

# Indici di prestazione sismica per le dighe in terra

D. Aliberti<sup>1</sup>, G. Biondi<sup>1</sup>, E. Cascone<sup>1</sup>, S. Rampello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Messina

<sup>2</sup>Università degli Studi Sapienza Roma

**SOMMARIO:** I dati disponibili in letteratura mostrano che lo spostamento verticale della cresta delle dighe in terra può essere assunto come indice rappresentativo della prestazione sismica complessiva della diga e del più ampio sistema di cui essa fa parte. Tale parametro è infatti ben correlato al livello di danno indotto da un evento sismico e all'eventuale superamento di una condizione limite che configura la perdita di funzionalità della diga o dell'impianto. In questo articolo è stato esaminato un ampio insieme di dati di letteratura, relativi ai danni indotti da eventi sismici su varie tipologie di dighe, per individuare diverse classi di danno e le possibili condizioni limite raggiunte dalla diga o dall'impianto. Le distribuzioni dei valori dello spostamento verticale della cresta, corrispondenti a ognuna delle classi di danno esaminate, sono poi state utilizzate per individuare valori di soglia che configurano l'insorgere di un dato stato limite.

**Keywords:** dighe, sisma, prestazione sismica, indici di prestazione

## 1 INTRODUZIONE

La valutazione della risposta sismica delle dighe mediante approcci di carattere prestazionale richiede la definizione di indici di prestazione che individuano l'insorgere di un dato stato limite ultimo o di esercizio e la definizione di scenari sismici nei confronti dei quali effettuare la verifica. In particolare, le analisi per la valutazione della prestazione sismica devono essere finalizzate a verificare che la completa operatività dell'impianto sia garantita in occasione di eventi sismici meno intensi, ma caratterizzati da una elevata probabilità di accadimento; le condizioni di stabilità sismica dell'opera devono essere invece verificate utilizzando azioni sismiche corrispondenti a eventi di forte intensità, aventi una minore probabilità di accadimento.

Le *Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta* (nel seguito NTD14) introducono due stati limite di esercizio (di operatività, *SLO*, e di danno, *SLD*) e due stati limite ultimi (di salvaguardia della vita, *SLV*, e di collasso *SLC*) che possono essere raggiunti a seguito della perdita di funzionalità connessa all'insorgere di danni indotti dall'evento sismico, del rilascio incontrollato di acqua o del collasso dell'opera.

Aliberti et al. (2019) hanno recentemente esaminato tali stati limite, le cui caratteristiche principali sono riassunte in Tabella 1 insieme ai corrispondenti valori della probabilità di superamento  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento e a una descrizione sintetica della condizione che individua il raggiungimento di ciascuno stato limite.

Il raggiungimento di un fissato stato limite dovrebbe essere verificato attraverso analisi mirate alla previsione della prestazione sismica complessiva della diga (corpo diga, terreni di fondazione, sistemi di drenaggio, strumenti di manovra etc.) e di tutte le componenti dell'impianto.

Pertanto, nell'ambito di un approccio di carattere prestazionale, sarebbe necessario definire indici di prestazione sismica per ciascun elemento del sistema che sia rilevante per la condizione operativa post-sismica o che abbia una incidenza rilevante sui costi da sostenere per il ripristino delle condizioni di normale funzionamento dell'impianto.

Partendo dall'esame dei danni subiti da numerose dighe in terra a seguito di vari eventi sismici, Swaisgood (2003) ha mostrato che lo spostamento verticale  $w_c$  della cresta della diga costituisce un parametro che ben descrive la prestazione sismica del sistema nel suo insieme.

Tabella 1. Stati limite introdotti dalle NTD14 (da Aliberti et al., 2019).

C	Operational ( <i>OLS</i> )	Damage ( <i>DLS</i> )	Life safety ( <i>LLS</i> )	Collapse <i>CLS</i> )
$P_{VR}$ (%)	81	63	10	5

	L	A	L	A	L	A
Condition to be lost (L) or to be attained (A) for the achievement of the limit state	No damage occurs in the dam and in the facilities (normal operating condition)	Occurrence of repairable damages without uncontrolled release of water	Occurrence of irreparable damages without uncontrolled release of water	Occurrence of irreparable damages producing uncontrolled release of water and/or risk of loss of human life (Collapse)		

In particolare, lo spostamento verticale  $w_c$  normalizzato rispetto all'altezza totale  $H$  del sistema diga-fondazione è generalmente rappresentativo della deformazione complessiva del corpo diga e ben correlato ai valori di picco dell'accelerazione sismica al sito della diga. L'utilizzo di tale parametro come indice complessivo della prestazione sismica di una diga è stato suggerito anche da Seco e Pinto (2010) e Ishihara (2010) con riferimento a dighe in rockfill con manto bituminoso.

Sulla base di tali considerazioni l'articolo illustra alcune caratteristiche di un database relativo a 90 casi documentati di danni prodotti da eventi sismici di forte intensità su dighe di varie tipologie. Partendo da un riesame dei livelli di danno indotto, i valori osservati dello spostamento verticale della cresta sono stati utilizzati per definire opportune soglie da utilizzare come indici per la valutazione della prestazione sismica delle dighe.

## 2 DESCRIZIONE DEL DATABASE

Un ampio insieme di dati, relativi a 90 casi documentati di danni indotti da terremoti a varie tipologie di dighe in terra, sono stati recentemente raccolti ed esaminati da Aliberti et al. (2019) al fine di definire valori di riferimento dello spostamento verticale  $w_c$  della cresta corrispondenti a determinati livelli di danno atteso. In particolare, in accordo con le indicazioni di Swaisgood (2003) lo spostamento  $w_c$  è stato normalizzato rispetto all'altezza totale  $H$  del sistema diga-fondazione, definita come somma dell'altezza  $H_d$  del corpo diga e dello spessore  $H_f$  dei terreni di fondazione.

Alcune statistiche del set di dati che costituiscono il database sono riportate in Tabella 2: in particolare l'insieme si riferisce a 7 dighe in rockfill con manto bituminoso o in calcestruzzo (rockfill dams, *RD*), 11 dighe a sedimentazione idraulica (hydraulic fill, *HF*), 4 Tailing dams (*TD*), 68 dighe in terra di cui 27 omogenee (*HED*) e 31 zonate (*ZED*). I valori delle altezze  $H_d$  delle dighe variano tra 6.1 e 235 m.

Le dighe hanno risentito degli effetti prodotti da 42 eventi sismici (verificatisi dal 1906 al 2011) caratterizzati da una magnitudo compresa tra 4.9 e 8.3; la distanza epicentrale  $R_{ep}$  che caratterizza i siti in

cui sono ubicate le dighe varia nell'intervallo 0÷260 km mentre il valore di picco dell'accelerazione orizzontale al sito della diga  $a_{h,max}$  (registrata o stimata su roccia affiorante o alla base della diga) è compreso tra 0.02g e 0.80g.

I danni che le dighe hanno subito, documentati in diversi lavori scientifici, sono stati riesaminati da Aliberti et al. (2019) con l'obiettivo di definire valori di soglia dello spostamento verticale della cresta correlati al raggiungimento di uno degli stati limite descritti in Tabella 1. I 4 livelli di danno presi in esame nell'analisi (*None*, *Minor*, *Moderate* e *Severious*) sono esposti in dettaglio nella memoria di Aliberti et al. (2019), alla quale si rimanda, e sono sinteticamente descritti in Tabella 3.

Tabella 2. Principali caratteristiche del database.

Diga	n.	$H$ (m)	$M$	$R_{ep}$ (km)	$a_{h,max}$ (g)
<i>RD</i>	7	66.5÷132	5.6÷7.9	7÷260	0.03÷0.37
<i>HF</i>	11	6.1÷63	5.3÷7.3	1÷151	0.05÷0.60
<i>HED</i>	37	10.7÷100	5.3÷8.2	0÷77	0.02÷0.80
<i>ZED</i>	31	46.9÷235	5.3÷8.1	5÷150	0.04÷0.58
<i>TD</i>	4	10÷32.5	7.0÷8.0	8÷80	0.25÷0.80

Tabella 3. Livelli di danno (da Aliberti et al. 2019).

Level	Description
None	No damages in the dam and in the appurtenant structures and equipment. The plant remains in a normal operating condition
Minor	Downstream and upstream slopes suffer local instabilities, but overall stability of the dam embankment is ensured. The normal operating condition is lost due to the occurrence of repairable damages that do not lead to uncontrolled release of water (crest settlement lower than freeboard)
Moderate	Occurrence of cracks and/or excessive permanent deformations and settlements in the embankment and/or in the foundation soils, producing irreparable damages without uncontrolled release of water (crest settlement lower than freeboard).
Severe	Overall instability of the embankment and /or in the basin slopes, occurrence of soil liquefaction (in the embankment and/or in the foundation soils). Uncontrolled release of water (crest settlement greater than freeboard) and even dam collapse.

### 3 ESAME E DISCUSSIONE DEI DATI

L'insieme di dati ottenuto attraverso questo esame critico è descritto in Tabella 4 e in Figura 1.

Gli intervalli di variazione dello spostamento normalizzato  $w_c/H$  che, per ciascuna tipologia di diga presa in esame, caratterizza l'insieme di dati raccolto sono riportati in Tabella 4.

Per le quattro differenti classi di danno considerate da Aliberti et al. (2019), i valori dello spostamento normalizzato in cresta al variare della magnitudo  $M$  dell'evento che lo ha determinato sono mostrati in Figura 1. Nella stessa figura, le frecce verticali individuano gli intervalli di spostamento normalizzato suggeriti da Swaisgood (2003) per identificare i diversi livelli di danno.

I casi per i quali non è stato osservato alcun danno (*None* in Tabella 3 e 4) sono mostrati in Figura 1b. Da essa si evince che, sia per l'intero insieme di dati presi in esame (26 casi) sia per il sottoinsieme relativo alle sole dighe zonate e omogenee (23 casi), nessun danno è stato generalmente osservato per valori dello spostamento in cresta normalizzato inferiori allo 0.11% circa. Con riferimento a tali dati, indipendentemente dalla tipologia di diga, il valore medio dello spostamento normalizzato è risultato pari a circa 0.02%. Tale valore non è rappresentativo dell'intero insieme a causa della grande dispersione dei dati; tuttavia, i valori del rapporto  $w_c/H$  variano in un intervallo limitato sempre interno a quello definito da Swaisgood (2003) per tale livello di danno ( $w_c/H = 0.001\% \div 0.1\%$ ). I dati riportati in Figura 1b consentono infine di individuare un limite superiore del rapporto di spostamento, variabile nell'intervallo  $0.09\% \div 0.10\%$  (area campita in grigio scuro in Figura 1b), che comprende oltre il 95% dei dati.

Un livello di danno modesto (*Minor* in Tabella 3 e 4) è stato invece osservato nei casi caratterizzati da valori dello spostamento normalizzato della cresta variabili da 0.02% a 1.2% circa (Figura 1c): si tratta di 33 casi, 28 dei quali riferiti a dighe zonate e omogenee. L'intervallo di valori  $w_c/H = 0.02\div 0.5\%$ , suggerito da Swaisgood (2003) per tale classe di danno, comprende praticamente tutti i dati presi in esame e per i quali il valore medio del rapporto  $w_c/H$  è pari a circa 0.14%. Per questo livello di danno, un limite superiore dello spostamento della cresta normalizzato può essere identificato nell'intervallo  $0.4\%\div 0.45\%$  (area campita in grigio scuro in Figura 1c), molto vicino alla soglia  $w_c/H = 0.5\%$  proposta da Swaisgood (2003) per la medesima classe di danno.

Danni di livello medio (*Moderate* in Tabella 3 e 4) sono stati osservati in una serie di casi per i quali lo spostamento normalizzato presenta valori dispersi in un intervallo molto ampio (Figura 1d). Per tale classe di danno, i valori del rapporto  $w_c/H$  sono risultati compresi nell'intervallo  $0.02\%\div 13.8\%$  circa, sia se i dati si esaminano nel loro insieme (16 casi),

sia se ci si riferisce al sottoinsieme relativo alle sole dighe zonate e omogenee (10 dighe). Il massimo valore del rapporto di spostamento osservato si riferisce ad uno sbarramento di modeste dimensioni ( $HED, H_d = 11.6$  m) per il quale il valore dello spostamento normalizzato è risultato pari a  $w_c/H = 13.8\%$  circa. Escludendo tale caso e altri due relativi a uno sbarramento di piccola altezza ( $H_d = 6.1$  m,  $w_c = 60$  cm,  $w_c/H = 9.8\%$ ) e a una diga che ha manifestato uno spostamento in cresta molto ridotto ( $w_c = 1$  cm,  $w_c/H = 0.02\%$ ), si può concludere che un livello di danno *Medio* è stato generalmente osservato per valori dello spostamento in cresta normalizzato inferiori al 5.6% circa. Per questo insieme di dati, un valore compreso tra  $0.8\% \div 1.0\%$  (area campita in grigio scuro in Figura 1d) può essere assunto come ragionevole limite superiore per circa l'85% dei casi esaminati.

Danni elevati (Figura 1e, *Severe* in Tabella 3 e 4) sono stati infine identificati in 15 casi, tre dei quali (dati cerchiati in Figura 1e) sono caratterizzati da valori del rapporto  $w_c/H$  superiori al 17% circa e si riferiscono al raggiungimento di una condizione di completo collasso del sistema. Escludendo questi tre casi insieme a un altro per il quale il livello di danno descritto nei documenti di riferimento risulta severo a fronte di un rapporto di spostamento inferiore allo 0.6%, nei restanti 11 casi (che includono 6 dighe omogenee e zonate) è stato osservato un livello di danno severo per spostamenti della cresta normalizzati superiori a 0.82% circa. Se ci si riferisce all'intero insieme di dati, il valore massimo del rapporto di spostamento è pari al 20.9% circa, mentre per le sole dighe omogenee e zonate il valore massimo scende a 13.3% circa. Per questa classe di danno, la definizione di un limite superiore dello spostamento della cresta normalizzato richiede una certa cautela sia a causa della grande dispersione dei dati (evidente dalla distribuzione mostrata in Figura 1e) sia per effetto delle inevitabili approssimazioni insite nella procedura di riesame e classificazione della descrizione dei danni disponibile per ciascuna delle dighe esaminate. Un ragionevole limite superiore del rapporto di spostamento normalizzato può essere individuato nell'intervallo  $2\%\div 3\%$  individuato dalla zona campita in grigio scuro in Figura 1e.

Nel complesso, per ciascuna delle quattro classi di danno prese in esame (Tabella 3), l'analisi dei dati ha consentito la definizione dei seguenti intervalli di variazione dello spostamento normalizzato della cresta:

- $w_c/H = 0.09\%\div 0.10\%$  rappresenta l'intervallo che comprende più del 95% dei casi per i quali non sono stati osservati danni apprezzabili (Figura 1b, *None* in Tabella 3 e 4);
- $w_c/H = 0.4\%\div 0.45\%$  individua un limite superiore dello spostamento normalizzato per i casi in cui sono stati osservati livelli di danno modesti (Fig. 1c, *Minor* in Tabella 3 e 4);

Tabella 4. Intervalli di variazione del rapporto di spostamento per ciascuna classe di danno.

Livello di danno	Diga		$w_c/H_d$ (%)		
	Tipologia	n.	minimo	massimo	medio
Nessuno (none)	tutte (ZED, HED, RD, HF, TD)	26	0.0009	0.1096	0.0189
	'in terra' (ZED, HED)	23	0.0009	0.1096	0.0326
Modesto (Minor)	tutte (ZED, HED, RD, HF, TD)	33	0.0196	1.2116	0.136
	'in terra' (ZED, HED)	28	0.0196	1.2116	0.180
Medio (Moderate)	tutte (ZED, HED, RD, HF, TD)	16 (13) <sup>a</sup>	0.0198 (0.0833) <sup>a</sup>	13.79 (5.6075) <sup>a</sup>	1.425 (0.6226) <sup>a</sup>
	'in terra' (ZED, HED)	10 (8) <sup>a</sup>	0.0198 (0.0833) <sup>a</sup>	13.79 (5.6075) <sup>a</sup>	2.422 (1.3011) <sup>a</sup>
Elevato (Severe, Failure)	tutte (ZED, HED, RD, HF, TD)	15 (11) <sup>b</sup>	0.5249 (0.8209) <sup>b</sup>	98.462 (20.866) <sup>b</sup>	14.235 (6.658) <sup>b</sup>
	'in terra' (ZED, HED)	7 (6) <sup>b</sup>	0.8209	20.866	8.162 (6.947) <sup>b</sup>

(a) con esclusione di 3 casi: HED ( $H_d=11.6$  m,  $w_c=1.6$  m) con  $w_c/H=13.8$  %; HF ( $H_d=6.1$  m,  $w_c=60$  cm) con  $w_c/H=9.8$  %; HED ( $H_d=55.5$  m,  $w_c=1.1$  cm) con  $w_c/H=0.02$  %.  
 (b) con l'esclusione di 3 casi di collasso (1 HED, 2 TD) e 1 caso con  $w_c/H=0.525$  % (< 20 cm).

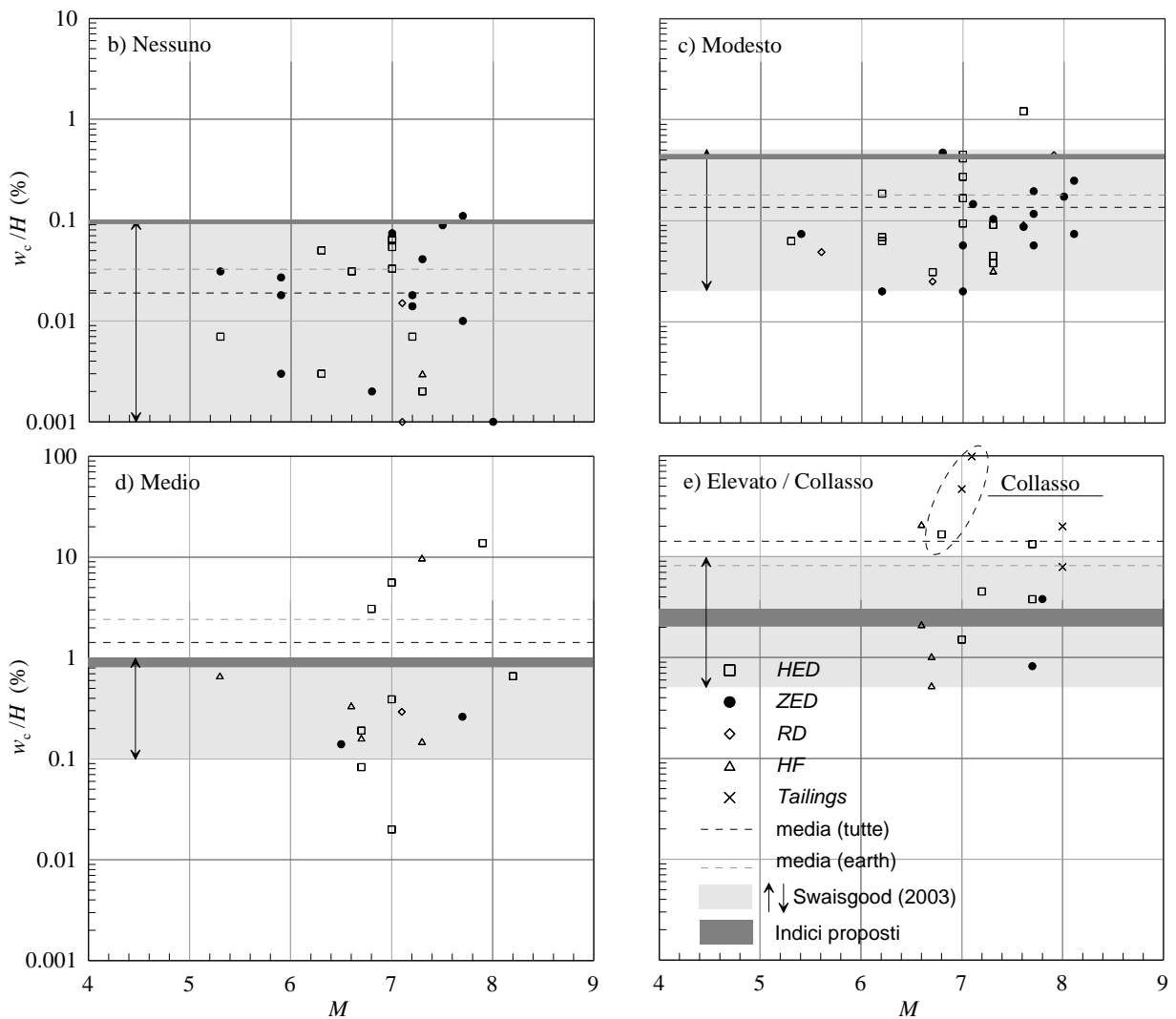
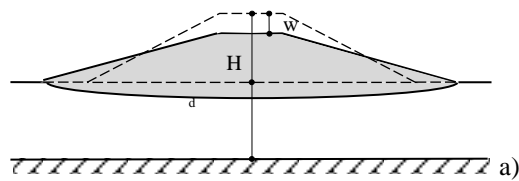


Figura 1. Database di case history considerate per valutare i valori di soglia dello spostamento della cresta normalizzato.

- $w_c/H = 0.8\% \div 1.00\%$  può essere assunto come limite superiore che ingloba circa l'85% dei casi per i quali è stato osservato un danno medio (Figura 1d, *moderate* in Tabella 3 e 4);
- $w_c/H = 2\% \div 3\%$  rappresenta un valore conservativo del limite superiore per i casi in cui sono stati osservati danni elevati (Figura 1e, *Severe* in Tabella 3 e 4);
- $w_c/H > 10\%$  rappresenta un valore conservativo del limite inferiore che identifica i casi in cui si è verificato un fenomeno di completo collasso del sistema (Figura 1e).

#### 4 INDICI DI PRESTAZIONE PROPOSTI

A partire da questi risultati, sono stati definiti i valori di soglia dello spostamento normalizzato della cresta riportati in Tabella 5 insieme al corrispondente livello di danno indotto dall'evento sismico. Ciascuno di tali valori può essere assunto come rappresentativo del raggiungimento degli stati limite descritti in Tabella 1.

In particolare, per le analisi sismiche di dighe in terra si possono assumere valori di soglia  $w_c/H = 0.1\%$ ,  $0.4\%$ ,  $1.0\%$  e  $2.5\%$  per identificare il raggiungimento di uno stato limite di operatività (*SLO*), di danno (*SLD*), di salvaguardia della vita (*SLV*) e di collasso (*SLC*).

Per ciascuno stato limite è comunque necessario verificare contestualmente (Tabella 5) che il cedimento della cresta risulti minore del franco netto  $f$  che, in questo tipo di analisi, va inteso come differenza tra la quota della cresta della diga e la quota del serbatoio assunta nell'analisi della prestazione sismica.

Tabella 5. Indici di prestazione proposti.

Livello di danno	Stato limite	Indice di prestazione
nessuno (None)	Operatività (SLO)	$w_c/H < 0.1\%$
modesto (Minor)		$w_c < f$
medio (Moderate)	Danno (SLD)	$w_c/H < 0.4\%$
elevato (Severe)	Salvaguardia della Vita (SLV)	$w_c/H < 1.0\%$
	Collasso (SLC)	$w_c/H < 2.5\%$
		$w_c < f$

#### 5 CONCLUSIONI

È stato esaminato un ampio insieme di dati relativi a casi ben documentati di danni indotti da terremoti su varie tipologie di dighe al fine di definire dei valori di soglia del rapporto di spostamento verticale della cresta  $w_c/H$ , da utilizzare nelle verifiche sismiche per ciascuno degli stati limite previsti dalle prescrizioni normative nazionali.

Per le dighe considerate i danni sono stati analizzati e ordinati con l'obiettivo di mettere in relazione alcuni valori di soglia del rapporto  $w_c/H$  con il raggiungimento di un dato stato limite. L'esame dei dati ha permesso di definire i valori di soglia del rapporto di spostamento corrispondenti all'insorgere dello stato limite di Operatività, di Danno, di Salvaguardia della Vita e di Collasso.

#### RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro riassume alcuni dei risultati delle attività di ricerca svolte dall'unità di Ricerca dell'Università di Messina e Roma La Sapienza nell'ambito del PRIN "Risk assessment of Earth Dams and River Embankments to Earthquakes and Floods (REDREEF)" (progetto n. 2017YPMBWJ) finanziato dal MIUR.

#### BIBLIOGRAFIA

- Aliberti D., Biondi G., Cascone E., Rampello S. (2019). Performance indexes for seismic analyses of earth dams. 7th ICEGE, June 2019, Rome, Italy.
- Ishihara K. (2010). Performances of rockfill dams during recent large earthquakes. 5<sup>th</sup> Int. Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, (p. 1-11). San Diego, California.
- NTD14 (2014). Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse). 26 Giugno, 2014. G.U. n.156, Luglio 8, 2014.
- Seco e Pinto, P., Simao, P. (2010). Understanding seismic embankment dam behavior through case histories. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, SOAP 2. San Diego.
- Swaigood J. (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes. Proc. Pacific conference on earthquake engineering, 2003.