

# ANALISI PRELIMINARI DELLA RISPOSTA SISMICA DI UNA DIGA IN TERRA

Giuseppe Di Filippo  
*Università degli Studi di Messina*  
[gdifilippo@unime.it](mailto:gdifilippo@unime.it)

Fabio Rollo  
*Sapienza Università di Roma*  
[fabio.rollo@uniroma1.it](mailto:fabio.rollo@uniroma1.it)

Orazio Casablanca  
*Università degli Studi di Messina*  
[ocasablanca@unime.it](mailto:ocasablanca@unime.it)

Luca Masini  
*Sapienza Università di Roma*  
[luca.masini@uniroma1.it](mailto:luca.masini@uniroma1.it)

## Sommario

Nella presente nota viene affrontata la modellazione numerica in campo statico e dinamico del prototipo di una diga in terra zonata il cui modello fisico in scala ridotta sarà successivamente testato attraverso prove statiche e dinamiche in centrifuga geotecnica. La modellazione numerica eseguita in PLAXIS 2D in condizioni di deformazione piana ha consentito di definire la configurazione geometrica che garantisce un prefissato margine di sicurezza in campo statico e un prefissato livello di danno durante la fase sismica.

## 1. Introduzione

Le simulazioni numeriche dinamiche di una diga in terra, eseguite nel dominio del tempo, rappresentano l'approccio più completo per la stima della prestazione sismica dell'opera. I metodi di calcolo avanzati permettono di valutare il comportamento di dighe in terra reali (Aliberti *et al.*, 2016, 2017; Cascone *et al.*, 2021; Masini *et al.*, 2021) e di quantificare i danni che queste opere subiscono in occasione di eventi sismici intensi (Aliberti *et al.*, 2019).

In questo studio vengono illustrati i risultati di analisi numeriche della risposta sismica di un prototipo di diga in terra zonata il cui modello fisico in scala ridotta sarà prossimamente sottoposto a prove dinamiche in centrifuga nell'ambito del progetto di ricerca di rilevante interesse nazionale (*PRIN*) denominato *REDREEF*. La diga è stata sottoposta a un'azione sismica attraverso l'applicazione di una storia temporale di accelerazioni in grado di massimizzare gli effetti di amplificazione dinamica del sistema, scegliendo una registrazione sismica caratterizzata da una frequenza predominante prossima alla prima frequenza di oscillazione della diga. Lo spostamento verticale  $u_y$  in cresta, valutato alla fine dell'evento sismico e normalizzato rispetto all'altezza della diga, è stato assunto come indice di prestazione per determinare il corrispondente livello di danno atteso secondo quanto proposto da Swaisgood (2003). Allo scopo di valutare la risposta della diga per differenti stati limite, le analisi sono state ripetute amplificando l'ampiezza dell'input sismico di un fattore pari a 2 e 3, mantenendo invariato il contenuto in frequenza del segnale.

Inoltre, in previsione delle future prove in centrifuga, i tre segnali sismici sono stati applicati in sequenza. I risultati della simulazione numerica mostrano che, in queste condizioni, i livelli di danno corrispondenti risultano maggiori di quelli determinati applicando separatamente i segnali sulla stessa configurazione statica iniziale della diga.

## 2. Descrizione del modello

Lo schema della diga oggetto di studio è mostrato in Fig.1. Si tratta di una diga zonata di altezza pari a 13 m con un vaso nella zona di monte che raggiunge in esercizio l'altezza di 11m. I fianchi sono costituiti da sabbia del Ticino, caratterizzata da peso dell'unità di volume  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , indice dei vuoti  $e = 0.622$ , corrispondente a una densità relativa  $D_r = 87\%$ , e coefficiente di permeabilità  $k = 10^{-6} \text{ m/s}$  mentre il nucleo è realizzato con argilla di Pontida con  $\gamma = 19.2 \text{ kN/m}^3$ ,  $e = 0.404$  e coefficiente di permeabilità  $k = 10^{-10} \text{ m/s}$ .

Le analisi numeriche sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D, assumendo condizioni di deformazione piana. Il modello numerico è stato discretizzato in 4523 elementi triangolari a 15 nodi per un numero di nodi complessivo pari a 37035 (Fig.1 (b)) in modo che la dimensione degli elementi sia minore di 1/8 della lunghezza d'onda associata alla frequenza massima del segnale sismico considerato.

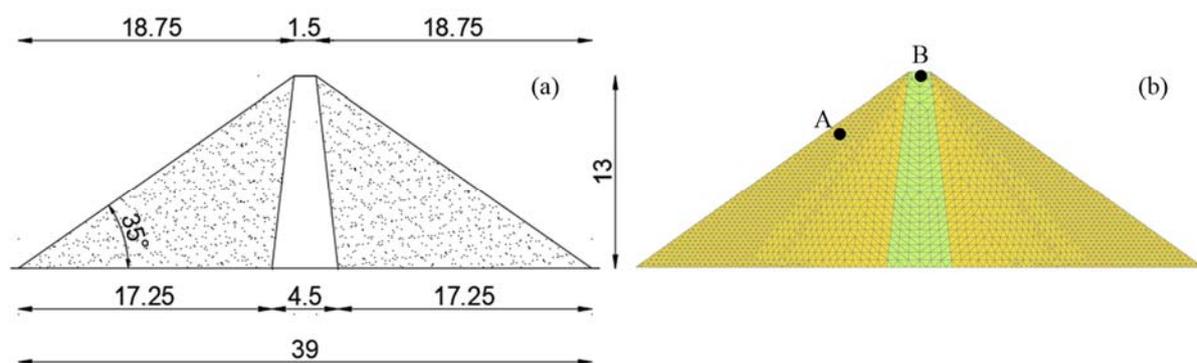


Fig 1. Schema della diga (a) e modello agli elementi finiti (b)

Il comportamento meccanico dei terreni che costituiscono la diga è descritto attraverso il modello costitutivo *Hardening Soil with Small Strain Stiffness* (Schanz *et al.* 1999; Benz *et al.* 2009) implementato nella libreria di PLAXIS 2D, i cui parametri sono riportati nella Tabella 1. La calibrazione dei parametri è stata effettuata sulla base di prove di compressione edometrica e di compressione triassiale condotte nell'ambito del progetto *PRIN REDREEF*.

Tab. 1. Parametri del modello *Hardening Soil with Small Strain Stiffness* utilizzati nella modellazione.

	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\psi$ (°)	$E'_{ref}$ (MPa)	$E'/E'_{50}$	$E'_{50}/E'_{oed}$	$E'_{50 ref}$ (MPa)	$E'_{oed ref}$ (MPa)	$E_{ur}$ (MPa)	$G_{0 ref}$ (MPa)	$\gamma_{0.7}$	$m$	$k_0$
Fianchi	1	41	0	396	20	1.40	19.8	14.143	59.4	165	1.70E-04	0.50	0.577
Nucleo	14	34	0	228	26.8	1.55	8.5	5.500	25.5	95	1.70E-04	0.98	0.440

La risposta dinamica dei terreni è stata calibrata sulla base di dati letteratura, come riportato in Fig. 2. (Fioravante & Giretti, 2015; Fioravante & Jamiolkowski, 2005; Fioravante, 2000). Gli effetti della parziale saturazione sono stati invece portati in conto attraverso l'introduzione del modello di Van Genuchten (1980), calibrato sulle curve di ritenzione idrica ottenute sperimentalmente nell'ambito del progetto di ricerca (Fig. 3, Tabella 2) (Giretti *et al.*, 2021).

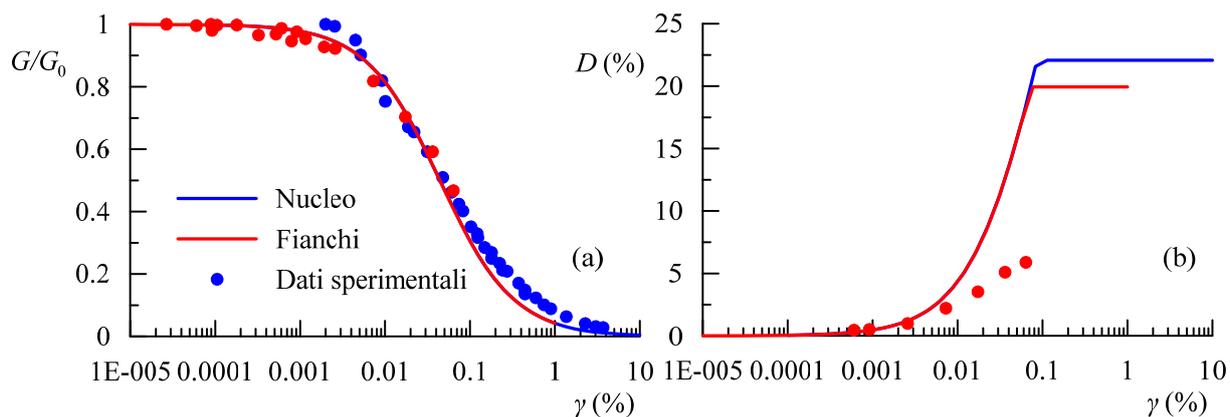


Fig 2. Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato (a) e del rapporto di smorzamento (b)

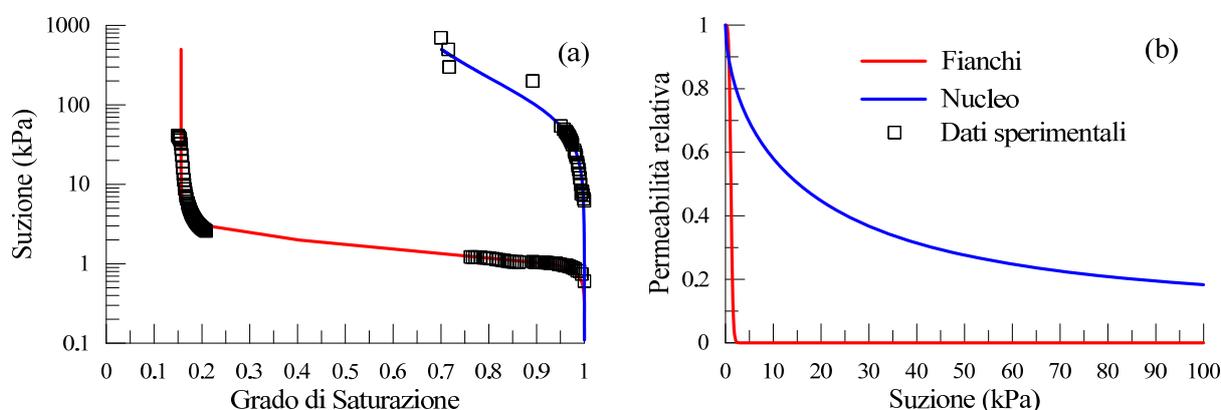


Fig 3. Curve di ritenzione idrica

Tab. 2. Parametri del modello di Van Genuchten (1980).

	$S_{Res}$	$S_{Sat}$	$g_n$	$g_a$	$g_c$	$g_l$
Fianchi	0.156	1	5	6.38	-0.8	0.5
Nucleo	0.496	1	1.57	0.09	-0.36	-5

La costruzione della diga è stata simulata per fasi in condizioni drenate attivando progressivamente strati orizzontali di 1m di spessore fino al raggiungimento della quota finale dell’opera. In seguito, è stata effettuata un’analisi di filtrazione in regime stazionario imponendo il carico idraulico costante pari a 11 m sul paramento di monte per simulare la presenza dell’invaso e determinare la distribuzione delle pressioni interstiziali iniziale all’interno del corpo diga.

Nelle fasi dinamiche, le analisi sono state condotte in condizioni non drenate applicando alla base del dominio il segnale sismico orizzontale *GM17*, caratterizzato da un’accelerazione massima  $a_{max}=0.1g$  e una frequenza predominante  $f = 3.95$  Hz: l’accelerogramma del segnale e lo spettro di Fourier delle ampiezze sono riportati in Fig.4. Tale segnale è stato scelto per massimizzare gli effetti di amplificazione dinamica sulla diga, la cui frequenza fondamentale è stata preliminarmente stimata pari a circa 5 Hz. L’ampiezza del segnale sismico è stata inoltre scalata di un fattore pari a 2 e 3 per valutare la prestazione della diga per eventi sismici di intensità crescente. In termini di condizioni al contorno, gli spostamenti verticali sono impediti alla base del dominio mentre sono liberi tutti i gradi di libertà dei nodi sui paramenti della diga.

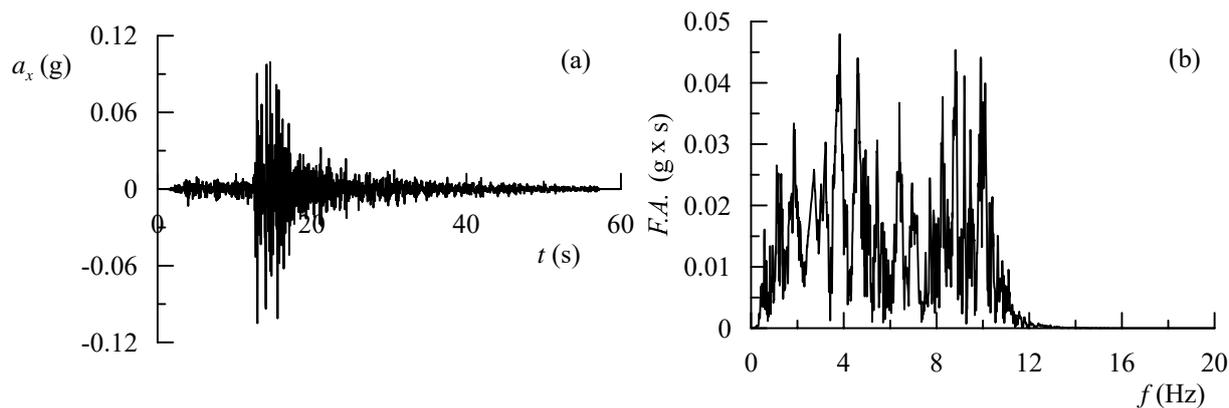


Fig 4. Segnale sismico GM17: (a) accelerogramma e (b) spettro di Fourier delle ampiezze

### 3. Risultati delle analisi numeriche

A seguito della costruzione della diga e del riempimento dell'invaso, la distribuzione delle pressioni interstiziali nel corpo diga assume la distribuzione riportata in Fig.5. La linea blu rappresenta la superficie libera, che subisce un abbassamento all'interno del nucleo in virtù della minore permeabilità di questo materiale rispetto a quella della sabbia dei fianchi della diga. Al di sopra della superficie libera si sviluppano suzioni non trascurabili (di segno positivo nella convenzione di PLAXIS) solo all'interno del nucleo, in conseguenza delle curve di ritenzione adottate.

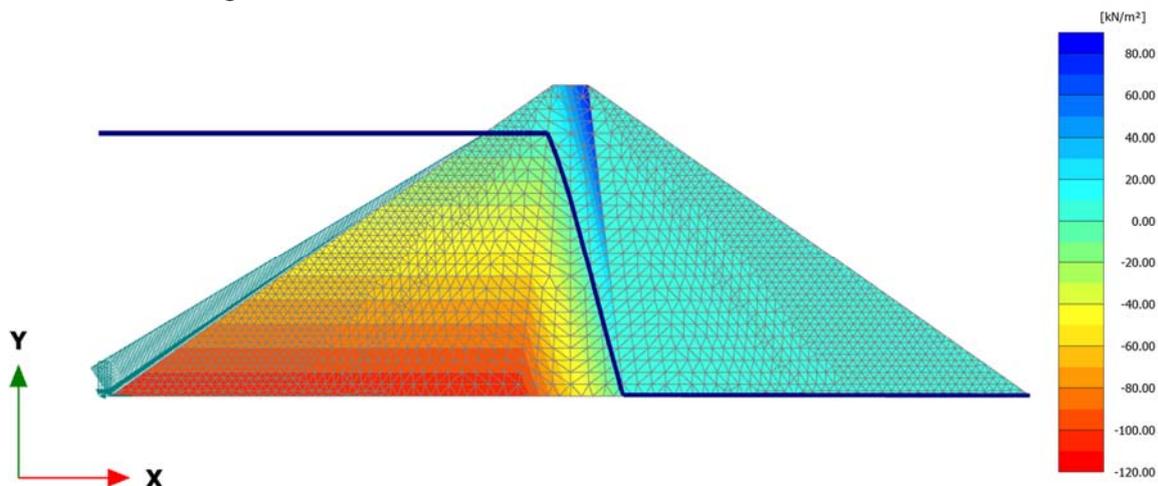


Fig 5. Distribuzione delle pressioni interstiziali a fine costruzione

Il comportamento della diga in condizioni dinamiche è illustrato in Fig.6 in termini di isolinee degli spostamenti finali orizzontali  $u_x$  e verticali  $u_y$ , calcolati al termine del segnale non scalato GM17. La distribuzione degli spostamenti permanenti a fine sisma non è simmetrica e denota la propensione della diga a sviluppare spostamenti più elevati nella zona di monte dove è presente l'invaso. Infatti, la sabbia del fianco di monte si trova in gran parte in condizioni di totale saturazione, mentre la porzione superiore del nucleo beneficia di un incremento di stato tensionale efficace dovuto alla parziale saturazione. La maggior parte dei cedimenti si sviluppa nei fianchi della diga, producendo un funzionamento “a mensola” del nucleo che è imputabile all'elevata resistenza del materiale impiegato e agli effetti di parziale saturazione.

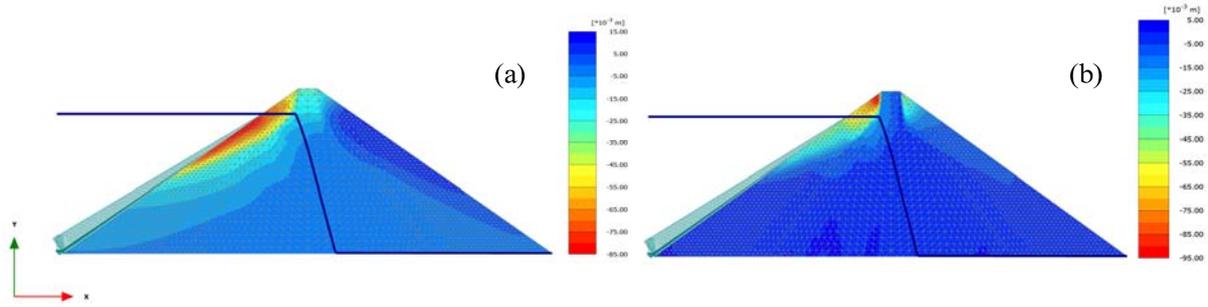


Fig 6. Isolinee degli spostamenti a fine sisma: (a) spostamenti orizzontali, (b) spostamenti verticali

La Fig.7 mostra la storia temporale degli spostamenti orizzontali  $u_x$  e verticali  $u_y$ : i primi sono valutati con riferimento al nodo A posto sul paramento di monte, mentre quelli verticali sono valutati nel nodo B posto in asse alla diga in corrispondenza della cresta (Fig. 1 (b)). A seguito dell'applicazione dei due segnali amplificati, le distribuzioni degli spostamenti permanenti a fine sisma rimangono qualitativamente simili a quelle riportate in Fig. 6 ma con un incremento dei valori del 230% e 400% per gli spostamenti verticali in cresta e del 140% e 280% per quelli orizzontali sul paramento di monte rispetto ai valori ottenuti con il segnale non scalato.

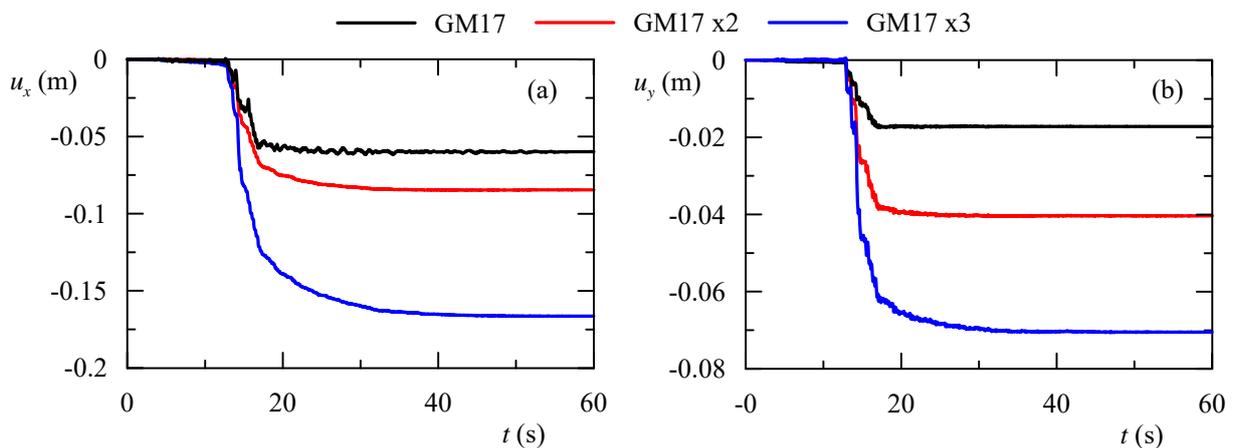


Fig 7. Storie temporali degli (a) spostamenti orizzontali (punto A) e (b) spostamenti verticali (punto B)

Infine, per valutare la prestazione sismica della diga, la Fig. 8 mostra l'abaco di danno proposto da Swaisgood (2003) in cui sono stati riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche.

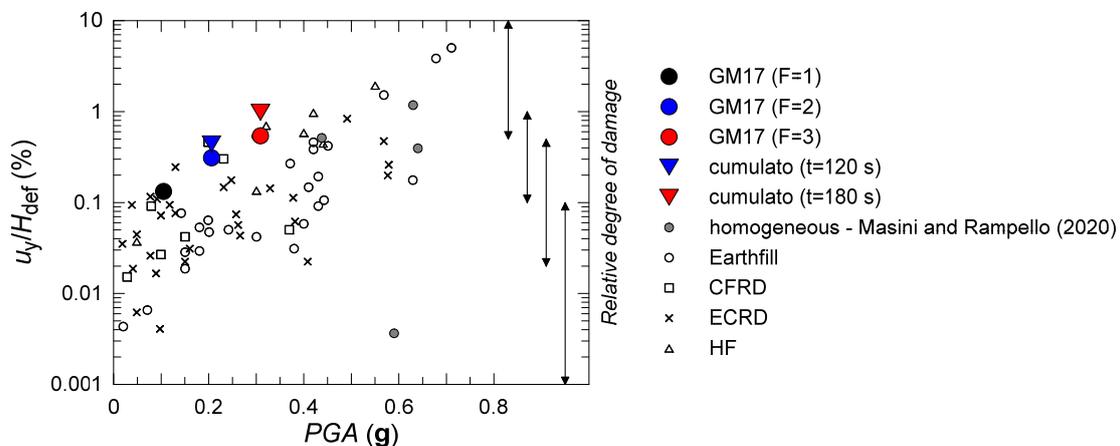


Fig 8. Abaco di Swaisgood (2003)

Tale abaco consente di quantificare il livello di danno atteso in funzione dell'accelerazione di picco *PGA* dell'evento sismico e dello spostamento in cresta, normalizzato rispetto all'altezza della diga. Come atteso, il livello di danno cresce all'aumentare dell'intensità del sisma; tuttavia, solo per il segnale scalato con  $F = 3$  il livello di danno diventa severo. Per riprodurre le condizioni di carico delle future prove in centrifuga, finalizzate anche allo studio delle condizioni di collasso della diga, i tre segnali sismici sono stati anche applicati in sequenza con intensità crescente. I risultati sono riportati con simboli diversi in Fig. 8 e dimostrano un aumento del livello di danno nella diga, specialmente in corrispondenza dell'istante finale  $t = 180$  s.

### Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito delle attività finanziate dal *Progetto di Ricerca PRIN-REDREEF (Risk Assessment of Earth Dams and River Embankments to Earthquakes and Floods)*.

### Bibliografia

- Aliberti D., Biondi G., Cascone E., Rampello S. 2019. Performance indexes for seismic analyses of earth dams. 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (Roma, Italy).
- Aliberti D., Cascone E., Biondi G., 2016. Seismic performance of San Pietro Dam. *Procedia Engineering*. Vol. 158, p. 362-367. 6th Italian Conf. Res. in Geotechnical Eng., CNRIG 2016, 22-23 September, Bologna, Italy.
- Aliberti D., Cascone E., Biondi G., 2017. Valutazione della risposta sismica di una diga in terra zonata. In atti del XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica. Roma, Italy.
- Benz T, Vermeer PA, Schwab R. (2009). "A small-strain overlay model", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33,25-44.
- Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M., Engin, E., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & Galavi, V. (2010). *PLAXIS 2D 2010. User manual, Plaxis bv*.
- Cascone E., Biondi G., Aliberti D., Rampello S. 2021. Effect of vertical input motion and excess pore pressures on the seismic performance of a zoned dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 142, 106566.
- Fioravante V. (2000). "Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing." *Soils and Foundations* Vol. 40, No. 4, 129-142, Aug. 2000.
- Fioravante V., Giretti D. (2015). "Unidirectional cyclic resistance of Ticino and Toyoura sands from centrifuge cone penetration tests." *Acta Geotechnica* DOI 10.1007/s11440-015-0419-3.
- Fioravante V., Jamiolkowski M.B. (2005). "Physical modelling of Piled Rafts". International Geotechnical Conference. Saint Petersburg, 26-28 May 2005.
- Giretti D., Dodaro E., Gragnano C.G., Zarattini F., Pirone M., Fioravante V., Gabrieli F., Gottardi G, Mancuso C., Simonini P. (2021). Analisi sperimentale per lo studio del comportamento idromeccanico di un terreno costipato. IARG 2021.
- Masini L., Rampello S. (2020). Influence of input assumptions on the evaluation of the seismic performance of earth dams. *Journal of Earthquake Engineering*.doi.org/10.1080/13632469.2020.1835747.
- Masini, L., Rampello, S., & Donatelli, R. (2021). Seismic performance of two classes of earth dams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(2), 692-711.
- Plaxis (2002) V8, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Plaxis b.v., The Netherlands.
- Schanz T, Vermeer PA, Bonnier PG. (1999). "The hardening soil model: formulation and verification". *Plaxis Symposium on Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Amsterdam 1999; 281-296.
- Swaisgood J. (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes. *Proc. Pacific conference on earthquake engineering*, 2003.
- Van Genuchten, M.T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980, 44, 892–898.