

SULLA SICUREZZA DELLE DIGHE TIPO CFRD IN CONDIZIONI SISMICHE

Emanuele Catalano (emanuele.catalano@lombardi.group)
Lombardi Engineering Ltd.

Riccardo Stucchi (riccardo.stucchi@lombardi.group)
Lombardi Engineering Ltd.

Remo Crapp (remo.crapp@lombardi.group)
Lombardi Engineering Ltd.

ABSTRACT. Nel testo vengono presentati i risultati ottenuti dall'analisi di stabilità di una diga in pietrame con manto in calcestruzzo (CFRD dall'inglese *Concrete Face Rockfill Dam*), in condizioni statiche e dinamiche. L'analisi è stata effettuata mediante modellazione numerica tridimensionale utilizzando un codice che implementa il metodo delle differenze finite (FLAC3D). La stabilità della diga è stata valutata durante le fasi di costruzione e riempimento dell'invaso (condizioni quasi-statiche). In condizioni dinamiche è stato valutato l'impatto di un sisma in termini di spostamenti permanenti indotti e tensioni nel manto di calcestruzzo. La nascita di forti tensioni di trazione su quest'ultimo ha permesso di riconoscere la presenza di un meccanismo indotto dai movimenti del corpo diga, le cui conseguenze mettono a serio rischio la stabilità dell'opera. La sicurezza in condizioni sismiche di altre dighe di questo tipo, già in opera, diventa confutabile sulla base dei risultati ottenuti.

1. INTRODUZIONE

Le dighe in pietrame con una copertura a monte in calcestruzzo (CFRD) sono molto diffuse (ICOLD 2010, Gazetas 1992). Come in altri campi di ingegneria civile, il dimensionamento di dighe di questo tipo si è basato per tanti anni principalmente sulle esperienze passate ottenute in progetti analoghi. Tale approccio può portare a gravi conseguenze, come testimoniano i casi di danneggiamento al manto di calcestruzzo che si sono verificati in anni recenti (Sobrinho et al., 2007; Pinto et al., 2007; Johannesson, 2007). Un'attenzione ancora maggiore va posta in caso di dimensionamento per azioni sismiche, nei confronti delle quali l'esperienza sul comportamento di dighe CFRD è molto limitata. Oggi, fortunatamente, gli strumenti numerici forniscono dei validi strumenti per valutare scenari complessi di interazione tra i diversi materiali messi in opera, di difficile interpretazione con metodi analitici. In questo studio, l'analisi mediante modellazione numerica ha permesso di portare alla luce un meccanismo di interazione tra il manto in calcestruzzo e il corpo diga in presenza di terremoto, pericoloso per la stabilità dell'opera nel suo insieme.

2. ANALISI DI STABILITÀ IN CONDIZIONI QUASI-STATICHE

Per la simulazione del comportamento dei materiali in condizioni quasi-statiche (costruzione della diga e riempimento dell'invaso) è stato adottato un modello costitutivo elastico perfettamente plastico, con criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb e modulo di rigidità variabile in funzione della pressione di confinamento. La Figura 1 offre una vista del modello 3D nel suo insieme e di una sezione 2D della diga (H=140 m, pendenza dei paramenti 1H:1.5V). La fondazione è costituita da una roccia di ottima qualità.

La simulazione della costruzione della diga è effettuata in 7 fasi. Gli assestamenti del corpo diga al termine di tale fase sono mostrati in Figura 2. Per simulare il riempimento dell'invaso, esso è fatto salire gradualmente in 10 fasi. Gli spostamenti indotti sono osservabili in Figura 2. I valori di questi spostamenti permettono la definizione di valori di soglia da monitorare durante la costruzione dell'opera e il primo riempimento dell'invaso, al fine di poter confermare o meno la corretta valutazione dei moduli di rigidità.

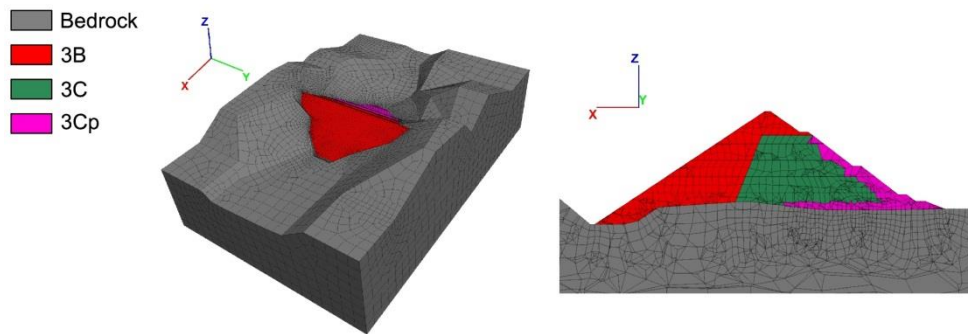


Figura 1. Modello 3D del corpo diga e della roccia di fondazione.

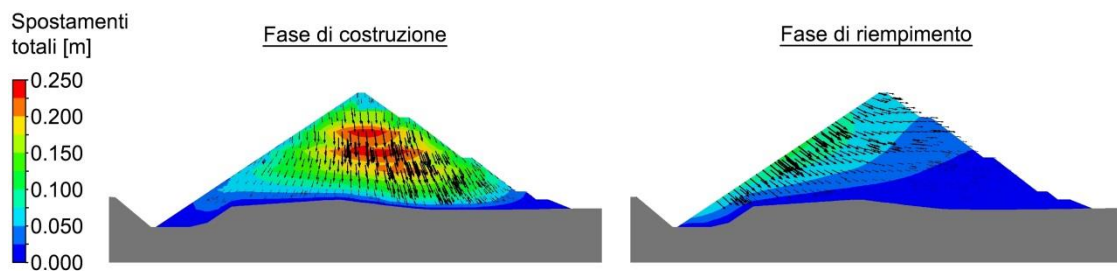


Figura 2. Spostamenti per la fase di costruzione (sinistra) e per la fase di riempimento dell'invaso (destra).

3. ANALISI DI STABILITÀ IN CASO DI TERREMOTO

Per l'analisi di stabilità della diga in condizioni dinamiche, al modello costitutivo descritto nel paragrafo precedente viene associato un modello di smorzamento isteretico calibrato sulla base della curva di decadimento del modulo di rigidità al taglio in funzione della deformazione di taglio che caratterizza il comportamento dei materiali del corpo diga sottoposti a sollecitazione ciclica.

L'analisi di stabilità è del tipo *time-history*, effettuata considerando accelerogrammi reali per un terremoto di tipo MCE (*Maximum Credible Earthquake*, $PGA = 0.51g$, durata 110 sec, intensità di Arias 12 m/s) e per un terremoto di tipo OBE (*Operational Basis Earthquake*, $PGA = 0.344g$, durata 110 sec, intensità di Arias 5.5 m/s).

Gli spostamenti permanenti al termine della sollecitazione sismica sono osservabili in Figura 3. L'assestamento verticale della cresta permette di escludere il rischio di tracimazione. Ciò conferma la buona capacità di questo tipo di opere di sopportare eventi sismici di notevole intensità, per quanto riguarda la parte massiva in pietra.

Le sollecitazioni nel manto, valutate nel senso della pendenza, sono mostrate in Figura 4. È osservabile come si generino delle forti sollecitazioni di trazione nel manto, dell'ordine delle decine di MPa, assolutamente incompatibili con la sicurezza nei confronti della fessurazione e della conseguente infiltrazione di acqua nel corpo diga. Le ragioni della presenza di questi sforzi di trazione sono presentate nel paragrafo seguente.

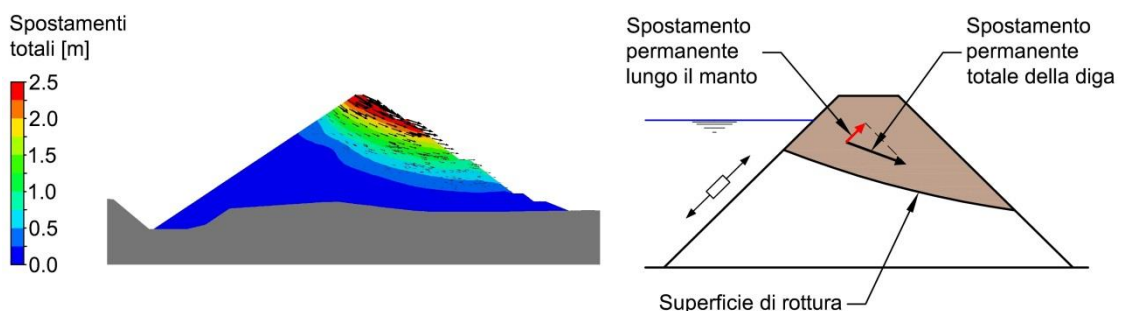


Figura 3. Spostamenti permanenti del corpo diga al termine della sollecitazione sismica.

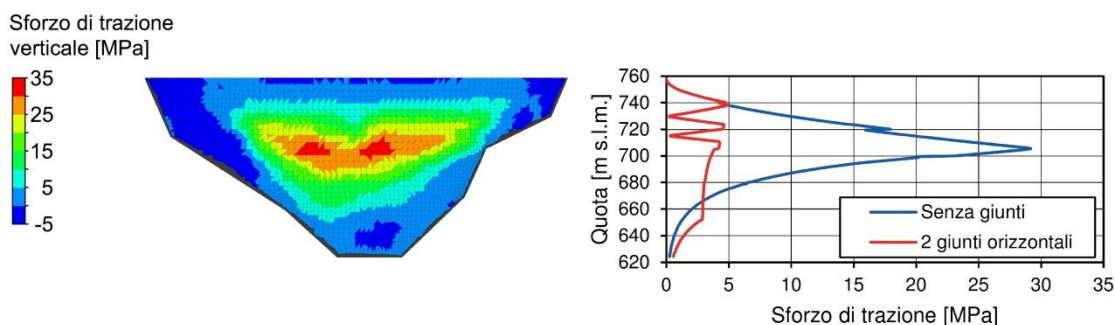


Figura 4. Sforzi di trazione nel manto di calcestruzzo in direzione verticale.

3.1 Lo sforzo di trazione sul manto di cls

Come è mostrato in Figura 3, gli spostamenti permanenti del corpo diga durante l'evento sismico si concentrano nella parte alta della diga. Per la condizione di carico con invaso pieno, tali spostamenti sono diretti verso valle e verso il basso. Dato che la componente dello spostamento lungo il manto è diretta verso l'alto (cf. Figura 3) e progressivamente aumenta dalla base verso il coronamento della diga, il manto viene allungato e risulta soggetto a sforzi di trazione in direzione verticale.

Se il manto fosse teoricamente incollato al corpo diga, si svilupperebbero delle trazioni ancora superiori a quelle mostrate in Figura 4, per via della grande differenza di rigidità tra i due materiali. In realtà, essendo lo sforzo di taglio tra manto e pietrame limitato dall'attrito, il manto scivola rispetto al corpo diga. Ciononostante l'entità degli sforzi di taglio e soprattutto la lunghezza lungo la quale essi si sviluppano (L , dell'ordine delle decine di metri) è tale da generare degli elevati sforzi di trazione (σ_t), stimabili con la seguente equazione:

$$\sigma_t = \frac{0.5 \cdot \gamma_w \cdot L^2 \cdot \sin \alpha \cdot \tan \varphi}{s} \quad (1)$$

Dove γ_w è il peso di volume dell'acqua, α è la pendenza del paramento di monte misurata dall'orizzontale, φ è l'angolo di attrito tra manto e pietrame e s è lo spessore del manto (Figura 5). È importante notare come il meccanismo di generazione degli sforzi di trazione del manto può attivarsi anche per modesti spostamenti permanenti del corpo diga, dell'ordine delle decine di cm.

L'introduzione di giunti orizzontali, associata a un corretto dimensionamento dell'armatura per il controllo della fessurazione è una possibile soluzione progettuale. In corrispondenza dei giunti, infatti, lo sforzo di trazione è nullo e la lunghezza lungo cui possono svilupparsi gli sforzi di taglio (L nell'equazione (1)) viene limitata alla metà della distanza fra i giunti. Il dimensionamento del manto è stato effettuato con un modello numerico 1D disaccoppiato dal modello 3D. La Figura 4 mostra il profilo di sforzi di trazione calcolato in presenza di due giunti orizzontali (per la loro ubicazione si veda la Figura 6). Per il caso di sisma MCE, la riduzione degli sforzi è netta (cf. Figura 4) e la trazione nel manto può essere ripresa dall'armatura ($A_s/A_c = 1\%$) limitando l'apertura delle fessure a 3 mm. I giunti devono essere dimensionati per consentire un'apertura di 200 mm garantendo l'impermeabilità.

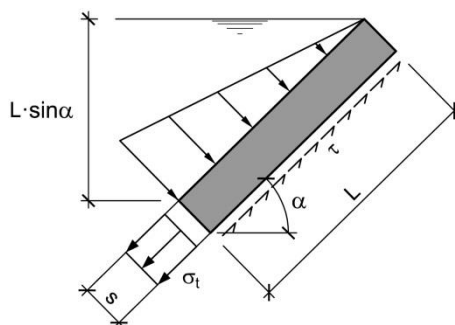


Figura 5. Schema di comportamento del manto.

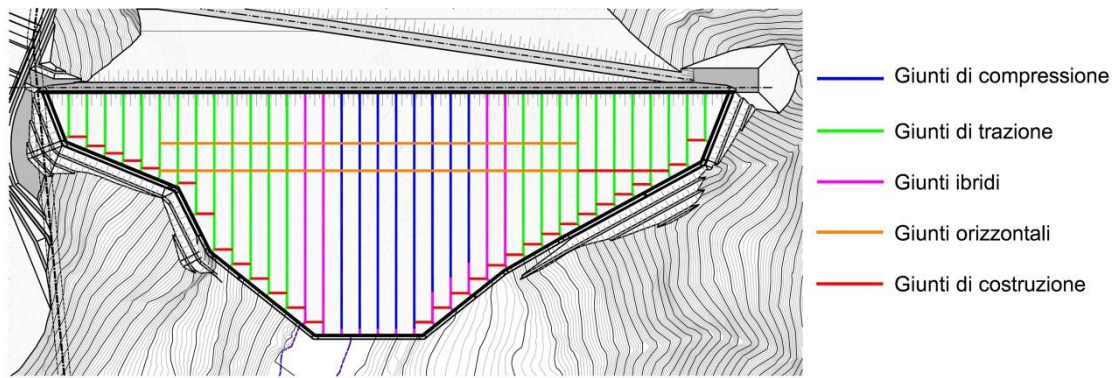


Figura 6. Disposizione dei giunti nel paramento di monte.

4. CONCLUSIONI

Sulla base dei calcoli e delle osservazioni effettuate, il rischio della nascita di alti sforzi di trazione nel manto di calcestruzzo di una diga di tipo CFRD durante un terremoto può essere tutt'altro che escluso. Al contrario, l'analisi delle condizioni che determinano tale scenario portano a concludere che è altamente probabile che una diga di questo tipo sia interessata da problemi di questo genere, anche per modesti spostamenti permanenti del corpo diga. Nonostante l'osservazione di questo fenomeno non sia affatto nuova (Uddin 1995, Arici 2011, Zhang et al. 2017), la normativa di riferimento non ne fa cenno (ICOLD 2010), né, ad opinione degli autori, si riscontra sufficiente sensibilità verso i rischi connessi a questo fenomeno tra gli addetti ai lavori. In questo studio, la realizzazione di giunti orizzontali che interrompono la continuità del manto di calcestruzzo nel senso della pendenza, si è rivelata, sulla base dei risultati ottenuti, una soluzione progettuale efficace.

5. BIBLIOGRAFIA

- Concrete Face Rockfill Dams (2010): Concepts for design and construction, *CIGB ICOLD, Bulletin* 141.
- Gazetas G., Dakoulas P. (1992), Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art, *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 11, 27-61.
- Uddin N., Gazetas G. (1995), Dynamic response of concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121, 185-197.
- Arici Y. (2011), Investigation of the cracking of CFRD face plates, *Computers and Geotechnics*, 38, 905-916.
- Zhang Y., Kong X., Zou D., Xu B. (2017), Tensile Stress Responses of CFRD Face Slabs during Earthquake Excitation and Mitigation Measures, *Int. J. Geomech.* 17(12).
- Sobrinho J.A., Xavier L.V., Albertoni C., Correa C. and Fernandes R. (2007), Performance and concrete repair at Campos Novos, *Hydropower and dams*, 2.
- Pinto N.L.S. (2007), A Challenge of very high CFRD dams: Very high concrete face compressive stresses, *5th International Conference on Dam Engineering*, Lisbon, Portugal.
- Johannesson P. (2007), Lesson learned from Mohale, *Water Power and Dam Construction*.