POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Determinazione delle proprietà osmotiche delle bentoniti tramite un edometro a deformazione controllata

Original
Determinazione delle proprietà osmotiche delle bentoniti tramite un edometro a deformazione controllata / Guarena, N., Dominijanni, A., Manassero, M.. - STAMPA. - (2019), pp. 73-76. (IX Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici Napoli (ITA) 10-11 Maggio 2019).

Availability:
This version is available at: 11583/2735835 since: 2019-06-15T17:11:48Z

Publisher:
Associazione Geotecnica Italiana

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright
default_conf_editorial [DA NON USARE]

-

(Article begins on next page)

27 November 2026

DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ OSMOTICHE DELLE BENTONITI TRAMITE UN EDOMETRO A DEFORMAZIONE CONTROLLATA

Nicolò Guarena (nicolo.guarena@polito.it)
Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Andrea Dominijanni (andrea.dominijanni@polito.it)
Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Mario Manassero (mario.manassero@polito.it)
Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

ABSTRACT. Allo scopo di verificare la possibilità di correlare le proprietà di trasporto e il comportamento rigonfiante delle bentoniti a un numero ristretto di parametri fisico-chimici e microstrutturali, è stata messa a punto una nuova attrezzatura di laboratorio che consente di misurare simultaneamente, sullo stesso campione di argilla, il coefficiente di efficienza chimico-osmotica e il coefficiente di rigonfiamento. Sono state condotte due prove *multi-stage* su una bentonite sodica naturale variando sia la porosità sia la concentrazione salina delle soluzioni di equilibrio, e i risultati sono stati interpretati alla luce di un modello meccanicistico, nel quale sono tenute esplicitamente in conto le interazioni elettrochimiche che hanno luogo tra lo scheletro solido, la fase acquosa contenuta nei pori e le specie ioniche in soluzione. Si è osservato che l'efficienza a membrana semipermeabile e il comportamento rigonfiante della bentonite testata possono essere simulati in modo accurato nel momento in cui un singolo parametro microstrutturale, $\overline{c}'_{sk,0}$, è calibrato sui dati sperimentali disponibili.

1. INTRODUZIONE

I terreni argillosi caratterizzati da un'elevata superficie specifica e da una carica elettrica permanente sullo scheletro solido (e.g. bentoniti) si comportano come membrane semipermeabili, sicché un flusso volumetrico d'acqua può essere generato non solo da un gradiente del carico idraulico, ma anche da gradienti di concentrazione delle specie ioniche in soluzione: tale fenomeno, noto comunemente come osmosi chimica, è causato dalla repulsione elettrostatica degli anioni dai doppi strati diffusi che circondano particelle di argilla adiacenti. Per quanto concerne il controllo dei fluidi inquinati nel sottosuolo, la migrazione dei contaminanti attraverso le barriere a base bentonitica, come i geocompositi bentonitici usati nei sistemi di impermeabilizzazione di fondo delle discariche, risulta influenzata dal comportamento a membrana, essendo il flusso molare dei soluti ridotto per effetto sia del contro-flusso osmotico, sia della diminuzione della porosità accessibile ai soluti (Malusis et al., 2003).

Le interazioni elettriche tra gli ioni disciolti nella soluzione interstiziale e le particelle di argilla, che sono all'origine dei fenomeni di flusso accoppiato, sono inoltre in grado di influenzare il comportamento meccanico delle bentoniti. Infatti, durante una prova edometrica a carico controllato, a seguito di un cambiamento della composizione chimica della soluzione esterna di equilibrio si osservano deformazioni volumetriche del campione (Musso et al., 2017). Simmetricamente, un cambiamento della concentrazione ionica della soluzione esterna di equilibrio induce una variazione della pressione di rigonfiamento nel corso di una prova edometrica a deformazione controllata (Dominijanni et al., 2018).

2. MODELLO TEORICO E ATTREZZATURA SPERIMENTALE

Sulla base di modelli pioneristici sviluppati con il proposito di simulare i processi di trasporto nelle membrane microporose dotate di carica elettrica fissa, come le membrane filtranti in policarbonato e i gel di polielettroliti (Yaroshchuk, 1995), Dominijanni et al. (2006) hanno identificato le interazioni che, alla scala dei pori, governano il comportamento macroscopico delle argille chimicamente attive, permettendo una caratterizzazione completa delle proprietà osmotiche delle bentoniti nel contesto di un approccio puramente meccanicistico. In accordo al modello teorico adottato, nel quale i pori sono assimilati a tubi capillari caratterizzati da una geometrica planare, i coefficienti fenomenologici sono espressi in funzione di un numero limitato di parametri fisico-chimici e microstrutturali, nell'ipotesi di una soluzione infinitamente diluita e di una distribuzione costante del potenziale elettrico nella sezione trasversale del poro.

L'efficienza della bentonite come membrana semipermeabile è valutata attraverso la misura in laboratorio del coefficiente di riflessione, ω, anche noto come coefficiente di efficienza chimico-osmotica (Malusis et al., 2003). Nella configurazione di prova illustrata in Figura 1, il campione di argilla è interposto tra due pietre porose attraverso le quali sono fatte circolare soluzioni saline a diversa concentrazione ionica, mentre è impedito il flusso volumetrico d'acqua attraverso il terreno. Se tali condizioni sono mantenute nel tempo fino al raggiungimento di uno stato stazionario, tra le estremità del campione si instaura una differenza di carico idraulico. Il valore globale del coefficiente di riflessione, ω_g, che risulta essere uguale al valore medio integrale di ω calcolato rispetto alle concentrazioni saline imposte al contorno (Dominijanni et al., 2018), è determinato come segue:

$$\omega_g = \left(\frac{\Delta h \cdot \gamma_w}{\Delta \Pi} \right)_{q=0} = \frac{1}{\Delta c_s} \int_{c_b}^{c_t} \omega \cdot dc_s \tag{1}$$

dove Δh è la differenza di carico idraulico attraverso il mezzo poroso, γ_w è il peso dell'unità di volume dell'acqua, $\Delta \Pi$ è la differenza di pressione osmotica attraverso il mezzo poroso (i.e. $\Delta \Pi = 2RT\Delta c_s$ per soluzioni sufficientemente diluite di elettroliti 1:1), q è il flusso volumetrico d'acqua, R è la costante universale dei gas, T è la temperatura assoluta e Δc_s è la differenza di concentrazione salina attraverso il mezzo poroso (i.e. $\Delta c_s = c_t - c_b$). Le concentrazioni saline delle soluzioni esterne a contatto con l'estremità superiore e inferiore del mezzo poroso, c_t e c_b, possono essere stimate come segue:

$$c_t = \frac{c_{0,t} + c_{exit,t}}{2}; \qquad c_b = \frac{c_{0,b} + c_{exit,b}}{2} \tag{2}$$

dove il significato dei simboli utilizzati è chiarito in Figura 1.

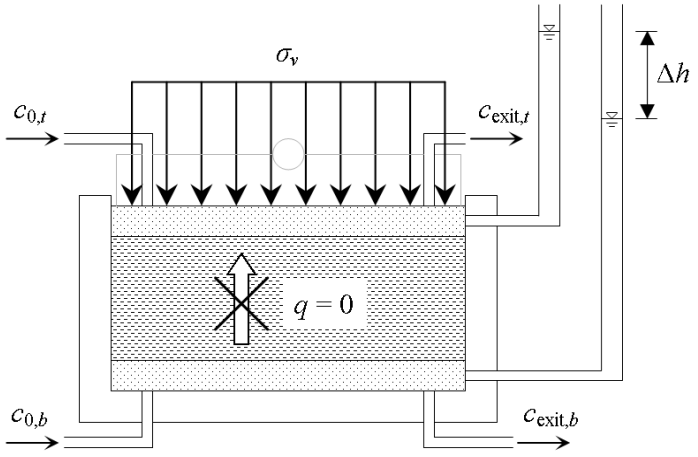

Figura 1. Vista schematica dell'edometro modificato a deformazione controllata e del relativo circuito idraulico, impiegato per la misura delle proprietà di trasporto e del comportamento meccanico delle argille attive. $c_{0,t}$ e $c_{0,b}$, concentrazioni saline delle soluzioni iniettate nella pietra porosa superiore e inferiore, rispettivamente; $c_{exit,t}$ e $c_{exit,b}$, concentrazioni saline delle soluzioni estratte dalla pietra porosa superiore e inferiore, rispettivamente; q, flusso volumetrico d'acqua; Δh, differenza di carico idraulico tra le estremità del campione; σ_v, tensione verticale totale agente sul campione.

Un'identificazione fisica del coefficiente di riflessione può essere ottenuta a partire dalle equazioni di trasporto per i flussi di solvente e soluto attraverso un mezzo poroso semipermeabile, unitamente alla condizione di densità di corrente elettrica nulla (Dominijanni et al., 2006). Sulla base dell'approccio teorico adottato, il coefficiente di riflessione globale, ω_g, in presenza di un elettrolita 1:1 può essere espresso come segue:

$$\omega_g = 1 + \frac{\overline{c}'_{sk,0}}{2\Delta c_s e} \cdot \left[Z_2 - Z_1 - (2t_1 - 1) \cdot ln\left(\frac{Z_2 + 2t_1 - 1}{Z_1 + 2t_1 - 1} \right) \right] \tag{3}$$

dove:

$$Z_1 = \sqrt{1+\left(\frac{2c_t e}{\bar{c}'_{sk,0}}\right)^2}\ ; \qquad Z_2 = \sqrt{1+\left(\frac{2c_b e}{\bar{c}'_{sk,0}}\right)^2} \tag{4}$$

essendo e l'indice dei vuoti della bentonite, t_1 il numero di trasporto del catione (i.e. $t_1 = D_{1,0} / \left(D_{1,0} + D_{2,0}\right)$), $D_{1,0}$ e $D_{2,0}$ i coefficienti di diffusione in soluzione libera del catione e dell'anione, rispettivamente, e $\bar{c}'_{sk,0}$ il coefficiente di carica elettrica dello scheletro solido. Manassero (2017) ha mostrato che il parametro $\bar{c}'_{sk,0}$ è suscettibile di variazioni per effetto di mutamenti dell'assetto microstrutturale della bentonite, e pertanto dovrebbe essere considerato, a rigori, una funzione della forza ionica della soluzione di equilibrio e della porosità del campione. Ciononostante, il parametro $\bar{c}'_{sk,0}$ può essere assunto, in prima approssimazione, costante per valori di concentrazione salina non eccedenti 0.1 mol/L.

Il coefficiente di rigonfiamento, ϖ, è stato introdotto da Dominijanni et al. (2018) per quantificare l'entità della variazione indotta nella pressione di rigonfiamento da un cambiamento della concentrazione salina della soluzione di equilibrio. Quest'ultimo coefficiente fenomenologico può essere determinato tramite l'edometro modificato a deformazione controllata illustrato in Figura 1, per mezzo del quale è possibile misurare la variazione indotta nella tensione verticale totale da un cambiamento della concentrazione salina di equilibrio in assenza di deformazioni volumetriche. Il valore globale del coefficiente di rigonfiamento, ϖ_g, che risulta essere uguale al valore medio integrale di ϖ calcolato rispetto alle concentrazioni saline di equilibrio a due diversi istanti temporali, è determinato come segue:

$$\varpi_g = -\left(\frac{\delta\sigma}{\delta\Pi}\right)_{d\varepsilon_v=0;\delta u=0} = \frac{1}{\delta c_s}\int_{c_i}^{c_f} \varpi \cdot dc_s \tag{5}$$

dove $\delta\sigma$ è la variazione nel tempo della tensione verticale totale, $\delta\Pi$ è la variazione nel tempo della pressione osmotica, $d\varepsilon_v$ è l'incremento di deformazione volumetrica, δu è la variazione nel tempo della pressione idraulica e δc_s è la variazione nel tempo della concentrazione salina di equilibrio (i.e. $\delta c_s = c_f - c_i$). Le concentrazioni saline delle soluzioni esterne in equilibrio con il mezzo poroso a due diversi istanti temporali, c_f e c_i, possono essere assunte, in prima approssimazione, uguali alla media aritmetica delle concentrazioni saline imposte al contorno.

Allo scopo di ricavare un'identificazione fisica del coefficiente di rigonfiamento, è possibile combinare la legge costitutiva di un mezzo poroso semipermeabile e le equazioni di Donnan, ottenendo la seguente relazione per il coefficiente di rigonfiamento globale, ϖ_g, in presenza di un elettrolita 1:1 (Dominijanni et al., 2018):

$$\varpi_g = 1 + \frac{\bar{c}'_{sk,0}}{2\delta c_s e}\cdot\left[\sqrt{1+\left(\frac{2c_i e}{\bar{c}'_{sk,0}}\right)^2} - \sqrt{1+\left(\frac{2c_f e}{\bar{c}'_{sk,0}}\right)^2}\right]. \tag{6}$$

3. EVIDENZE SPERIMENTALI

Sono state condotte due prove chimico-osmotiche *multi-stage* su una bentonite sodica naturale in equilibrio con soluzioni di cloruro di sodio a concentrazione variabile tra 5.01 e 89.20 mmol/L, impiegando l'attrezzatura illustrata in Figura 1. La bentonite è stata preliminarmente trattata per la rimozione dei sali solubili presenti nella soluzione interstiziale e quindi introdotta nella cella edometrica allo stato anidro, previa vagliatura al setaccio ASTM No. 200. Nella fase iniziale di saturazione, al campione è stato consentito di rigonfiare liberamente nella direzione assiale fino al raggiungimento di un determinato indice dei vuoti (i.e. e = 3.33 ed e = 4.18 durante la prima e la seconda prova, rispettivamente). Al termine di tale fase, il pistone dell'edometro è stato bloccato e la prova chimico-osmotica è stata avviata misurando, per ciascuno stadio di prova, la differenza di carico idraulico, Δh, la tensione verticale totale, σ_v, e la concentrazione salina delle soluzioni iniettate alle estremità del campione

(i.e. $c_{0,t}$ and $c_{0,b}$), così come delle soluzioni estratte (i.e. $c_{exit,t}$ and $c_{exit,b}$), fino al raggiungimento di una condizione stazionaria.

In Figura 2a sono riportati i risultati ottenuti in termini di coefficiente di riflessione, ω, unitamente all'andamento previsto dal modello teorico proposto per un valore del coefficiente di carica elettrica dello scheletro solido, $\overline{c}'_{sk,0}$, pari a 110 mmol/L. Nonostante l'intervallo di valori misurati di ω sia limitato, si è osservato un buon accordo tra le determinazioni sperimentali e le previsioni teoriche, che migliora ulteriormente con riferimento ai risultati ottenuti in termini di coefficiente di rigonfiamento, ϖ, come illustrato in Figura 2b. Anche in quest'ultimo caso, per l'interpretazione dei dati sperimentali è stato assunto un valore del parametro microstrutturale $\overline{c}'_{sk,0}$ pari a 110 mmol/L.

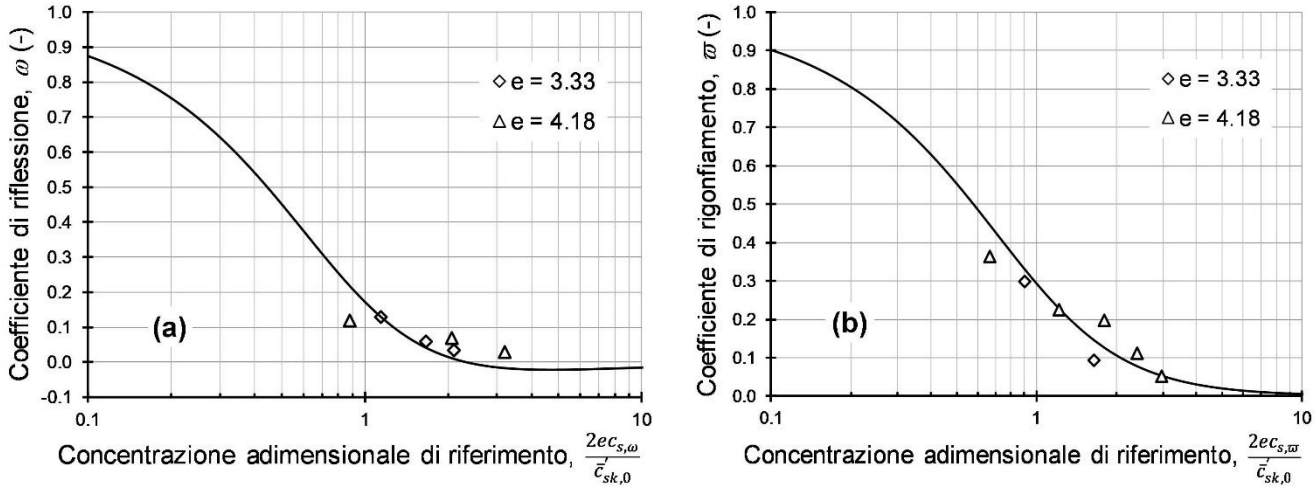

Figura 2. Valori del coefficiente di riflessione (a) e del coefficiente di rigonfiamento (b) ottenuti dalle due prove chimico-osmotiche (indicatori vuoti), e interpretazione teorica con $\overline{c}'_{sk,0}$ = 110 mmol / L (linea continua).

4. CONCLUSIONI

I risultati di due prove chimico-osmotiche *multi-stage*, condotte su una bentonite sodica naturale per mezzo di una nuova attrezzatura di laboratorio, sono stati interpretati alla luce di un modello meccanicistico, nel quale l'effetto macroscopico delle interazioni elettriche che hanno luogo alla scala dei pori è tenuto in conto tramite un singolo parametro microstrutturale, $\overline{c}'_{sk,0}$. La possibilità di adottare lo stesso valore di $\overline{c}'_{sk,0}$ per l'interpretazione sia del coefficiente di riflessione sia del coefficiente di rigonfiamento suggerisce che una proprietà di trasporto (i.e. ω) può essere stimata a partire dalla misura di un parametro meccanico (i.e. ϖ), e viceversa.

5. BIBLIOGRAFIA

Dominijanni A., Manassero M., Vanni D. (2006). Micro/macro modeling of electrolyte transport through semipermeable bentonite layers. *Proceedings, 5th ICEG (Eds: Thomas H.R.)*, Volume 2, 1123-1130. Thomas Telford, England.

Dominijanni A., Guarena N., Manassero M. (2018). Laboratory assessment of semi-permeable properties of a natural sodium bentonite. *Can. Geotech. J.*, 55(11): 1611-1631.

Malusis M.A., Shackelford C.D., Olsen H.W. (2003). Flow and transport through clay membrane barriers. *Eng. Geol.*, 70(3-4): 235-248.

Manassero M. (2017). On the fabric and state parameters of active clays for contaminant control. *Proceedings, 19th ICSMGE (Eds: Lee W., Lee J.S., Kim H.K., Kim D.S.)*, 167-189. Korean Geotechnical Society, Republic of Korea.

Musso G., Cosentini R.M., Dominijanni A., Guarena N., Manassero M. (2017). Laboratory characterization of the chemo-hydro-mechanical behaviour of chemically sensitive clays. *Riv. Ital. Geotec.*, 51(3): 22-47.

Yaroshchuk A.E. (1995). Osmosis and reverse osmosis in fine-charged diaphragms and membranes. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 60(1-2): 1-93.