

# ANALISI DELL'EFFETTO DELLE CONDIZIONI DI DRENAGGIO SULLA RISPOSTA IDRO-MECCANICA DI TAILINGS IN CONDIZIONI NON SATURE

Gianluca Bella <sup>1</sup> (gianluca.bella@pini.group)  
*Pini Group SA, Lugano, Svizzera*

Guido Musso <sup>2</sup> (guido.musso@polito.it)  
*Politecnico di Torino, Torino, Italia*

**ABSTRACT.** Il presente articolo espone alcuni risultati significativi di un'ampia campagna di prove sperimentali realizzata sulla frazione limosa degli sterili minerari degli ex-bacini minerari di Stava. Il comportamento idro-meccanico di tali materiali (tailings) è analizzato in condizioni di parziale saturazione mediante prove triassiali a suzione controllata eseguite presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Torino. L'effetto delle condizioni di drenaggio sulla risposta idro-meccanica del materiale è analizzato ed interpretato ricorrendo alle curve di ritenzione idrica (WRC) stimate da una precedente campagna effettuata sul medesimo materiale. Tale studio trova possibili applicazioni ai fini di una corretta progettazione dei bacini di decantazione che, a motivo della loro complessità, richiedono un'approfondita caratterizzazione idraulica e meccanica dei materiali ivi depositi.

## 1. INTRODUZIONE

I bacini di stoccaggio degli sterili minerari sono opere di ritenuta atte a contenere gli scarti derivanti dai processi estrattivi. A causa della loro elevata estensione spaziale e prolungata vita utile, tali opere sono costituite da materiali eterogenei e sottoposte a interazioni con l'atmosfera. Queste ultime comportano variazioni di livello della superficie piezometrica e dunque cambiamenti dell'estensione della zona non satura all'interno delle aree di deposito. Una corretta progettazione e accurate analisi di stabilità in grado di cogliere tali aspetti richiedono dunque un'approfondita caratterizzazione della risposta idro-meccanica dei materiali in condizioni di parziale saturazione. Il presente studio espone gli esiti sperimentali di una campagna di prove realizzata sui tailings prelevati dai bacini di decantazione di Stava (Italia) in seguito al loro collasso avvenuto 1985. La sperimentazione ha previsto l'esecuzione di prove in cella triassiale a suzione controllata utilizzando la tecnica della traslazione degli assi e dell'equilibrio di vapore. La risposta idro-meccanica della frazione limosa è analizzata mediante l'applicazione di differenti percorsi idraulici, tensionali e condizioni di drenaggio.

## 2. MATERIALE E MODALITÀ OPERATIVE

Il materiale prelevato dai bacini di Stava è stato separato nella frazione sabbiosa e limosa, quest'ultima sottoposta a sperimentazione. Passante il setaccio ASTM n.200, essa rappresenta la parte di deposito più interna e dunque più distante dal rilevato arginale. Quarzo, calcite e fluorite sono i costituenti mineralogici presenti in maggior misura (Bella, 2017) mentre il limite liquido, il limite plastico e la gravità specifica sono valutati rispettivamente  $w_L=27.4\%$ ,  $w_P=18.0\%$  e  $G_S=2.83$  (Carrera, 2008). Campioni cilindrici aventi diametro iniziale 38mm ed altezza pari a 76mm sono stati preparati a differenti contenuti d'acqua e indici dei vuoti iniziali. Al terreno asciutto è stata aggiunto un certo quantitativo di acqua deionizzata-deaerata, mentre il volume desiderato è stato ottenuto tramite compattazione statica con pressa a controllo di spostamento. In Tabella 1 è riportato lo stato iniziale dei provini e l'indicazione ed alle condizioni di drenaggio imposte in fase di taglio e delle tecniche di misura/controllo suzione in cella triassiale. Come riportato in Tabella 2, tre sono le fasi principali di ciascuna prova: 1) equalizzazione della suzione (valore iniziale  $s_0$  non noto), 2) consolidazione 3) taglio. L'equalizzazione della suzione consiste nell'imporre al campione un certo valore di suzione mediante la "traslazione degli assi" (agendo indipendentemente sulla pressione dell'aria e dell'acqua (Fig.1a), oppure tramite la "tecnica dell'equilibrio di vapore" (forzando tramite apposito circuito e pompa la circolazione in cella di vapori di selezionate soluzioni chimiche sature (Fig.1b). Tale procedura è stata preceduta in certi casi, da una fase di carico isotropo a contenuto d'acqua costante. La consolidazione è stata eseguita in condizioni isotrope imponendo differenti valori di confinamento variabile tra 100kPa e 800kPa in termini di pressione netta (definita come differenza tra tensione media a pressione dell'aria). Infine, il taglio è stato realizzato aumentando gradualmente il carico assiale a suzione costante (condizioni drenate), oppure a contenuto d'acqua costante (condizioni non

drenate). Talvolta questa fase è stata preceduta da un imbibimento del campione tramite incremento della pressione dell'acqua. Al termine della prova il campione è estratto, pesato ed essiccato in forno a 104°C per 24 ore al fine di valutare a ritroso il contenuto d'acqua e il grado di saturazione.

Tabella 1. Stato iniziale dei campioni del limo di Stava: peso secco per unità di volume ( $\gamma_d$ ), indice dei vuoti ( $e_0$ ), contenuto d'acqua ( $w_0$ ), tecnica di misura/controllo suzione, condizioni fase di taglio, commenti.

Campione	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$ (-)	$w_0$ (-)	Tecnica di misura/ controllo suzione	Condizioni drenaggio fase di taglio	Stato Critico
TX_0.70-60-100	16.60	0.70	14.90	Traslazione assi	Non drenate	Approcciato
TX_0.70-60-200	16.60	0.70	14.90	Traslazione assi	Non drenate	Raggiunto
TX_0.70-60-400	16.60	0.70	14.90	Traslazione assi	Non drenate	Raggiunto
TX_0.60-60-800	17.70	0.60	14.90	Traslazione assi	Non drenate	Approcciato
TX_0.60-175-200	17.70	0.60	6.40	Equilibrio di vapore	Non drenate	Raggiunto
TX_0.80-90-800	15.70	0.80	5.70	Traslazione assi	Non drenate	Raggiunto
TX_0.80-90-100	15.70	0.80	14.10	Traslazione assi	Drenate (suzione imposta)	Raggiunto

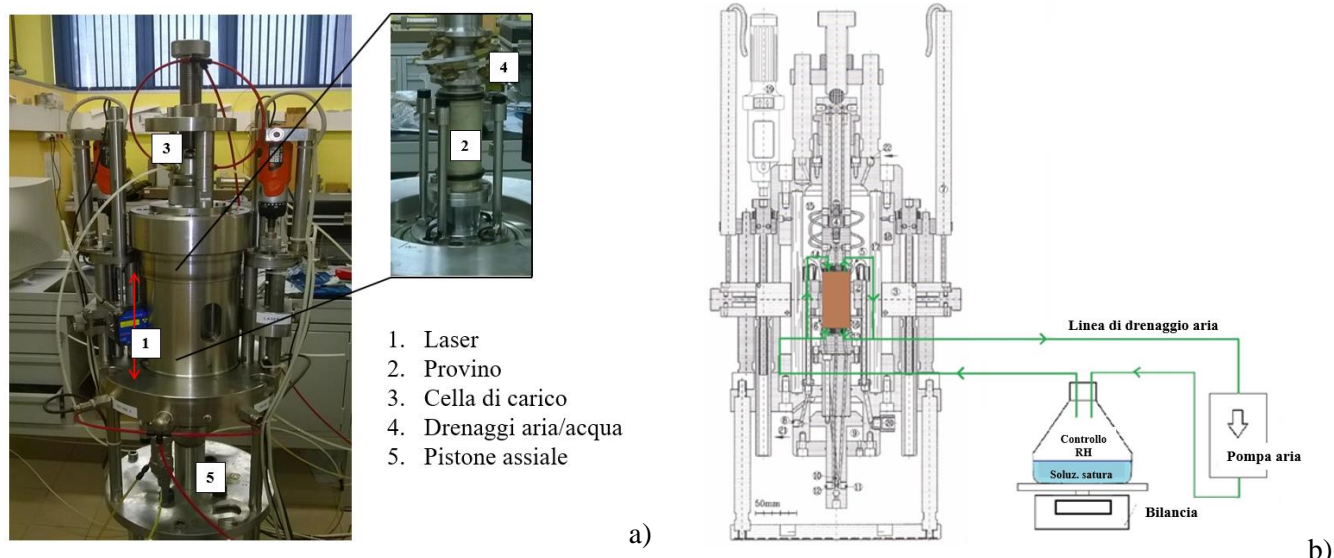


Figura 1. a) Principali componenti della cella triassiale a controllo di suzione (tecnica traslazione degli assi); b) vista schematica del circuito realizzato per l'utilizzo della tecnica dell'equilibrio di vapore (modificato da Romero, 1999).

Tabella 2. Fasi delle prove triassiali a suzione controllata ed indicazione di suzione ( $s$ ), sforzo deviatorico ( $q$ ), contenuto d'acqua ( $w$ ) e tensione netta ( $p_{net}$ ). Mis.=misurata, Cost.=costante.

Campione	Carico a $w = \text{cost.}$	Fase di equalizzazione della suzione			Fase di consolidazione			Fase di imbibimento			Fase di taglio		
	$P_{net}$ (kPa)	$s$ (kPa)	$q$ (kPa)	$P_{net}$ (kPa)	$s$ (kPa)	$q$ (kPa)	$P_{net}$ (kPa)	$s$ (kPa)	$q$ (kPa)	$P_{net}$ (kPa)	$s$ (kPa)	$q$ (kPa)	$P_{net}$ (kPa)
TX_0.70-60-100	-	$s_i \rightarrow 60$	0	5-10	60	0	5-10 $\rightarrow$ 100	-	-	-	Mis.	Mis.	Mis.
TX_0.70-60-200	-	$s_i \rightarrow 60$	0	5-10	60	0	5-10 $\rightarrow$ 200	-	-	-	Mis.	Mis.	Mis.
TX_0.70-60-400	-	$s_i \rightarrow 60$	0	5-10	60	0	5-10 $\rightarrow$ 400	-	-	-	Mis.	Mis.	Mis.
TX_0.60-60-800	-	$s_i \rightarrow 60$	0	5-10	60	0	5-10 $\rightarrow$ 800	60 $\rightarrow$ 20	Cost.(0)	Cost.(800)	Mis.	Mis.	Mis.
TX_0.60-175-200	-	$s_i \rightarrow 175$	0	5-10	175	0	5-10 $\rightarrow$ 200	-	-	-	Cost. (175)*	Mis.	Mis.
TX_0.80-90-800	100	$s_i \rightarrow 90$	0	100	90	0	5-10 $\rightarrow$ 800	-	-	-	Mis.	Mis.	Mis.
TX_0.80-90-100	100	$s_i \rightarrow 90$	0	100	-	-	-	-	-	-	Cost.(90)	Mis.	Mis.

\* Generalmente la tecnica dell'equilibrio di vapore è utilizzata per imporre suzioni totali di alcuni MPa mediante opportuna soluzione chimica saturata. Tuttavia nel caso in esame, in condizioni di scambio d'acqua costante ossia assenza di variazioni di peso del campione, il valore di suzione è stato stimato tramite analisi a ritroso mediante curve di ritenzione sul medesimo materiale (dettagli in Bella, 2017).

Caratteristica peculiare di tali prove è che le variazioni del volume d'acqua scambiato e le variazioni di volume totale del campione non coincidono a causa delle condizioni di non saturazione imposte. Durante la prova le variazioni di volume totale del campione sono state accuratamente valutate mediante regolari scansioni laser del suo profilo come descritto nel dettaglio nella tesi di dottorato di Bella (2017).

### 3. RISULTATI E COMMENTI

L'andamento della suzione nel tempo per i campioni sottoposti a taglio in condizioni non drenate è rappresentato in Fig.2a ed in Fig.2b, rispettivamente TX\_0.70-60-200 e TX\_0.60-60-800. Per quanto attiene al primo campione, la suzione è mantenuta costante durante la consolidazione, mentre in fase di taglio essa è valutata misurando le pressioni dell'aria e dell'acqua, assistendo così ad una riduzione della stessa. Viceversa, l'evoluzione della suzione nel tempo per il campione TX\_0.60-60-800 mostra che, dopo la consolidazione, la suzione si riduce a circa 20kPa durante la fase di imbibimento, mentre in fase di taglio essa è nuovamente valutata misurando le pressioni dell'aria e dell'acqua assistendo dunque ad un incremento. Viceversa, l'andamento della suzione nel tempo per un campione sottoposto a taglio in condizioni drenate (drenaggi acqua aperti) è rappresentata in Fig.2c (campione TX\_0.80-90-100) per il quale la suzione si mantiene pressoché costante durante tutta la prova.

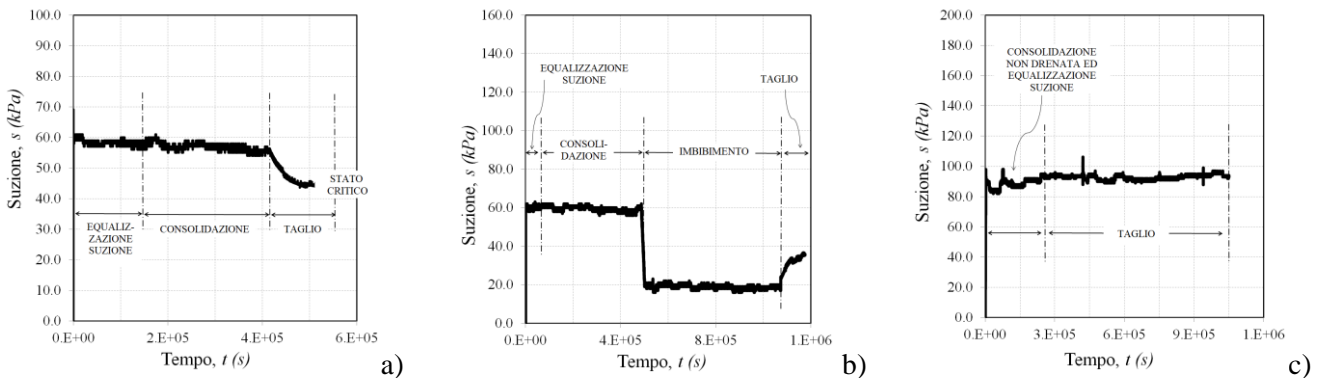


Figura 2. Andamento della suzione nel tempo durante tutte le fasi della prova: a) campione TX\_0.70-60-200; b) campione TX\_0.60-60-800; c) campione TX\_0.80-90-100.

Tali andamenti trovano una possibile giustificazione teorica dall'analisi dell'evoluzione delle curve di ritenzione idrica. Una precedente campagna sperimentale sui medesimi materiali ha infatti consentito la valutazione delle WRC tramite sperimentazione in cella edometrica a controllo di suzione (dettagli in Bella, 2021). Esse sono ottenute per interpolazione dei risultati sperimentali sul piano (s-Sr) di campioni preparati a differenti indici dei vuoti iniziali ( $e_0=0.50-0.60-0.70$ ) mediante il modello proposto da Gallipoli *et al.* (2003), consentendo dunque di stimarne il comportamento idraulico al variare dell'indice dei vuoti:

$$Sr = \frac{1}{(1 + [\phi(v-1)\psi s]^n)^m} \quad (1)$$

dove  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $n$ ,  $m$  sono i parametri di modello (calibrazione riportata in Tab.3 e Tab.4),  $v$  il volume specifico,  $Sr$  il grado di saturazione noto il quale si perviene al "water ratio"  $e_w = Sr \cdot e$ . (Fig. 3).

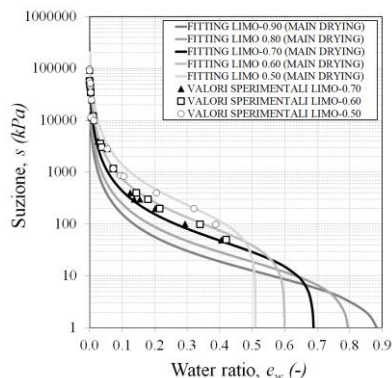


Figura 3. Valori sperimentali e principali rami di essiccazione (main drying) delle curve di ritenzione idraulica per differenti indici dei vuoti.

Tabella 3. Main drying: parametri calibrati della curva di ritenzione idraulica secondo il modello di Gallipoli *et al.* (2003).

Ramo principale di essiccazione			
n (-)	m (-)	$\Phi$ (kPa <sup>-1</sup> )	$\psi$ (-)
1.670	0.400	0.281	5.327

Tabella 4. Main wetting: parametri calibrati della curva di ritenzione idraulica secondo il modello di Gallipoli *et al.* (2003).

Ramo principale di imbibimento			
n (-)	m (-)	$\Phi$ (kPa <sup>-1</sup> )	$\psi$ (-)
1.500	0.330	5.405	7.810

Lo stato di inizio taglio (punto A:  $e_A=0.67$ ) e di fine taglio (punto B:  $e_B=0.70$ ) del campione TX\_0.70-60-100 assieme ai rami principali delle curve di ritenzione valutate in corrispondenza dei rispettivi indici dei vuoti sono

riportati in Fig.4a. Il percorso idraulico da A→B è rappresentato da una freccia verticale sul piano (s-e<sub>w</sub>) a motivo delle condizioni non drenate imposte in fase di taglio (e<sub>w</sub>=costante) durante il quale il campione esibisce globalmente un comportamento dilatante (dettagli in Bella, 2017). In termini di WRC, tale risposta è associata a variazioni dello stato idraulico verso il ramo di essiccamento con conseguente incremento della suzione. Tuttavia, i risultati sperimentali hanno evidenziato una diminuzione della suzione (Fig.2a): ciò trova la sua giustificazione nella tendenza del campione a raggiungere il ramo di drying associato a indici dei vuoti (e<sub>B</sub>) superiori rispetto a quelli iniziali (e<sub>A</sub>) e dunque caratterizzato da minor capacità di ritenzione idrica. Il percorso idraulico del campione TX\_0.60-60-800 ed i rispettivi rami principali della curva di ritenzione sono riportati in Fig.4b. Lo stato iniziale giace questa volta sul ramo di wetting a motivo della imbibizione imposta al campione dopo la consolidazione, mentre la direzione del percorso durante il taglio non drenato è verso l'alto per raggiungere il ramo principale di essiccamento con conseguente incremento della suzione, come osservato sperimentalmente in Fig. 2b. Infine, il percorso idraulico del campione TX\_0.80-90-100 ed i rispettivi rami principali della WRC sono rappresentati in Fig.4c. Durante il taglio il campione esibisce globalmente un comportamento contraente (e<sub>A</sub>=0.77→ e<sub>A</sub>=0.74). In termini di WRC, tale risposta è associata a variazioni dello stato idraulico in direzione del ramo di imbibimento con conseguente aumento della suzione. Essa è però imposta costante e dunque il ramo di wetting è approssiato mediante un percorso orizzontale a motivo delle condizioni drenate. Una maggior perdita d'acqua dal campione avrebbe tuttavia reso più evidente il percorso A→B approssiando maggiormente il punto finale al rispettivo ramo di wetting.

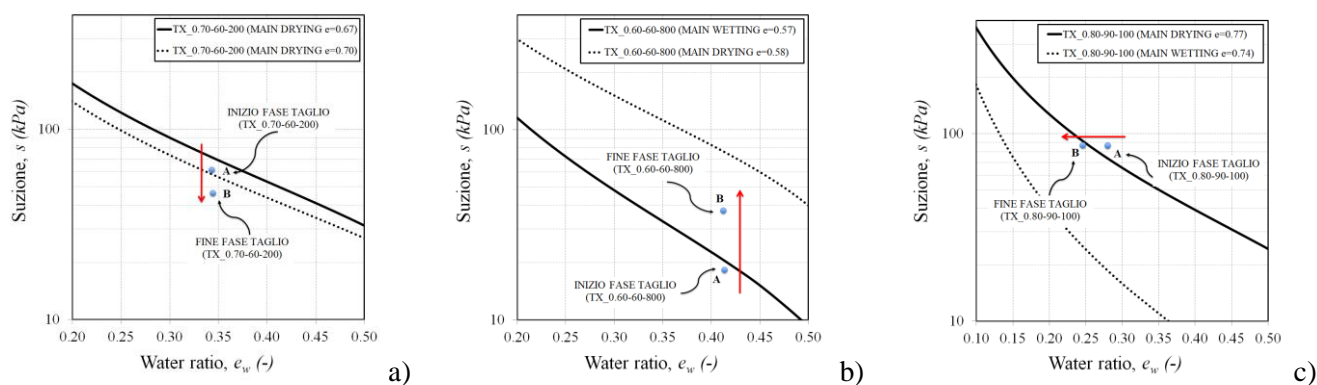


Figura 4. Andamento della suzione nel tempo durante tutte le fasi della prova: a) campione TX\_0.70-60-200; c) campione TX\_0.60-60-800; c) campione TX\_0.80-90-100.

#### 4. CONCLUSIONI

La presente nota sintetizza alcuni risultati significativi di uno studio sperimentale condotto sulla frazione limosa dei tailings di Stava in condizioni non sature evidenziando l'effetto delle condizioni di drenaggio sulla risposta idro-meccanica del materiale. Tale risposta è interpretata sulla base delle curve di ritenzione che costituiscono un dominio entro i quali esistono i percorsi tensionali e idraulici. Una dettagliata analisi del comportamento idro-meccanico dei tailings risulta infatti essenziale ai fini di una adeguata progettazione e realistiche analisi di stabilità dei bacini di decantazione nel breve e nel lungo termine.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

Bella G. (2017). Hydro-Mechanical Behaviour of Tailings in Unsaturated Conditions. *Tesi di Dottorato*, Politecnico di Torino.  
 Bella G. (2021). Water retention behaviour of tailings in unsaturated conditions. *Geomechanics and Engineering, An Int'l Journal* 26(2): 117-132.  
 Carrera A. (2008). Mechanical behaviour of Stava tailings. *Tesi di Dottorato*, Politecnico di Torino.  
 Gallipoli D., Wheeler S.J., Karstunen M. (2003). Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. *Geotechnique*: 105-112.  
 Romero E. (1999). Characterisation and thermo-hydronechanical behavior of unsaturated Boom clay: an experimental study. *Tesi di Dottorato*, Universitat Politècnica de Catalunya.