

UN APPROCCIO INTEGRATO PER LA VALUTAZIONE PRESTAZIONALE DELLA STABILITÀ DELLE SPALLE DI DIGHE AD ARCO

Edoardo Lusini

Università di Bologna
edoardo.lusini@unibo.it

Luca Verrucci

Sapienza Università di Roma
luca.verrucci@uniroma1.it

Daniela Boldini

Sapienza Università di Roma
daniela.boldini@uniroma1.it

Sommario

La nota presenta un metodo per valutare le prestazioni sismiche di cunei in roccia alle spalle di una diga ad arco, secondo un approccio agli spostamenti di tipo Newmark opportunamente modificato per includere le forze trasmesse dalla diga e tutti i possibili cinematismi tridimensionali del cuneo all'interno della nicchia di distacco. Nell'ipotesi di blocco rigido e assenza di rotazioni, il metodo è in grado di tenere conto delle tre componenti dell'input sismico, il progressivo distacco del blocco dai piani di appoggio del giunto, l'eventuale recupero del contatto e anche il temporaneo distacco completo del blocco attraverso una fase di volo libero. Oltre alle azioni inerziali gravitazionali e sismiche, sono incluse nell'analisi le forze statiche e dinamiche esercitate al contatto diga-cuneo, comprese quelle relative all'interazione inerziale con l'invaso. Il metodo viene applicato per la verifica sismica della diga ad arco-gravità di Ridracoli (Italia), fondata su una formazione rocciosa fittamente stratificata di origine turbiditica. In particolare, la spalla destra viene verificata rispetto alla formazione di cunei adagiati su piani di strato con caratteristiche di resistenza particolarmente scadenti.

1. Introduzione

Una delle fasi più importanti dell'analisi di risposta sismica di una diga ad arco dal punto di vista geotecnico consiste nella valutazione della stabilità dei cunei di roccia presenti a livello delle spalle. Un approccio agli spostamenti per l'analisi sismica dei cunei in roccia che interagiscono con le dighe ad arco è particolarmente appropriato se si considera che anche spostamenti limitati delle spalle durante i terremoti possono indurre grandi incrementi di sollecitazione, fino a gravi danni strutturali del corpo diga (Pan & Wang 2019). Un aspetto particolare, che distingue questo caso da una generica analisi di stabilità dei cunei rocciosi, consiste nel tenere correttamente conto dell'interazione struttura-fondazione per ottenere una buona approssimazione delle forze trasmesse al cuneo durante il terremoto.

Londe (1969) ha proposto un primo metodo per l'analisi di stabilità delle spalle di una diga applicando un approccio all'equilibrio limite tridimensionale, arricchito con indicazioni specifiche su come definire la geometria dei cunei e le forze statiche agenti su di essi (ed eventualmente l'azione sismica attraverso forze pseudo-statiche equivalenti). Miglioramenti al metodo sono stati successivamente proposti da Goodman & Powell (2003), abbinandovi la teoria dei blocchi per l'individuazione sistematica dei cunei removibili.

Un approccio alternativo, prestazionale, per studiare il comportamento sismico dei pendii in roccia consiste

nell'estensione del metodo di Newmark (1965) per blocchi rigidi planari, adattato per tenere conto della natura tridimensionale del problema (Verrucci et al. 2018). Il metodo considera tutte e tre le componenti di accelerazione del moto sismico, applicate in modo indipendente alla massa rocciosa. Durante l'evento sismico si possono seguire possibili cambiamenti nella cinematica del moto: lo scorrimento su una o due discontinuità planari, il distacco completo e il successivo recupero dei contatti.

La principale difficoltà nell'applicare l'approccio di Newmark ai cunei che interagiscono con una diga risiede nella necessità di includere gli effetti dell'interazione diga-cuneo, a causa della grande variabilità delle forze trasmesse durante il sisma. Con la crescente capacità dei modelli numerici di gestire interazioni complesse, il metodo agli elementi finiti è stato applicato allo studio della stabilità dei cunei delle spalle delle dighe ad arco in condizioni sismiche (Mills-Bria et al. 2008). Recentemente sono stati condotti svariati tentativi di adattare un metodo di Newmark 3D allo studio della stabilità delle spalle di dighe ad arco, combinandolo con analisi agli elementi finiti per la definizione delle spinte (Mirazbozorg et al. 2015; Mostafaei et al. 2017; Mostafai & Behnamfar 2022).

Il metodo qui presentato mira a definire il moto tridimensionale del cuneo nel contesto di un approccio alla Newmark, tenendo conto dell'interazione cuneo-diga a diversi livelli di complessità. Si appoggia sul lavoro di Verrucci et al. (2018) per l'integrazione delle equazioni del moto e confronta tre diverse modalità per definire le forze trasmesse dalla diga ai cunei: statico analitico, numerico e misto.

Viene dapprima fornita una breve introduzione all'approccio 3D Newmark modificato per il caso di dighe ad arco (Sezione 2). Successivamente (Sezione 3) viene descritta l'applicazione del metodo al caso della diga ad arco-gravità di Ridracoli, nell'ambito di una rivalutazione complessiva della sua sicurezza a seguito di una revisione della classificazione sismica dell'area e dell'introduzione di requisiti normativi più severi. Nella Sezione 4 si riassumono, infine, le principali risultanze.

2. Sintesi del metodo

Questa sezione si concentra sull'estensione del noto metodo agli spostamenti di Newmark (1965) all'analisi di cunei rocciosi 3D, seguendo l'approccio di Verrucci et al. (2018). Fornisce inoltre indicazioni per l'applicazione del metodo ai cunei posizionati alle spalle di una diga ad arco.

Il cuneo di roccia è assunto rigido e inizialmente in contatto con l'ammasso roccioso attraverso tre discontinuità planari che formano una nicchia (Figura 1a). Per il caso specifico delle dighe si seguono le indicazioni di Londe (1973) e della FERC (2018) per la definizione delle tre discontinuità (Figure 1b, c, d). Si parte dai giunti strutturali preesistenti nell'ammasso roccioso (in verde) a cui può essere aggiunta una terza discontinuità subverticale che costituisce l'ideale prolungamento all'interno dell'ammasso del paramento di monte della diga (in rosso). Questa ulteriore discontinuità è introdotta come piano di rilascio e quindi esiste a patto che gli sforzi normali al piano siano di trazione.

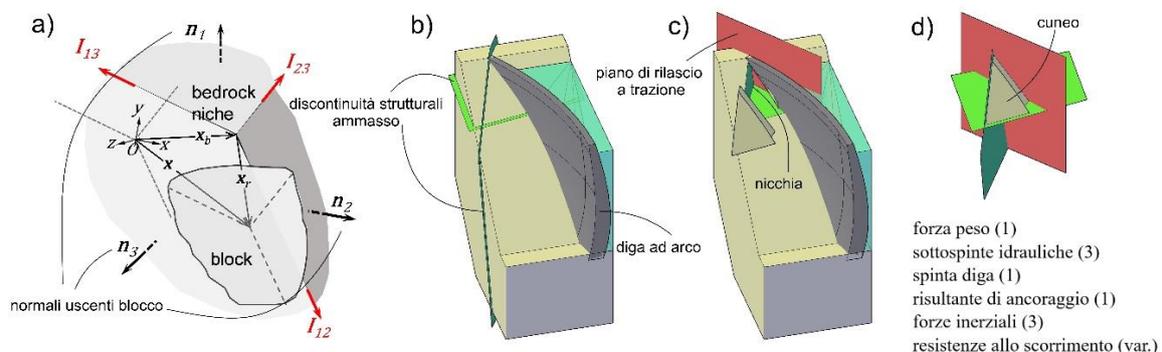


Fig 1. a) Schema di blocco rigido nella nicchia di distacco costituita da tre piani; b) discontinuità strutturali ammasso; c) cuneo traslato che scopre la nicchia di distacco con piano di rilascio a tergo; d) cuneo con sintesi delle forze agenti

Le possibili azioni non inerziali includono il peso proprio, le reazioni normali e tangenziali lungo le superfici di contatto e le forze esterne (sottospinte idrauliche, forze di ancoraggio, spinte trasmesse da strutture

interagenti). La forza inerziale, proporzionale alle componenti del moto sismico, è considerata come un'ulteriore azione che agisce sul cuneo e concorre al calcolo dell'equilibrio dinamico istante per istante. Il movimento relativo del cuneo rispetto alla massa rocciosa si verifica quando viene superata la resistenza al taglio sui piani di contatto; si trascura la resistenza per trazione. È ammesso solo un moto traslazionale, mentre le rotazioni sono trascurate. Quando il moto relativo cessa, il cuneo torna a essere bloccato all'ammasso roccioso nella nuova posizione, finché la resistenza al taglio viene nuovamente superata.

Oltre alle forze “esterne”, i dati di input includono gli accelerogrammi nelle tre direzioni, la massa del cuneo, l'orientamento dei piani che formano la nicchia, i lati dei semispazi occupati dal blocco e la resistenza al taglio di ciascun piano secondo un criterio di Mohr-Coulomb. Se si considera un contributo coesivo, sono necessarie anche le aree superficiali dei piani di contatto.

Dopo un calcolo iniziale delle entità vettoriali che descrivono la condizione geometrica, il metodo viene implementato attraverso un'integrazione esplicita alle differenze finite nel dominio del tempo. Per ogni passo temporale si considerano le seguenti fasi: (a) identificazione della configurazione attuale dei vincoli (contatti attivi sui piani di discontinuità); (b) calcolo della forza risultante (cioè la risultante delle forze esterne statiche e dinamiche effettive, oltre alla forza gravitazionale e alla forza inerziale); (c) identificazione del meccanismo attuale tra scorrimento su uno o due piani, distacco completo e impossibilità di movimento relativo; (d) calcolo dell'accelerazione relativa ed (e) integrazione della velocità e dello spostamento relativi.

Il recupero di un contatto piano precedentemente perso viene trattato attraverso un'ipotesi semplificata rispetto al fenomeno dell'impatto: le componenti di velocità normale e tangenziale sono rispettivamente annullate e conservate. In una logica di coefficienti di restituzione, ciò corrisponde a considerare un coefficiente normale K_N uguale a 0 e quello tangenziale K_T uguale a 1.

Fra le forze “esterne” un'attenzione particolare merita la definizione delle sollecitazioni trasmessa dalla diga. La variabilità di questa forza nel tempo a causa degli effetti inerziali di diga e vaso e dell'interazione con il substrato rende necessaria una valutazione approfondita. All'interno di questo studio la spinta sul cuneo trasmessa dalla diga è stata definita secondo tre approcci:

- i. una forza esterna statica calcolata tramite un approccio analitico elastico; fra i possibili metodi, si ricordano il Trial Load Method (Howell & Jaquith, 1929) e il metodo di Tolke & Ludin (1938);
- ii. un approccio numerico agli elementi finiti (FE), comprensivo di un'analisi statica elastica preliminare di un modello completo con la diga e la fondazione in roccia, seguita da un'analisi dinamica *fixed-base* della sola struttura della diga con gli effetti inerziali dell'acqua invasata modellati attraverso il metodo delle masse aggiunte;
- iii. un approccio ibrido che combina la soluzione statica analitica e i risultati del modello FEM dinamico in termini di forze di contatto, per sovrapposizione degli effetti.

3. Applicazione al caso studio di Ridracoli

Il metodo agli spostamenti descritto nella sezione precedente viene qui applicato al caso della spalla destra della diga di Ridracoli (Figura 2).

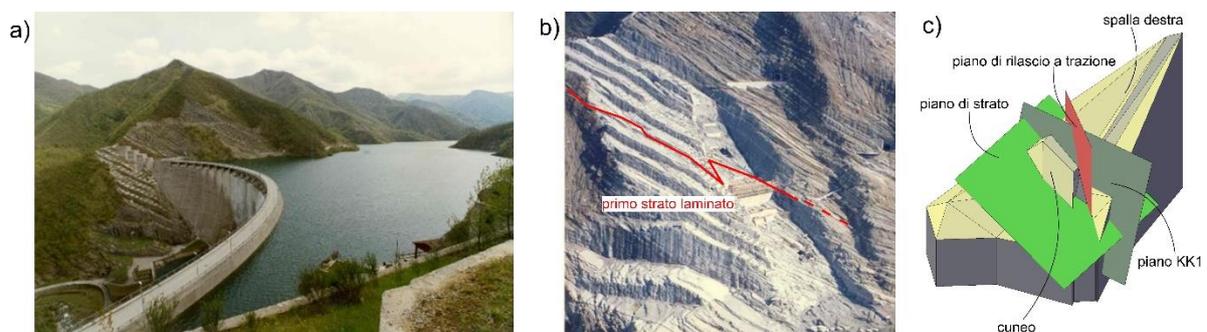


Fig 2. a) diga di Ridracoli; b) spalla destra durante i lavori di costruzione; c) schema di spalla destra con cuneo

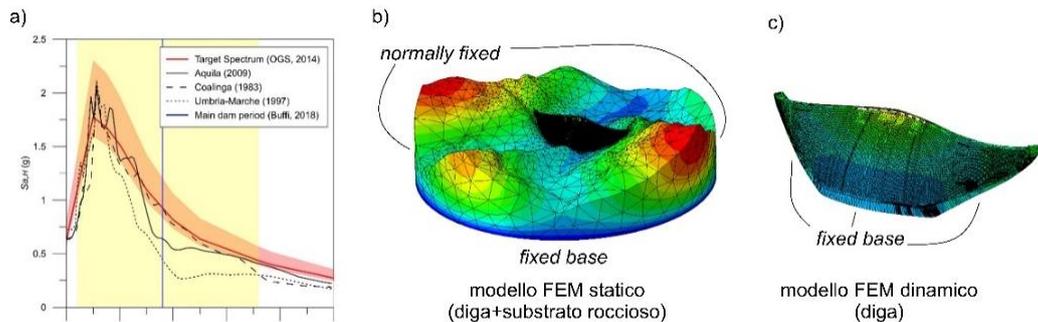
La diga è una struttura ad arco gravità poggiante su un pulvino di fondazione che sbarrava un'ampia valle appenninica generando un invaso di 33 Mm³ (Fig. 2a). La sua costruzione è stata completata a cavallo degli anni '70 e '80 del secolo scorso.

La spalla destra (Fig. 2b) presenta sistemi di fratture e piani di stratificazione che possono generare cunei instabili. È inoltre interamente interessata da un esteso sistema di tiranti di ancoraggio.

L'ammasso roccioso su cui si fonda la diga appartiene alla formazione turbiditica detta Marnoso-Arenacea Romagnola, caratterizzata da una fitta alternanza di strati pelitici e arenacei. Taluni contatti stratigrafici, testati tramite prove di taglio diretto in sito, hanno mostrato valori dell'angolo di attrito non superiori a 13°. Si è scelto di impostare i cunei potenzialmente instabili su questi contatti stratigrafici particolari, definiti d'ora in avanti strati laminati; ne sono stati individuati tre affioranti in spalla destra. Relativamente alle resistenze lungo le discontinuità di strato sono state adottate le seguenti ipotesi, mutuata dal progetto esecutivo (Bavestrello 1983): coesione nulla su tutti i piani e angoli di attrito pari a 13° lungo il contatto stratigrafico (in verde chiaro) e 36° lungo il giunto di fratturazione subverticale (in verde scuro).

Le storie temporali di accelerazione (in tre direzioni ortogonali) utilizzate per analizzare il comportamento dinamico dei cunei sono state selezionate da *database* internazionali nel rispetto della spettrocompatibilità in un ampio intervallo di periodi nell'intorno del periodo fondamentale T_1 della struttura, limitato superiormente sulla base delle indicazioni fornite da Chopra (2020) per l'analisi delle dighe, ma esteso anche ai bassi periodi tipici dei pendii ($0.04s < T < 2.5 T_1$). La scelta è ricaduta su tre sismi: due italiani (Aquila e Umbria-Marche) e uno americano (Coalinga), che si scostavano superiormente dallo spettro di riferimento orizzontale atteso al sito per meno del 30% (Fig. 3a). Inferiormente si richiedeva che almeno uno spettro fosse compreso per ogni periodo in una forbice del 10%. Il fattore di scala è stato mantenuto inferiore a 2 per tutti i sismi selezionati. Lo spettro orizzontale considerato è la composizione trigonometrica delle due componenti planimetriche Nord e Est. Analogamente si è valutata la spettrocompatibilità per la componente verticale, scalando indipendentemente rispetto alla componente orizzontale e rispettando condizioni meno stringenti per la banda di spettrocompatibilità (-20% ~ +30%). Considerando in questa sede uno solo dei cunei analizzati (Fig. 2c), ovvero quello poggiante sullo strato laminato che emerge più in alto nella spalla destra (primo strato laminato), le forze non inerziali agenti sul cuneo sono costituite da: forza peso, sottospinte idrauliche sulle discontinuità dell'ammasso che isolano il cuneo (calcolate idrostaticamente nelle condizioni più sfavorevoli), forze trasmesse dal sistema di tiranti di ancoraggio e spinte della diga. Queste ultime sono calcolate nei tre modi sintetizzati nella Sezione 2, in particolare:

- i. il metodo analitico implementato è quello di Swaminathan (1956), derivato dal metodo di Tolke & Ludin (1938) introducendo la deformabilità delle imposte, i risultati in termini di forze risultanti erano deducibili dalle tabelle del Progetto Esecutivo della diga;
- ii. il modello numerico agli elementi finiti (Figure 3b e c) è stato sviluppato su Abaqus® a partire da un modello preesistente (Buffi, 2020); l'analisi statica è stata svolta in campo elastico considerando sia la struttura sia il substrato roccioso per un'estensione considerevole (modello cilindrico con raggio $R = 5 H$, dove H è l'altezza della diga), con le diverse *instances* solidarizzate con vincoli di tipo *tie*; le 3 analisi dinamiche sono state svolte sempre in campo elastico sul solo corpo diga applicando vincoli fissi alla base (*fixed base*) e aggiungendo a ciascun nodo del paramento di monte della diga (al di sotto della quota di massimo invaso) una "massa puntuale" a cui sono associati un sistema di riferimento specifico e una matrice delle masse diagonale in modo da simulare pressioni idrodinamiche sempre normali al paramento (il calcolo delle masse aggiunte è stato svolto su Matlab® e poi introdotto nell'*input file* di Abaqus®); le due soluzioni, statica e dinamica, ottenute come somma vettoriale delle forze nodali di contatto (analisi statica) e delle reazioni vincolari (analisi dinamiche) limitatamente alla porzione della base di appoggio appartenente al cuneo, sono state poi combinate *ex post*, per sovrapposizione degli effetti, ad ottenere le tre storie temporali della spinta della diga;
- iii. per il terzo caso si è proceduto in modo analogo al caso (ii) ma sommando alle storie temporali di spinta "dinamica" la componente statica ottenuta al punto (i); la sovrapposizione degli effetti, in questo caso come nel precedente, è stata possibile data la natura elastica di tutti i legami costitutivi impiegati per caratterizzare struttura e ammasso.



4. Risultati

In Figura 4 sono riassunti i principali risultati delle analisi numeriche sul cuneo selezionato. I cinematismi attivati durante l'applicazione delle storie temporali di accelerazione dei tre sismi sono stati sempre limitati a due casi: scorrimento lungo la linea di intersezione tra le due discontinuità strutturali ($I_{strat/kk1}$) e scorrimento lungo il solo giunto di strato. Gli spostamenti accumulati sono stati sempre inferiori ai 6 cm, piuttosto variabili per i tre sismi. I maggiori sono stati calcolati per il sisma Umbria-Marche che, a fronte di un contenuto energetico minore, presentava ordinate spettrali più elevate per i periodi più bassi, seguiva il sisma Coalinga (quello con il maggior contenuto energetico e la durata significativa maggiore) con spostamenti massimi nell'ordine dei 2 cm ed infine il sisma dell'Aquila (spettrocompatibile per i periodi alti) che mostrava spostamenti molto inferiori. Nel caso di spinta calcolata completamente con modello FEM (ii) l'entità della risultante di contatto è molto minore e conseguentemente comporta spostamenti di un ordine di grandezza inferiori (millimetrici) rispetto ai due casi con soluzione statica analitica (i e iii) e cinematismi più orientati verso uno scorrimento sul solo giunto di strato (Figura 4a). In generale il contributo dinamico non appare significativo ai fini della stabilità del cuneo: sia perché l'entità delle sollecitazioni calcolate numericamente è sempre considerevolmente inferiore rispetto alla soluzione statica analitica, che risulta pertanto dominante; sia perché il cuneo in esame si intesta a quote elevate della spalla dove le oscillazioni dinamiche di pressione di contatto sono più contenute.

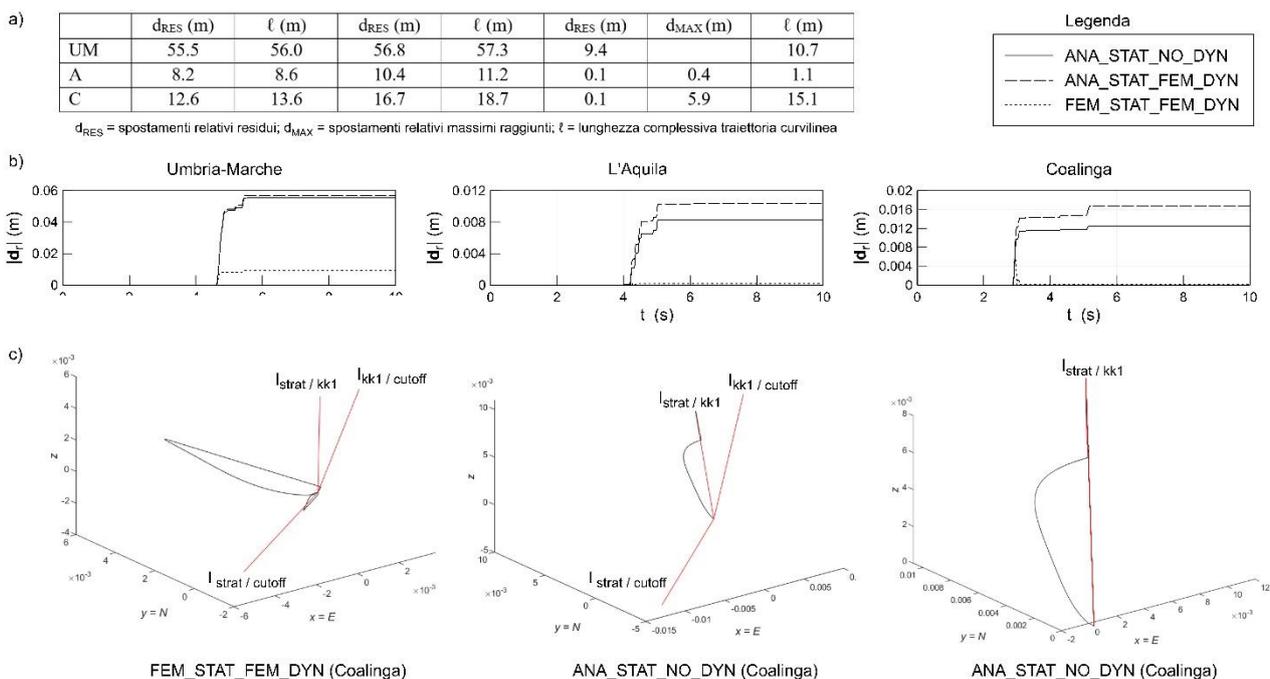


Fig. 4. a) tabella riassuntiva dei risultati in termini di spostamenti accumulati per i tre sismi; b) andamento degli spostamenti durante il sisma per i tre casi i, ii, iii; c) traiettorie del cuneo per il sisma Coalinga (1983) nei tre casi

5. Conclusioni

Lo stesso cuneo analizzato in questo studio secondo l'approccio agli spostamenti di tipo Newmark era stato precedentemente studiato con il classico metodo dell'equilibrio limite alla Londe, risultando non verificato quando si applicava ai piani di discontinuità un contributo di resistenza per coesione nullo. I risultati qui esposti hanno mostrato che un approccio prestazionale permette di estendere una valutazione di stabilità anche a cunei apparentemente instabili ($FS < 1$) poiché gli spostamenti che si possono accumulare durante il sisma atteso sono relativamente piccoli, dell'ordine di grandezza usualmente ben sopportato da una sovrastruttura rigida (Blake et al. 2002).

Bibliografia

- Bavestrello, F., 1983. *Stabilizzazione temporanea degli scavi d'imposta della diga di Ridracoli*. Spoleto.
- Blake T.F., Hollingsworth R.A., Stewart J.P., 2002. *Recommended procedures for implementation of dmgs special publication 117 guidelines for analyzing and mitigating landslide hazards in California*. Committee organized through the ASCE Los Angeles Section Geotechnical Group Document published by the Southern California Earthquake Center.
- Buffi, G., Manciola, P., De Lorenzis, L., Cavalagli, N., Comodini, F., Gambi, A., Gusella, V., Mezzi, M., Niemeier, W. and Tamagnini, C., 2017. 'Calibration of finite element models of concrete arch-gravity dams using dynamical measures: the case of Ridracoli', *Procedia Engineering*, 199, pp. 110-115.
- Chopra AK. *Dynamics of Structures*. 5th ed. Pearson, 2017: 960 pp.
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC), 2018. *Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects*.
- Goodman, R.E. and Powell, C. (2003), "Investigations of blocks in foundations and abutments of concrete dams", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(2), 105-116.
- Howell, C. H., & Jaquith, A., 1929. "Analysis of Arch Dams by the Trial Load Method". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 93, 1191-1225.
- Londe, P., 1973. "Analysis of the stability of rock slopes", *Quart. J. Eng. Geology Hydrogeology*, 1, 93-127.
- Mills-Bria, B.L., Nuss, L.K., & Chopra, A. K., 2008. *Current methodology at the Bureau of Reclamation for the nonlinear analyses of arch dams using explicit finite element techniques*. Paper presented at the The 14th World Conference on Earthquake Engineering October.
- Mirzabozorg, H., Varmazyari, M., Hoseini, M. and Gharebaghi, A.S., 2015. "A comparative study of rock wedge stability of an arch dam abutment subjected to static and seismic loading", *Soil Mech. Foundation Eng.*, 52(5).
- Mostafaei, H., F. Behnamfar, and M. Alembagheri. 2020. "Nonlinear analysis of stability of rock wedges in the abutments of an arch dam due to seismic loading." *Struct. Monit. Maint.* 7 (4): 295.
- Mostafaei, H., and Farhad B., 2021. "Wedge Movement Effects on the Nonlinear Behavior of an Arch Dam Subjected to Seismic Loading." *International Journal of Geomechanics* 22: 1-16.
- Newmark, N. M., 1965. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139-160.
- Pan, J., and J. Wang. 2019. "Effect of abutment movements on nonlinear seismic response of an arch dam." *Struct. Infrastruct. Eng.* 16 (8): 1106–1120.
- Swaminathan, K. V., 1956. "Su di una estensione del calcolo Tolke a dighe arco-gravità con fondazioni cedevoli" *L'Energia Elettrica* N.7
- Tölke, F. & Ludin, A., 1938. *Wasserkraftanlagen*. Berlin: Julius Springer.
- Verrucci L., Lanzo G., Rotonda T., Tommasi P. and Di Giulio A., 2018. «Valutazione del comportamento sismico 3D di blocchi di roccia mediante il metodo degli spostamenti» *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica IARG 2018 (Genova)*, 4-6 Luglio 2018