

## MODELLAZIONE FISICA IN CENTRIFUGA DI UN ARGINE FLUVIALE SOGGETTO A FORZANTI IDRAULICHE

Roberta Ventini<sup>1</sup>, Daniela Giretti<sup>2</sup>, Marianna Pirone<sup>1</sup>, Elena Dodaro<sup>3</sup>, Carmine Gerardo Gragnano<sup>3</sup>, Veronica Girardi<sup>4</sup>, Francesco Zarattini<sup>4</sup>, Vincenzo Fioravante<sup>5</sup>, Fabio Gabrieli<sup>4</sup>, Guido Gottardi<sup>3</sup>, Paolo Simonini<sup>4</sup>, Claudio Mancuso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Napoli Federico II*  
[roberta.ventini@unina.it](mailto:roberta.ventini@unina.it), [marianna.pirone@unina.it](mailto:marianna.pirone@unina.it), [mancuso@unina.it](mailto:mancuso@unina.it)

<sup>2</sup>*Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università degli Studi di Bergamo*  
[daniela.giretti@unibg.it](mailto:daniela.giretti@unibg.it)

<sup>3</sup>*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[elena.dodaro2@unibo.it](mailto:elena.dodaro2@unibo.it), [carmine.gragnano2@unibo.it](mailto:carmine.gragnano2@unibo.it), [guido.gottardi2@unibo.it](mailto:guido.gottardi2@unibo.it)

<sup>4</sup>*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova*  
[veronica.girardi.1@phd.unipd.it](mailto:veronica.girardi.1@phd.unipd.it), [francesco.zarattini@phd.unipd.it](mailto:francesco.zarattini@phd.unipd.it), [fabio.gabrieli@unipd.it](mailto:fabio.gabrieli@unipd.it),  
[paolo.simonini@unipd.it](mailto:paolo.simonini@unipd.it)

<sup>5</sup>*Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara*  
[vincenzo.fioravante@unife.it](mailto:vincenzo.fioravante@unife.it)

### Sommario

In questo lavoro sono riportati i risultati sperimentali di una prova in centrifuga su un modello di argine fluviale soggetto ad una progressiva sollecitazione idraulica. Le misure di pressioni neutre e di suzione nell'argine mostrano che il fronte di saturazione raggiunge il lato campagna attingendo la condizione stazionaria solo dopo una persistenza irrealistica dell'evento di piena simulato. Pertanto, svolgere la progettazione o la valutazione delle condizioni di sicurezza di un argine fluviale con proprietà simili a quello testato nel presente lavoro, assumendo l'ipotesi semplificata di un regime stazionario di filtrazione, potrebbe risultare in molti casi un approccio eccessivamente conservativo e, comunque, poco significativo.

### 1. Introduzione

La valutazione delle condizioni di sicurezza e la pianificazione degli interventi di manutenzione delle opere in terra utilizzate per la regimazione idraulica e la protezione dalle alluvioni costituiscono una priorità nella gestione del territorio e nella mitigazione del rischio idrogeologico. Tuttavia, molti argini esistenti sono stati realizzati secondo regole empiriche e non soddisfano i moderni criteri di progettazione. Ad esempio, lo studio del comportamento idraulico e meccanico degli argini fluviali viene spesso condotto secondo l'ipotesi semplificata di filtrazione in regime stazionario, trascurando in modo volutamente conservativo la condizione di parziale saturazione dei terreni, ma non rappresentando una risposta realistica della struttura alle forzanti idrauliche. In realtà, a causa dei carichi idraulici transitori che si sviluppano per effetto delle piene o che agiscono all'interfaccia terreno-atmosfera, come le precipitazioni e l'evapotraspirazione, il contenuto d'acqua del suolo e le pressioni neutre variano nel tempo, influenzando significativamente le condizioni di stabilità

dell'argine. Il miglioramento delle capacità di previsione delle effettive condizioni di sicurezza delle strutture in terra esistenti può essere perseguito attraverso l'interpretazione dei dati ottenuti dalle attività di monitoraggio e dalla corretta calibrazione degli strumenti impiegati a tale scopo. In questo contesto, la modellazione fisica delle strutture in terra sottoposte a moti transitori di filtrazione può fornire preziose indicazioni. Il presente lavoro illustra i risultati di una prova in centrifuga su un modello di argine fluviale costituito da sabbia limosa compattata in condizioni non sature e sottoposto ad un'onda di piena simulata. L'argine è fondato su un substrato di limo argilloso completamente saturo. La cresta e la sponda di valle dell'argine sono stati strumentati con trasduttori di spostamento. Inoltre, sia la fondazione che l'argine sono stati strumentati con trasduttori di pressione e tensiometri per monitorare la variazione della pressione dei pori e della suzione di matrice durante il progressivo aumento del livello d'invaso e la conseguente saturazione dell'argine. L'analisi dei dati di monitoraggio ha consentito di analizzare il comportamento idro-meccanico dell'argine durante la prova.

## 2. Modellazione in centrifuga

La prova è stata eseguita utilizzando la centrifuga geotecnica dell'Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici - ISMGEO (Bergamo, Italia). Il modello è stato ricostituito all'interno di un contenitore prismatico, le cui dimensioni interne sono: lunghezza = 620 mm, altezza = 445 mm, larghezza = 160 mm, e la cui parete frontale è in Perspex trasparente. In fase di volo è stata raggiunta l'accelerazione target di 50g alla base del contenitore, da cui deriva, in base alle leggi di scala prototipo-modello (Garnier et al., 2007), un fattore geometrico  $N = 50$ . La Figura 1 mostra lo schema del modello di argine, alto 150 mm (7.5 m scala prototipo) e inclinato di  $45^\circ$  e  $56^\circ$  rispettivamente lato fiume e lato campagna. Il rilevato arginale è stato ricostruito utilizzando una miscela (Ventini et al., 2021a) composta per il 70% in peso secco da Ticino sand (TS4), (Fioravante e Giretti, 2016) e per il 30% da Pontida clay (PON), (Hueckel et al., 1990, 1991, Ventini et al. 2021b). Le distribuzioni granulometriche della miscela e dei componenti sono mostrate in Figura 2. La miscela è stata compattata in quattro strati all'ottimo Proctor Standard. Il rilevato arginale è stato fondato su uno strato di PON di spessore pari a 100 mm (5 m scala prototipo), consolidato sotto una tensione verticale efficace di 200 kPa.

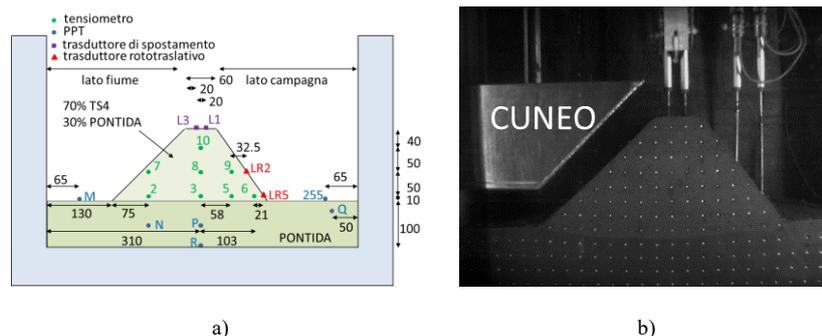


Fig 1. Modello fisico: a) Schema geometrico (lunghezze in mm); b) Fotografia al termine della fase di volo

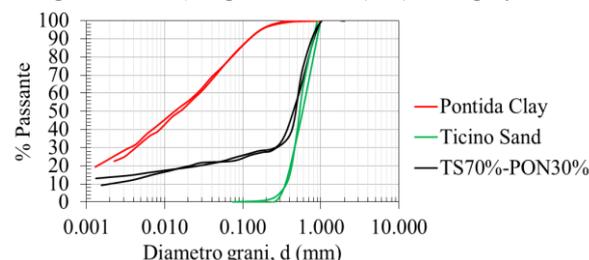


Fig 2. Distribuzioni granulometriche dei terreni testati

Le caratteristiche idromeccaniche della miscela sono discusse in Ventini et al. 2021b; la Tabella 1 elenca le principali proprietà fisiche dei materiali utilizzati; la Tabella 2 riassume le condizioni di prova dell'argine e dello strato di fondazione.

Tabella 1. Proprietà dei terreni testati

Terreno		TS4	PON	TS70%-PON30%
Peso dell'unità di volume minimo, $\gamma_{min}$	kN/m <sup>3</sup>	13.64	-	13.48
Peso dell'unità di volume massimo, $\gamma_{max}$	kN/m <sup>3</sup>	16.67	-	21.3
Indice dei vuoti minimo, $e_{min}$	-	0.574	-	0.236
Indice dei vuoti massimo, $e_{max}$	-	0.923	-	0.953
Massa specifica relativa, $G_s$	-	2.671	2.744	2.684
Diametro grani corrispondente al passante 50%, $D_{50}$	mm	0.574	0.015	0.458
Coefficiente di uniformità, $U_c$	-	1.83	-	246.06
Limite liquido, LL	%	-	23.61	17.66
Limite plastico, LP	%	-	13.13	10.23
Indice di plasticità, IP	%	-	10.48	7.42
Angolo d'attrito di stato critico, $\phi'_{cv}$	°	34	33	34

Tabella 2. Condizioni dei terreni ad inizio prova

Terreno		PON	TS70%-PON30%
Peso secco dell'unità di volume, $\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	17	20.6
Peso dell'unità di volume, $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	20.6	22.4
Contenuto d'acqua, w	%	21	8.8
Suzione di matrice, s	kPa	-	4.9
Permeabilità satura, $k_{sat}$	m/s	6.67E-10	1.23E-07

Come mostrato nella Figura 1, il modello di argine è stato strumentato con: otto tensiometri miniaturizzati in grado di misurare suzioni fino a 500 kPa e adatti a misurare pressioni sia positive che negative; due trasduttori di spostamento lineare (L1 e L3) per monitorare gli spostamenti verticali della cresta; due sensori roto-traslativi (LR2 e LR5) per misurare gli spostamenti della sponda dell'argine lato campagna. Inoltre, quattro trasduttori di pressione (PPT) sono stati alloggiati nello strato di fondazione; altri due PPT hanno monitorato il livello dell'acqua lato fiume (M) e lato campagna (255).

Una volta ricostituito, il modello è stato accelerato alla velocità angolare desiderata, mantenuta poi costante fino al termine della fase di consolidazione che è insorta per l'applicazione dell'accelerazione. Successivamente la prova è consistita nell'incremento del livello d'acqua d'invaso, al fine di studiare la risposta idro-meccanica della struttura in terra.

Il fluido utilizzato (i.e. acqua miscelata con un pigmento bianco per migliorarne la visibilità), stoccato in un serbatoio esterno alla centrifuga e collegato al modello tramite un tubo, è stato fatto scorrere all'interno del cestello della centrifuga attraverso un foro praticato nella parete laterale. Il flusso è stato controllato con una valvola e il livello del fluido è stato monitorato con il PPT M (Figura 1a). Una volta raggiunto un predeterminato livello d'invaso, la valvola è stata chiusa e il battente idraulico è stato ulteriormente regolato mediante un cuneo ad azione idraulica rappresentato in Figura 1b. La prova è consistita nelle seguenti fasi: accelerazione (dal tempo 0 al tempo  $t_1$ ), equilibrio (da  $t_1$  a  $t_2$ ), innalzamento del livello del fiume (da  $t_2$  a  $t_4$ ) e svaso parziale (dopo  $t_4$ ) (si veda l'asse x della Figura 3).

### 3. Risultati sperimentali

La Figura 3 riporta la storia temporale delle pressioni neutre e suzioni (PWP) misurate durante l'intera prova dai trasduttori posizionati lungo l'asse centrale del modello; sono riportate anche le misure del PPT M al variare del tempo alla scala del modello e la storia temporale dell'accelerazione misurata alla base del modello. Gli spostamenti verticali della cresta dell'argine e dei punti monitorati lato campagna sono invece riportati in Figura 4.

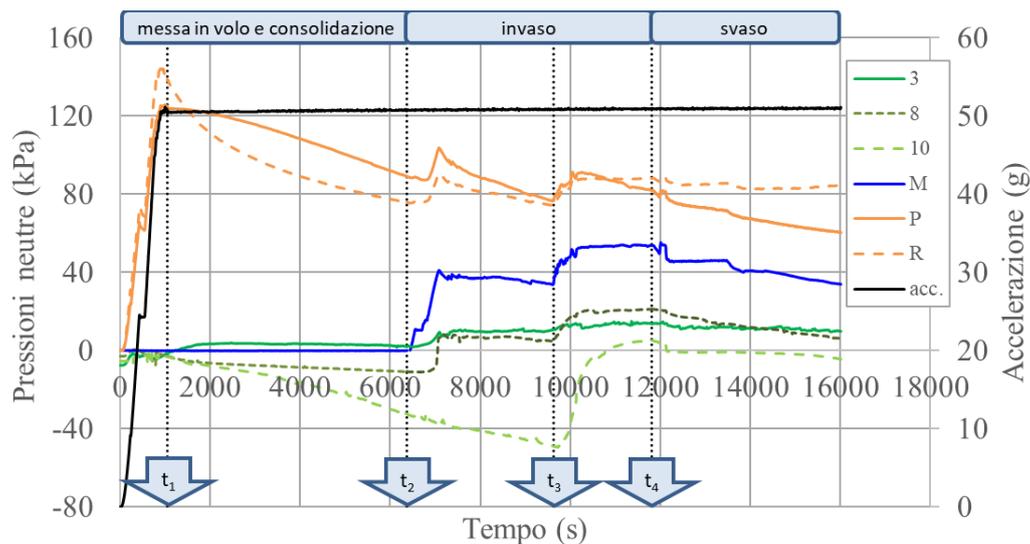


Fig 3. Storia temporale delle pressioni neutre nei punti posizionati lungo la sezione centrale del modello fisico e dell'accelerazione misurata alla base del modello (tempo in scala modello)

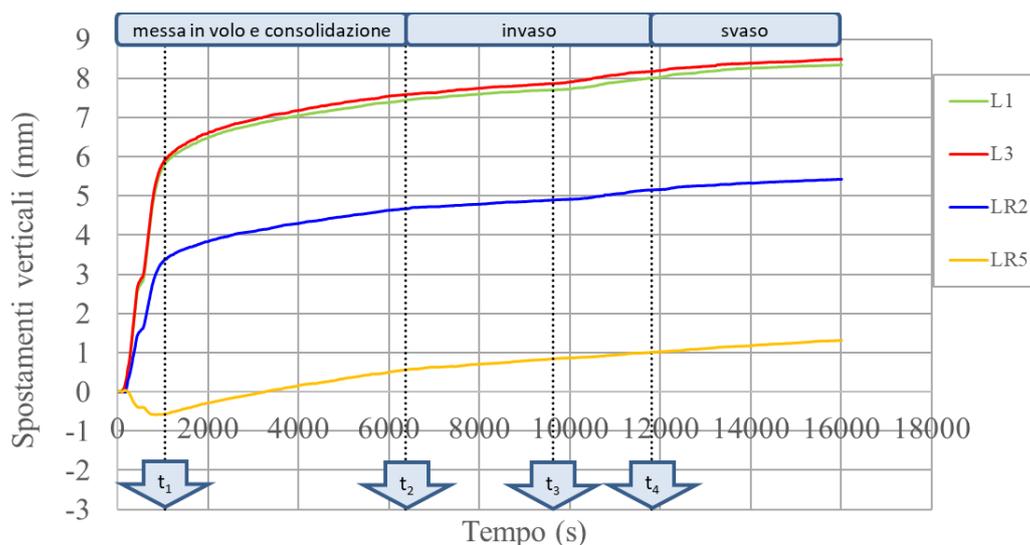


Fig 4. Storia temporale degli spostamenti verticali (scala modello)

Durante la prima fase di prova, ovvero la messa in volo del modello, per effetto dell'accelerazione, è generata una sovrappressione positiva dell'acqua di porosità nello strato di fondazione (PPT P e R in Figura 3) che, una volta raggiunta l'accelerazione target, ha iniziato a tendere verso la condizione d'equilibrio (distribuzione idrostatica) dissipando l'aliquota di sovrappressione dovuta all'applicazione dell'accelerazione. In merito all'argine, tutti i tensiometri hanno registrato una suzione iniziale di circa 5 kPa, a conferma di quanto misurato sperimentalmente su campioni di terreno costipati in laboratorio all'ottimo Proctor standard (Ventini et al., 2021a). Successivamente durante la prima fase di prova, nella parte superiore del rilevato, la suzione è incrementata progressivamente (messa in volo e consolidazione), tendendo a condizioni idrostatiche (tens. 8 e 10 in Figura 3). Mentre, tutti i tensiometri alla base del rilevato (tens. 3 in Figura 3) hanno registrato una diminuzione della suzione fino all'attingimento di una PWP positiva, per effetto del moto di filtrazione dallo strato di fondazione all'argine.

Questi fenomeni possono essere ben visualizzati in Figura 5, dove sono tracciate le isocrone della

PWP lungo l'asse centrale del rilevato in corrispondenza di istanti temporali significativi. Per confronto è riportata anche la distribuzione idrostatica in assenza di forzante idraulica lato fiume. Gli istanti di tempo selezionati sono:  $t_1 = 1000$  s,  $t_2 = 6370$ ,  $t_3 = 9600$  s,  $t_4 = 11810$  s, corrispondenti rispettivamente a 29, 184, 278 e 342 giorni alla scala prototipo. Dalla Figura 5, è interessante notare che, a  $t_2$ , la distribuzione di pressioni neutre nell'argine tendeva alla condizione idrostatica, mentre lo strato di fondazione era ancora in fase di consolidazione. In corrispondenza di  $t = t_2$ , l'acqua è stata lasciata fluire all'interno del contenitore lato fiume per simulare un invaso progressivo. Come evidenziato dalla linea blu (PPT M) in Fig. 3, il livello del fiume è stato incrementato in due fasi: prima, fino a un livello d'acqua  $L$  pari a  $0.6H$ , dove  $H$  è l'altezza del rilevato alla fine della consolidazione; questo livello è stato mantenuto costante fino a  $t_3$  (cioè per circa 70 giorni scala prototipo); dopo  $L$  è stato aumentato fino a  $0,82H$  e mantenuto costante per altri 1600 s (46 giorni scala prototipo). Per  $t > t_4$ , il livello è stato abbassato.

Le variazioni di carico applicato hanno prodotto sovrappressioni neutre nello strato di fondazione, le quali hanno iniziato a dissiparsi durante la persistenza del battente idrico, riprendendo dunque il processo di consolidazione. Con l'aumento del livello dell'acqua, l'argine è stato interessato da un processo di filtrazione verso il lato campagna. Quest'ultimo si è progressivamente saturato, come registrato dai tensiometri, a partire da quelli più vicini al lato fiume e alla base, poi progressivamente dagli altri. Infatti, la linea di saturazione ha raggiunto il tensiometro 10 soltanto a  $t_3$ , senza essere influenzata dal primo incremento di carico idraulico a  $t_2$ .

Come mostrato in Figura 5, a  $t_4$ , tutti i tensiometri inseriti nel rilevato hanno registrato una PWP positiva. Quando, a  $t > t_4$ , il livello del fiume si è abbassato, l'argine si è lentamente desaturato. Tutte le misure di pressione interstiziale nell'argine (Figura 1) sono state interpolate per ottenere linee equipotenziali. Come mostrato in Figura 6, a  $t = t_4$  è evidente che la linea di saturazione ha raggiunto il lato campagna e più della metà dell'argine risulta completamente saturo.

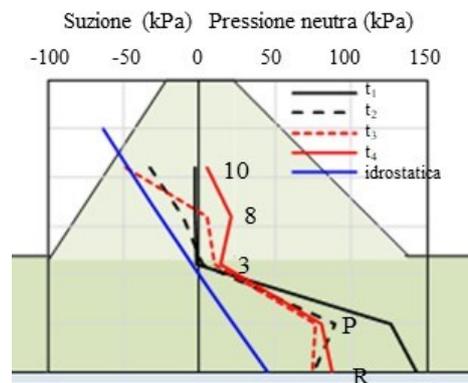


Fig 5. Profili di suzione e pressioni neutre a differenti istanti temporali lungo la sezione centrale del modello

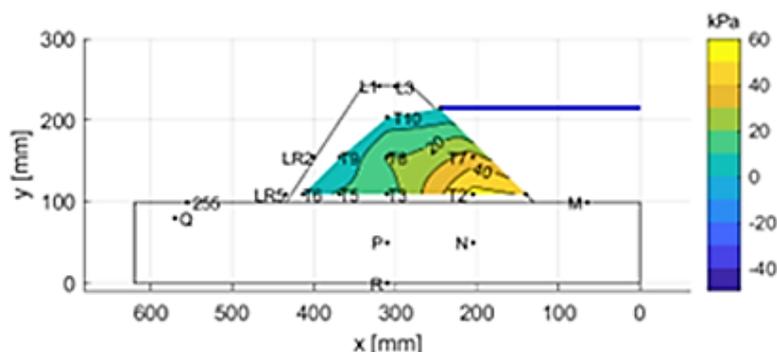


Fig 6. Curve di livello della PWP interpolanti le misure di suzione nell'argine modello a  $t = t_4$

Per quanto riguarda gli spostamenti, è stato misurato un cedimento progressivo dell'argine durante la messa in volo del modello e la fase di consolidazione immediatamente successiva pari a circa 8 mm (Figura 4), dovuto principalmente alla deformazione dello strato di fondazione sotto l'impronta del rilevato. Un incremento dei cedimenti di circa 1 mm è registrato dopo  $t_3$  per effetto dell'invaso. Pertanto, l'effetto dell'oscillazione del livello d'invaso non ha compromesso la stabilità dell'argine, infatti, non è stato osservato alcun meccanismo di rottura (Giretti et al., 2022).

#### **4. Conclusioni**

In questo lavoro sono stati discussi i risultati di una prova in centrifuga su un modello di argine in sabbia limosa, compattato in condizioni di parziale saturazione e sottoposto ad un'onda di piena simulata. Osservando la storia temporale delle pressioni neutre, l'argine risulta completamente saturo solo alla fine della seconda fase (i.e.  $t_4$ ). Alla scala prototipo, il livello dell'acqua ha raggiunto il lato campagna dopo una piena molto persistente, di durata irrealistica pari a più di cento giorni. Ciò fornisce una robusta conferma sperimentale che, in molti casi, l'ipotesi semplificata di filtrazione in condizioni stazionarie, tipicamente utilizzata per la progettazione di un argine fluviale, può generare risultati eccessivamente conservativi, comunque poco significativi. L'assestamento massimo del corpo arginale è stato osservato durante la fase iniziale di spin-up, principalmente a causa della deformazione dello strato di fondazione, mentre l'argine ha avuto un comportamento piuttosto rigido. I cedimenti misurati durante le fasi di vaso sono risultati trascurabili e fondamentalmente legati al processo di consolidazione ancora in atto nello strato di fondazione. Infine, i risultati di tale prova rappresentano un dataset utile per la calibrazione di un modello predittivo.

#### **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. (1990). "Thermoplasticity of Saturated Clays: Experimental Constitutive Study", *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1778).
- Fioravante V., Giretti D. (2016). "Unidirectional cyclic resistance of Ticino and Toyoura sands from centrifuge cone penetration tests", *Acta Geotechnica*, 11:953, doi:10.1007/s11440-015-0419-3.
- Garnier, J., Gaudini C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings D., König, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M.F. and Thorel, L. (2007). "Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling". *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 7 (3): 1-23
- Giretti D., Pirone M., Dodaro E., Ventini R., Gragnano C.G., Fioravante V., Mancuso C., Gottardi G., Gabrieli F. (2022). "Centrifuge modelling of a river embankment subjected to transient seepage conditions". Proc. 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Daejeon, Korea, 19-23 September 2022.
- Hueckel T., Pellegrini R. (1991). "Thermoplastic Modelling of Undrained Failure of Saturated Clay due to Heating", *Soils and Foundations*, 31 (3), 11–16.
- Ventini R., Dodaro E., Gragnano C.G., Giretti D., Pirone M. (2021b). "Experimental and numerical investigations of a river embankment model under transient seepage conditions", *Geosciences*, 11(5), 192.
- Ventini R., Giretti D., Dodaro E., Gragnano C.G., Zarattini F., Pirone M., Fioravante V., Gabrieli F., Gottardi G., Mancuso C., Simonini, P. (2021a). "Analisi sperimentale per lo studio del comportamento idromeccanico di un terreno costipato". Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2021 – IARG2021\_online.