

ALCUNI ASPETTI DEL COMPORTAMENTO SISMICO DI GRANDI DIGHE IN TERRA OMOGENEE

Luca Masini, Ilaria Del Brocco
“Sapienza” Università di Roma
luca.masini@uniroma1.it

Sommario

In questa nota si mostrano alcuni aspetti del comportamento sismico di dighe in terra omogenee. A partire da una diga esistente ben documentata è stato definito un modello di sbarramento opportunamente semplificato con il quale sono state eseguite analisi numeriche pseudo-statiche condotte a rottura e analisi dinamiche in tensioni efficaci. I risultati mostrano che la deformabilità del bedrock permette una parziale attenuazione dell'energia del sisma e quindi una riduzione degli spostamenti della diga rispetto al caso di bedrock infinitamente rigido. Al contrario, la componente verticale dell'azione sismica induce una sensibile amplificazione delle accelerazioni e un incremento degli spostamenti dello sbarramento, specialmente in condizioni non drenate.

1. Definizione dello schema di riferimento

Il comportamento sismico delle dighe in terra è fortemente influenzato dalle azioni inerziali che si sviluppano durante l'evento sismico e si modificano nel tempo e nello spazio. La distribuzione e l'evoluzione di tali azioni dipendono dalle caratteristiche del terreno di fondazione e dei materiali che compongono il corpo diga, dallo stato tensionale efficace indotto dalle fasi di costruzione e invaso della diga e dalla geometria dell'opera. I tradizionali approcci di analisi semplificati consentono di portare in conto solo alcuni dei precedenti aspetti. Le analisi numeriche dinamiche non lineari svolte in condizioni bi e tri-dimensionali, se ben calibrate, permettono di riprodurre più adeguatamente l'interazione tra l'opera e l'azione sismica e di seguirne l'evoluzione nel tempo attraverso l'analisi dello stato tensionale e dei percorsi deformativi all'interno della diga.

In questa nota vengono descritti alcuni risultati preliminari di uno studio sul comportamento sismico di grandi dighe in terra. Nello specifico, sono state eseguite analisi numeriche pseudo-statiche e dinamiche con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC v.5.0 su un modello numerico opportunamente semplificato di sbarramento omogeneo che è stato definito a partire da una diga italiana esistente e ben documentata in letteratura (Calabresi *et al.*, 2000; Cascone e Rampello, 2003; Amorosi & Elia, 2008; Rampello *et al.*, 2009; Elia *et al.*, 2010). Specificamente, si è fatto riferimento alla diga sulla Marana Capacciotti, per la quale si dispone di un'accurata caratterizzazione geotecnica e dei dati di monitoraggio durante la fase di costruzione e di invaso (Calabresi *et al.*, 2000).

Le caratteristiche geometriche della diga reale sono state convertite in uno schema di riferimento semplificato poiché, in una fase successiva della ricerca, si confronteranno tre schemi di sbarramento (omogeneo, a nucleo verticale e a nucleo inclinato), caratterizzati dallo stesso terreno di fondazione e dalla stessa altezza di ritenuta, per valutare, a parità di azione sismica, le differenze nella risposta derivanti dalla diversa tipologia e geometria dell'elemento di tenuta. Sulla base dei risultati ottenuti verranno quindi definiti criteri per indirizzare meglio gli interventi di riqualificazione sismica delle dighe esistenti e per individuare la tipologia di diga in terra in grado di fornire la migliore prestazione sismica.

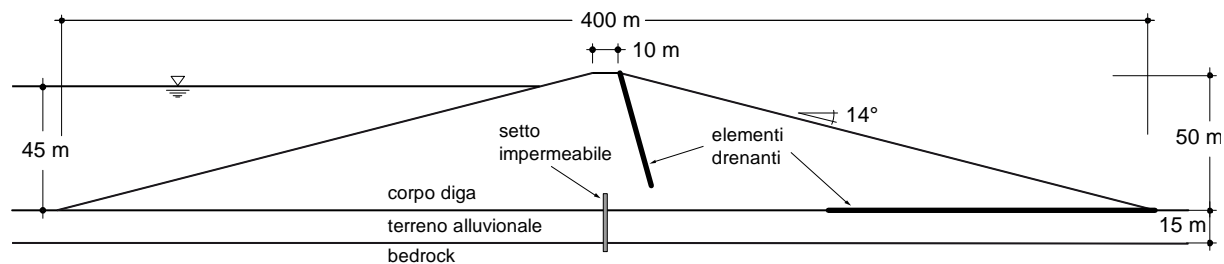


Fig 1. Modello di riferimento per lo schema di diga omogenea.

La Figura 1 mostra lo schema di diga omogenea in base al quale è stato sviluppato un modello alle differenze finite in condizioni di deformazione piana. Si assume che lo schema adottato sia rappresentativo della sezione maestra di una diga omogenea ideale indefinitamente estesa in direzione longitudinale. Il rilevato è caratterizzato da un'altezza $H = 50$ m, da una larghezza di 400 m e da un'inclinazione dei fianchi $\alpha = 14^\circ$. A partire dalla cresta, larga 10 m, un dreno sub-verticale si sviluppa fin quasi al piano di posa della diga. Un altro elemento di drenaggio si estende in direzione orizzontale dal piede a valle della diga per 100 m all'interno del corpo diga. Un setto impermeabile verticale posto al centro della diga impedisce la filtrazione attraverso il terreno di fondazione che è costituito da uno strato di 15 m di terreno alluvionale posto al di sopra del substrato rigido.

La Tabella 1 riporta i valori dei parametri meccanici impiegati nelle analisi. I parametri di resistenza per il terreno di fondazione e per il corpo diga sono stati ottenuti sulla base dei risultati delle prove in sito e in laboratorio disponibili per il sito della diga; la rigidità utilizzata nelle analisi statiche è stata ottenuta applicando un fattore riduttivo al modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 , in modo da riprodurre i profili di cedimento ottenuti da misure assestimentriche eseguite durante la costruzione del rilevato. Nello specifico, per il corpo diga e per il terreno di fondazione si è assunta una rigidità statica pari al 5% di G_0 . Il modulo di taglio iniziale G_0 è stato espresso in funzione della pressione media efficace p' attraverso la relazione

$$G_0 = A + B \cdot p'^n \quad (1)$$

I valori delle costanti A , B , e n , sono stati scelti in modo da riprodurre i profili di G_0 con la profondità ottenuti da prove geofisiche eseguite nel sito della diga di riferimento. Per il *bedrock* è stato invece assunto un modulo $G_0 = 2060$ MPa costante con la profondità, corrispondente a una velocità di propagazione delle onde di taglio $v_s = 1000$ m/s, e un modulo di rigidità volumetrica $K = 5026.4$ MPa.

2. Analisi di risposta sismica monodimensionali

La risposta dinamica del modello bidimensionale alle differenze finite è stata calibrata confrontando i risultati di analisi di risposta sismica in condizioni di campo libero con quelli ottenuti con il codice di calcolo MARTA v.1.1.01 (Callisto, 2015), in cui il terreno è schematizzato come un mezzo visco-elastico equivalente. Specificamente, è stata studiata una colonna di terreno di altezza pari a 67 m, rappresentativa della successione stratigrafica in asse alla diga. Essa è composta, per i primi 50 m a partire dal piano campagna, dal terreno del corpo diga, al di sotto del quale è presente uno spessore di 15 m di terreno alluvionale di fondazione. Lo strato consistente di base è modellato con uno strato elastico di spessore pari a 2 m. Nelle analisi, il comportamento meccanico del terreno di fondazione e

Tabella 1. Parametri meccanici dei terreni

terreno	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	k_0 (-)	k (m/s)	A	B	n	ν
corpo diga	20.8	20	28	0	-	10^{-7}	19.476	1573	0.75	0.30
terreno di fondazione	20.6	7	32	0	1.5	10^{-6}	19.476	2155	0.73	0.32
bedrock	20.6	-	-	-	1.5	10^{-9}	2060	0	1	0.32

del corpo diga è descritto mediante il modello costitutivo elastico-perfettamente plastico, con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb e legge di flusso non associata, utilizzando i parametri di resistenza della Tabella 1. Il substrato rigido è stato invece modellato come un mezzo elastico lineare. Il comportamento dinamico dei terreni del corpo diga e di fondazione è descritto mediante il modello isteretico Sigmoidal4, disponibile nella libreria del codice di calcolo: si tratta essenzialmente di una generalizzazione delle regole di Masing (1926) a stati deformativi bidimensionali. Il modello richiede la definizione di una curva scheletro del modulo di taglio G che è stata calibrata in modo da riprodurre le curve di decadimento $G/G_0-\gamma$ ottenute dalle prove di colonna risonante disponibili, integrate, per i valori più elevati della deformazione di taglio, da curve di letteratura. Specificamente, per il terreno del corpo diga, si è fatto riferimento alla curva ottenuta applicando la relazione proposta da Ishibashi & Zang (1993) per $p' = 50$ kPa e $I_p = 0$, mentre per il terreno di fondazione si è fatto riferimento alla curva proposta da Seed & Idriss (1979). Ne deriva un comportamento isteretico che produce una dissipazione di energia proporzionale alle massime deformazioni cicliche. In aggiunta allo smorzamento isteretico, il modello è in grado di riprodurre un'ulteriore fonte di dissipazione di energia, associata allo sviluppo di deformazioni plastiche quando viene mobilitata la resistenza del terreno. Per migliorare la stabilità numerica delle analisi, è stato inoltre utilizzato uno smorzamento aggiuntivo di tipo "local", la cui entità è definita da un coefficiente di smorzamento $\alpha_L = \pi D$ in cui D rappresenta una frazione dello smorzamento critico che nelle applicazioni tipiche viene assunta pari al 5%. Questa formulazione dello smorzamento ha il vantaggio di essere indipendente dalla frequenza, al contrario di quella alla "Rayleigh", in cui lo smorzamento minimo è associato ad un valore della frequenza da definire a priori.

L'azione sismica impiegata per le analisi monodimensionali e bidimensionali è costituita da un accelerogramma reale (componente orizzontale e verticale), selezionato tra un set di registrazioni di eventi reali le cui caratteristiche sono compatibili con la sismicità del sito della diga (Cascone e Rampello, 2003). Nello specifico, si è fatto riferimento alla registrazione NS della stazione di Tolmezzo, relativa all'evento friulano del 1976 (accelerazione massima $a_{x,max} = 0.342g$, intensità di Arias $I_A = 0.781$ m/s, durata significativa dell'intensità di Arias $T_s = 4.245$ s). Per le analisi bidimensionali, le storie temporali delle accelerazioni orizzontale e verticale sono state scalate di un fattore pari a 1.8, in modo da ottenere uno spettro elastico compatibile con quello di progetto associato a un tempo di ritorno di 2475 anni, relativo a grandi dighe di nuova costruzione, in accordo con il D.M. 26/06/2014.

Le analisi di risposta sismica monodimensionali sono state eseguite nell'ipotesi che il *bedrock* sia dotato di rigidità finita, applicando alla base della colonna una storia temporale di tensioni tangenziali τ_{xy}

$$\tau_{xy}(t) = \rho v_s \cdot \int a(t) \quad (2)$$

in cui $\rho = 2.06$ Mg/m³ e $v_s = 1000$ m/s indicano rispettivamente la densità e la velocità di propagazione delle onde di taglio del *bedrock* e $\int a(t)$ è la velocità ottenuta dall'integrazione della storia temporale dell'accelerazione orizzontale.

La Figura 2 mostra il confronto tra i risultati delle analisi monodimensionali eseguite con FLAC e quelli ottenuti con il metodo lineare equivalente utilizzato in MARTA, unitamente al profilo di v_s adottato nelle analisi (Figura 2a). I valori della massima accelerazione orizzontale $a_{x,max}$ (Figura 2b) ottenuti con i due metodi sono simili nel *bedrock* e nel terreno di fondazione; all'interno del corpo diga i risultati delle analisi alle differenze finite presentano valori di $a_{x,max}$ minori, per effetto del maggiore smorzamento previsto dal legame isteretico. Tuttavia, confrontando gli spettri elastici di risposta valutati a diverse quote al di sopra del terreno alluvionale (Figura 2c), i due metodi di analisi mostrano mediamente un buon accordo, sebbene il metodo delle differenze finite fornisca una maggiore amplificazione delle alte frequenze, alle quali però non è associata un'aliquota significativa di energia del sisma. Successivamente, le analisi monodimensionali sono state ripetute applicando alla base della colonna anche la componente verticale del sisma, rappresentata da una storia temporale di

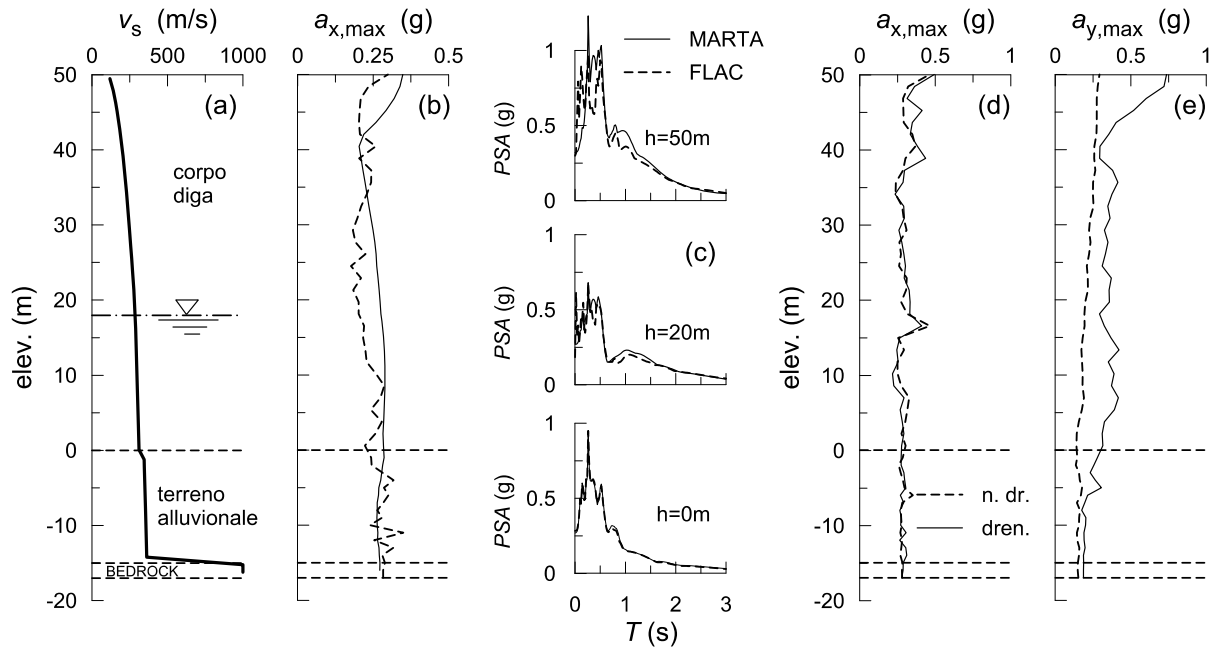


Fig 2. Analisi numerica di risposta sismica monodimensionale.

tensioni verticali σ_{yy} ottenuta applicando la relazione:

$$\sigma_{yy}(t) = \rho v_p \cdot \int a(t) \quad (3)$$

in cui v_p è la velocità di propagazione delle onde di compressione, pari a 1944 m/s. Le analisi sono state eseguite considerando entrambi le ipotesi di condizioni drenate e non drenate. Le Figure 2d-2e mostrano i profili delle massime accelerazioni orizzontali e verticali. I profili di $a_{x,max}$ presentano una modesta dipendenza dalle condizioni di drenaggio, viceversa, sensibili differenze si osservano per $a_{y,max}$. Nello specifico, in condizioni drenate il maggiore contrasto di impedenza dinamica tra il *bedrock* e il soprastante strato di alluvioni produce una significativa amplificazione della componente verticale del moto sismico.

3. Analisi bidimensionali

Il comportamento sismico della diga omogenea è stato studiato eseguendo analisi dinamiche nel dominio del tempo sul modello bidimensionale della Figura 1. La Figura 3 mostra il reticolo di calcolo alle differenze finite impiegato nelle analisi. Per i parametri meccanici dei terreni sono stati utilizzati i valori riportati nella Tabella 1. Nelle analisi è stato simulato il processo di costruzione e di invaso della diga fino a raggiungere l'altezza di massimo invaso, pari a 45m. Nelle fasi di calcolo statiche, gli spostamenti sono impediti alla base del reticolo in entrambe le direzioni e quelli lungo i contorni laterali in direzione orizzontale. Lo studio è svolto in termini di tensioni efficaci, assumendo condizioni drenate, nell'ipotesi di piccole deformazioni. Al termine di ogni fase di calcolo la rigidità dei terreni viene aggiornata in funzione del nuovo stato tensionale efficace.

Al termine delle fasi di costruzione e invaso, il modello numerico così inizializzato è stato impiegato per eseguire una serie di analisi pseudo-statiche condotte iterativamente incrementando progressivamente la componente orizzontale delle forze di massa $k_h \gamma / g$, fino al valore critico del coefficiente sismico (k_c) in corrispondenza del quale il sistema accumula spostamenti senza che l'algoritmo di calcolo giunga a convergenza, a seguito dell'attivazione di un meccanismo plastico. Il coefficiente sismico critico fornisce, quindi, una stima della resistenza sismica globale del sistema. Le analisi pseudo-statiche sono state ripetute per entrambi i versi della componente orizzontale, mantenendo costante quella verticale. Il minimo valore del coefficiente sismico critico, $k_c = 0.212$, si ottiene quando l'accelerazione orizzontale è rivolta verso il paramento di monte.

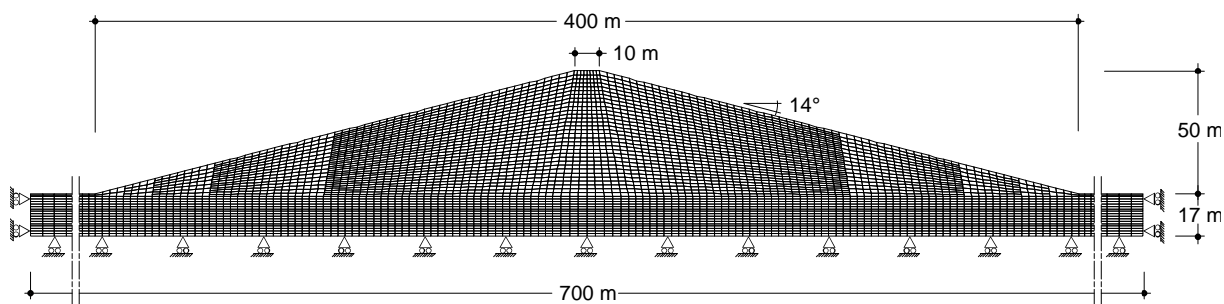


Fig 3. Griglia di calcolo per le analisi numeriche bidimensionali e condizioni al contorno per le fasi statiche.

La Figura 4 mostra la griglia di calcolo deformata a seguito dell'attivazione del meccanismo plastico. Quest'ultimo interessa tutto il paramento di monte, si chiude al piede della diga ed è compatibile con un cinematisma rotazionale. I meccanismi deformativi individuati con le analisi pseudo-statiche forniscono una prima valutazione del comportamento della diga in presenza di intense azioni sismiche, sebbene questo approccio trascuri gli effetti dell'asincronia e della propagazione del moto sismico all'interno del corpo della diga.

La fase di calcolo dinamico viene inizializzata al termine del processo di costruzione e di invaso della diga rimuovendo i vincoli imposti sui contorni del reticolo e assegnando opportune condizioni sui contorni verticali e orizzontali. Nello specifico, sono stati utilizzati i contorni viscosi di tipo "quiet" secondo la formulazione proposta da Lysmer & Kuhlemeyer (1969), in grado di assorbire le onde che si propagano verso i lati del dominio. Inoltre, il modulo di taglio dei terreni viene posto pari al modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 .

Le analisi sono state eseguite per entrambe le ipotesi di *bedrock* deformabile e *bedrock* infinitamente rigido. Nel primo caso, ai nodi della base del reticolo viene applicata una storia temporale dell'accelerazione in direzione orizzontale e in direzione verticale; nel secondo, si applicano due storie temporali di tensioni ottenute mediante le eq. 2 e 3.

La Tabella 2 riporta le analisi eseguite: esse si differenziano per l'ipotesi sulla deformabilità del *bedrock* e per la presenza della componente verticale del moto sismico. Nei casi A, B, C, D le analisi sono state eseguite assumendo condizioni non drenate; nel caso E, l'analisi è stata ripetuta assumendo condizioni drenate. La Figura 5a mostra i profili dei massimi valori della componente orizzontale dell'accelerazione a_x in corrispondenza dell'asse della diga. I valori di $a_{x,max}$ si mantengono mediamente costanti nel terreno di fondazione mentre una modesta deamplificazione si verifica nei primi due terzi del corpo diga. Nel terzo superiore, invece, $a_{x,max}$ aumenta fino a valori pari a circa due volte quelli che si verificano alla base della diga, a causa degli effetti di focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta. I valori minori di $a_{x,max}$ si osservano nel caso B, per effetto della deformabilità del *bedrock* e della mancanza della componente verticale dell'azione sismica. L'ipotesi di *bedrock* infinitamente rigido (caso A) e di *bedrock* deformabile con applicazione della componente verticale del sisma (caso D) comportano un incremento di $a_{x,max}$ pari a circa l'80% in cresta alla diga. Non sorprende, quindi, che per il caso C (*bedrock* infinitamente rigido e applicazione della componente verticale del sisma) si ottengano accelerazioni sensibilmente più elevate rispetto agli altri casi, sia nel corpo diga che nei terreni di fondazione.

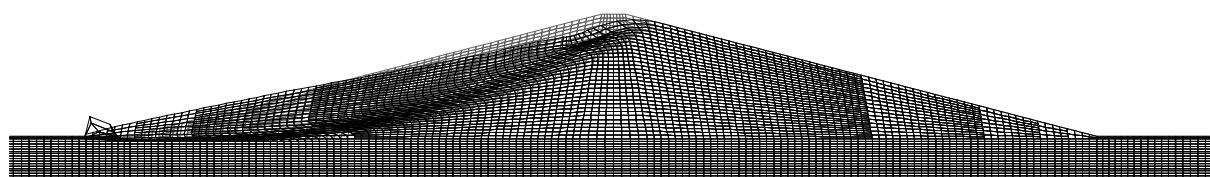


Fig 4. Analisi numeriche pseudo-statiche iterative, griglia di calcolo deformata per $k_h = k_c = -0.212$.

Tabella 2. Analisi dinamiche bidimensionali eseguite e valori massimi degli spostamenti nel corpo diga

ID Analisi	cond.	comp. ver.	bedrock	u_{\max} (m)	w_{\max} (m)
caso A	non drenate	no	rigido	-0.42	-0.40
caso B	non drenate	no	def.	-0.18	-0.16
caso C	non drenate	si	rigido	-0.62	-0.56
caso D	non drenate	si	def.	+0.22	-0.22
caso E	drenate	no	rigido	-0.34	-0.15

Gli stessi effetti di amplificazione sono molto più evidenti per la componente verticale dell'accelerazione $a_{y,\max}$ (Figura 5b), poiché, in condizioni non drenate, la bassa deformabilità volumetrica dell'acqua determina una risposta del sistema più rigida per sollecitazioni di compressione. Viceversa, in condizioni drenate, (caso E), a_y è minore rispetto al caso B mentre per $a_{x,\max}$ si ottengono differenze modeste. È bene osservare che i valori delle accelerazioni, sebbene sensibilmente elevati, vengono raggiunti solo istantaneamente e sono generalmente associati alla presenza di alte frequenze.

Le Figure 5c-5d mostrano i profili degli spostamenti orizzontali, u , e verticali, w , rispetto alla base della diga, calcolati in asse al termine dell'evento sismico; la Tabella 3 ne riporta i valori massimi. Il segno negativo indica spostamenti orizzontali in direzione del paramento di monte e spostamenti verticali verso il basso (cedimenti). In accordo con i profili delle accelerazioni, gli spostamenti maggiori si ottengono per la condizione di bedrock infinitamente rigido e in presenza di entrambi le componenti del moto sismico (caso C): $u_{\max} = -0.42$ m e $w_{\max} = -0.56$ m. Se il bedrock è dotato di rigidità finita (caso D) gli spostamenti orizzontali e verticali si riducono di circa il 60%. Una riduzione simile si osserva anche nel caso di presenza della sola componente orizzontale (casi A e B). In accordo con i risultati dell'analisi pseudo-statica, gli spostamenti massimi si verificano nel paramento di monte, ad eccezione del caso C. I gradienti di spostamento più elevati si sviluppano nel terzo superiore del corpo diga. Inoltre, i profili della componente orizzontale sono compatibili con quelli tipici del primo modo di vibrare di una trave elastica lineare disomogenea deformabile a taglio.

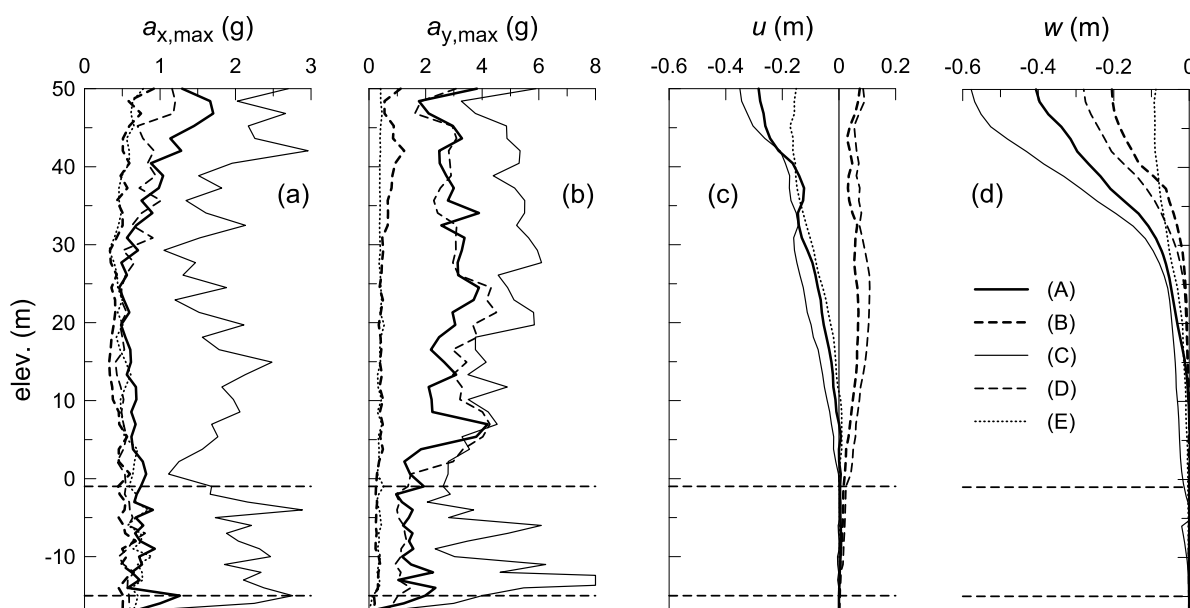


Fig 5. Analisi numeriche dinamiche bidimensionali. Profili delle massime accelerazioni e degli spostamenti al termine del sisma in asse alla diga.

4. Conclusioni

La presenza in Italia di grandi dighe in terra di importanza strategica, molte delle quali progettate e costruite in assenza di una normativa sismica, rende necessaria una migliore comprensione del loro comportamento in presenza di azioni sismiche molto intense. A partire dai dati di una diga omogenea reale ben documentata si è definito un modello numerico alle differenze finite e si è studiato il comportamento dello sbarramento sottoposto ad un'azione sismica compatibile con lo spettro elastico definito dal D.M. 26/06/2014, per un tempo di ritorno di 2475 anni. I risultati hanno mostrato che la presenza della componente verticale dell'azione sismica produce incrementi significativi delle accelerazioni orizzontali, con accelerazioni massime di 2÷3 volte maggiori. Tale effetto viene mitigato se si considera la deformabilità del bedrock. Tuttavia i valori elevati delle accelerazioni sono raggiunti solo istantaneamente e sono associati a bassi contenuti energetici del sisma. La resistenza del terreno viene quindi mobilitata solo temporaneamente, e il massimo cedimento al termine dell'evento sismico (0.56 cm) si mantiene al di sotto del franco disponibile (2.6 m), confermando il buon comportamento dell'opera anche in presenza di azioni sismiche molto severe.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito della ricerca finanziata dal Dipartimento della Protezione Civile, per il tramite del consorzio ReLUIS 2014-2015 su: *Accordo quadro in materia di Vulnerabilità e Rischio Sismico - Working Package 2 – Dighe in terra*, coordinata dal prof. Sebastiano Rampello.

Bibliografia

- Amorosi, A., Elia, G. (2008). "Analisi dinamica accoppiata della diga Marana Capacciotti". *Rivista Italiana di Geotecnica*, Patron editore, Bologna, 52 (4): 78-95.
- Calabresi G., Rampello S., Sciotti A., Amorosi A. (2000). "Diga sulla Marana Capacciotti: verifica delle condizioni di stabilità e analisi del comportamento in condizioni sismiche". Rapporto di Ricerca Università degli Studi di Roma La Sapienza, Dip. di Ingegneria Strutturale e Geotecnica. A cura e per conto del Consorzio per la Bonifica della Capitanata. Bastogi Editrice, Foggia.
- Callisto L. (2015). "MARTA v. 1.1: a computer program for the site response analysis of a layered soil deposit". <https://sites.google.com/a/uniroma1.it/luigicallisto/attivita-1>.
- Cascone E., Rampello S. (2003). "Decoupled seismic analysis of an earth dam". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23 (5): 349-365.
- Elia G., Amorosi A., Chan A.H.C., Kavvas M.J. (2010). "Fully coupled dynamic analysis of an earth dam". *Géotechnique*, 61(7): 549-563.
- Ishibashi, I., Zhang, X. (1993). "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay". *Soils and Foundations*, 33(1): 182-191.
- Itasca (2005). "FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua v. 5.0". User's Manual. Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group.
- Lysmer J., Kuhlemeyer R. L. (1969). "Finite Dynamic Model for Infinite Media," *J. Eng. Mech.*, 95(4): 859-877.
- Masing G. (1926). "Eigenspannungen und Verfertigung bim Messing". Proceedings 2nd Int. Congress on Applied Mechanics, pp. 322-355. Zurich-Leipzig: Füssli (in German).
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. "D.M. 26/06/2014, Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)" *Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana*, 156.
- Rampello S., Cascone E., Grosso N. (2009). "Evaluation of the seismic response of a homogeneous earth dam". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (5): 782-798.
- Seed H. B., Idriss, I. M. (1979). "Soil moduli and damping factors for dynamic analysis". Report No. EERC 70-10, Berkeley, CA, USA: University of California.