

ANALISI SPERIMENTALE PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO IDROMECCANICO DI UN TERRENO COSTIPATO

Roberta Ventini¹, Daniela Giretti², Elena Dodaro³, Carmine Gerardo Gragnano³, Francesco Zarattini⁴, Marianna Pirone¹, Vincenzo Fioravante⁵, Fabio Gabrieli⁴, Guido Gottardi³, Claudio Mancuso¹, Paolo Simonini⁴

¹ *Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Napoli Federico II*
roberta.ventini@unina.it, marianna.pirone@unina.it, mancuso@unina.it

² *Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università degli Studi di Bergamo*
giretti@ismgeo.it

³ *Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*
elena.dodaro2@unibo.it, carmine.gragnano2@unibo.it, guido.gottardi2@unibo.it

⁴ *Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova*
francesco.zarattini@phd.unipd.it, fabio.gabrieli@unipd.it, paolo.simonini@unipd.it

⁵ *Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara*
vincenzo.fioravante@unife.it

Sommario

La valutazione delle condizioni di stabilità delle opere in terra rappresenta una difficoltà spesso sottovalutata nella pratica ingegneristica e, viceversa, di attualità della ricerca scientifica in geotecnica. Infatti, è certamente vero che il contenuto d'acqua dei terreni costituenti tali opere e la distribuzione della pressione interstiziale nelle strutture in terra variano nel tempo a causa dei mutevoli effetti delle condizioni idrometriche e climatiche al contorno, cosa che influenza significativamente le condizioni di stabilità dell'opera. In questo lavoro è presentata una procedura per la caratterizzazione del comportamento idromeccanico di una miscela di sabbia e limo al variare dell'energia di costipamento. I dati sperimentali vengono discussi al fine di contribuire allo studio del comportamento in esercizio delle opere in terra.

1. Introduzione

Il tipo di terreno e la tecnica di costruzione utilizzati nella realizzazione di rilevati arginali e dighe giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della tipologia e della velocità con cui possono presentarsi eventuali fenomeni indesiderati. La tessitura dei terreni è infatti significativamente influenzata dal processo di compattazione a cui sono assoggettati, con importanti riflessi su proprietà idrauliche (e.g. Klute, 1982) e resistenza al taglio (e.g. Ahmed et al., 1974). Molti studi (Vinale et al., 1999) hanno evidenziato che la microstruttura di un dato terreno compattato non è unica e dipende fortemente dal metodo di preparazione usato. Tipici esempi sono la variazione della permeabilità di terreni argillosi costipati a differenti contenuti d'acqua e la modifica dei parametri di resistenza al taglio al variare della tecnica di compattazione adoperata. La determinazione sperimentale degli effetti della compattazione sul comportamento idromeccanico dei terreni è dunque essenziale per un'affidabile valutazione della stabilità delle opere in terra, per fornire una guida nella definizione delle specifiche di compattazione e, infine, come ausilio alla previsione della probabilità e del tipo di collasso che possono

interessare tali opere.

2. Materiali e procedure

2.1 Proprietà fisiche dei materiali

Gli argini sono generalmente costituiti da un misto eterogeneo di sabbia, limo e talvolta argilla, e frequentemente fondati su depositi argillosi e limosi di ambiente golenale. Al fine di caratterizzare sperimentalmente un materiale da utilizzare in prove in centrifuga geotecnica nell'ambito del progetto PRIN 2017 denominato "Risk Assessment of Earth Dams and River Embankment to Earthquakes and Floods (REDREEF)" è stata di recente selezionata una miscela, TS70-PON30, costituita dal 70% in peso di Ticino Sand (TS) e dal 30% di Pontida Clay (PON).

La sabbia del Ticino è una nota sabbia sottoposta ad intensive campagne sperimentali con attrezzature convenzionali ed avanzate (e.g. Fioravante & Giretti, 2016). Si tratta di una sabbia uniforme composta per il 30% da quarzo, per il 65% da feldspato e per il 5% da mica (Baldi et al., 1986). La Pontida Clay, invece, è un limo argilloso caolinitico a bassa plasticità ottenuto da una cava di materiale fine depositato in un ambiente lacustre post-glaciale. Prove di diffrazione ai raggi X indicano la seguente composizione mineralogica: 25-30% illite, 20-25% caolinite, 20-25% quarzo, 12% calcite e dolomite, meno del 10% di feldspato, meno del 5% di clorite. Le distribuzioni granulometriche dei singoli componenti (TS e PON) e della miscela TS70-PON30 sono riportate in Figura 1.

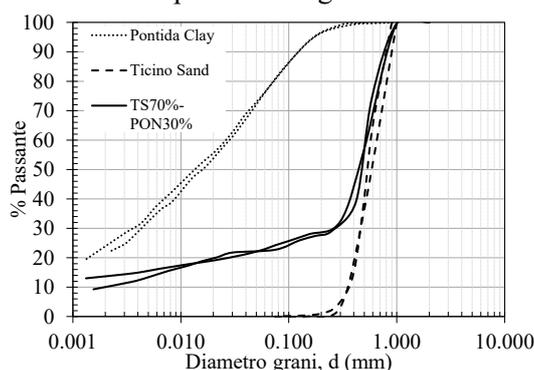


Fig 1. Distribuzioni granulometriche dei materiali testati

A seguito di una preliminare fase di indagini di laboratorio sono state determinate le proprietà fisiche riportate in Tabella 1.

Tab. 1. Proprietà fisiche medie dei materiali testati (γ_{min} valore minimo del peso dell'unità di volume, γ_{max} valore massimo del peso dell'unità di volume, e_{min} indice dei vuoti minimo, e_{max} indice dei vuoti massimo, G_s massa specifica relativa, D_{50} diametro percentile relativo al 50%, U_c coefficiente di uniformità, LL limite liquido, LP limite plastico, IP indice di plasticità).

Terreno	γ_{min} kN/m ³	γ_{max} kN/m ³	e_{min} -	e_{max} -	G_s -	D_{50} mm	U_c -	LL %	LP %	IP %
TS	13.64	16.67	0.574	0.923	2.671 ¹	0.574 ¹	1.83 ¹	-	-	-
PON	-	-	-	-	2.744 ²	0.015 ¹	-	23.61 ¹	13.13 ¹	10.48 ¹
TS70%-PON30%	13.48	21.30	0.236	0.953	2.684 ²	0.458 ¹	246.06	17.66	10.23	7.42

¹ Media di due misure; ² Media di tre misure.

2.2 Preparazione dei campioni e condizione iniziale

Come detto in premessa, i terreni usati per la realizzazione di argini fluviali e dighe in terra vengono comunemente costipati al fine di ottenere soddisfacenti proprietà in termini di permeabilità e resistenza al taglio. Come ben noto, il costipamento consente infatti di aumentare "artificialmente" la densità del terreno attraverso l'applicazione di energia meccanica permettendo così di ridurre la compressibilità, incrementarne la resistenza a taglio (di picco) oltre a ridurre effetti indesiderati prodotti dal gelo e da

fenomeni di imbibizione o essiccamento. È ancora ben noto che le condizioni di costipamento adottate in sito possono essere simulate in laboratorio mediante prove in cui il terreno, tipicamente disposto in un recipiente metallico di forma cilindrica, viene costipato in strati successivi. L'obiettivo delle prove di laboratorio è quello di ottenere la curva densità secca (γ_d) - contenuto d'acqua (w), mediante l'utilizzo di una procedura standardizzata. Tra queste, si annoverano le prove Proctor, ovvero prove dinamiche che consistono nell'applicare sul terreno posizionato in un contenitore di dimensioni standard un'energia di costipamento nota, impressa mediante un opportuno pestello fatto cadere da un'assegnata altezza. Le prove Proctor si distinguono in "standard" [ASTM D698-12(2021)] e "modificato" [ASTM D1557-12(2021)] e rappresentano una procedura di compattazione tipicamente utilizzata quale riferimento per le opere in terra. La prova Proctor standard (PS) permette di ottenere un grado di compattazione sostanzialmente inferiore alla Proctor modificata (PM) a causa della minore energia di costipamento applicata. Un'energia maggiore si traduce in una maggiore resistenza al taglio, minore volume dei vuoti e minore permeabilità. Nel caso specifico della miscela qui considerata, le curve di costipamento sono riportate in Figura 2. Le analisi granulometriche eseguite dopo la compattazione Proctor hanno mostrato una non significativa rottura dei grani.

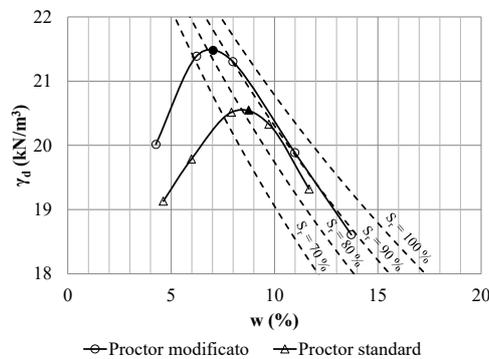


Fig 2. Curve di costipamento Proctor

Come ben noto, i terreni compattati usati nelle strutture in terra operano spesso in condizioni di parziale saturazione. Per tale motivo, immediatamente dopo la compattazione, è opportuno misurare la suzione di matrice per individuarne le condizioni iniziali. A tale scopo nel presente lavoro sono stati utilizzati dei tensiometri small-tip che, opportunamente saturati, restituiscono una misura affidabile in un periodo breve. La pietra porosa che costituisce la parte principale del tensiometro è stata inserita nel campione di terreno posizionato all'interno del contenitore metallico dell'apparecchiatura Proctor, a circa 5 cm dal bordo superiore per evitare di interessare lo strato superficiale di terreno disturbato. Il campione è stato quindi ricoperto con pellicola al fine di preservarne il contenuto d'acqua e consentire il raggiungimento della condizione di equilibrio tra terreno e pietra porosa, condizione che è stata generalmente raggiunta in meno di cento minuti. La prova è stata di norma eseguita utilizzando due tensiometri, permettendo di verificare che entrambi restituissero la stessa tendenza e valori simili in tutte le misure effettuate. Il valore medio della suzione iniziale e le proprietà indice dei campioni analizzati nelle condizioni ottimo PS ed ottimo PM sono riportati in Tabella 2. Dai dati è emerso che, nel caso specifico, le due tecniche di compattazione adoperate determinano valori simili della suzione iniziale.

Tab. 2. Proprietà indice e suzione iniziale dei campioni compattati nelle condizioni ottimo PS ed ottimo PM (γ_d peso dell'unità di volume secco, w contenuto d'acqua, n porosità, e indice dei vuoti, S_r grado di saturazione).

Proctor	Campione	γ_d kN/m ³	w %	n -	e -	S_r %	Suzione kPa
Modificato	PM1	20.79	7.80	0.211	0.267	78.53	4.50
	PM2	20.82	7.30	0.209	0.265	74.00	6.00
	Media	20.81	7.55	0.210	0.266	76.26	5.25
Standard	PS1	20.16	8.62	0.234	0.306	75.58	4.00
	PS2	20.39	8.80	0.226	0.292	80.93	5.00
	Media	20.27	8.71	0.230	0.299	78.25	4.50

3. Caratterizzazione idromeccanica

3.1 Permeabilità satura e curva di ritenzione

Lo studio dei fenomeni di infiltrazione e dei processi di drenaggio che si verificano in dighe e argini fluviali richiede, tra l'altro, la conoscenza delle proprietà idrauliche dei terreni costituenti l'opera di sbarramento. Queste proprietà – la permeabilità e le caratteristiche di ritenzione idrica – sono fortemente influenzate dalla tessitura del terreno risultante dalla compattazione (Wendroth et al., 1993). Come ben noto, la determinazione delle proprietà idrauliche richiede molto tempo. In particolare, la permeabilità satura (k_{sat}) risulta di difficile determinazione. Per tale motivo in passato sono stati proposti vari metodi di laboratorio per la sua determinazione. Una delle possibili procedure consiste nell'effettuare una prova in permeametro a carico costante, come suggerito da Nicotera et al. (2010). A tal fine, immediatamente dopo la misura di suzione, i provini costipati sono stati prelevati dal blocco Proctor, utilizzando una fustella cilindrica metallica con diametro $d = 7.21$ cm e altezza $h = 6.08$ cm. Si è assunto che il successivo processo di saturazione in permeametro sia stato completo al raggiungimento di una condizione stazionaria caratterizzata da uguali portate d'acqua in entrata e in uscita (Nicotera et al., 2010). La permeabilità satura è stata poi determinata utilizzando la legge di Darcy. I valori di k_{sat} determinati per ciascun provino sono riportati in Tabella 3, dove si registrano valori simili, in termini di ordini di grandezza, al variare dell'energia di costipamento e una maggior dispersione nei provini PM.

Tab. 3. Permeabilità satura (k_{sat}) e parametri del modello di Mualem-van Genuchten (θ_r contenuto d'acqua volumetrico residuo; θ_{sat} contenuto d'acqua volumetrico del terreno saturo; α , n e l parametri di fitting).

Campione	k_{sat} m/s	θ_r -	θ_{sat} -	α 1/kPa	n -	l -	R^2 -
PM1	1.10E-08	0.005	0.190	0.013	1.650	-0.030	0.920
PM2	6.08E-07	0.017	0.200	0.011	1.400	-0.330	0.930
Media	3.10E-07	0.011	0.195	0.012	1.525	-0.180	0.925
PS1	1.29E-07	0.040	0.210	0.133	1.210	-6.000	0.990
PS2	1.17E-07	0.090	0.200	0.200	1.330	-5.570	0.980
Media	1.23E-07	0.065	0.205	0.167	1.270	-5.785	0.985

Come si evince dai dati riportati nelle colonne 3-7 di Tabella 3, diversamente da quanto appena osservato per k_{sat} , la tecnica di compattazione influenza significativamente i parametri del modello idraulico di Mualem-van Genuchten (MVG - Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), qui ottenuti mediante analisi inversa con software Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2008), capace di risolvere numericamente le equazioni di Richards simulando il flusso dell'acqua in un mezzo parzialmente saturo. L'analisi inversa è stata qui eseguita utilizzando i dati sperimentali ottenuti da una prova di evaporazione svolta con l'ausilio di due diverse apparecchiature combinate in serie: nella prima fase il provino saturo è sottoposto ad un processo di essiccamento nell'apparecchiatura ku -pF in cui sono registrati il contenuto d'acqua e la suzione fino ad 80 kPa; successivamente lo stesso provino è collocato nella piastra di Richards per ottenere informazioni relative alla curva caratteristica ad elevati valori di suzione, maggiori di 80 kPa (Richards, 1948). L'intera procedura è descritta in Nicotera et al. (2010).

I parametri del modello MVG (θ_r , θ_{sat} , α , n , l) sono quindi determinati mediante analisi inversa svolta dal software Hydrus-1D. La tecnica di regressione utilizzata per fittare i dati sperimentali è l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963), tecnica iterativa ormai ritenuta standard per risolvere problemi non lineari multivariabili. Con la procedura descritta sono state determinate la curva di ritenzione, in entrambi i casi ben sovrapposta ai punti sperimentali (Figura 3), e la funzione di conducibilità idraulica dei materiali PS e PM. Si noti infine che nella presente campagna sperimentale è stata trascurata l'isteresi idraulica modellando il comportamento idraulico del terreno mediante un unico ramo (essiccamento) della curva di ritenzione. I dati sperimentali e le relative interpretazioni mostrano che, a parità di tipo di materiale, le curve variano molto significativamente al variare della tecnica di compattazione, evidenziando così la necessità di un'attenta sperimentazione per la corretta

modellazione del comportamento di opere in terra.

Dall’osservazione di Figura 3a, è evidente che i provini costipati all’ottimo PM, sono caratterizzati da una suzione d’ingresso d’aria maggiore dei provini costipati all’ottimo PS, ciò è probabilmente legato alla minore porosità che compete ai provini PM.

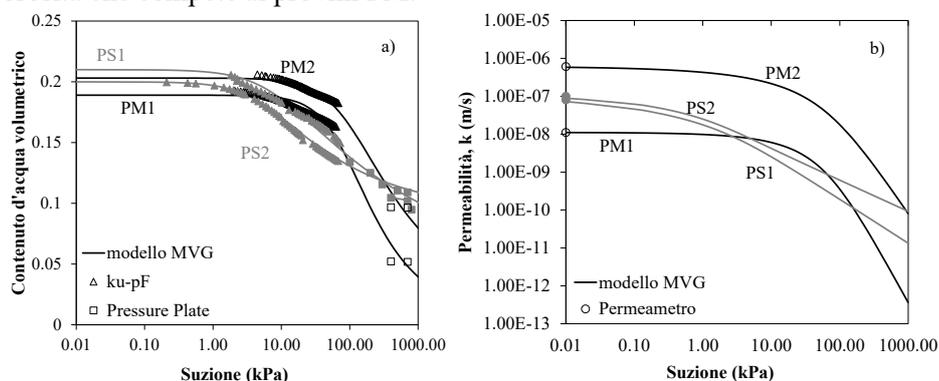


Fig 3. a) Curve di ritenzione e b) Curve di conducibilità idraulica determinate su provini della miscela TS70-PON30 costipata all’ottimo PS ed ottimo PM

3.2 Resistenza al taglio di provini saturi

Il comportamento tensione-deformazione della miscela TS70-PON30 è stato analizzato mediante prove triassiali drenate eseguite applicando diverse tensioni di confinamento su provini cilindrici di diametro $d = 38$ mm e altezza $h = 76$ mm. Come da standard, dopo aver verificato il raggiungimento della totale saturazione mediante l’applicazione di adeguati valori di contro-pressione e l’esecuzione di B-Test, i provini sono stati assoggettati a tensioni di confinamento in condizioni isotrope drenate e successivamente sollecitati a taglio incrementando il carico assiale in condizioni di spostamento controllato con velocità $v = 0.05$ mm/min.

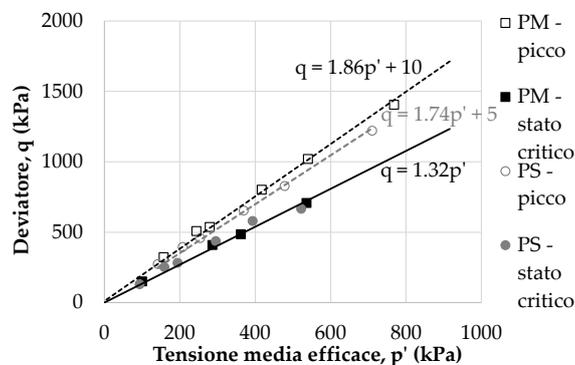


Fig 4. Risultati di prove triassiali monotone drenate su provini saturi

Come atteso, dai risultati (Fig. 4) si evince la maggior resistenza di picco del terreno costipato con tecnica PM ($\phi = 45.2^\circ$, $c = 10$ kPa) rispetto a quello PS ($\phi = 42.4^\circ$, $c = 5$ kPa) e la stessa resistenza di stato critico ($\phi = 33^\circ$), in accordo a quanto si osserva per terreni sabbiosi al variare della densità relativa come la miscela in esame composta principalmente da sabbia. Il contributo coesivo, invece, è attribuibile alla presenza del 30% in peso di PON.

4. Conclusioni

La campagna sperimentale brevemente illustrata ha consentito la determinazione delle proprietà idrauliche e meccaniche di materiali costipati poi impiegati per l’esecuzione di prove in centrifuga geotecnica nell’ambito del progetto PRIN menzionato in calce alla presente nota. L’approccio seguito è riferito a provini compattati in laboratorio ma sarebbe facilmente riproducibile per provini indisturbati. La caratterizzazione idraulica di provini ha consentito la determinazione della suzione post-

costipamento, della permeabilità satura e, mediante test di evaporazione, delle curve di permeabilità e ritenzione dei materiali sottoposti a prova. Queste, unitamente ai parametri di resistenza al taglio ottenuti mediante prove triassiali tradizionali svolte su provini saturi, completano il set di parametri necessari per la simulazione della risposta idro-meccanica di opere in terra tenendo conto del loro stato di parziale saturazione. Dal confronto tra i dati sperimentali su provini costipati a due differenti energie di compattazione è emerso che, come peraltro atteso, la tecnica PS produce un terreno con proprietà idrauliche differenti in termini principalmente di valore d'ingresso d'aria, e risposta meccanica meno performante rispetto a quanto registrato utilizzando la tecnica PM.

Fonti di finanziamento

Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito delle attività del progetto PRIN 2017 denominato Risk Assessment of Earth Dams and River Embankment to Earthquakes and Floods (REDREEF, prot. 2017YPMBWJ), finanziato dal Ministero dell'Istruzione, della Università e della Ricerca, oggi Ministero dell'Università e della Ricerca.

Bibliografia

- Baldi G., Bellotti R., Ghionna V.N., Jamiolkowski M., Pasqualini E. (1986). "Interpretation of CPT's and CPTU's". Proc. 4th Int. Geotechnical Seminar, Balkema, Singapore, 3–10.
- Fioravante V., Giretti D. (2016). "Unidirectional cyclic resistance of Ticino and Toyoura sands from centrifuge cone penetration tests", *Acta Geotech.*, 11, 953–968.
- ASTM D1557-12(2021), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org.
- ASTM D698-12(2021), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org
- Wendroth O., Ehlers W., Hopmans J., Kage H., Halbertsma J., Wosten, J. (1993). "Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1436–1443.
- Nicotera M., Papa R., Urciuoli G. (2010). "An experimental technique for determining the hydraulic properties of unsaturated pyroclastic soils", *Geotechnical Testing Journal*, 33.
- Richards L. A. (1948). "Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soils", *Soil Sci.*, 66, 105-110.
- Mualem Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science of America Journal*, 4(5), 892–898.
- Klute A. (1982). Tillage effects on the hydraulic properties of soils: A review. In: D.M. Krai and S. Hawkins (Editors), Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes. Am. Soc. Agron., Madison, WI, U.S.A., Spec. Publ. 44, 29-41.
- Ahmed S., Lovell C.W., Diamond S. (1974). "Pore sizes and strength of compacted clay". *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE 100 (4), 07–425.
- Šimůnek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M. (2008). "The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media", Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 315.
- Marquardt D.W. (1963). "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- Vinale F., d'Onofrio A., Mancuso C., Santucci De Magistris F., Tatsuoka F. (2001). "The Prefailure Behaviour of Soils as Construction Material", Opening Lecture at The Int. Conf. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials.