunamente le curve di ritenzione dei geotessili e della bentonite secondo la formulazione di Equazione (6) nella quale il contributo dei

singoli componenti, geotessili e bentonite, è portato in conto come somma dei volumi dei vuoti ( $V_{v,g}$  e  $V_{v,b}$ ) e dell'acqua ( $V_{w,g}$  e  $V_{w,b}$ ), che a loro volta possono essere riscritti in funzione dei gradi di saturazione ( $S_r^g$  e  $S_r^b$ ), degli indici dei vuoti ( $e_g$  e  $e_b$ ) e dai volume del solido ( $V_{s,g}$  e  $V_{s,b}$ ).

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_{w,g} + V_{w,b}}{V_{v,g} + V_{v,b}} = \frac{S_r^g e_g V_{s,g} + S_r^b e_b V_{s,b}}{e_g V_{s,g} + e_b V_{s,b}} \quad (6)$$

### 3. Curva di ritenzione per i geocompositi bentonitico

Il modello di curva di ritenzione dei geocompositi bentonitici è stato validato con i dati sperimentali di Seiphooori *et al* (2016), i quali hanno valutato il ramo di imbibizione della curva di ritenzione di un geocomposito bentonitico composto da bentonite MX-80 e due geotessili, uno tessuto alla base e uno non tessuto in sommità. La cella utilizzata per la prova ha un diametro di 30 mm e un'altezza di 6 mm. Il volume del provino è mantenuto costante per tutta la prova. Il contenuto d'acqua nel provino viene fatto variare in modo controllato dalla base e dalla sommità della cella. La suzione viene quindi misurata ogni qualvolta si applica una variazione di contenuto d'acqua dopo un tempo di stabilizzazione. In Tabella 2 sono riportati l'indice dei vuoti iniziale  $e_0$ , il contenuto d'acqua  $w_0$  e il grado di saturazione  $S_{r0}$  iniziale, il peso specifico dei solidi  $G_s$  e lo spessore di ciascuno strato.

|                        | $e_0$ [-] | $w_0$ [-] | $S_{r0}$ [-] | $G_s$ [-] | Spessore [mm] |
|------------------------|-----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| Geotessile tessuto     | 9.00      |           |              | 1.30      | 1.5           |
| Bentonite              | 0.83      | 0.05      | 0.16         | 2.74      | 3.8           |
| Geotessile non tessuto | 9.00      |           |              | 1.30      | 0.7           |

Tab. 2. Proprietà dei componenti del geocomposito bentonitico.

Coerentemente con i vincoli cinematici applicati durante la prova, si assume che, al crescere del contenuto in acqua: (i) il volume totale del geocomposito rimanga costante per tutta la durata della prova; (ii) la bentonite sia libera di espandere all'interno dei vuoti dei geotessili fintanto che essi non siano riempiti dalla bentonite stessa.

Da quanto riportato in Figura 4.a emerge come il modello di curva di ritenzione proposto riesca in modo soddisfacente a riprodurre i dati sperimentali di Seiphooori *et al* (2016). La curva di ritenzione del geocomposito bentonitico è confrontata anche con le curve di ritenzione della sola bentonite MX-80, mostrando un comportamento intermedio tra quello della bentonite a volume costante ( $e=0.82$ ) e quello della bentonite a espansione libera. Figura 4.b mostra l'evoluzione degli indici dei vuoti dei vari componenti del geocomposito bentonitico al variare della suzione. Guardando il grafico da destra verso sinistra (contenuto di acqua crescente), si evince come la bentonite si espanda all'interno dei vuoti dei geotessili fino a riempirli completamente intorno ai 4 MPa di suzione.

### 4. Conclusioni

L'articolo riporta i primi risultati di uno studio sul modello concettuale di curva di ritenzione idrica per i geocompositi bentonitici, formati da uno strato di bentonite compreso tra due geotessili. L'idea di fondo è stata quella di modellare indipendentemente le curve di ritenzione dei singoli componenti e poi combinarle insieme in modo opportuno al fine di riprodurre le corrette interazioni che s'instaurano tra i diversi materiali al variare del contenuto d'acqua. Il modello di ritenzione proposto riesce in modo soddisfacente a descrivere, sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo, alcuni dati sperimentali di letteratura di curva di ritenzione per i geocompositi bentonitici lungo un ampio di intervallo di suzioni indagate. Il modello concettuale sarà in futuro utile a riprodurre anche il comportamento meccanico delle singole componenti, nonché la loro interazione con le cuciture presenti.

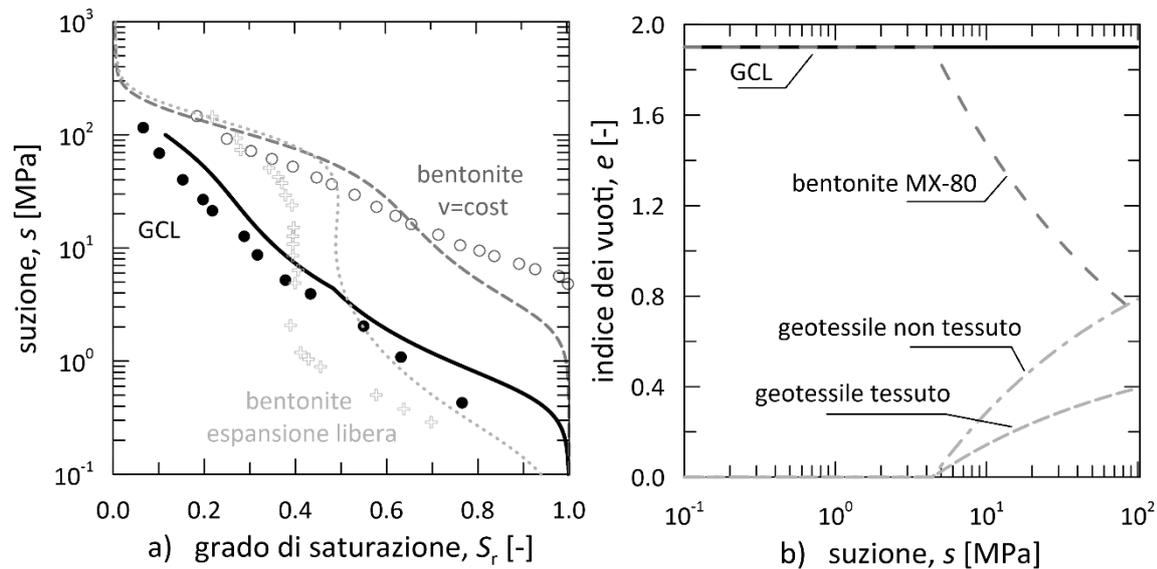


Fig. 4. a) Curva di ritenzione del geocomposito bentonitico: modello e dati sperimentali. b) evoluzione dell'indice dei vuoti dei singoli contributi costituenti il geocomposito bentonitico con la suzione.

## Bibliografia

- Acikel, A. S., Singh, R. M., Bouazza, A., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2015). "Applicability and accuracy of the initially dry and initially wet contact filter paper tests for matric suction measurement of geosynthetic clay liners". *Geotechnique*, 65(9), 780-787.
- Beddoe, R. A., Take, W. A., & Rowe, R. K. (2010). "Development of suction measurement techniques to quantify the water retention behaviour of GCLs". *Geosynthetics International*, 17(5), 301-312.
- Bouazza, A., Zornberg, J. G., McCartney, J. S., & Nahlawi, H. (2006). "Significance of unsaturated behaviour of geotextiles in earthen structures". *Australian Geomechanics*, 41(3), 133-142.
- Dieudonne, A. C., Della Vecchia, G., & Charlier, R. (2017). "Water retention model for compacted bentonites". *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 915-925.
- Della Vecchia, G., Dieudonné, A. C., Jommi, C., & Charlier, R. (2015). "Accounting for evolving pore size distribution in water retention models for compacted clays". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(7), 702-723.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve". *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546.
- Gallipoli, D., Wheeler, S. J., & Karstunen, M. (2003). "Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil". *Geotechnique*, 53(1), 105-112.
- Romero, E., Della Vecchia, G., & Jommi, C. (2011). "An insight into the water retention properties of compacted clayey soils". *Geotechnique*, 61(4), 313-328.
- Rowe, R. K. (2020). "Geosynthetic clay liners: perceptions and misconceptions". *Geotextiles and Geomembranes*, 48(2), 137-156.
- Seiphoori, A., Laloui, L., Ferrari, A., Hassan, M., & Khushefati, W. H. (2016). "Water retention and swelling behaviour of granular bentonites for application in GCL systems". *Soils and Foundations*, 56(3), 449-459.
- Van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vaughan P.R. (1988). "Characterising the mechanical properties of in situ residual soils". *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Geomechanics in tropical soils*, Singapore, 469-487.
- Villar, M. V. (2004). MX-80 bentonite. Thermo-hydro-mechanical characterization performed at CIEMAT in the context of the Prototype Project. *Technical report, CIEMAT*.