

# Ricerca

## Un metodo semplificato per la verifica sismica spalla-spalla di dighe alleggerite e a speroni (TMMS)

A simplified method (TMMS) for seismic analysis of buttress dams with actions directed across the valley

Ennio Casagrande<sup>1</sup> ■

### Sommario

In questo articolo si presenta una metodologia nuova per effettuare analisi strutturali su dighe alleggerite e a speroni in condizioni sismiche con moto trasversale alla gola (spalla-spalla). Il metodo si basa sul concetto di massa multipla concentrata e risulta particolarmente efficiente in termini di analisi complesse come quelle nel transitorio. Dopo l'introduzione al metodo TMMS (Transverse Multi-Mass-System) l'articolo riporta la taratura e la validazione del modello nonché i risultati fondamentali di un'analisi condotta su uno schema semplice di diga.

**Parole chiave:** dighe, speroni, alleggerite, sismica, spalla-spalla

### Abstract

*This paper presents a new procedure to evaluate the structural performance of buttress dams in seismic conditions with earthquake directed across the gorge. The procedure based on multiple-mass lumped at the nodes, a very powerful method to complex calculations. After introduce a new procedure called TMMS (Transverse Multi-Mass-System), the paper describes the calibration of the method and the fundamental results about a simple buttress dam.*

**Keywords:** buttress dams, damage, seismic, across valley

### 1. Introduzione

Durante gli anni le dighe alleggerite e a speroni sono state oggetto di svariati studi approfonditi (Datei, 1998) e ricerche correlate (Colombo, 2015) con il fine di valutarne il comportamento in condizioni statiche e sismiche.

Come lecito pensare e ampiamente dimostrato (Casagrande, 2017) l'analisi sismica delle dighe alleggerite e a speroni lungo la direzione della valle, può essere condotta con metodi assodati e ampiamente utilizzati in fase di progettazione (Arredi, 1974). L'ingresso della nuova normativa sismica italiana, l'O.P.C.M. 3274 prima e il D.M. 14/01/2008 successivamente, hanno variato la zonizzazione sismica dell'intero territorio, introducendo una nuova zonizzazione sismica e alcune prescrizioni tecniche inerenti le combinazioni di carico per carichi eccezionali (es. sisma).

Ora la norma cogente in fatto di dighe (D.P.C.M. 11 febbraio 2014 n. 72) prescrive di effettuare delle analisi sismiche che comprendano sia un'eccentricità addizionale (derivante dalla non corretta definizione del centro delle masse) sia una componente ortogonale stimabile in circa il 30% dell'azione attesa nella direzione dominante.

Per molti casi e per sbarramenti di una certa tipologia, come le dighe a gravità, la componente ortogonale (trasversale alla gola) non assume una condizione dominante, per cui, spesso la verifica avviene solamente nella direzione trasversale al coronamento (monte-valle). Recenti ricerche hanno evidenziato, però, che in certe tipologie di dighe come quelle alleggerite e a speroni, la

<sup>1</sup> Ingegnere libero professionista - ✉ [ennio.casagrande@gruppcasagrande.it](mailto:ennio.casagrande@gruppcasagrande.it)

componente trasversale (notoriamente chiamata spalla-spalla) potrebbe risultare non trascurabile (Casagrande, 2017).

I primi studi in cui si considerava l'azione sismica nella direzione spalla-spalla risalgono agli anni '80 e comprendevano modelli estremamente semplificati dello sperone (Rozanov, 1979). Successivamente, alcuni studi perfezionarono l'analisi del concio tipo introducendo metodi matriciali per la stima della deformazione in sommità della diga (Motsonelidze, 1987). L'attuale panorama informatico ha permesso di effettuare analisi piuttosto complesse considerando, ad esempio, l'interazione terreno-struttura e molteplici altre caratteristiche quali l'interazione diga-serbatoio.

Generalmente, per la verifica rapida della vulnerabilità sismica delle dighe facenti parte, ad esempio, di una determinata zona, la tendenza è quella di utilizzare metodi numerici performanti basati, principalmente, su una semplificazione della geometria del corpo diga (Casagrande, 2013). Tali metodi sono molto utilizzati nella fase di screening, in quanto, su essi possono essere effettuate diverse tipologie di analisi (non lineari, dinamiche ecc.)

In questa ricerca si presenta un nuovo metodo di analisi denominato *Trasverse Multi-Mass System* (TMMS), un nuovo sistema innovativo che introduce il concetto di massa concentrata collegata a rigidità variabili. Il nuovo modello risulta matematicamente snello e permette di effettuare analisi sofisticate per valutare la vulnerabilità sismica di ogni singolo sperone o sezione.

## 2. Descrizione del metodo TMMS

Le dighe alleggerite presentano delle sezioni trasversali altamente variabili: sezioni a doppio T oppure sezioni cave sono solo alcune configurazioni di base che possiamo trovare nel panorama italiano. Indubbiamente, alla complessità della sezione trasversale si aggiunge lo sviluppo verticale del singolo elemento, il quale, presenta non solo delle variazioni di pendenza all'estradosso (monte-valle) ma anche all'intradosso, dovute alla presenza delle varie rientranze (Figura 1).

Con tali configurazioni, risulta difficile un approccio prettamente ingegneristico per la valutazione del comportamento in condizioni sismiche nella direzione spalla-spalla. Infatti, anche dal punto di vista numerico, è ampiamente assodato come il modello completo tridimensionale dello sperone sia preferibile per coglierne il completo comportamento strutturale (Fell et al., 2015). Studi numerici eseguiti su dighe a speroni (Malm, 2016) hanno dimostrato come su sbarramenti alleggeriti con geometria piuttosto semplice (*buttress dam with flat slab deck*) la differenza, per la verifica di stabilità nel piano dello sperone, tra modello classico (metodo manuale) e numerico tridimensionale (FEM) sia intorno all'1,5%.

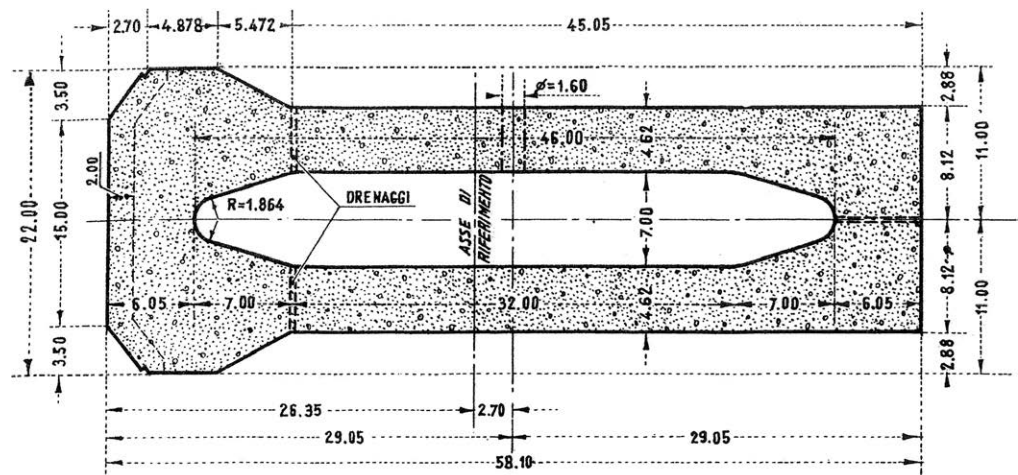
Naturalmente, la differenza aumenta notevolmente se l'analisi viene condotta nella direzione spalla-spalla, in quanto, la geometria si complica notevolmente: l'interazione tra gli speroni e le condizioni al contorno in prossimità della spalla risultano tutt'ora accompagnati da un certo grado di incertezza.

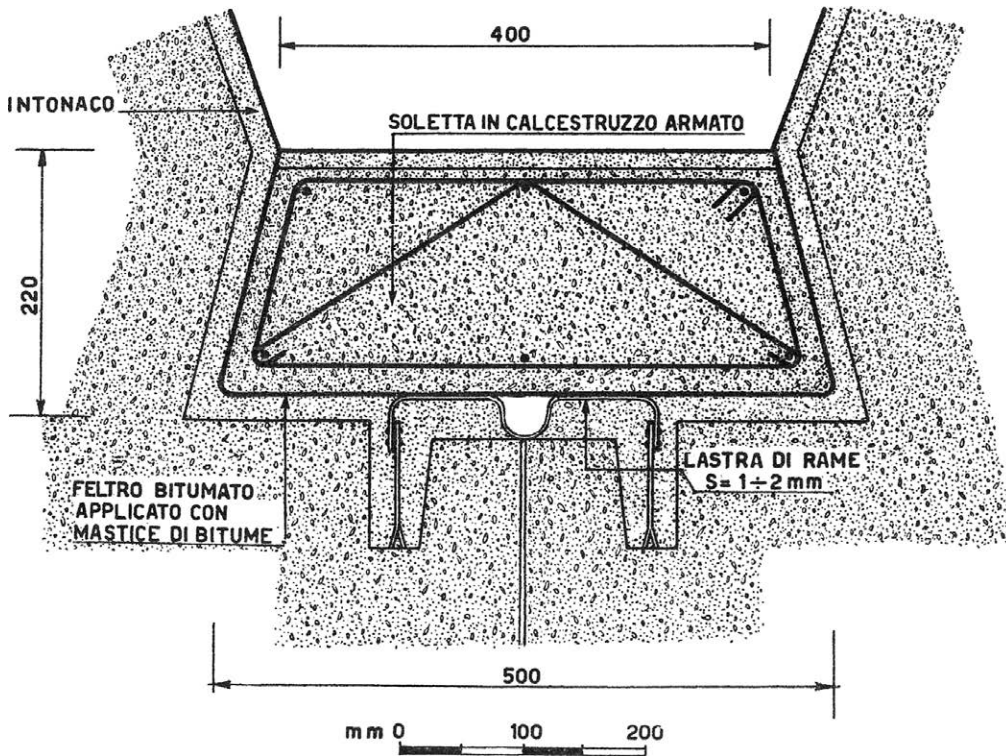
Dal punto di vista numerico, inoltre, la modellazione di una diga completa a speroni richiede una certa preparazione dell'analista e un certo grado di approssimazione dovuto all'interazione tra i vari blocchi (Figura 2).

Ad aumentare la difficoltà di modellazione dell'interazione tra elementi c'è proprio il tipo di giunto. Nelle epoche di costruzioni, i giunti delle dighe alleggerite venivano protetti attraverso un'apposita trave (chiamata coprigiunto) e dei lamierini di rame (Datei, 1998). In fase di progettazione, si considerava l'interazione tra elementi definita, considerando pertanto, una sorta di interazione completa nella direzione trasversale alla valle.

Studi recenti (Berneheim e Forsgren, 2016) hanno evidenziato come i montanti orizzontali nelle dighe a contrafforti (*struts*) con piastra di tenuta (*flat slab deck*) siano decisamente efficaci per contenere le tensioni negli elementi verticali.

**Figura 1**  
Sezione trasversale di una diga alleggerita (Anidel, 1951).





**Figura 2**  
Particolare giunto di  
contrazione di una diga  
alleggerita (Anidel, 1951).

Il metodo considerato in questa trattazione è un'evoluzione numerica del procedimento proposto in (Motsonelidze, 1987) e si basa sul nuovo concetto di *masse concentrate a multipla rigidità*.

Il metodo deriva da una semplificazione della geometria del corpo diga, metodo questo ampiamente utilizzato, come già accennato, anche nelle verifiche di stabilità di dighe a gravità (Basili e Nuti, 2011) (Casagrande, 2013).

Per le dighe alleggerite e a speroni è di notevole difficoltà condurre una semplificazione ad un sistema ad un grado di libertà (SDOF), in quanto:

- gli speroni presentano una sezione variabile in altezza e in pianta;
- le masse risultano distribuite nella maggior parte lungo il paramento di monte e in certi casi lungo il paramento di valle;
- la variabilità del sisma nella direzione spalla-spalla, produce degli effetti torcenti sullo sperone e conseguentemente un'interazione non lineare con gli altri speroni adiacenti.

Il metodo proposto si basa sul nuovo concetto di sistema ad un grado di libertà con effetto multiplo (*TMMS Transverse Multiple Mass System*). Sostanzialmente, il modello considera come schema statico (Figura 3) una porzione diagonale dello sperone a cui è appesa una massa, rappresentativa del volume di calcestruzzo del paramento di monte.

La diga tipo, quindi, risulta essere descritta da una serie di sistemi ad un grado di libertà (S.D.O.F. *single-degree-of-freedom*) inclinati e posti ad un interasse prestabilito.

### 3. Impostazione e taratura del modello

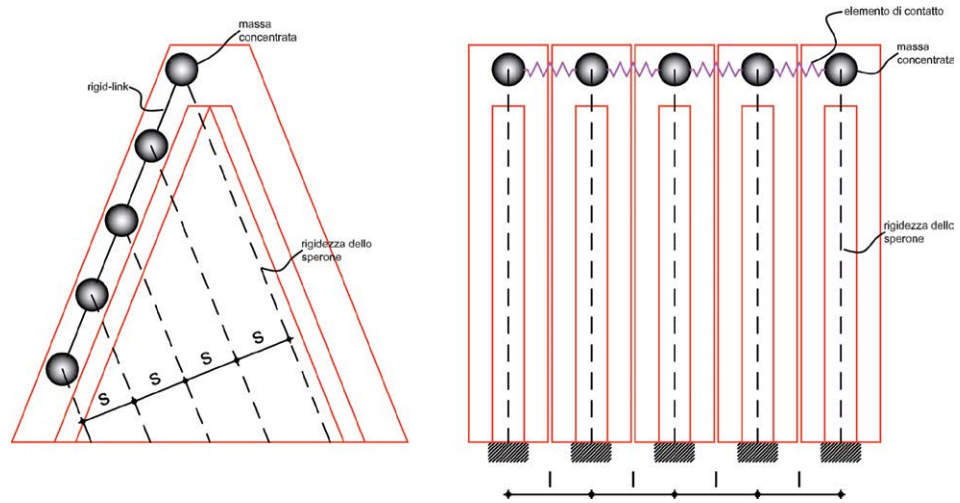
Il metodo TMMS è stato sottoposto al processo di validazione attraverso la comparazione con i risultati ottenuti con un modello ad elementi finiti (FEM) completo utilizzando elementi tipo *brick*.

Le analisi sono state eseguite prendendo in considerazione la geometria di una diga tipo a doppio T come riportata nella Figura 4a. La diga in questione, supposta di forma triangolare per semplicità computazionale, presenta una base e un'altezza pari a 100 m e una larghezza pari a circa 15 m con rientranze simmetriche di 5 m.

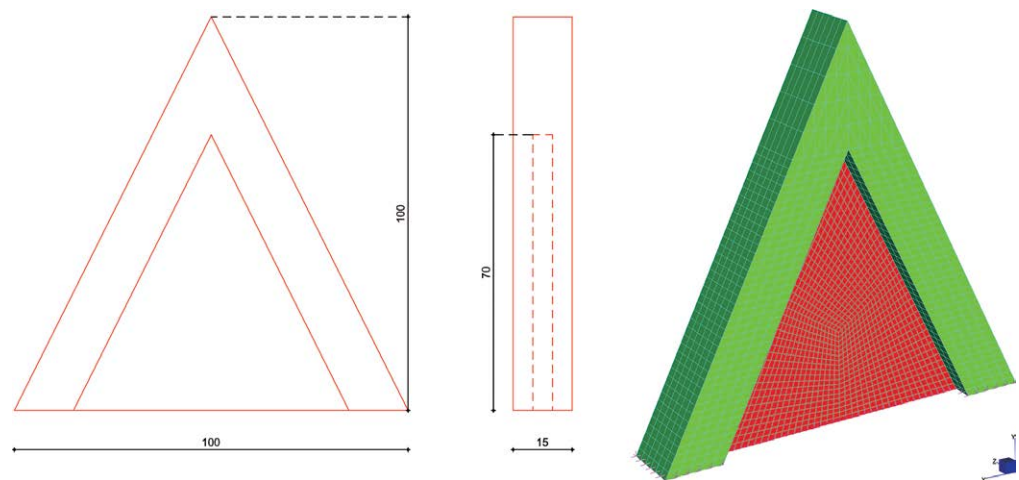
Il modello numerico è stato realizzato impiegando 4746 elementi tipo *brick* e supponendo la base della diga totalmente incastrata ipotizzando i cedimenti nulli e la perfetta interazione terreno-struttura. La massa complessiva del modello, considerando un peso specifico di circa 2400 kg/m<sup>3</sup>, risulta pari approssimativamente a 1,21·10<sup>8</sup> kg.

Il modello numerico è stato sottoposto, inizialmente, ad un'analisi per determinare le frequenze proprie di vibrazione. Tale metodologia permette al progettista di conoscere in modo approfondito il comportamento della diga individuando le "debolezze strutturali" associate alla rigidità e alla massa del sistema (Rugarli, 2004).

**Figura 3**  
schema grafico del metodo  
TMMS: prospetto laterale  
dello sperone e vista da valle.



**Figura 4**  
Schema grafico della diga  
alleggerita sottoposta ad  
analisi: geometria e modello  
FEM.



La Figura 5, mostra le deformate associate ai primi quattro modi di vibrare della struttura. Come si evince dalle immagini, il primo modo di vibrare corrisponde alla traslazione nella direzione  $+z$ ; ovviamente tale risultato era prevedibile, in quanto, la diga risulta possedere una rigidezza di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla corrispondente direzione ortogonale. I modi numero due e tre corrispondono rispettivamente ad una deformazione di tipo torsionale e di tipo composta traslazionale-torsionale derivante sia dalla “debolezza” fuori dal piano sia dalla bassa rigidezza torsionale.

Ovviamente tali effetti, se valutati nella globalità della struttura diminuiscono per l’interazione tra speroni, valutabile solamente per analisi molto sofisticate come la ben nota NCA (*nonlinear contact analysis*).

Il modello TMMS, invece, viene costruito basandosi sulla metodologia già esposta in Figura 3, ovvero per mezzo di una suddivisione della diga in un sistema multiplo di S.D.O.F. Si sottolinea che nella trattazione in questione, si fa riferimento a un sistema ad un grado di libertà (per l’appunto SDOF), in quanto, il nuovo metodo non può essere considerato in linea teorica come un semplice sistema M.D.O.F. (multi-degree-of-freedom).

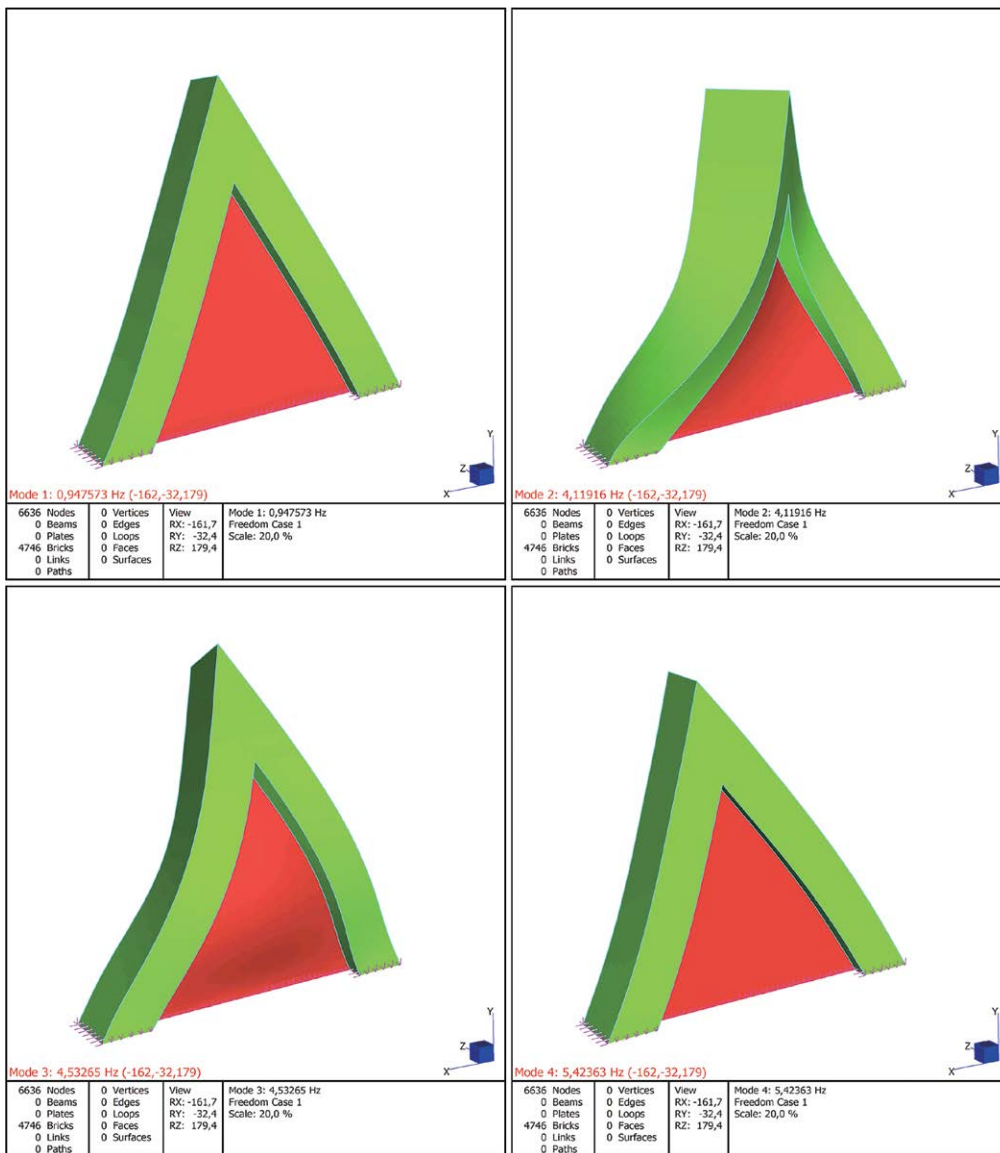
Come riportato nella Figura 6, la diga è stata suddivisa in sistemi ad un grado di libertà in cui la massa posta all’estremo, risulta essere rappresentativa del paramento di monte e valle.

Le masse, a loro volta, sono collegate tra loro da un elemento *rigid-link* che conferisce al sistema la rigidezza che deriva dal paramento di monte. Il modello FEM corrispondente, pertanto, è composto da dodici elementi tipo *beam* e sette vincoli (*boundary conditions*) ad incastro perfetto.

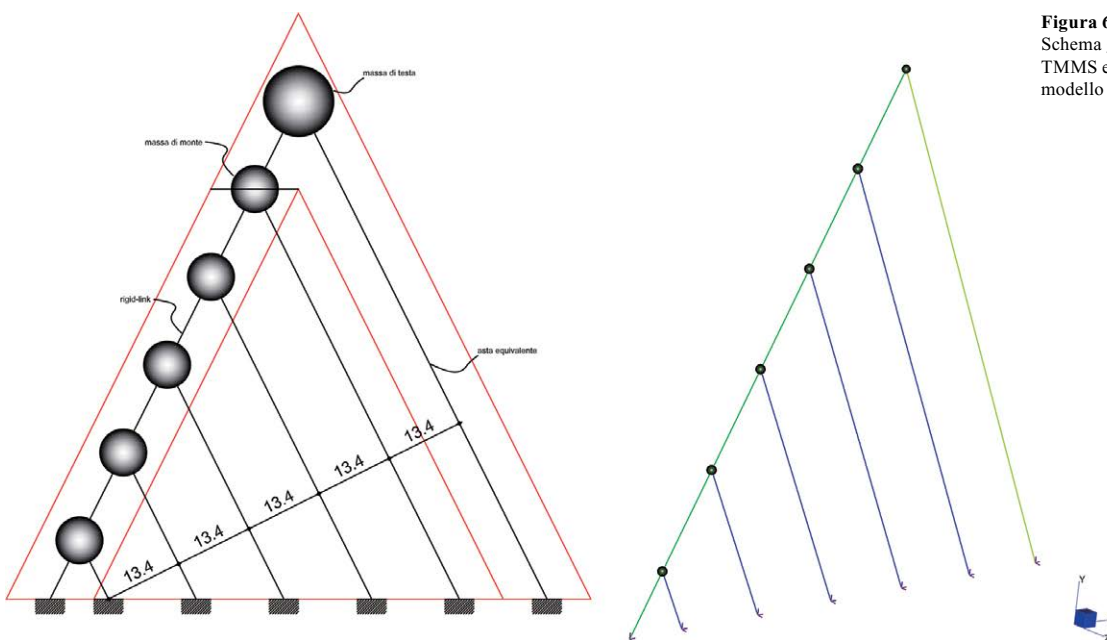
Nella Figura 7 si riportano le deformate corrispondenti per il modello TMMS. Per una rapida e chiara valutazione nei confronti del modello numerico completo, si riporta nella Figura 8, il confronto tra le frequenze di vibrazione.

Come si evince dal grafico si nota una buona correlazione per i primi tre modi di vibrare, i quali, differiscono mediamente per il 4-5%.



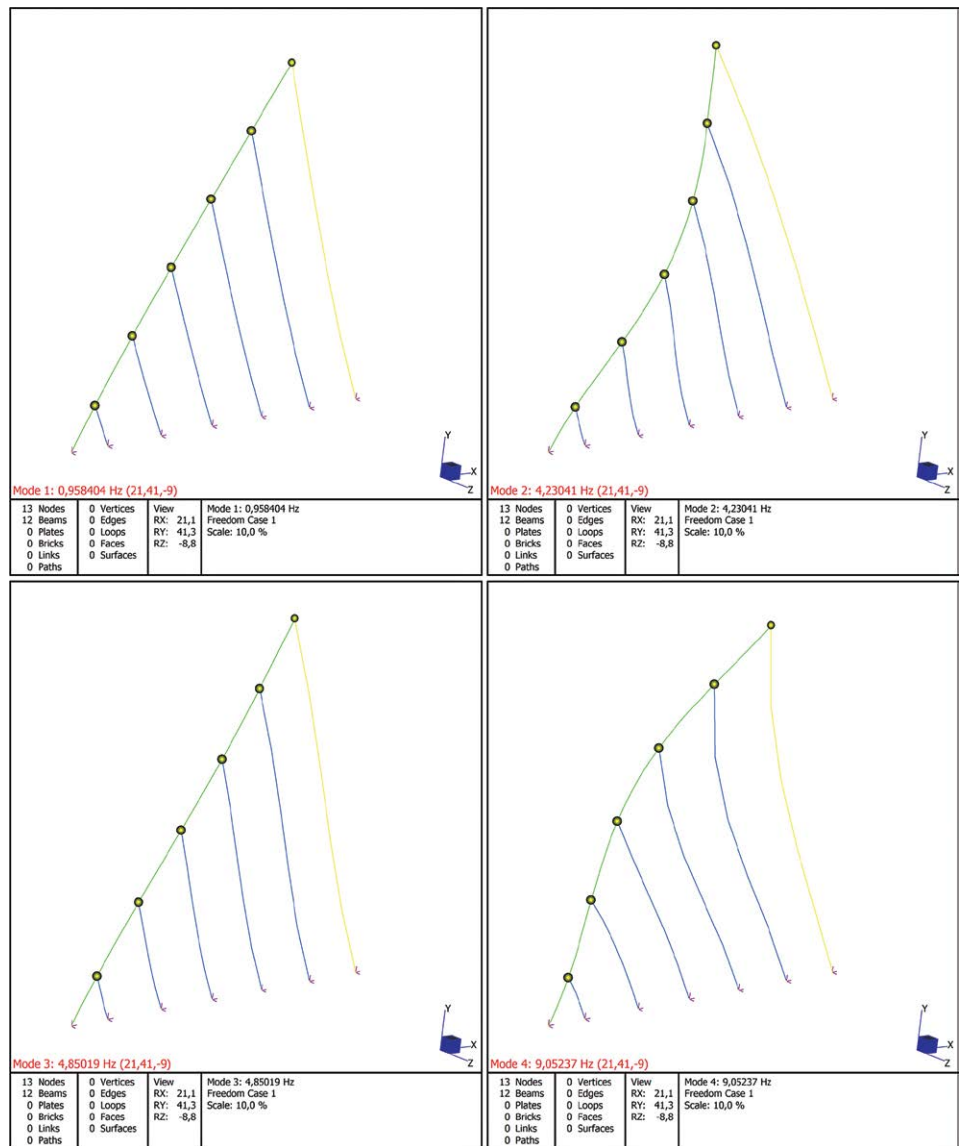


**Figura 5**  
 Modi di vibrazione (n. 4)  
 della diga tipo ottenuti  
 attraverso l'implementazione  
 di elementi tipo brick.

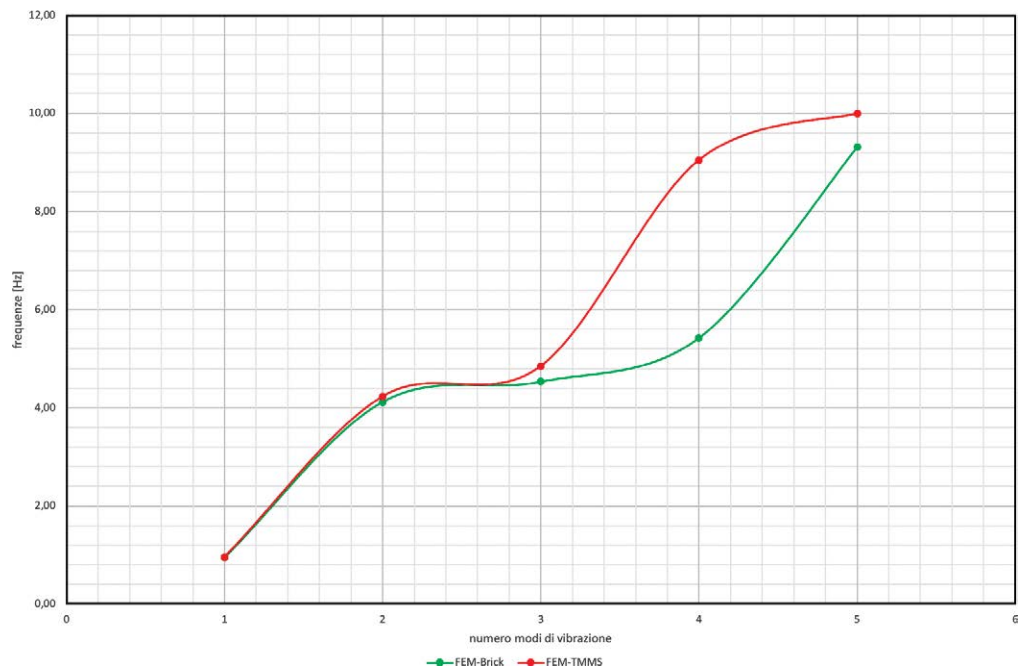


**Figura 6**  
 Schema grafico del modello  
 TMMS e corrispondente  
 modello numerico.

**Figura 7**  
 Modi di vibrazione (n. 4)  
 della diga tipo ottenuti  
 attraverso l'implementazione  
 del modello TMMS.



**Figura 8**  
 Confronto tra le frequenze  
 proprie di vibrazione dei  
 modelli numerici considerati.



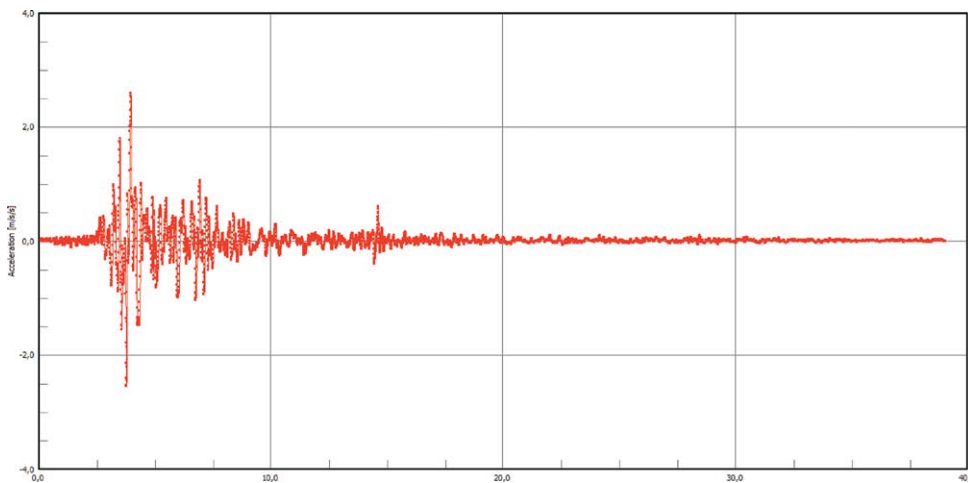
Una differenza sostanziale, invece, si verifica per il quarto modo di vibrare. Lo scostamento tra i due modelli per il quarto modo di vibrare deriva sostanzialmente dalla direzione; infatti, nel modello completo, il quarto modo di vibrare corrisponde ad una traslazione nel piano che coinvolge gran parte della massa del sistema. Tale scostamento risulta comunque meno importante dei primi tre modi, in quanto, il comportamento strutturale fondamentale viene influenzato nella direzione opposta.

#### 4. Analisi nel transitorio

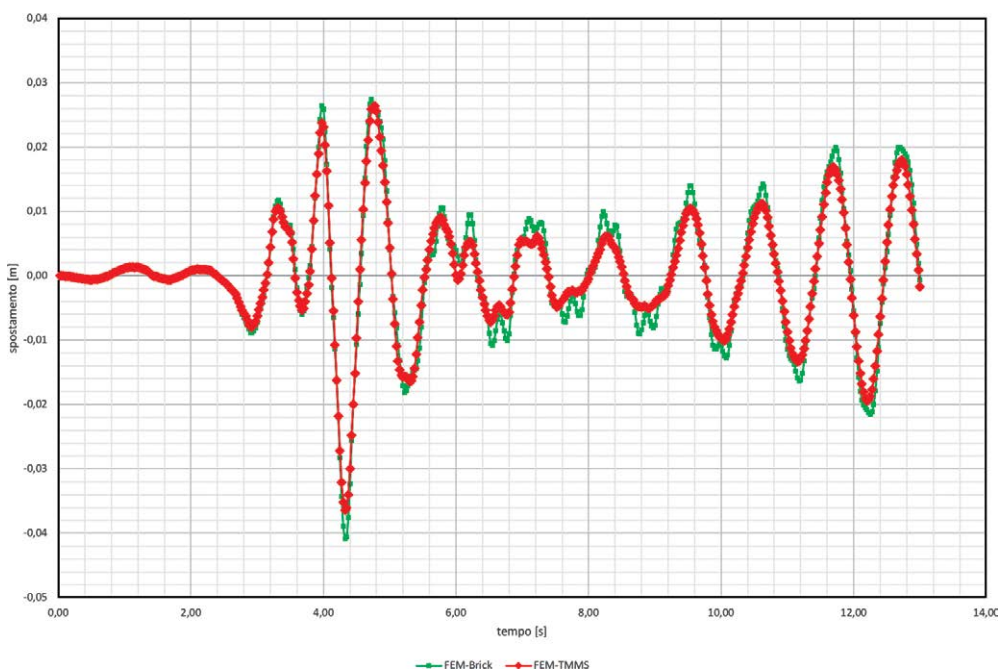
Al confronto dei modi propri di vibrare è possibile poi passare all'analisi struttura vera e propria in condizioni sismiche. Per un confronto più chiaro ed esteso è stato pensato di effettuare un'analisi lineare nel transitorio (*Linear Transient Dynamic Analysis*) dei due modelli e valutare lo spostamento in sommità della diga.

Come accelerogramma di riferimento è stato preso quello di Kede corrispondente al terremoto avvenuto ad Atene nel 1999 la cui intensità (magnitudo momento) è stata stimata con grado 6,0 (Figura 9).

Lo spostamento in sommità della diga è stato riportato in Figura 10. In tale immagine si evidenzia la storia temporale dello spostamento in sommità della diga sia per il modello completo (elementi *brick*) sia per il modello TMMS.



**Figura 9**  
Accelerogramma registrato a Kede (Atene) durante il terremoto avvenuto nel 1999.



**Figura 10**  
Confronto tra storia dello spostamento in sommità della diga (metodo FEM e TMMS).

Come si osserva dal grafico dello spostamento, abbiamo che la differenza nel punto di massimo scostamento risulta di circa l'11%; tale differenza è dovuta principalmente alla variazione di massa presente nell'anima della diga, massa che nel modello TMMS non viene considerata dominante.

Infatti la massa globale del modello TMMS risulta pari a circa  $9,31 \cdot 10^7$  kg, quindi, il 23% inferiore al modello globale. Tuttavia, lo scarto tra i due spostamenti risulta essere inferiore alla differenza della massa considerata nei due modelli. Questo significa che il contributo rilevante per la determinazione del comportamento deformativo risulta predominante per la massa posta a monte e a valle come già ben delineato in ricerche passate (Motsonelidze, 1987).

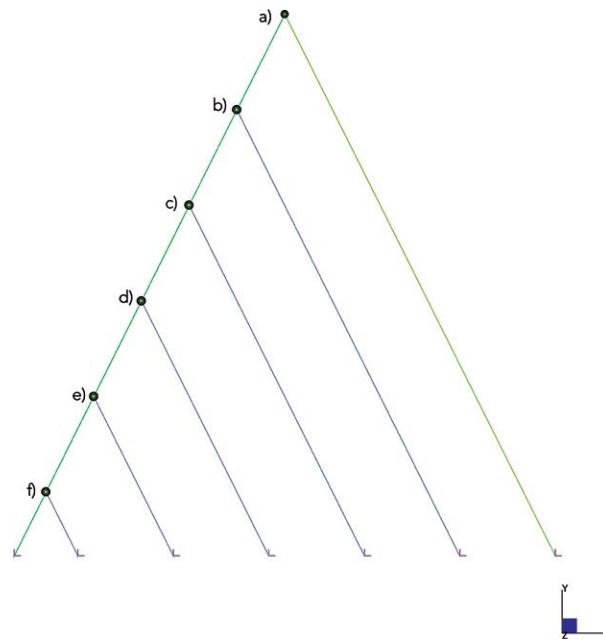
Ulteriori differenze si notano nella seconda parte del grafico, in quanto, esse sono principalmente influenzate dal quarto modo di vibrare, dove per l'appunto la differenza risulta più marcata.

Sostanzialmente, però, è possibile notare come la storia dello spostamento, in termini di qualità e quantità, sia in buon accordo tra i due modelli.

Inoltre, è possibile notare come il tempo di calcolo sia molto diverso. Per il modello FEM completo (elementi *brick*) è stata ottenuta una soluzione convergente in 13 m e 44 s mentre per il modello FEM-TMMS la soluzione è stata ottenuta in 12 s. Quest'ultimo modello, pertanto, presenta un onere computazionale di molto inferiore al modello completo e pertanto può essere utilizzato in tutte le fasi di analisi di una diga (Fell et al., 2015) anche con, ad esempio, procedure molto complesse (*Endurance Time Analysis*).

Con riferimento modello TMMS della Figura 11 è possibile, altresì, cogliere il comportamento completo trasversale dello sperone. Infatti, ad ogni punto fondamentale, a cui è concentrata la massa di ogni singola fascia, è possibile mappare lo spostamento trasversale in funzione del tempo.

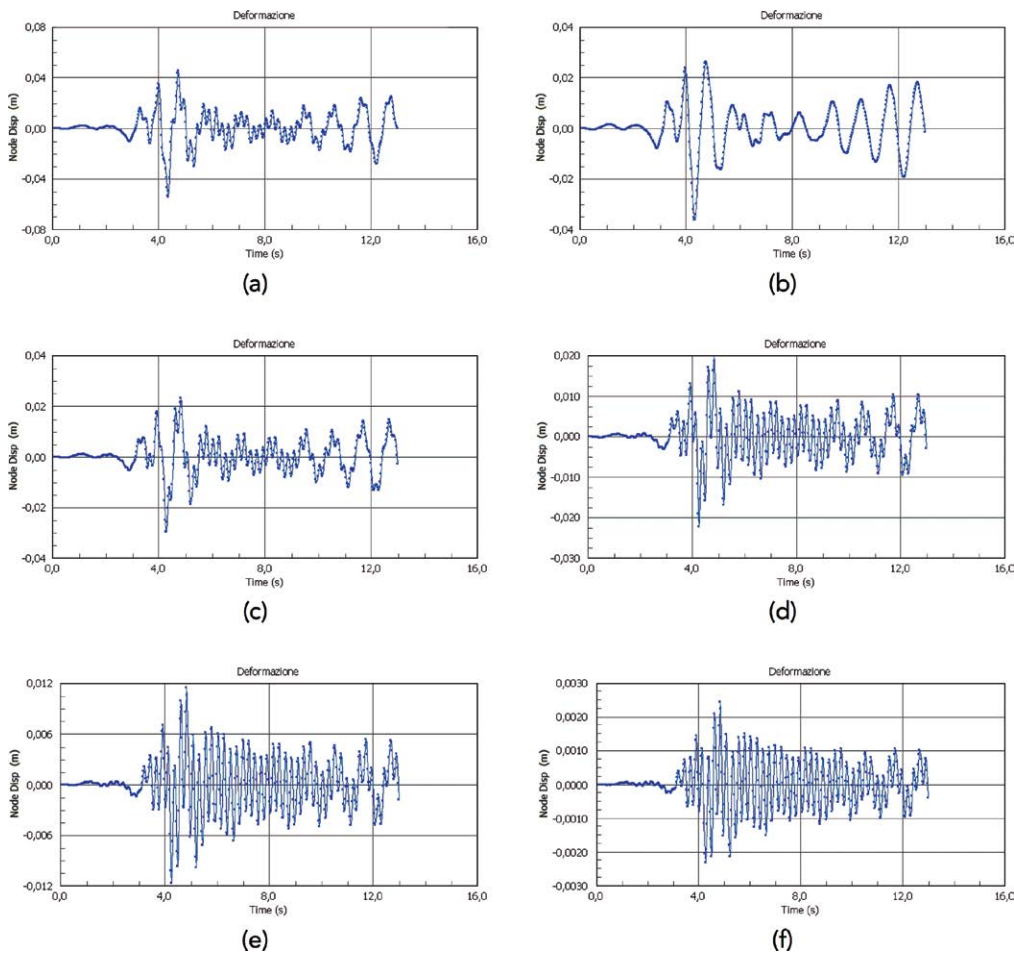
**Figura 11**  
Schema rappresentativo  
TMMS con indicati i nodi  
fondamentali di analisi.



A tal punto, la Figura 12 mostra l'andamento dello spostamento per ogni singolo nodo fondamentale indicato opportunamente con le lettere da a) a f). Dai singoli grafici è possibile trarre alcune osservazioni importanti:

- La reazione al nodo (a), in termini quantitativi, risulta essere la più importante, in quanto, causata dall'effetto "mensola" dello sperone. L'urto conseguente tra due speroni comporta quindi un notevole rilascio di energia che potrebbe danneggiare la testa stessa dello sperone;
- Lo spostamento in sommità risulta essere maggiore rispetto al nodo prossimo alla fondazione, ma quest'ultimo presenta un'alternanza ciclica di deformazione molto elevata se computata rispetto al più vicino nodo vincolato (Figura 12 a e f). Ciò significa che il "martellamento" strutturale tra speroni contigui in prossimità delle fondazioni, non può essere trascurato soprattutto se coesiste una perdita di rotazione del vincolo di base nella direzione spalla-spalla.





**Figura 12**  
Storia dello spostamento per ogni singolo nodo fondamentale (Figura 11).

## 5. Conclusioni

Il presente studio riporta una metodologia innovativa per la verifica di dighe alleggerite e a speroni in condizioni sismiche in direzione spalla-spalla. La messa appunto di una metodologia a multi-massa denominato Transverse Multi-Mass System (TMMS) permette di ridurre drasticamente i tempi di calcolo, soprattutto in caso di analisi complesse come le analisi nel transitorio.

Il sistema TMMS è stato sottoposto a validazione attraverso un confronto numerico con un modello di calcolo FEM che utilizza elementi di tipo *brick* procedendo ad un'analisi nel transitorio con un dato accelerogramma.

I risultati ottenuti sono più che soddisfacenti sia in termini qualitativi sia in termini quantitativi. Inoltre, la velocità di calcolo risulta drasticamente in inferiore rispetto ai consueti modelli numerici e, pertanto, il metodo TMMS risulta essere un'ottima alternativa anche per analisi particolarmente complesse.

La mappatura delle deformazioni nei nodi fondamentali permette di valutare in modo completo l'interazione tra speroni. A tal punto si è notato una differenza di comportamento interessante tra forza e frequenza impressa tra gli elementi.

Attualmente, è in fase di sviluppo e validazione una metodologia di calcolo per permettere una stima dell'effetto di martellamento strutturale tra speroni. Tale metodologia sarà inclusa, successivamente sul modello TMMS.

## 6. Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Antonella Frigerio e l'Ing. Guido Mazzà per il supporto dato nell'ambito del Gruppo di Lavoro ITCOL "Dighe alleggerite e a speroni".

## Bibliografia

- Colombo M. (2013) - Analisi statiche e sismiche di una diga a gravità a speroni, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.  
 Datei C. (1998) - Introduzione allo studio delle dighe - sbarramenti in muratura, Cortina-Padova.

- Casagrande E. (2017) - Fast-graph method to estimate the internal stress of buttress dams in seismic conditions, *Dam Engineering*, Vol XXVIII, 57-64.
- Casagrande E. (2013) - Metodi numerici per l'analisi sismica di dighe a gravità e opere accessorie, Cleup Padova ISBN 9788867871520
- Arredi F. (1974) - Sulla analisi statica degli elementi per dighe a gravità alleggerite, *L'Energia Elettrica*, n.1, pp. 1-11.
- Rozanov N.P. (1979) - Kontrforsnie plotiny (Buttress Dams). Gosstroizdat.
- Motsonelidze N.S. (1987) - Stability and seismic resistance of buttress dams, V.S. Kothekar.
- ANIDEL (1951) - Le dighe di ritenuta degli impianti idroelettrici italiani, Volume II, ANIDEL.
- Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G., Foster M. (2015) - *Geotechnical Engineering of Dams*, CRC Press.
- Malm R. (2016) - Guideline for FE analyses of concrete dams, Report 2016:270, Energiforsk.
- Berneheim I., Forsgren E. (2016) - Behavior of Swedish Concrete Buttress Dams at Seismic Loading, Master Thesis TRITA-BKN.
- Basili M., Nuti C. (2011) - A Simplified Procedure for Base Sliding Evaluation of Concrete Gravity Dams under Seismic Action, International Scholarly Research Network ISRN Civil Engineering.
- El-Nady A.M. (1992) - Seismic analysis of concrete gravity dams with keyed contraction joints, Thesis, McMaster University.
- Rugarli P. (2004) - Calcolo strutturale con gli elementi finiti, EPC libri.

### L'Autore

**Ennio Casagrande**, ingegnere civile svolge la libera professione nel campo strutturale e nell'idraulica. È membro dell'associazione SPONSE e dell'ITCOLD a cui partecipa attivamente al Gruppo di Lavoro "Dighe alleggerite e a speroni".  
Docente in corsi di formazione per enti pubblici e privati in materia di rischio sismico e strutture, è autore di memorie scientifiche relative all'ingegneria strutturale.  
È autore, inoltre, di diversi libri tra i quali "Metodi numerici per l'analisi sismica di dighe a gravità e opere accessorie" pubblicato nel 2013 per la Cleup Padova.