

## **CELLA TRIASSIALE CON CONTROLLO DELL'UMIDITÀ RELATIVA**

Roberta Ventini

*Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
roberta.ventini@unina.it*

Alessandro Flora

*Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
flora@unina.it*

Stefania Lirer

*Università degli Studi Guglielmo Marconi  
s.lirer@unimarconi.it*

Claudio Mancuso

*Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
mancuso@unina.it*

### **Sommario**

Il comportamento meccanico dei rockfill dipende dal livello tensionale e dalla densità relativa, ma anche dalla rottura delle particelle, fenomeno caratteristico dei terreni a grana grossa. Come ampiamente riconosciuto in letteratura, la rottura dei grani è influenzata dalla composizione mineralogica, dall'assortimento granulometrico ed anche dall'umidità relativa (RH). Recentemente, presso il Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", è stata avviata una ricerca finalizzata proprio allo studio sperimentale del comportamento meccanico di rockfill in condizioni di parziale saturazione. Lo studio si avvale dell'impiego di una cella triassiale di grandi dimensioni modificata per imporre nel provino anche condizioni di parziale saturazione: il controllo dell'umidità relativa, e quindi della suzione totale, consiste nell'imporre il trasferimento di vapore acqueo mediante un sistema di convezione forzata, ed avviene per mezzo di soluzioni saline collocate all'interno di un recipiente esterno.

La cella è stata anche modificata introducendo, per la misura delle deformazioni assiali e radiali, un sistema magnetico innovativo di rilevamento forma/volume denominato Magnetic Shape Detector (MSD), attualmente in fase di messa a punto.

### **1. Introduzione**

Il comportamento meccanico dei rockfill dipende dal livello tensionale e dalla densità relativa, come di consueto per i terreni granulari. Tuttavia, a causa delle grandi dimensioni delle particelle, anche le loro caratteristiche mineralogiche giocano un ruolo rilevante, influenzando la rottura dei grani e quindi il loro comportamento generale. Inoltre, è stato ampiamente dimostrato in letteratura che per un dato stato (definito come la combinazione di stato tensionale, indice dei vuoti e numero medio di contatti tra i grani), l'effetto della mineralogia dei grani sulla rottura dipende molto significativamente dall'umidità relativa (RH). Ad esempio, Oldecop & Alonso (2001), sulla base di prove in un edometro di grosse dimensioni, hanno mostrato come l'umidità relativa dell'aria di porosità condizioni la compressibilità e determini, a seguito di umidificazione totale o parziale, fenomeni di collasso volumetrico di provini in rockfill.

Al fine di indagare l'influenza dell'umidità relativa e, quindi, della suzione totale sulla compressibilità

dei rockfill, presso il Laboratorio di Ingegneria Geotecnica dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" è stata avviata una ricerca sperimentale avvalendosi di una cella triassiale di grandi dimensioni (D=20 cm, H=40 cm), modificata per poter imporre nel provino condizioni di umidità relativa controllata. L'apparecchiatura è stata dotata anche di un sistema innovativo per la misura delle deformazioni del provino, descritta nel seguito.

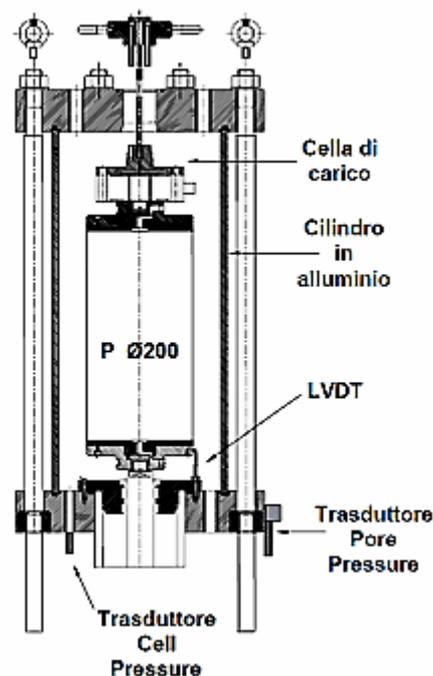
## **2. Cella triassiale High Pressure Stress Path**

La 'HPSP', High Pressure Stress Path, è un apparecchio triassiale di grandi dimensioni di tipo Bishop e Wesley con cella di carico immergibile posta nella parte superiore dell'apparecchiatura. La cella è stata progettata per operare alla pressione massima di 2 MPa. Il provino ha un diametro di 20 cm ed un'altezza pari a 41 cm; uno schema della cella è mostrato in Figura 1.

Il carico assiale di compressione può raggiungere un valore massimo pari a 200 kN ed è applicato mediante un pistone idraulico posto nella parte inferiore dell'apparecchiatura mentre il provino fa contrasto superiormente con una cella di carico (fissa). Il pistone ha una corsa massima pari a 200 mm ed un diametro di 60 mm. Un trasduttore di spostamento assiale immergibile (LVDT) collegato al pistone di carico consente la misura delle deformazioni assiali del provino con una corsa di  $\pm 3$ " ed un'accuratezza dello 0,3%.

Il sistema è costituito da tre circuiti di pressione indipendenti: uno per la pressione di cella, uno per la contropressione ed uno (contenente olio idraulico) per regolare la pressione nella camera inferiore per l'applicazione del carico assiale.

Il circuito di drenaggio si sviluppa a partire dalle basi inferiore e superiore del provino con linee indipendenti per la misura della pressione neutra e delle deformazioni volumetriche. I rubinetti presenti sulle singole linee consentono l'isolamento dei circuiti garantendo elevata versatilità nell'esecuzione di diverse tipologie di prova.



*Fig 1. Schema della cella triassiale HPSP*

L'HPSP è in grado di eseguire prove sia a carico che a deformazione controllata con controllo in

retroazione automatica. Nel caso in cui il controllo sia operato sul carico, il segnale di retroazione è fornito dalla cella di carico; nel caso in cui, invece, il controllo sia sullo spostamento, il segnale di retroazione è fornito dall'LVDT dello spostamento assiale.

Lo stato corrente del provino è trasmesso al sistema di controllo che regola le pressioni ed è rilevato da una serie di trasduttori, quali la già menzionata cella di carico per la misura del carico assiale, due trasduttori di pressione (CELL e PORE), un trasduttore differenziale di pressione (DPT), l'LVDT per la misura delle deformazioni assiali ed un LVDT per la misura degli spostamenti del moltiplicatore di pressione (Volume Gauge esterno). È quindi possibile eseguire prove con percorsi molto vari sfruttando il controllo indipendente della tensione di cella, del carico assiale e delle pressioni del fluido di porosità.

### **3. Sistema di applicazione della suzione**

#### *3.1 Aspetti generali*

La risposta meccanica dei rockfill è fortemente dominata dalla rottura delle particelle, che è controllata dal livello di tensione agente, dall'assortimento granulometrico, dalla durezza e dalla forma dei granelli, dallo stato di addensamento e dall'umidità relativa (RH) all'interno dei pori. L'umidità relativa esprime in percentuale il rapporto tra la quantità di vapore acqueo contenuta in una massa d'aria e la quantità massima che la stessa può contenere nelle medesime condizioni di temperatura e pressione. Pertanto, l'RH fornisce una misura della concentrazione di vapore acqueo contenuto all'interno dei pori in rockfill.

Se il liquido, ovvero l'acqua contenuta nei pori, raggiunge l'equilibrio con la fase gassosa, la legge psicrometrica consente una facile determinazione della suzione totale a partire dall'umidità relativa (Coussy, 1995):

$$RH = \exp \left[ -\frac{v(s+\pi)}{RT} \right] \quad (1)$$

con  $v$  volume molare dell'acqua,  $R$  costante universale dei gas,  $T$  temperatura assoluta,  $s$  suzione di matrice,  $\pi$  suzione osmotica dovuta alla presenza di soluto nell'acqua di porosità. La somma  $\psi = s + \pi$  è la suzione totale. La suzione di matrice e la suzione totale coincidono se i pori tra le particelle di materiale contengono acqua pura priva di soluto.

L'equazione (1) implica che il controllo della suzione totale, in un qualsiasi provino conservato in un sistema chiuso, può essere raggiunto controllando l'umidità relativa dell'ambiente circostante, purché si raggiunga una condizione di equilibrio termodinamico. In questa procedura, nota come tecnica dell'equilibrio di vapore, il trasporto di acqua avviene esclusivamente attraverso la fase gassosa, mediante i processi di avvezione e di diffusione molecolare.

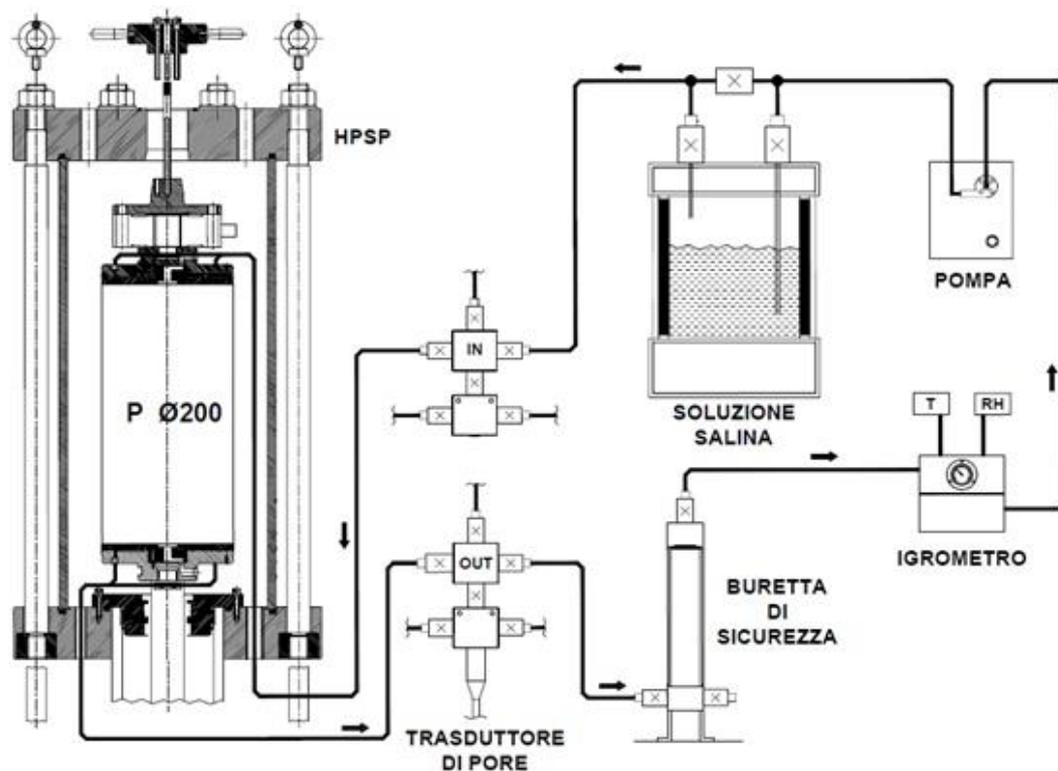
#### *3.2 Tecnica di controllo della suzione in cella HPSP*

Nell'ambito delle operazioni di potenziamento della cella HPSP, si è realizzato un sistema in grado di attuare la tecnica dell'equilibrio del vapore, implementata con successo da Oldecop & Alonso (2001). Il controllo dell'umidità relativa è ottenuto mediante l'introduzione di una soluzione salina in un circuito chiuso all'interno del sistema di prova, come mostrato in Figura 2. La soluzione è posta in un contenitore separato dalla cella triassiale al fine di evitare il contatto diretto con il provino, consentendo il collegamento con la sola fase gassosa del sistema.

Il trasporto di acqua, dalla soluzione salina al provino, avviene sotto forma di vapore acqueo. Quando il trasporto d'acqua avviene esclusivamente per diffusione molecolare il raggiungimento della condizione di equilibrio termodinamico richiede tempi lunghissimi e incompatibili con una "agevole"

sperimentazione. L'alternativa consiste nel provocare la circolazione d'aria tra soluzione e provino attraverso una pompa che, producendo un efficace trasporto del vapore, migliora l'efficienza del sistema. In questo modo, il vapore acqueo è trasportato per avvezione, ossia con un meccanismo di trasporto più efficiente della sola diffusione molecolare. Pertanto, in cella HPSP una pompa elettrica proporziona un flusso d'aria che passa attraverso il contenitore in cui è posta la soluzione salina.

Il vapore acqueo in uscita dal contenitore viene fatto circolare attraverso il provino dalla testa superiore alla base, dove viene raccolto da un igrometro installato nel flusso d'aria in uscita dal provino. Questo strumento consente la misura della temperatura e la registrazione continua dell'umidità relativa nel tempo. Al fine di impedire l'ingresso d'acqua nel circuito pneumatico, immediatamente prima dell'igrometro è collocata una buretta di sicurezza.



*Fig 2. Sistema di controllo dell'umidità relativa della cella HPSP*

I materiali granulari sono considerati materiali a doppia porosità: i vuoti formati dagli spazi interparticellari ed i pori dovuti alla naturale porosità della roccia. All'avvio del sistema il vapore acqueo azionato dalla pompa scorre all'interno dei vuoti creando un gradiente di RH tra i vuoti interparticellari ed i pori della roccia. Questa condizione aziona un processo di trasporto di vapore nei pori della roccia mediante diffusione molecolare. Quando termina il trasporto di vapore l'RH è uguale in tutti i punti della fase gassosa del sistema indicando il raggiungimento della condizione di equilibrio termodinamico. All'equilibrio, l'umidità relativa e la suzione totale sono correlate dall'equazione (1).

Il sistema è in grado di simulare sia un percorso di umidificazione adoperando una soluzione che imponga un'umidità relativa maggiore dell'RH interna al provino, sia un percorso di essiccamento. Secondo la relazione (1), l'aumento dell'umidità relativa del materiale comporta la riduzione della suzione e quindi un aumento della quantità d'acqua liquida contenuta nei pori della roccia.

#### 4. Sistema di misura delle deformazioni volumetriche

Nella cella HPSP la misura delle deformazioni volumetriche in condizione di totale saturazione avviene 'in modo classico' tramite delle burette ed un trasduttore differenziale di pressione (DPT). Una misura accurata delle variazioni di volume in provini parzialmente saturi, che comprende le variazioni dei volumi di acqua e di aria nei pori, comporta maggiori difficoltà rispetto a quanto avviene in provini saturi.

In letteratura sono descritte diverse tecniche che consentono sia misure globali che locali, a seconda della posizione dei trasduttori. In particolare, una tecnica innovativa è stata sviluppata da Romero et al. (1997) e più recentemente da Messerklinger et al. (2004), i quali hanno utilizzato un sistema laser che misura le deformazioni radiali per tutta l'altezza del provino.

Nella cella HPSP si è optato di affiancare al sistema tradizionale di misura globale con DPT, un sistema locale magnetico di rilevamento forma/volume denominato Magnetic Shape Detector (MSD). Tale sistema è stato progettato per la misura delle deformazioni assiali e radiali locali nonché per la misura delle variazioni di volume globali in condizione di parziale saturazione.

Il sistema è costituito da sei magneti cilindrici N40 in lega di neodimio, ferro e boro (NdFeB), aventi diametro pari a 10 mm ed altezza di 40 mm ed altrettanti involucri contenenti terne di sensori Hall. Immediatamente prima della chiusura della cella, i magneti vengono incollati sulla membrana in lattice che avvolge il provino nelle posizioni mostrate in Figura 3. I sensori sono invece bloccati in posizioni fisse nella parte interna del cilindro esterno (in alluminio) della cella triassiale, in modo che, all'inizio della prova, i rispettivi baricentri siano perfettamente allineati con i baricentri dei magneti.

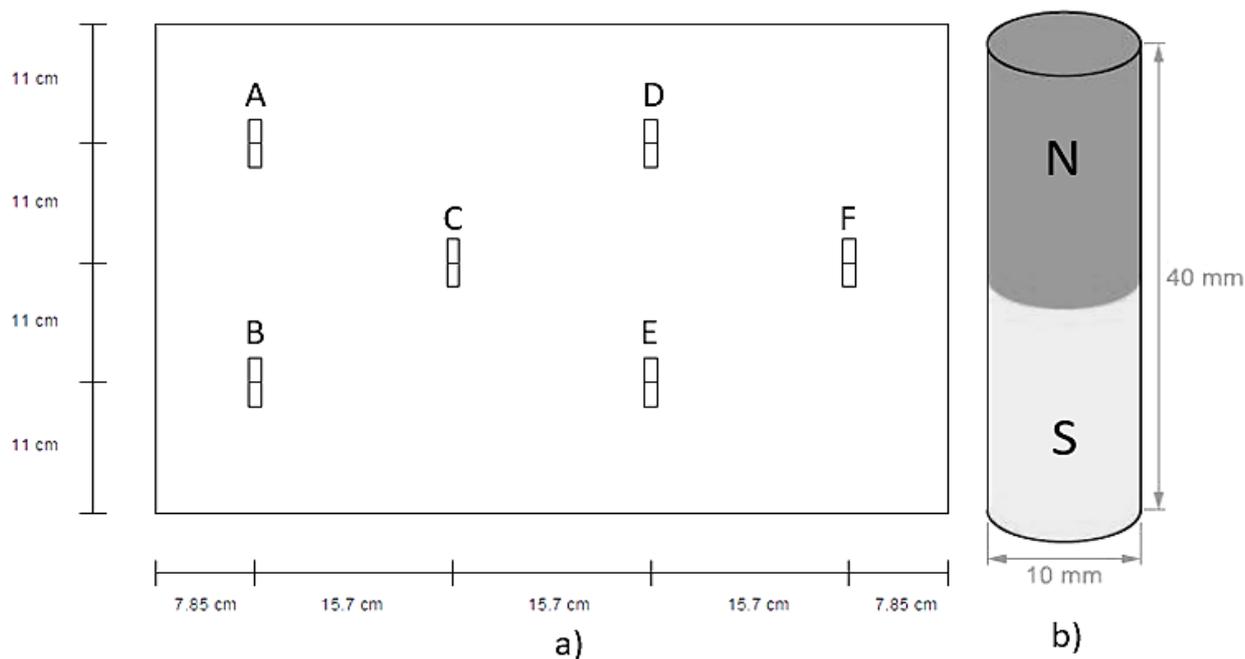


Fig 3. Sistema di rilevamento forma/volume: a) schema di posizionamento dei magneti sulla superficie esterna del provino; b) ingrandimento del magnete

I sensori adoperati sono in grado di rilevare gli spostamenti assiali, radiali e le rotazioni dei magneti collocati nelle posizioni A, B, D, E mentre dei restanti magneti C ed F vengono rilevati solo gli spostamenti in direzione assiale e radiale. Le misure vengono elaborate da un software, consentendo la registrazione degli spostamenti dei magneti e della conseguente probabile variazione di posizione della superficie laterale del provino nel tempo. L'asse verticale lungo il quale si sviluppa tale superficie ha origine nel punto fisso in testa al provino ed è diretto verso la base mentre l'asse orizzontale ha origine

in corrispondenza della superficie laterale iniziale del provino ed è diretto verso l'esterno. Il profilo laterale del provino viene determinato interpolando le misure alle quote 100, 200 e 300 mm, ottenute mediando le posizioni dei magneti posti alla stessa quota. Si sono assunte le ulteriori ipotesi di punti a tangente verticale per le quote 0 e 200 mm e per la base inferiore del provino, data la mancanza di informazioni relative alla rotazione. Note le posizioni delle basi ed il profilo laterale, il volume corrente del provino è facilmente determinato attraverso un calcolo integrale.

## **5. Conclusioni**

La cella triassiale HPSP con controllo della suzione è stata progettata e strumentata per l'esecuzione di prove su provini in rockfill con diametro pari a 20 cm.

L'apparecchiatura presenta grande versatilità e consente di sviluppare percorsi tensionali a carico e/o a deformazione controllata con controllo in retroazione automatica. Inoltre, permette l'esecuzione di prove in cui è possibile far variare l'umidità dell'aria di porosità utilizzando la tecnica di equilibrio del vapore. Al raggiungimento della condizione di equilibrio termodinamico, attraverso la legge psicrometrica, è possibile determinare la suzione totale all'interno del provino. Infine, è in fase di sviluppo una sperimentale tecnica di misura delle deformazioni assiali e radiali locali nonché della deformazione volumetrica globale.

I prossimi obiettivi della ricerca consistono nella caratterizzazione meccanica di rockfill in condizione di parziale saturazione attraverso l'esecuzione di prove triassiali, al fine di valutare l'incidenza dei vari fattori che influenzano la rottura delle particelle.

## **Bibliografia**

- Chávez C., Alonso E. E. (2003). "A constitutive model for crushed granular aggregates which includes suction effects". *Soils and foundations*, 43, 215-227.
- Coussy O. (1995). *Mechanics of porous continua*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Messerklinger S., Bleiker E., Zweidler A., Springman S.M. (2004). Displacement measurement with laser scanning in triaxial testing apparatuses. 16<sup>th</sup> European Young Geotechnical Engineers' Conference, 1-10, Vienna, Austria.
- Oldecop L. (2000). *Compresibilidad de escolleras influencia de la humedad*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Oldecop L. A., Alonso E. E. (2001). "A model for rockfill compressibility". *Géotechnique*, 51, 127-139.
- Oldecop L. A., Alonso E. E. (2003). "Suction effects on rockfill compressibility". *Géotechnique*, 53, 289-292.
- Oldecop L. A., Alonso E. E. (2004). "Testing rockfill under relative humidity control". *Geotechnical Testing Journal*, 27, 269-278.
- Ortega E. F. (2008). *Comportamiento de materiales granulares gruesos. Efecto de la succión*. PhD Thesis.
- Romero E., Facio J. A., Lloret A., Gens A., Alonso E. E. (1997). "A new suction and temperature controlled triaxial apparatus". 4th ICSMFE Hamburg, 1, 185-188.