

NOME E COGNOME: Antonino Pierdamiano Santangelo
UNIVERSITÀ: Università degli Studi di Catania
AUTORE: Antonino Pierdamiano Santangelo
TITOLO TESI: Applicazione e validazione numerica del Discrete Macro Element Method DMEM per la stima della resistenza alle azioni orizzontali di dighe
ARGOMENTO BANDO: Eventi estremi: La sicurezza delle dighe (idraulica idrologica, tracimazione controllata, sismica)

INDICE ESSENZIALE:

- 1 Le dighe esistenti in ca
 - 1.1 Introduzione
 - 1.2 Normative per le dighe esistenti
 - 1.3 Le dighe esistenti in Italia
 - 1.4 Effetti delle azioni sismiche sulle dighe, imparare dagli errori
- 2 Vulnerabilità sismica delle dighe in ca ad arco e gravità
 - 2.1 Azioni statiche e dinamiche
 - 2.2 Metodi di analisi numerica per la stima della vulnerabilità sismica
 - 2.3 Metodi di calcolo della pressione idrodinamica
 - 2.4 Problematiche aperte
- 3 Modellazione a macroelementi di dighe in ca
 - 3.1 Il modello computazionale 3d a macroelementi
 - 3.2 Descrizione del modello
- 4 Applicazione e validazione numerica DMEM
 - 4.1 Analisi preliminari
 - 4.2 Modellazione 3D
- 5 Conclusioni e sviluppi futuri
- 6 Bibliografia
- A Appendice: Metodi di calcolo della pressione idrodinamica

SCOPO:

La tesi ha valutato l'uso di approcci innovativi a macroelementi tipo Discrete Macro Element Method (DMEM) per le analisi statiche non lineari delle dighe.

DURATA: 10 mesi

SINTESI SULL'EVOLUZIONE DEL LAVORO

La valutazione delle strutture esistenti necessita di accurate analisi che possano considerare il comportamento non lineare geometrico o costitutivo della struttura. Modelli complessi tipo micro-modelli possono oggi solo in parte essere estesi a casi reali, soprattutto per il forte onere computazionale. Al fine di ridurre quest'onere, diversi ricercatori hanno sviluppato approcci a macroelementi soprattutto nel settore civile, trascurando quasi completamente il settore delle infrastrutture tra cui le dighe. In questa sede si sintetizza il lavoro di tesi che è stato articolato in cinque capitoli.

Il primo introduce la tematica e solleva l'attenzione sull'importanza della valutazione della vulnerabilità sismica delle dighe anche per il cospicuo numero presente sul territorio italiano. Gli effetti potenzialmente distruttivi degli eventi sismici su queste colossali opere di sbarramento è esposto attraverso un catalogo storico di collassi che hanno inficiato l'operatività di dighe per eventi sismici.

Il secondo capitolo descrive con maggiore dettaglio gli approcci di analisi delle dighe e come questi vengono recepiti da alcune normative internazionali.

Gli approcci di modellazione adottati nella tesi vengono descritti al capitolo terzo. L'approccio DMEM viene confrontato con un modello FEM non lineare. Unitamente ad una descrizione del modello computazionale e delle strategie di calibrazione dei legami costitutivi, si introducono e descrivono i modelli tridimensionali sia geometricamente che computazionalmente. In Figura 1 sono riportati due immagini di una generica diga in ca adottata come riferimento per la creazione del modello geometrico.

Il quarto capitolo contiene infine le analisi condotte a confronto tra i diversi modelli con diverse condizioni di carico, direzione e considerando la presenza o assenza di acqua all'interno del bacino. I risultati sono messi a paragone in termini di curve di capacità, quadri di danno e proprietà modali.

Per ultimo, il quarto capitolo riesamina i risultati alla luce dei quali alcune ipotesi di sviluppi futuri vengono avanzate.

La modellazione a elementi discreti è una strategia di modellazione inizialmente introdotta per strutture in muratura [1-2], successivamente estesa per tenere conto del comportamento fuori dal piano [3], delle geometrie curve [4] e di comportamenti 3D con applicazione a ponti in muratura a multi campata [5-6]. L'approccio a macroelementi è basato su una strategia di tipo fenomenologico in base alla quale l'elemento computazionale simula i meccanismi di rottura principali delle murature. Il macroelemento, nella versione originale, può essere descritto come un quadrilatero articolato dotato di link non lineari ortogonali ai lati, paralleli agli stessi e disposti lungo le due diagonali. I modelli successivamente sviluppati hanno introdotto interfacce piane e non uniformi. L'elemento computazionale adottato nelle analisi oggetto del lavoro di tesi è caratterizzato da un comportamento tridimensionale e viene schematizzato in Figura 2.a. Il modello numerico in uso in questa tesi è implementato nel software HiSTRA [7]. Il macroelemento DME consente di simulare i principali meccanismi di rottura quali quello presso-tenso-flessionale (lungo le interfacce), taglio (lungo il piano di taglio) e scorrimento (lungo le interfacce). Il software implementa la calibrazione del macroelemento in base alle proprietà elastiche e meccaniche del materiale. La calibrazione dei legami di tenso-presso flessione sono basati su un approccio di tipo a fibre (Figura 2.b). La calibrazione a taglio avviene tramite l'equivalenza di deformazione per puro taglio del macroelemento con un pannello omogeneo e continuo (Figura 2.c). Il legame a scorrimento è calibrato sull'equivalenza della superficie di contatto. Quest'ultimo meccanismo non è stato considerato nelle modellazioni della diga.

Il modello DME viene applicato per la simulazione della risposta di una diga a gravità valutandone la correttezza in confronto con quelli ottenuti tramite una simulazione FEM effettuata con LUSAS in termini di parametri modali (frequenze e forme modali) e analisi pushover (curve di capacità e meccanismi di danno).

In particolare è stato assunto in LUSAS un modello di calcestruzzo a plasticità diffusa i cui parametri essenziali sono: modulo di Young, rapporto di Poisson, densità di massa, resistenza a compressione uniassiale, resistenza a trazione uniassiale, energia di frattura a trazione. Utilizzando gli stessi parametri sono stati definiti i legami costitutivi del modello DMEM, per il quale il meccanismo a presso-tenso-flessione è definito da un legame asimmetrico con softening esponenziale a trazione e parabolico a compressione, quello a taglio da un comportamento elastoplastico. Gli scorrimenti, inibiti, sono definiti da un legame elastico quasi-rigido.

Il modello geometrico della diga ha un'altezza di 50 m dal punto più depresso, un andamento planimetrico arcuato di raggio pari a 150 m e un coronamento di 200 m e largo 6 m. La struttura è monolitica, priva di giunti di contrazione con larghezza sommitale pari a quella del coronamento, mentre la sezione di base ha uno spessore di 35 m. Il paramento di monte ha una inclinazione del 4%, mentre il paramento di valle ha inclinazione pari al 70% per poi raccordarsi gradualmente con una superficie pressoché verticale in prossimità del coronamento. La struttura è in calcestruzzo dosato a 250÷350 kg di cemento per m³. Il paramento di monte è in blocchi di calcestruzzo delle dimensioni di cm 80x80x50, dosato a 500 kg di cemento per m³. Al paramento segue, verso l'interno, uno strato di calcestruzzo dello spessore di 1 m dosato a 400 kg di cemento per m³. Il paramento a valle è in bolognini di pietrame. Il modello di riferimento è stato implementato con la strategia qui proposta (DMEM) e con quella FEM entrambe in ambito non lineare. Il macro-elemento, nella versione adottata in questa tesi, è dotato di un unico piano di taglio. Le analisi hanno messo a confronto la risposta della struttura in base all'orientamento del suddetto piano di taglio. Per tal motivo si sono implementati tre modelli in base al suo orientamento: a) Mod1 con piano di taglio orizzontale; b) Mod2 con piano di taglio trasversale; c) Mod3 con piano di taglio verticale, come mostrato in Figura 3.

Si osserva che il numero di gradi di libertà adottati nella modellazione FEM è di 68490, notevolmente superiore a quelli della modellazione DMEM pari a 2772 (4% del modello FEM).

Assumendo la modellazione FEM come riferimento, i modelli DMEM sono stati calibrati minimizzando il valore di una funzione obiettivo O calcolata sui valori delle prime tre frequenze di vibrazione al variare del modulo di Young assegnato al conglomerato. Sebbene la funzione obiettivo non abbia considerato un

errore legato alle forme modali, queste sono state controllate a posteriori. La Figura 4 riassume le matrici di MAC per le condizioni di bacino pieno e vuoto, validando i risultati DME con quelli FEM.

I risultati della calibrazione nelle due condizioni di esercizio della diga sono riassunte nella successiva tabella, in cui si riportano i moduli elastici calibrati (E) e le prime tre frequenze nelle due condizioni di esercizio.

In presenza di acqua					In assenza di acqua				
	LUSAS	MOD1	MOD2	MOD3		LUSAS	MOD1	MOD2	MOD3
E [MPa]	11687.5	13050	11600	12400		11687.5	13050	11600	12400
F1 [Hz]	5.625	5.556	5.746	5.619		6.272	6.108	6.248	6.128
F2 [Hz]	7.163	7.229	7.304	7.180		7.781	7.756	7.723	7.638
F3 [Hz]	8.722	8.788	8.769	8.714		9.364	9.378	9.180	9.184

Gli errori commessi sui valori delle frequenze appaiono marginali e, di conseguenza, i valori delle matrici MAC (Figura 4) sono caratterizzate da valori diagonali prossimi all'unità e quasi nulli per le restanti posizioni. Un'affidabile corrispondenza in termini di forme modali e frequenze conclude la parte di calibrazione dei modelli numerici. I risultati denotano come, in condizioni elastiche e in termini di parametri modali, l'orientamento del piano di taglio risulta essere marginalmente influenzante rendendo così il modello computazionale affidabile e robusto. Si osserva per ultimo che l'influenza della spinta idrostatica è stata ottenuta assumendo i carichi come masse aggiunte nella soluzione del problema di autovalori-autovettori. Le forme modali mostrano spostamenti modali maggiori in mezzzeria tipici di dighe di questo tipo [8-9]. Questo tipo di comportamento, come osservato da altri autori [10], guida la localizzazione del danno in condizioni dinamiche.

In ambito non lineare sono state condotte diverse analisi non-lineari considerando due diverse direzioni di carico (verso monte e valle), due distribuzioni di carico (proporzionale alla massa ed alla prima forma modale) e la presenza di acqua, per un totale di 32 analisi. Le spinte idrostatiche ed idrodinamiche sono state valutate definendo una opportuna distribuzione di carico coerente con quella proposta da Westergaard [11]. Tutti i modelli numerici sono stati analizzati in base alle configurazioni descritte. Per brevità si riportano solo alcune delle analisi condotte. Le figure 6 e 7 mostrano le curve di capacità dei diversi modelli. Sebbene non esaustive, alcune considerazioni possono essere fatte in presenza ed assenza di acqua in termini di coerenza delle risposte. Le curve di capacità, se confrontate con quelle ottenute con modelli FEM, restituiscono simili valori di picco o valori a cui si registrano estensioni significative di danno tale da ridurre la rigidità globale del sistema. Alcune mappe di danno sono riportate in Figura 8 per le analisi a diga vuota con profilo di carico proporzionale alle masse in direzione valle (Figura 8.a), profilo di carico proporzionale alle masse in direzione monte (Figura 8.b) e profilo di carico proporzionale al primo modo in direzione monte (Figura 8.c). La diversa discretizzazione del modello DME determina una diversa rappresentazione dello stesso meccanismo di collasso se confrontato con il modello FEM. Sebbene apparentemente diversi essi rappresentano lo stesso meccanismo la cui rappresentazione geometrica dipende dalla cinematica dell'elemento computazionale adottato. Per ultimo, al fine di meglio valutare la coerenza della modellazione DMEM, alcune analisi di sensitività sono state analizzate. La Figura 9 riporta le analisi di sensitività condotte. Queste hanno previsto l'analisi di alcuni parametri che influenzano la risposta del modello, quali la discretizzazione e l'energia di frattura.

CONCLUSIONI

“Le preoccupazioni principali sono legate alle dighe esistenti, che non sono state progettate contro i terremoti [...]. È necessario controllare la sicurezza sismica delle dighe esistenti e utilizzare metodi moderni di valutazione del pericolo sismico” [9]. In questa visione generale del problema della vulnerabilità sismica delle dighe, l'uso di metodi affidabili e computazionalmente non onerosi permette l'estensione delle verifiche ad un numero maggiore di strutture a fronte della riduzione di tempi ed oneri computazionali. Il lavoro di tesi, il primo in questa direzione, ha messo in luce l'applicabilità degli approcci a macroelementi discreti a manufatti di questo tipo. La geometria del benchmark è rappresentativa di numerose dighe presenti anche sul territorio italiano. I risultati hanno indagato diffusamente gli aspetti che possono condizionare la risposta, quale la mesh, il valore del modulo elastico, l'orientamento del piano di deformazione tagliante, il valore di energia di frattura a trazione nonché direzioni e profili di carico. Emerge chiaramente che l'approccio proposto è estendibile alle dighe in cui siano esse a semplice gravità

che ad arco. Dai risultati fin qui ottenuti, il modello con piani di taglio verticali e disposti trasversalmente rispetto allo sviluppo della diga ha restituito in media risultati più vicini a quelli degli elementi finiti. Particolare attenzione deve essere prestata alle definizioni dei parametri elasto-meccanici per la modellazione dei grossi ammassi in conglomerato.

SVILUPPI FUTURI

Il modello numerico validato in questa tesi ed i risultati ottenuti lasciano intravedere ulteriori sviluppi. Tra questi sono di certo da annoverare: i) Estensione ad analisi dinamiche non lineari e confronto con le pushover per la valutazione della loro applicabilità; ii) Approfondimenti rispetto alla simulazione delle spinte idrodinamiche. iii) Approfondimenti sull'interazione suolo-struttura-fluido. iv) Approfondimenti in merito ai criteri di stima della vulnerabilità. L'uso di un modello computazionalmente poco oneroso, ma affidabile e versatile, permette numerose applicazioni tra le quali: i) Monitoraggio dinamico. Il modello può essere implementato ed aggiornato in base ad eventi sismici, rappresentando un utile supporto per la stima di stati limite probabilisticamente superati. ii) Curve di fragilità. Sviluppo di curve di fragilità per diga specifica utile in ottica di mitigazione del rischio sismico. iii) Valutazione della vulnerabilità. Il modello in accordo con il monitoraggio può essere un rapido strumento per la valutazione della vulnerabilità sismica periodica, automatica o semi-automatica. iv) Analisi Parametrica. Stima probabilistica della vulnerabilità in base alla variazione dei parametri meccanici o sismici.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE:

- [1] Calìo I., Marletta M., Pantò B., “A Simplified Model for the Evaluation of the Seismic Behaviour of Masonry Buildings, in B.H.V. Topping, (Editor), Proc. of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK.”
- [2] Calìo I., Marletta M., Pantò B. “A new discrete element model for the evaluation of the seismic behavior of unreinforced masonry buildings, Engineering Structures, 40, 2012, pp 327-338.” 2012.
- [3] Pantò B., Calìo I., Lourenço P.B. “Seismic safety evaluation of reinforced concrete masonry infilled frames using macro modelling approach, Bull. Earthquake Eng. DOI 10.1007/s10518-017-0120-z.”
- [4] Calìo I., Cannizzaro F., Marletta M (2010). A discrete element for modeling masonry vaults. Adv. Mater. Res. 133-134, 447–452.
- [5] S. Caddemi, F. Cannizzaro, I. Calìo, D. Urso, “A ‘PARSIMONIOUS’ 3D DISCRETE MACRO-ELEMENT METHOD FOR MASONRY ARCH BRIDGES,” no. July, 2018.
- [6] S. Caddemi, F. Cannizzaro, I. Calìo, D. Urso, “A 3D DISCRETE MACRO-MODELLING APPROACH FOR MASONRY ARCH BRIDGES,” no. March, 2019.
- [7] Calìo I., Cannizzaro F., Pantò B., Rapicavoli D (2015) HiStrA (Historical Structures Analysis), in HISTRA s.r.l (Catania, Italy). Release 17.2.3; April 2015. Available at: <http://www.grupposismica.it>.”
- [8] “ICOLD, ‘Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Guidelines’, Bulletin 148, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris (2016).”
- [9] M. Wieland, “Icold Position Paper Dam Safety And Earthquake,” no. August, 2012.
- [10] L. R. and V. M. Ghrib F., Léger P., Tinawi R., “Seismic safety evaluation of gravity dams’. Hydropower & Dams 2, 126-138,” pp. 126–138, 1997.
- [11] H. Westergaard, “Water Pressures on Dams during Earthquakes.” 1933.

FIGURE

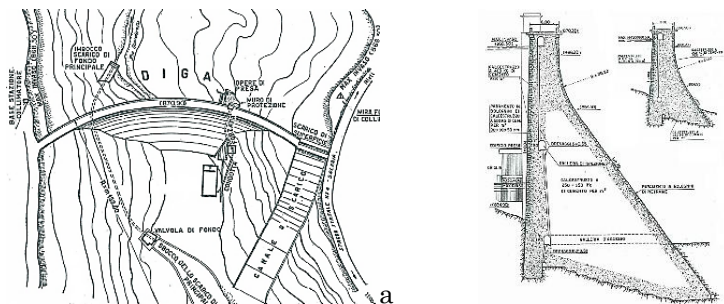


Figura 1 – Disegni di una diga tipica in ca a) planimetria e b) sezioni trasversali

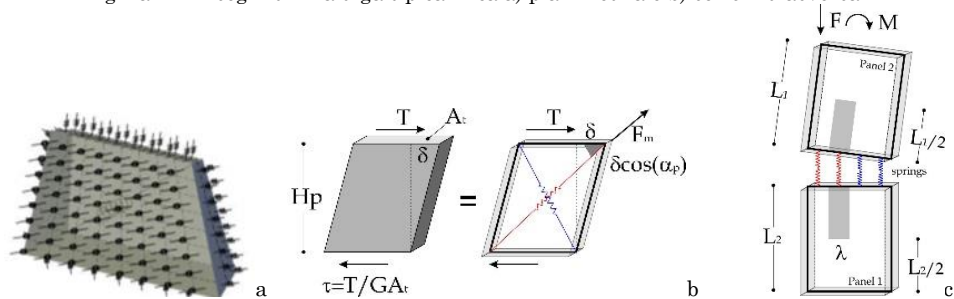


Figura 2 Macroelemento a) nella configurazione adottata e schemi della calibrazione b) a taglio e c) a flessione

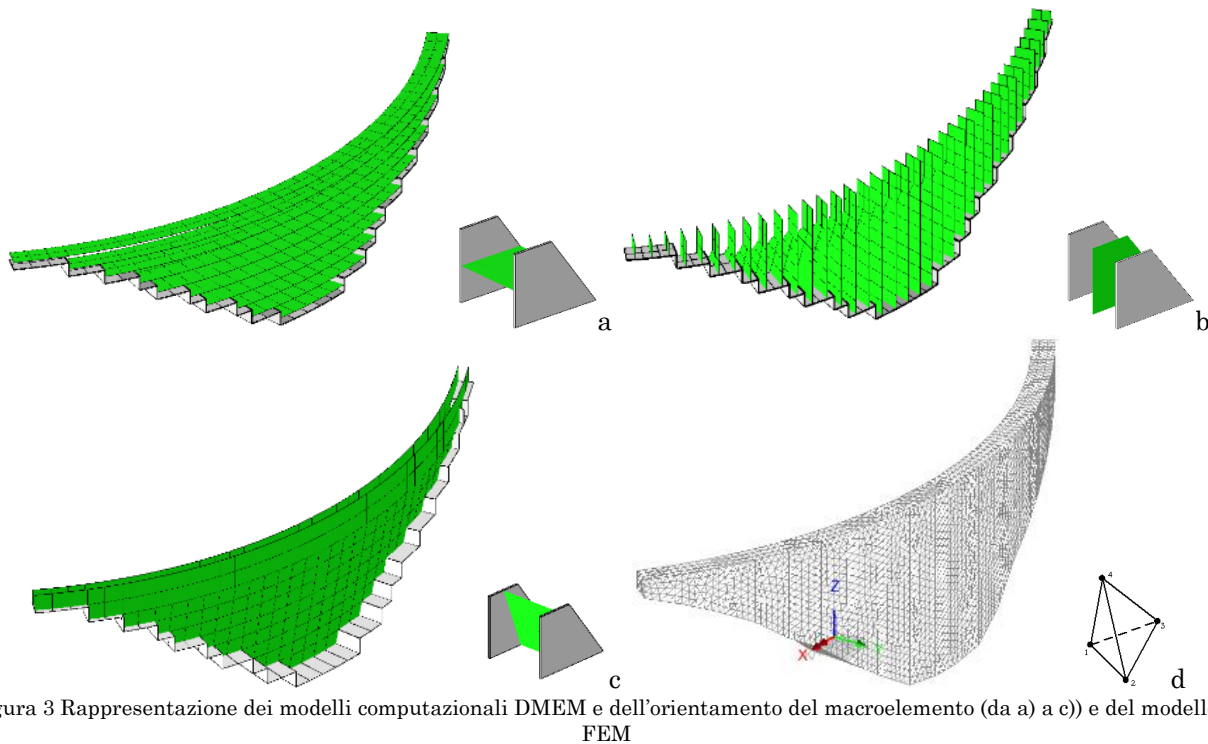
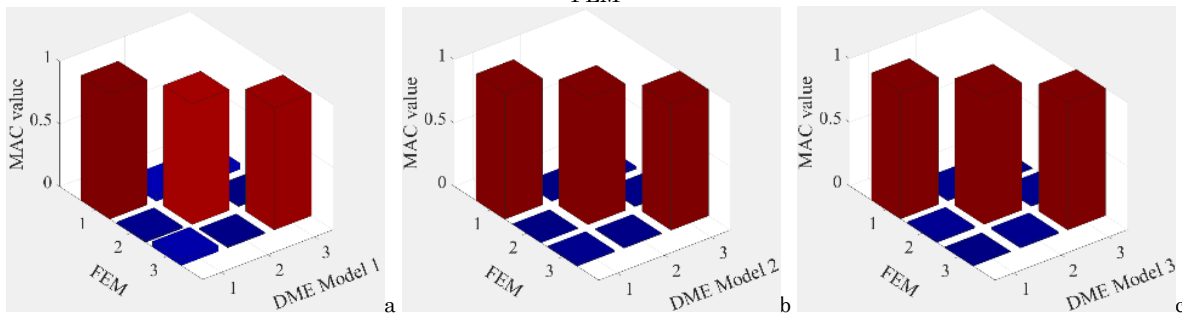


Figura 3 Rappresentazione dei modelli computazionali DMEM e dell'orientamento del macroelemento (da a) a c)) e del modello d) FEM



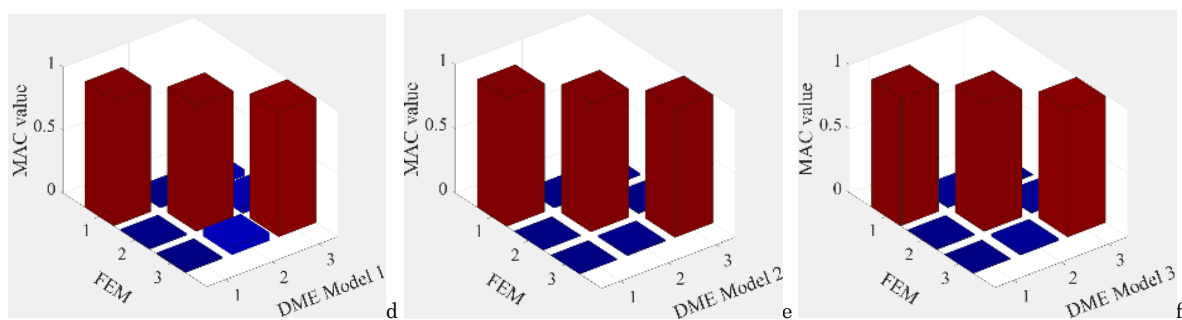


Figura 4 Matrici MAC nella condizione di bacino vuoto a) MOD1-FEM b)MOD2-FEM c) MOD3-FEM e bacino pieno d)MOD1-FEM e)MOD2-FEM e f) MOD3-FEM

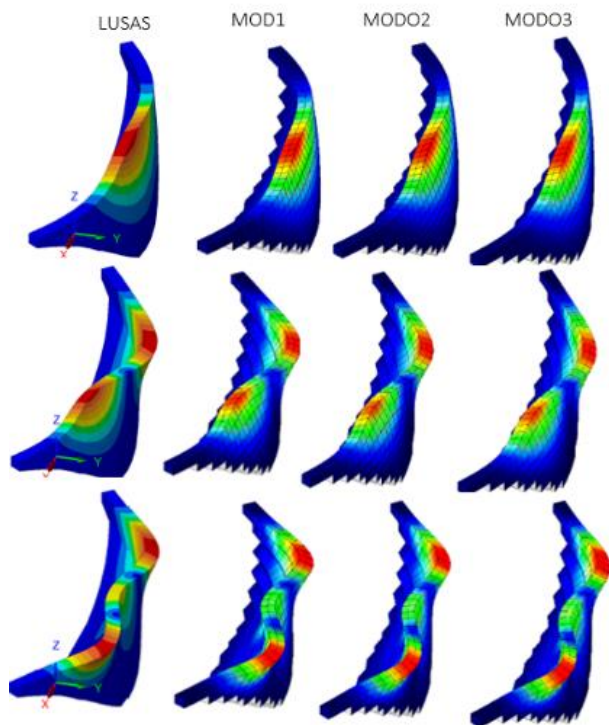


Figura 5 Confronto tra le forme modali calcolate con i diversi modelli.

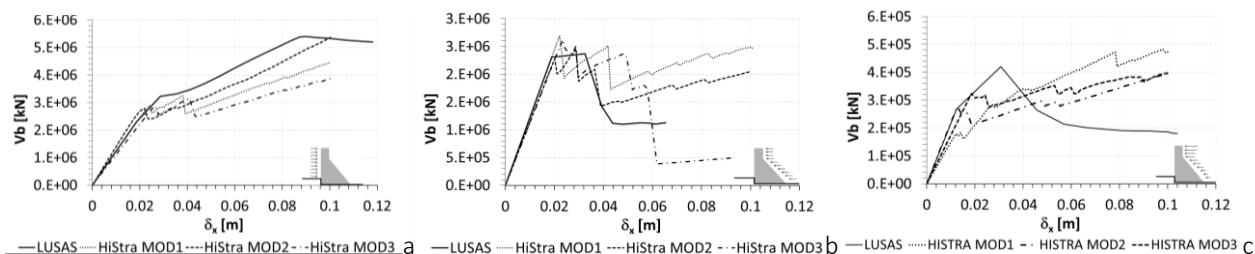


Figura 6 Curve di capacità diga vuota a) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione valle; b) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione monte; c) profilo di carico proporzionale al primo modo, direzione monte

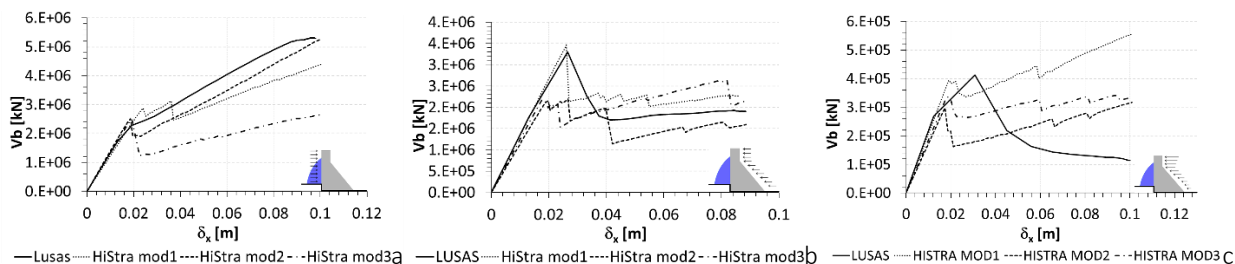


Figura 7 Curve di capacità diga piena a) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione valle; b) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione monte; c) profilo di carico proporzionale al primo modo, direzione monte

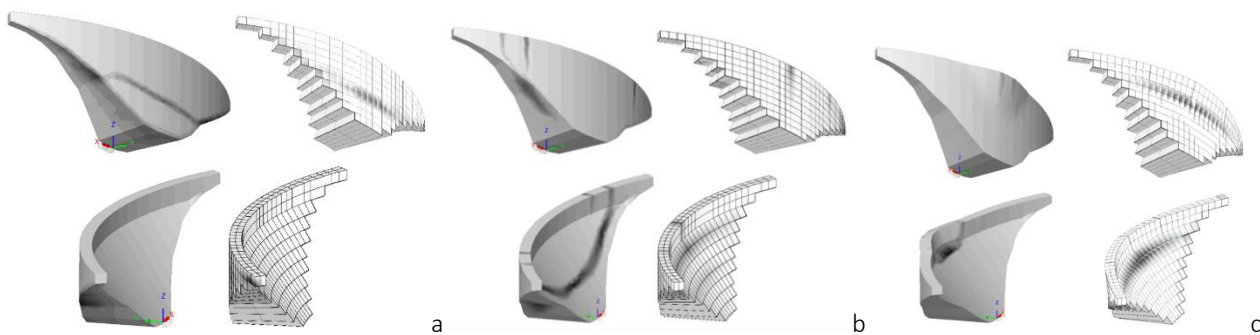


Figura 8 Mappe di danno a) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione valle; b) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione monte; c) profilo di carico proporzionale al primo modo, direzione monte

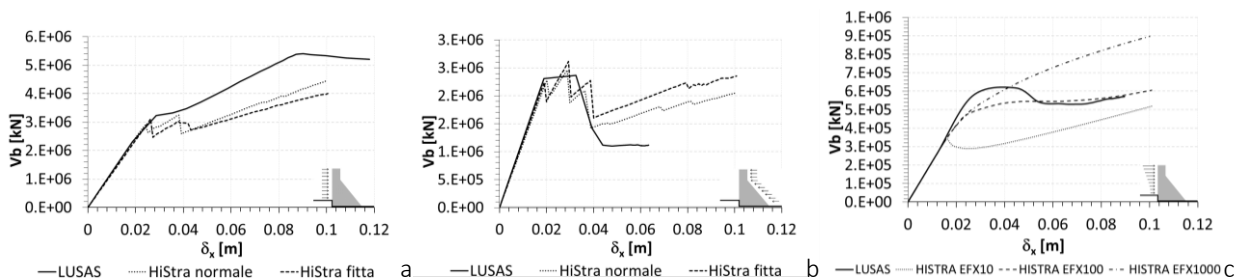


Figura 9 Analisi di sensitività influenza della mesh a) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione valle e b) profilo di carico proporzionale alle masse, direzione monte; c) influenza dell'energia di frattura profilo di carico proporzionale al primo modo, direzione valle