

PIEZOMETRI FULLY-GROUTED: RISULTATI DI SPERIMENTAZIONE IN SITO E LABORATORIO

Simeoni Lucia
Università di Trento
lucia.simeoni@ing.unitn.it

De Polo Fabio*, Giovanni Caloni**, Giorgio Pezzetti***

* Provincia Autonoma di Bolzano, Ripartizione 30: Opere idrauliche

** Sisgeo srl, Masate (MI); *** Field srl, Lallio (BG)

Sommario

La conformità di un piezometro o di una cella piezometrica risiede nella sua capacità di non alterare il regime delle pressioni interstiziali nel terreno e di fornire il reale valore di carico idraulico. La modalità d'installazione, vale a dire i materiali utilizzati per collegare lo strumento di misura al terreno circostante e la geometria degli stessi, definisce in modo predominante la conformità dello strumento. In questa nota si dimostra l'ottima conformità di celle piezometriche installate mediante completa iniezione del foro con miscela di acqua-cemento-argilla.

Sperimentazione in laboratorio

L'obiettivo della sperimentazione in laboratorio è stato la valutazione del tempo di risposta di un provino realizzato con una miscela acqua-cemento-bentonite e sottoposto ad una variazione della pressione interstiziale alla sua base.

Provini

I provini cilindrici sono stati realizzati con una miscela acqua-cemento-bentonite in rapporto in peso 2,5 - 1 - 0,3, conformemente alle indicazioni riportate in Mikkelsen, 2002. Tutti i provini avevano un diametro di 7 cm, ma altezze di 2, 4 e 8 cm. Sono state preparate tre serie di tre provini ciascuna, con altezze di 2, 4 e 8 cm (Tabella 1). Le prove sono state eseguite non prima che fossero trascorsi 28 giorni di maturazione. La preparazione dei provini e la maturazione sono state eseguite in acqua deaerata.

Provino	S2-01	S4-01	S8-01	S2-02	S4-02	S8-02	S4-03	S8-03
Altezza [cm]	2	4	8	2	4	8	4	8
Serie	1	1	1	2	2	2	3	3
Maturazione [g]	43	30	37	43	36	38	50	48
Prove	18	6	7	18	18	18	28	28

Tabella 1. Provini indagati.

Apparecchiatura

L'apparecchiatura utilizzata era simile ad una cella triassiale (Figura 1). La superficie cilindrica del provino è stata avvolta da una membrana di gomma, bloccata alla base, alla

sommità e, nei provini più alti, in posizione intermedia con due o-ring, al fine di impedire la filtrazione dell'acqua all'interfaccia provino-membrana. Alle due basi del provino sono state inserite le pietre porose per garantire una distribuzione uniforme della pressione interstiziale. Mediante tubicini di PVC, la base inferiore del provino era collegata ad un sistema di controllo della pressione dell'acqua o, a drenaggio chiuso, ad un trasduttore di pressione per la misura della stessa. La base superiore era collegata ad un trasduttore di pressione.

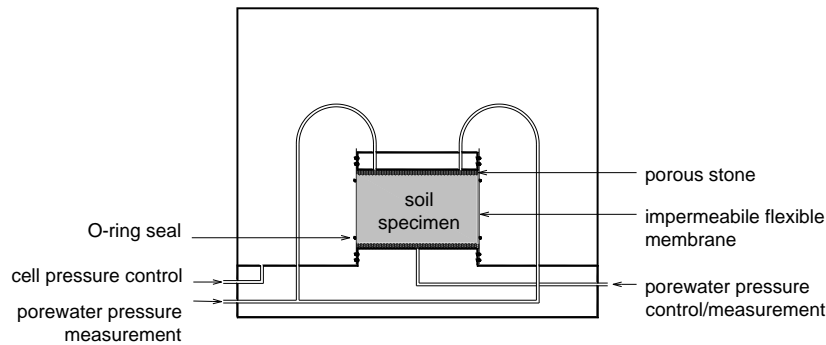


Figura 1. Schema dell'apparecchiatura per la sperimentazione

Modalità di prova

Prima di iniziare la prova tutti i circuiti di drenaggio e le pietre porose sono stati saturati mediante circolazione di acqua demineralizzata e deareata. Successivamente è stata applicata una pressione di cella di 600 kPa e una contro-pressione di 20 kPa. In questo modo in tutte le successive fasi di prova i provini erano sovraconsolidati. Terminata la fase di consolidazione, è stata incrementata la pressione dell'acqua alla base del provino fino a 500 kPa, con incrementi di pressione compresi tra 10 kPa e 200 kPa. Successivamente sono stati eseguiti decrementi per tornare al valore iniziale di 20 kPa. Prima di eseguire le prove, su un provino di acciaio era stato verificato che, per evitare la circolazione d'acqua all'interfaccia membrana-provino, la differenza tra la pressione di cella e la pressione applicata alla base doveva essere superiore a 80 kPa. Per questo motivo non sono stati applicati valori di pressione dell'acqua superiori a 500 kPa. In totale, sono state applicate 141 variazioni di pressione dell'acqua, in incremento o decremento, su 8 differenti provini (Tabella 1).

Risultati delle prove

La Figura 2 riporta i valori di pressione interstiziale misurati alla base superiore del provino per incrementi di pressione da 100 kPa a 200 kPa (test B) o per decrementi di pressione da 200 kPa a 100 kPa (test G). Si osserva che maggiore è l'altezza del provino, maggiore è il tempo necessario per raggiungere l'equilibrio idraulico; si osserva, inoltre, che provini con la stessa altezza (S8) esibiscono differenti tempi di equalizzazione.

Se si definisce il grado di eccesso di pressione alla base superiore del provino, $U_{top,t}$ al generico istante t , come:

$$U_{top,t} = 1 - \frac{u_{etop,t}}{u_{etop,0}} \quad (1)$$

in cui $u_{etop,t}$ è l'eccesso di pressione interstiziale alla base superiore del provino all'istante t e $u_{etop,0}$ è l'eccesso iniziale, è possibile definire il tempo di risposta $t_{0.95}$, come il tempo necessario affinché il grado $U_{top,t_{0.95}}$ sia pari a 0.95.

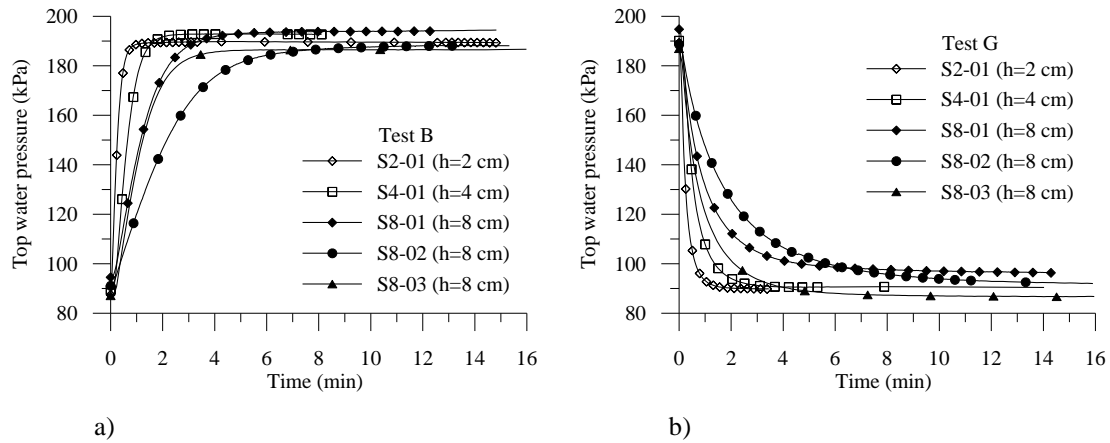


Figura 2. Valori di pressione interstiziale misurati alla sommità dei provini, di altezza 2, 4 e 8 cm, per variazioni della pressione alla base. a) Incremento di pressione da 100 kPa a 200 kPa (test B); b) decremento di pressione 200 kPa a 100 kPa (test G).

La Figura 3 riporta in grafico i valori di t_{95} rispetto al valore medio della pressione interstiziale $u_{average}$, calcolato come media tra valore iniziale e valore finale di pressione interstiziale imposta alla base del provino.

Si osserva che i tempi di risposta sono dell'ordine del minuto (minori di 8 min), diminuiscono con l'altezza del provino e diminuiscono all'aumentare di $u_{average}$, riducendosi a meno di un minuto per provini di 2 cm. Distinguendo con il simbolo pieno le prove in cui è stato imposto un incremento di pressione alla base del provino, inducendo una filtrazione verso l'alto (uw), e con il simbolo vuoto le prove in cui è stato imposto un decremento di pressione alla base del provino, inducendo una filtrazione verso il basso (dw), si osserva che i tempi t_{95} per le prove " uw " differiscono da quelli delle prove " dw ". Per valori di $u_{average}$ maggiori di 300 kPa, t_{95} per prove " uw " sono risultati generalmente superiori dei t_{95} per prove " dw ".

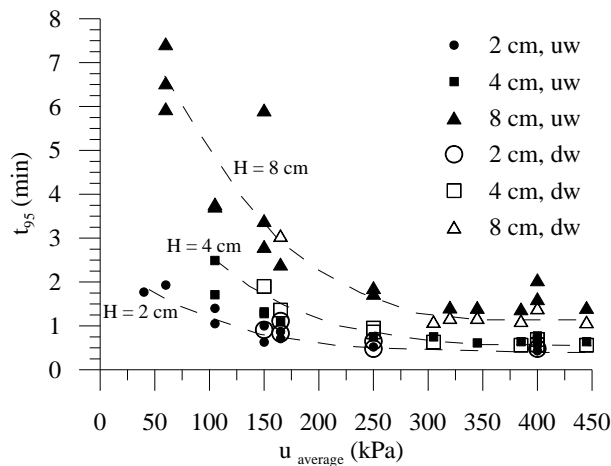


Figura 3. Relazione tra il tempo di risposta t_{95} e il valore medio di pressione interstiziale alla base del provino. I simboli pieni si riferiscono a moti di filtrazione verso l'alto (uw); quelli vuoti a moti verso il basso (dw).

Interpretazione dei risultati

Per spiegare la dipendenza del tempo di risposta dal valore della pressione interstiziale è necessario assumere il suolo comprimibile e non completamente saturo. In tali ipotesi ed assumendo valida l'equazione di Darcy, nonché ignorando la deformabilità del diaframma dei

trasduttori di pressione, l'equazione di continuità diventa:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(-k_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u_e}{\gamma_w} + z \right) \right) = - \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial u_e} \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2)$$

in cui $k_g = k_g(\mathcal{G})$ è la conducibilità idraulica del provino; \mathcal{G} è il contenuto d'acqua volumetrico, u_e è l'eccesso di pressione al tempo t e nella posizione z , crescente verso l'alto.

Se, in prima approssimazione, si assumono costanti sia k_g che $\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial u_e}$ per un assegnato intervallo di valori di u_e , l'equazione (2) diventa:

$$\frac{k_g}{\gamma_w \cdot \frac{\Delta \mathcal{G}}{\Delta u_e}} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (3)$$

che è simile alla ben nota equazione di Terzaghi per la consolidazione monodimensionale (Terzaghi, 1923). Utilizzando il metodo quasi-Newton sviluppato da Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno (Fletcher, 1987), implementato nel linguaggio di programmazione Ox di Doornik (1998), è stato possibile stimare i valori di c_v che minimizzano la somma dei quadrati delle differenze tra valori misurati e valori calcolati mediante l'equazione (3). La Figura 4 mostra, come esempio, l'ottima coincidenza tra valori misurati e valori stimati ottenuti per la prova B sul provino S8-03.

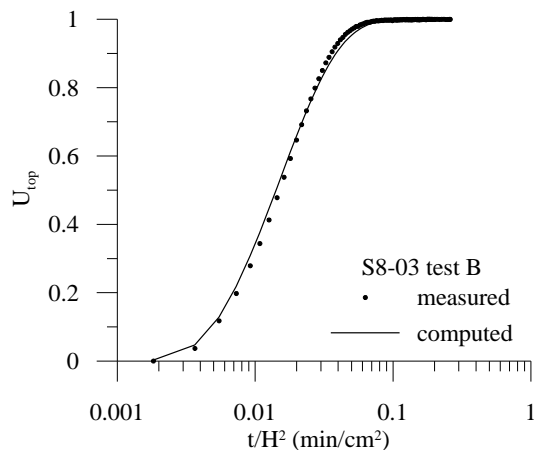


Figura 4. Confronto tra valori misurati e valori stimati di grado di eccesso di pressione U_{top} , per la prova B sul provino S8-03.

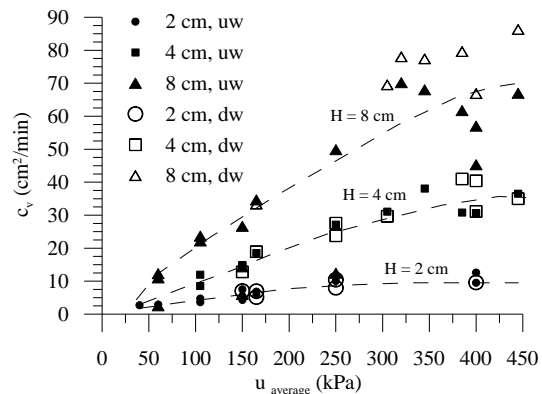


Figura 5. Valori stimati di c_v .

I valori stimati di c_v sono risultati crescenti con il valore di $u_{average}$ e con l'altezza del provino (Figura 5). La dipendenza dal valore di $u_{average}$ si può spiegare invocando il provino quasi-saturo ed ammettendo un sensibile incremento di k_g all'aumentare della pressione (Bicalho, 1999), la dipendenza dall'altezza del provino, invece, è spiegabile ammettendo una filtrazione all'interfaccia membrana-provino (Simeoni, submitted).

Sperimentazione in sito

Confortati dai risultati ottenuti in laboratorio è stata eseguita la sperimentazione in sito.

Strumentazione

A distanza di circa 4 m sono stati eseguiti due fori, in cui sono state installate quattro celle piezometriche (Figura 6): due superficiali (a), con trasduttori di pressione assoluti da 100 kPa (tipo Sisgeo P235S1), e due profonde (b), con celle filtranti tipo Casagrande di lunghezza 200 mm (tipo Sisgeo P101) e trasduttori di pressione assoluti a punta conica da 200 kPa (tipo Sisgeo P252C). I trasduttori di pressione Sisgeo P252C sono a punta conica con trasduttore ceramico, o-ring di tenuta e filtro in politene da 40 μm . I trasduttori Sisgeo P235S1 dei piezometri superficiali sono anch'essi di tipo ceramico, ma in configurazione classica con filtro di diametro 15 mm e porosità 1 μm .

I fori sono ubicati nell'argine destro del fiume Adige a Egna (BZ).

Installazione

Le celle piezometriche (a) sono state installate in uno strato di limo con sabbia, avente una conducibilità idraulica k_h di 10^{-5} m/s. Le celle porose tipo Casagrande (b) sono state installate in uno strato di sabbia limosa con ghiaia, avente k_h di 10^{-4} m/s.

Nel foro FGP le colonne piezometriche sono state realizzate iniettando da fondo foro una miscela di acqua-cemento-argilla in rapporto in peso 2,5 - 1 - 0,45. Al termine dell'iniezione, la canna è stata recuperata. La conducibilità idraulica di tale miscela è stata misurata in laboratorio mediante prove a carico variabile ed è risultata di 10^{-12} m/s. Nel foro TP la cella Casagrande (b) è stata inglobata nel terreno circostante per la chiusura del foro durante il recupero della camicia; il trasduttore di pressione (a) è stato installato tradizionalmente con un filtro di ghiaia fine (2-6 mm) e due tappi di bentonite in pellets.

In entrambi i fori i piezometri profondi sono stati installati all'interno di un tubo cieco da 1.5", terminante alla base con la cella Casagrande. Il trasduttore di pressione conico è stato installato calandolo direttamente nel tubo attraverso il cavo elettrico portante, fino a quando ha raggiunto il filtro P101 chiudendolo. Lo strumento è mantenuto in posizione da un opportuno peso cilindrico coassiale al cavo. Il trasduttore può quindi essere rimosso semplicemente recuperando il cavo elettrico attraverso il quale era stato calato.

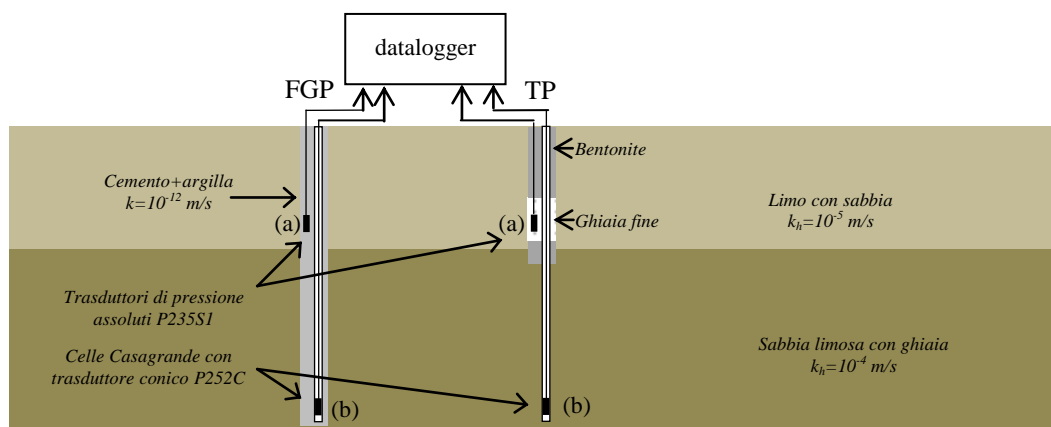


Figura 6. Piezometro fully-grouted FGP e piezometro tradizionale TP.

Risultati

In Figura 7 si riportano in grafico i valori di carico idraulico calcolati a partire dai valori di pressione misurati dai piezometri. Negli stessi grafici si riportano anche le altezze idrometriche del fiume Adige, che il 28 maggio 2011 evidenziano una piccola piena. Nelle

celle piezometriche profonde (b) si osserva un perfetto sincronismo tra il piezometro fully-grouted FGP e il piezometro tradizionale TP. Nelle celle piezometriche superficiali, invece, il piezometro fully-grouted sembrerebbe essere leggermente più “lento” e quindi meno conforme, oppure l’installazione del piezometro tradizionale potrebbe essere difettosa, non isolando perfettamente le due celle piezometriche installate nello stesso foro.

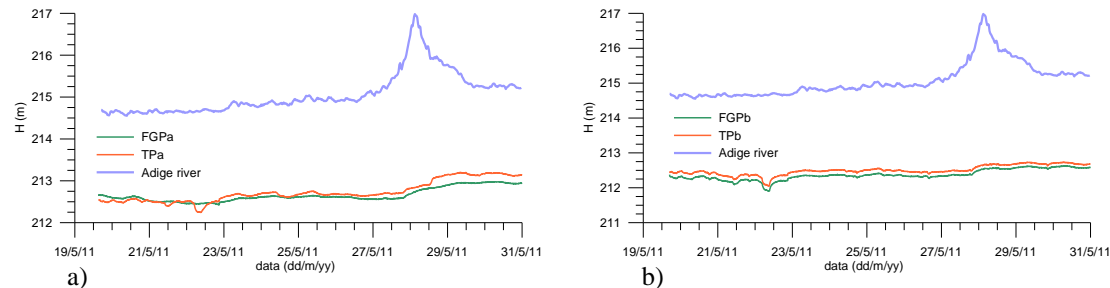


Figura 7. Carichi idraulici nei piezometri fully-grouted e tradizionale. a) celle piezometriche superficiali; b) celle piezometriche profonde.

Conclusioni

I risultati della sperimentazione in laboratorio e in sito hanno confermato l’ottima conformità dei piezometri fully-grouted. Le prove eseguite in sito hanno fornito tempi di risposta di un provino di miscela cemento-bentonite dell’ordine di pochi minuti; tali tempi sono accettabili per la maggior parte dei problemi geotecnici. La sperimentazione in sito, in cui sono messe a confronto quattro celle piezometriche installate con il metodo tradizionale e con la tecnica fully-grouted, ha dimostrato che entrambe le tipologie sono adeguate per la misura delle pressioni interstiziali.

Ne segue che la tecnica del fully-grouted può essere tenuta in particolare considerazione per l’installazione di celle piezometriche in profondità, dove la tecnica tradizionale con filtro e tappi di sigillatura di bentonite non risulta affidabile o comunque di difficile esecuzione. È altresì vantaggiosa nell’installazione di più celle piezometriche in un unico foro, dove le difficoltà operative della tecnica tradizionale in presenza di numerosi cavi e/o tubi in fori di diametro comunque contenuto e, soprattutto, l’incertezza sull’isolamento dei vari piezometri rendono la tecnica poco sicura, non garantendo la conformità dello strumento.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano Simone Zanolini e Tiziano Gheno per la collaborazione all’esecuzione delle prove in sito e in laboratorio.

Bibliografia

- Bicalho K.V. (1999). Modelling water flow in an unsaturated compacted soil. *Ph.D. thesis*. University of Colorado at Boulder.
- Doornik J.A. (1998). *Object-Oriented Matrix Programming Using Ox 2.0*, London, Timberlake Consultants Press.
- Fletcher R. (1987). *Practical Methods of Optimization*, 2nd edition. New York: John Wiley & Sons.
- Mikkelsen P.E. (2002). Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments. *Geotechnical News*, 20 (4): 38-42.
- Simeoni L. (xxxx). Laboratory tests for measuring the time-lag of fully grouted piezometers”. *Journal of Hydrology*, submitted.
- Terzaghi K. (1923). Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus Dem Veraluf der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen Akademie der Wissenschaften in Wien. *Mathematisch-Naturwissen-Schaftliche Klasse, Sitzungsberichte, Abteilung II*, 132 (3-4): 125-138.