

ANALISI NUMERICA DELLA *PERFORMANCE* SISMICA DI UNA DIGA IN TERRA CON MANTO

M. Tretola

Università degli studi del Sannio
martretola@unisannio.it

L. Pagano

Università Federico II di Napoli
lupagano@unina.it

S. Sica

Università degli studi del Sannio
stefsica@unisannio.it

Sommario

La valutazione della sicurezza sismica di una diga in terra esistente, tipicamente in esercizio da diversi decenni, richiede l'applicazione di procedure di analisi complesse. L'articolo descrive tali procedure in riferimento alla risposta statica e sismica di una diga in terra situata in Sicilia. L'opera appartiene alla tipologia di diga omogenea in rockfill con paramento di monte in conglomerato bituminoso. Vengono illustrati e discussi i risultati dello studio numerico svolto attraverso un approccio dinamico completo, ponendo particolare attenzione ai cedimenti subiti dalla diga al termine della fase di costruzione e della fase sismica per i diversi input accelerometrici corrispondenti allo scenario dello Stato Limite di Collasso. L'articolo mira ad indagare gli effetti generati da un grande blocco calcareo su cui poggia parte del corpo diga, per valutare se la sua presenza, completamente ignorata durante la progettazione originaria della diga, sia dannosa o irrilevante nei riguardi della performance complessiva dell'opera.

1. Introduzione

La valutazione della risposta sismica delle dighe in terra italiane è oggi di estrema attualità in quanto molte opere, costruite tra gli anni Sessanta e Ottanta dello scorso secolo in siti classificati non sismici, ricadono oggi in zone riclassificate sismiche e sovente ad altissima pericolosità sismica. In linea generale, le dighe in terra, se adeguatamente poste in opera, risultano sicure rispetto alle sollecitazioni indotte da eventi sismici severi, anche se progettate senza adottare criteri sismici. A parziale testimonianza di ciò, vi è la constatazione che in Italia non si è mai verificato il collasso di una diga in terra causato da un evento sismico e che i fenomeni di collasso sismoindotti sono limitatissimi anche su scala mondiale. I casi osservati, peraltro, si riferiscono a tipologie estremamente vulnerabili in quanto realizzate senza adottare le moderne tecniche di costipamento, tipologie che in Italia non sono presenti. La valutazione della sicurezza sismica delle dighe esistenti è un processo complesso, che preliminarmente prevede l'analisi della relazione tra la storia di carico della diga e la sua risposta meccanica dall'inizio della costruzione ad oggi. Tale analisi richiede l'interpretazione dei dati consegnati dal monitoraggio statico dell'opera. È tale analisi che infatti ha il compito di evidenziare eventuali carenze progettuali, zone di debolezza dell'opera, meccanismi di funzionamento anomali o inusuali, elementi di criticità, ovvero quegli aspetti che possono riflettersi negativamente sulla risposta

sismica dell'opera (Costigliola et al., 2019). L'articolo presenta lo studio condotto per caratterizzare la risposta statica e sismica della Diga Olivo ubicata in Sicilia e costruita alla fine degli anni Settanta (Fig. 1). Il rilevato, di altezza massima pari a 49,5 m (Fig. 1b), è costituito da terreni a grana grossa derivanti da formazioni di calcari evaporitici. Il dispositivo di tenuta è costituito da un manto in conglomerato bituminoso realizzato sul paramento di monte. Il terreno di fondazione presenta due stratificazioni costituite da materiali a grana fine, una superiore (AM1) e l'altra inferiore (AM2). Si tratta di formazioni di argille Mioceniche che nella zona di monte sono tra loro sovrapposte, mentre nella zona di valle del corpo diga inglobano un voluminoso blocco calcareo (CM). Ancora più a valle di tale blocco, è presente uno strato di breccia argillosa (MP) corrispondente alla cosiddetta formazione dei "trubi" (Fig. 1a). Il sottosuolo si presenta, dunque, disomogeneo e non simmetrico rispetto all'asse della sezione trasversale del rilevato. L'articolo analizza proprio gli effetti della marcata eterogeneità del deposito di fondazione sulla risposta statica e sismica della diga.

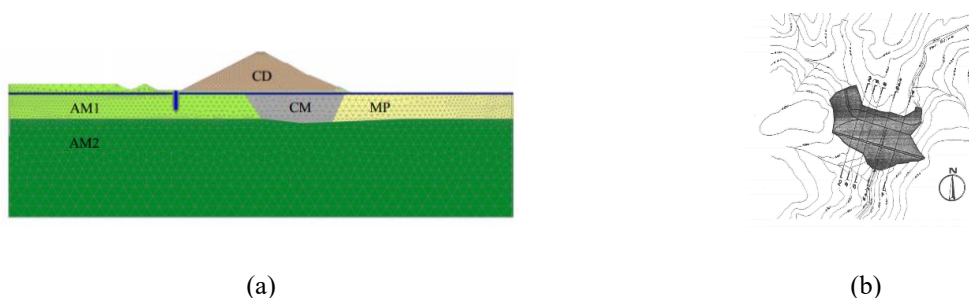


Fig 1. Diga di Olivo: (a) sezione trasversale della diga in corrispondenza della zona di massima altezza, con rappresentazione della discretizzazione agli elementi finiti; (b) pianta della diga.

2. Selezione dei segnali di input

A una diga rilevante quale è quella in esame le norme italiane (NTD2014, NTC2018) associano per lo Stato Limite di Collasso (SLC) un periodo di ritorno T_R pari a 1462 anni, cui corrisponde un'accelerazione orizzontale massima al sito di ubicazione dell'opera di 0.141g. Da database internazionali (*European Strong Motion database* - Luzi et al., 2016) sono stati selezionati, pertanto, sei gruppi (componenti orizzontale e verticale) di accelerogrammi reali spettro-compatibili registrati su affioramento roccioso orizzontale (sottosuolo tipo A). I parametri più significativi dei segnali accelerometrici orizzontali associati agli eventi selezionati sono riportati in Tab. 1. Gli accelerogrammi sono stati applicati alla base del modello agli elementi finiti di Fig. 1a, previa un'analisi di deconvoluzione lineare all'interno della formazione di argille mioceniche inferiori AM2, considerata quale formazione rigida di riferimento per il sito in esame ($V_s \gg 800$ m/s).

OLIVO DAM	Segnale	Terremoto	M	Dist. Epicentrale [km]	PGA [g]	PGA NTC [g]
	55	Friuli (06/05/1976)	6.5	23	0.306	0.141
	234	Montenegro (24/05/1979)	6.2	30	0.069	0.141
	290	Campano Lucano (23/11/1980)	6.9	32	0.216	0.141
	198	Montenegro (15/04/1979)	6.9	21	0.181	0.141
	294	Campano Lucano (23/11/1980)	6.9	26	0.092	0.141
	5819	Kalamata (13/10/1997)	6.4	48	0.121	0.141

Tabella 1. Segnali accelerometrici orizzontali adottati per le analisi sismiche nello scenario di SLC

3. Modellazione del problema al finito

La risposta statica e sismica della diga è stata condotta attraverso un'analisi al continuo in regime piano di deformazioni (Fig. 1), adottando un approccio dinamico accoppiato nel quale ai diversi materiali del corpo diga e del deposito di fondazione è stato attribuito un legame costitutivo elastoplastico, definito *Hardening Soil with Small Strain Stiffness* (HS_small). Tale legge costitutiva è in grado di descrivere con sufficiente accuratezza la risposta non lineare, isteretica e plastica del terreno nei diversi range di deformazione. Le analisi sono state condotte utilizzando il codice agli elementi finiti Plaxis 2D (Bentley,

2020). Il dominio di analisi modellato corrisponde alla sezione trasversale massima del corpo diga e include anche i terreni di fondazione al di sotto del rilevato. Lo spessore complessivo del deposito di fondazione è dell'ordine di 150 metri per poter analizzare accuratamente il processo di propagazione e modifica delle onde sismiche dal bedrock (AM2) alla superficie. I fenomeni di riflessione delle onde sismiche ai bordi del dominio di analisi sono stati attenuati applicando contorni assorbenti (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) lungo i confini laterali (*free field boundaries*) e alla base inferiore (*compliant base*). L'analisi è stata condotta dapprima simulando la costruzione del rilevato in 23 step di carico e la consolidazione post-costruttiva, per una durata complessiva di 16 mesi. In seguito, sono stati simulati il primo invasato e le fasi di esercizio. Infine, sono stati applicati i carichi dinamici associati ai diversi scenari sismici precedentemente descritti.

3.1. Risposta statica

Ad una prima calibrazione dei parametri del modello ottenuta sia interpretando i risultati delle diverse prove di laboratorio disponibili (argille di base) sia riferendosi a indicazioni di letteratura per materiali simili a quelli della diga in esame, è seguita una ricalibrazione dei parametri, finalizzata a riprodurre al meglio evoluzioni e distribuzioni di spostamenti e pressioni interstiziali osservati nel corpo diga e nei terreni di fondazione durante le diverse fasi di vita dell'opera. Tra i numerosi risultati delle analisi numeriche svolte, in questa nota si vuole mettere in luce il ruolo che la disomogeneità stratigrafica precedentemente descritta esercita sulla risposta statica e dinamica della diga. La Fig. 2 riporta la distribuzione di tensioni verticali e di cedimenti calcolati a fine costruzione. Si può chiaramente osservare come la presenza dell'olistolite CM, molto più rigido rispetto alle formazioni in cui è inglobato, generi una dissimmetria e una discontinuità tensionale nella parte di dominio che schematizza il sottosuolo. La dissimmetria degli spostamenti è evidenziata in Fig. 3, che riporta, per confronto, i risultati dell'analisi del caso reale con quelli di un sottosuolo virtuale, privo dell'olistolite e, dunque, simmetrico rispetto all'asse di simmetria della sezione trasversale del corpo diga. Nel caso virtuale il profilo di subsidenza del piano di fondazione, oltre a risultare come atteso simmetrico, presenta un cedimento massimo maggiore del 45% rispetto al caso reale. Il caso reale presenta una forte dissimmetria del profilo dei cedimenti, caratterizzata da una conca traslata verso monte. Nella configurazione reale, a un cedimento massimo minore lungo il piano di posa del rilevato diga corrispondono distorsioni ben maggiori rispetto al caso ideale.

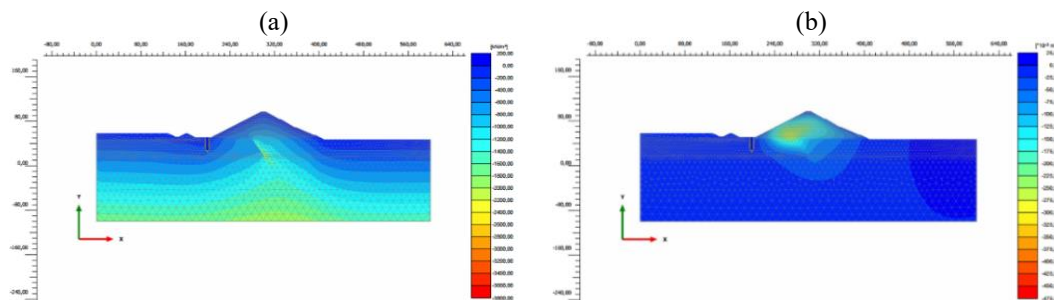


Fig 2. Distribuzione di (a) tensioni verticali efficaci (kPa) e (b) cedimenti alla fine della costruzione del rilevato.

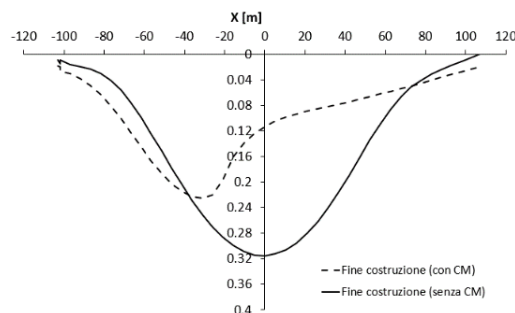


Fig 3. Cedimenti (m) attesi lungo il piano di posa della diga con e senza la modellazione del blocco CM.

3.2. Risposta dinamica

La risposta sismica della diga è stata analizzata sia in condizioni di serbatoio pieno sia in condizioni di serbatoio vuoto, in presenza o meno del blocco calcareo CM. La Fig. 4 mostra gli spostamenti verticali permanenti calcolati alla fine della fase sismica lungo l'asse verticale del rilevato nelle quattro condizioni analizzate. Indipendentemente dalla presenza di CM in fondazione, la condizione di serbatoio vuoto (Figs 4b-d) si è rivelata la più gravosa in quanto il cedimento medio in cresta (media sui sei gruppi di segnali dello SLC) è pari a circa 18 cm (0,36% di H), ossia superiore al valore di 12 cm (0,24% di H) calcolato in condizioni di serbatoio pieno (Figs 4a-c). In ogni caso, il cedimento atteso in cresta è risultato sempre ben inferiore alla soglia critica (1% di H) cui generalmente ci si riferisce nelle verifiche di dighe in terra per sintetizzare le varie tipologie di danno sismo-indotto (Hynes-Griffin & Franklin, 1984, Sica & Pagano, 2005). Il danno previsto dalle analisi per lo scenario sismico SLC corrisponde ad un livello moderato (Pells & Fell, 2003). Per caratterizzare gli effetti indotti dal blocco CM in condizioni sismiche è possibile confrontare i risultati con e senza blocco, a parità di altre condizioni (invaso pieno, confronto tra Figs 4a-c; invaso vuoto confronto tra Figs 4b-d). I risultati complessivamente evidenziano differenze trascurabili in termini di cedimenti permanenti lungo l'asse verticale del rilevato. Lo stesso risultato può essere esteso anche all'intero dominio della diga. Ad esempio, la Fig. 5 riporta i cedimenti calcolati assumendo come input il segnale #290, che dà luogo a spostamenti permanenti più elevati al termine dell'analisi sismica.

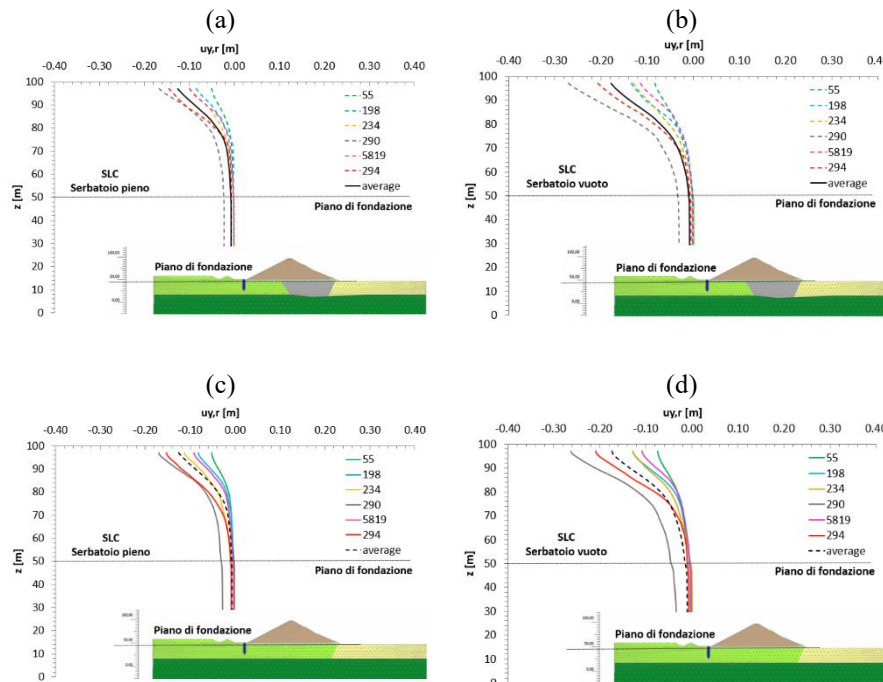
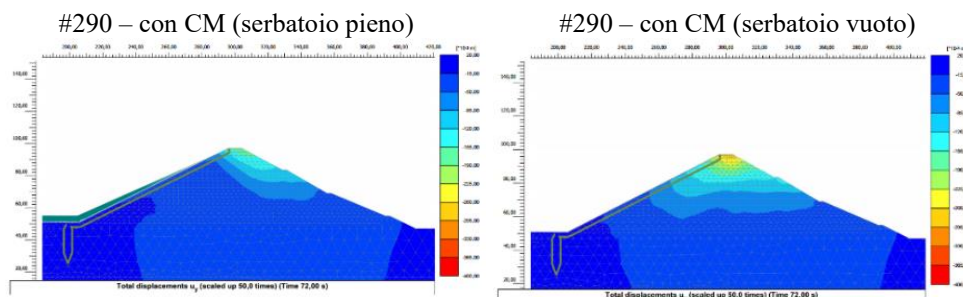


Fig 4. Spostamenti verticali indotti dal sisma per le condizioni di serbatoio pieno (a-c) e vuoto (b-d) con (in alto) e senza (in basso) il blocco calcareo CM.



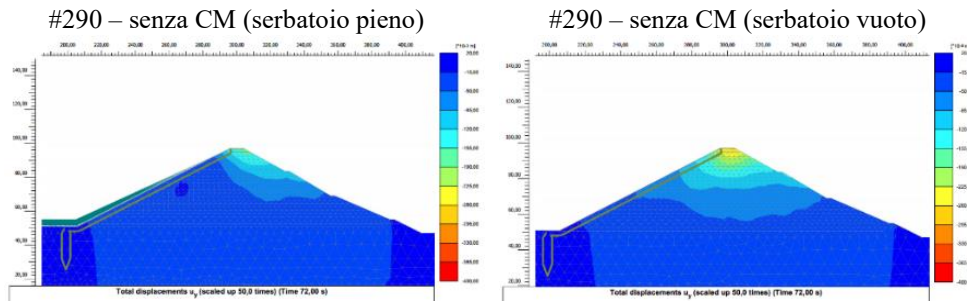


Fig 5. Distribuzione degli spostamenti verticali massimi per le condizioni di serbatoio pieno e vuoto, con e senza il blocco calcareo CM (segnale di input #290).

Alcune lievi differenze tra le analisi dinamiche con e senza il blocco CM sono state riscontrate in termini di accelerazioni massime lungo il piano di posa della diga (Fig. 6). La presenza dell'olistolite CM è risultata generalmente vantaggiosa in quanto ha determinato una riduzione delle PGA nella zona soprastante del corpo diga. Per alcune tracce di input si è riscontrata un'amplificazione del segnale nella zona posta a sinistra del CM generata dalla riflessione delle onde sulla zona di dominio più rigida (Figs 6a-d). Le variazioni di accelerazione orizzontale massima prodotte dal CM non sono significative nel corpo diga e sul coronamento, come mostrato dalle distribuzioni della PGA in Fig. 7 per il segnale #290. Tale risposta in termini accelerometrici risulta coerente con quanto precedentemente commentato per i cedimenti cosismici, per i quali le differenze tra i due schemi geometrici non risultavano apprezzabili. Inoltre, in base al contenuto in frequenza dei segnali di input e alle velocità delle onde di taglio dei terreni di fondazione, dati qui non riportati per brevità, si deduce che le minime lunghezze d'onda in gioco sono dell'ordine delle centinaia di metri, rendendo il CM (con altezza di circa 34 m) ininfluente ai fini della propagazione delle onde sismiche nel deposito di fondazione. In definitiva, per il caso studio analizzato, gli effetti del blocco CM sulla risposta sismica della diga possono essere considerati trascurabili.

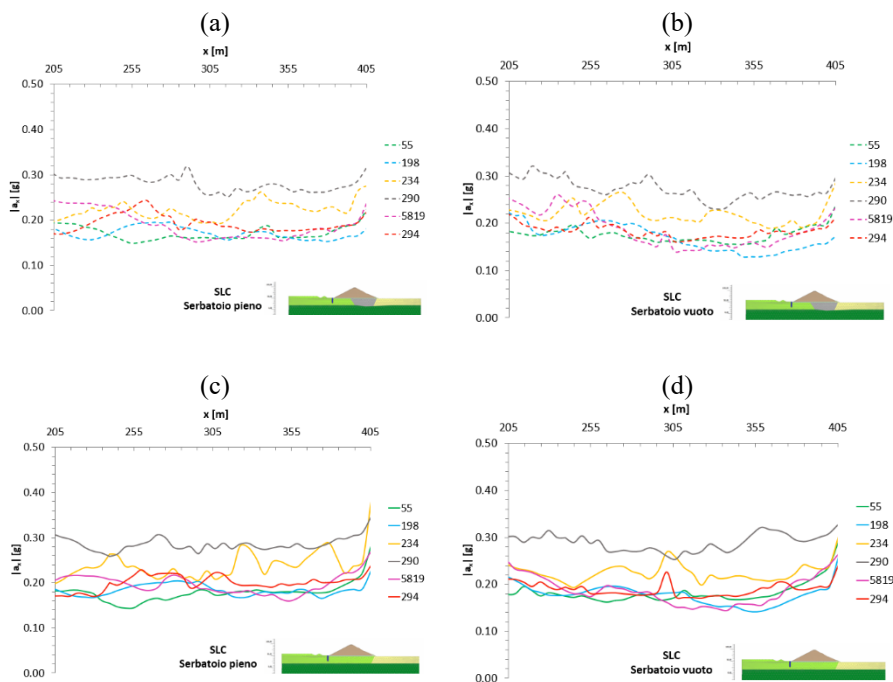


Fig 6. Valori di PGA lungo il piano di posa della diga per le condizioni di serbatoio pieno (a-c) e vuoto (b-d) con (in alto) e senza (in basso) il blocco calcareo CM.

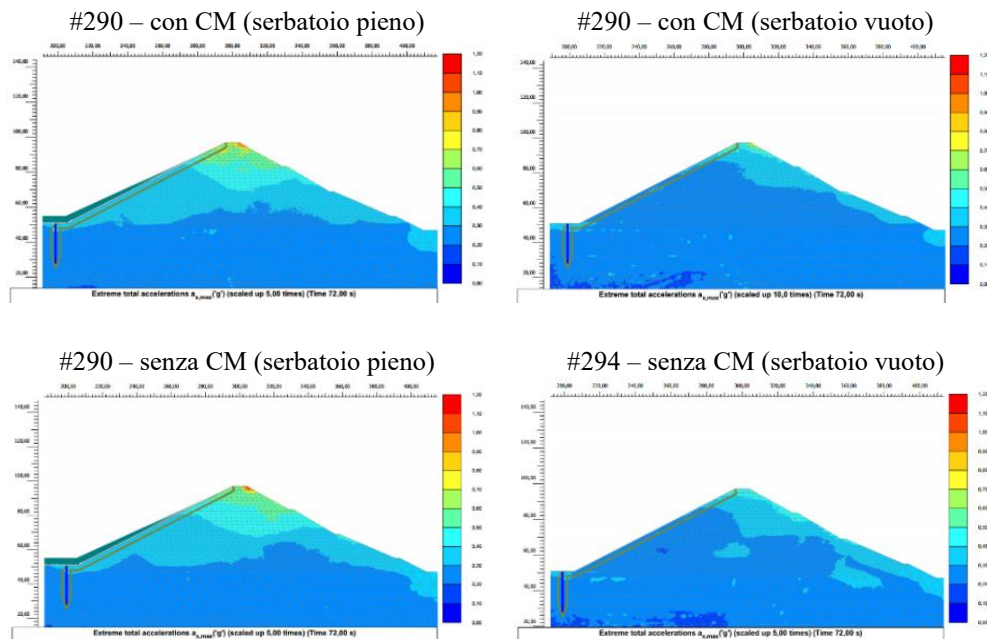


Fig 7. Distribuzione delle accelerazioni orizzontali massime nelle condizioni di serbatoio pieno e vuoto, con e senza il blocco calcareo CM (segnale di input #290).

4. Conclusioni

L'articolo illustra la procedura numerica sviluppata per analizzare la risposta statica e sismica di una diga in terra italiana con manto. La particolarità della case-history è la presenza di un grosso blocco calcareo inglobato all'interno dei terreni di fondazione, in modo tale che solo metà del corpo diga (lato valle) è fondato su di esso mentre la restante parte poggia su argille mioceniche. I risultati dell'analisi numerica mostrano che la disomogeneità del deposito di fondazione influenza prevalentemente la risposta statica della diga ma, al contrario, genera effetti di scarso rilievo sulla risposta sismica complessiva dell'opera.

Bibliografia

- Luzi et al. (2016). "The Engineering Strong-Motion Database: a platform to access Pan-European Accelerometric data", *Seismological Research Letters*, 87, 4, 987-997.
- Lysmer J. and Kuhlemeyer R.L. (1969). "Finite Dynamic Model for Infinite Media", *Journal of Engineering Mechanics Division*, 95, 859-878.
- Hynes-Griffin M.E., Franklin A.G. (1984). „Rationalizing the seismic coefficient method", *Miscellaneous Paper GL-84-13*, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Pells S., Fell R. (2003). "Damage and cracking of embankment dams by earthquake and the implications for internal erosion and piping". Proc. 21st Int. Congress on Large Dams, Montreal.
- Benz T., Vermeer PA, Schwab R. (2009). "A small-strain overlay model", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33, 25-44.
- Costigliola R.M., Pagano L., Russo C., Sica S. (2019). "Earth dams: Damage mechanisms and limit states in seismic conditions". Proc. 7th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome.
- Pagano L., Sica S. (2005). Cap 16-Costruzioni in terra - in "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica". Linee Guida AGI, Associazione Geotecnica Italiana, Edizione provvisoria, Patron, Bologna.
- Iervolino J., Galasso C., Cosenza E. (2010). "REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis", *Bull Earthquake Eng*, 8, 339-362.
- Bentley Plaxis 2D Manual (2020). Engineering Department License, University of Sannio, Benevento.