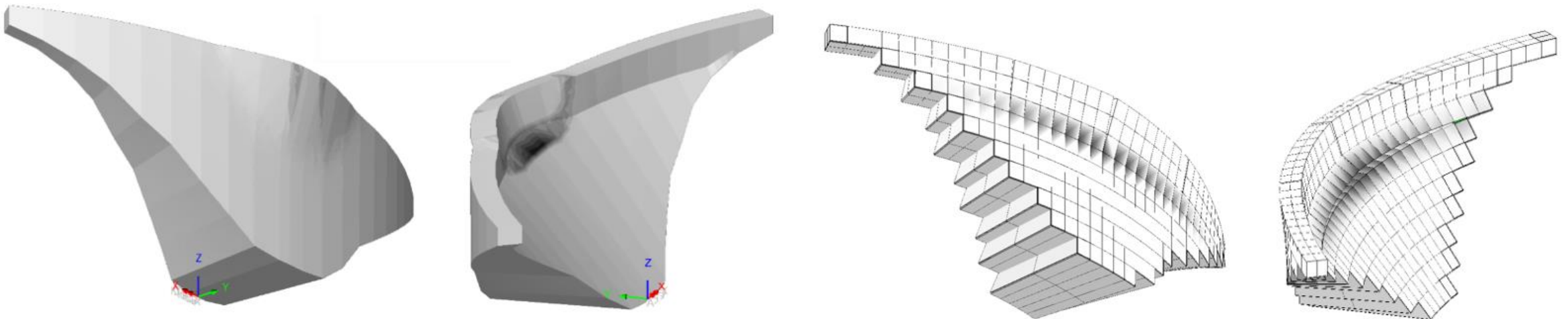


# APPLICAZIONE E VALIDAZIONE NUMERICA DEL DISCRETE MACRO ELEMENT METHOD DMEM PER LA STIMA DELLA RESISTENZA ALLE AZIONI ORIZZONTALI DI DIGHE

Antonino Pierdamiano Santangelo

Corso di Laurea in Ingegneria Civile Strutturale e Geotecnica  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura  
Università degli Studi di Catania



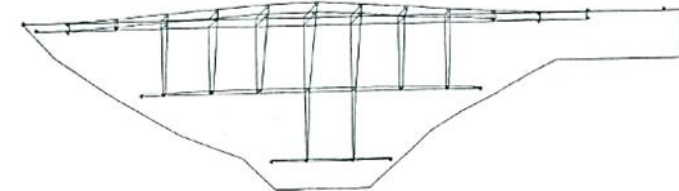
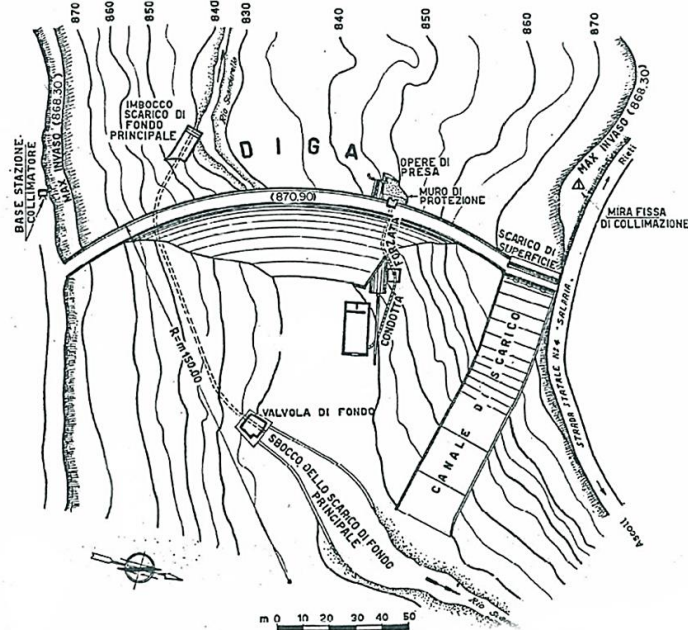
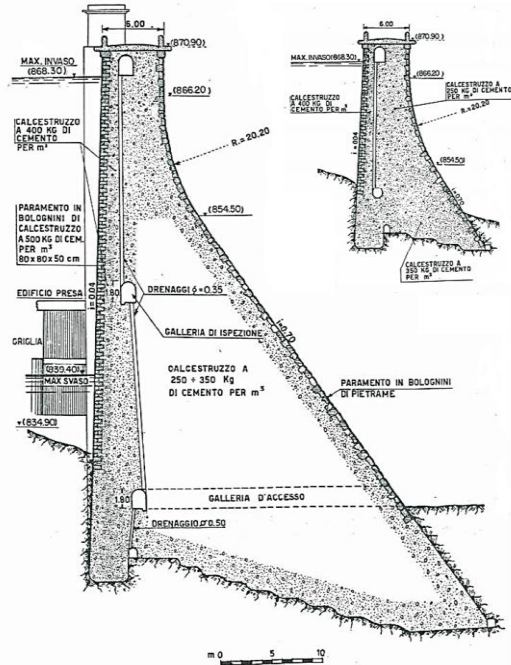
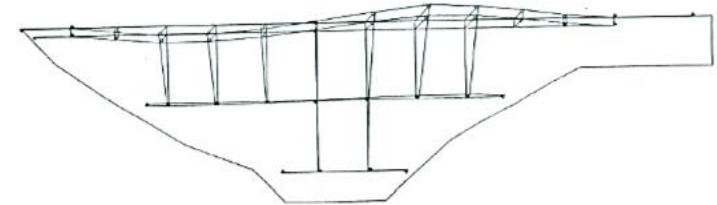
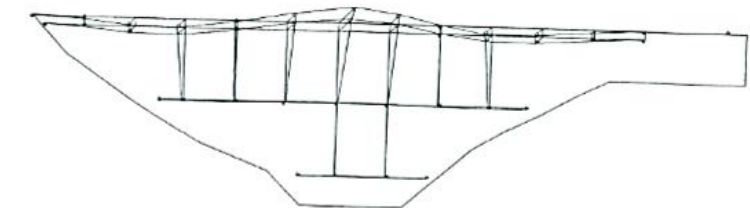
**Relatore** Prof.Ing. Ivo Calìo | **Correlatore** Ing. Ph.D. Giuseppe Occhipinti (IGAG-CNR) | **Revisore esterno** Ing. Ph.D. Vincenzo Marco Nicolosi (MIT)

## OBIETTIVI

- Adozione di modelli a macroelementi discreti (DMEM) per:
  - Risposta statica lineare
  - Risposta modale
  - Risposta statica non lineare
- Valutazione dell'influenza della deformazione a taglio nella risposta
- Verifica dell'influenza di parametri quali la densità di mesh ed energia di frattura

Il tutto è stato valutato su un modello benchmark e tramite confronto con modelli FEM non lineari

# CASO STUDIO: DIGA AD ARCO GRAVITA'


$$f_1 = 5.74 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 7.17 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 8.61 \text{ Hz}$$

## Geometria:

- **Altezza:** dal punto più depresso: **50 m**;
- **Sviluppo** coronamento: **200 m**;
- **Raggio** di curvatura: **150 m**;
- **Spessore** coronamento **6m**;

	Calcestruzzo
$E_s$ [MPa]	14500
$\nu$	0.16
$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2268
$f_{cm}$ [Mpa]	16.7
$f_{tm}$ [Mpa]	2

# INTRODUZIONE DEL MACROELEMENTO

L'approccio a **elementi discreti (DMEM)** si basa su uno schema meccanico equivalente in cui ogni elemento della muratura è modellato mediante un quadrilatero avente quattro bordi rigidi e un collegamento a taglio non lineare lungo la diagonale che conferisce una deformabilità al taglio nel piano, correlata ad un unico grado di libertà per ogni macroelemento.

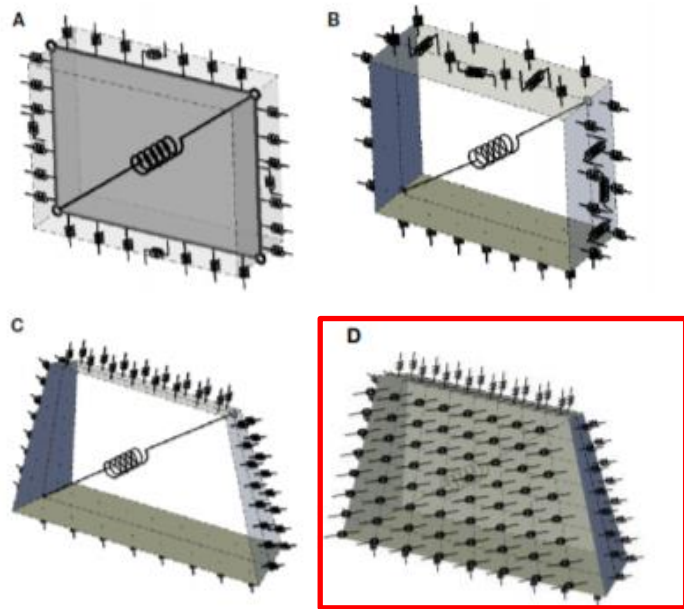
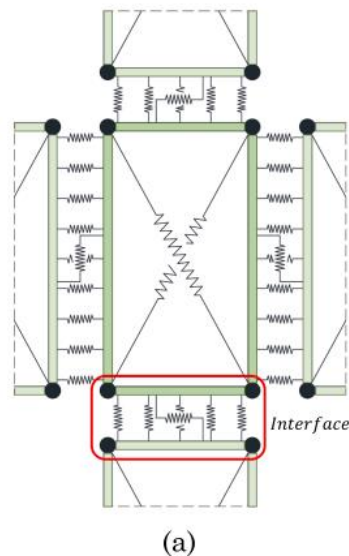


Figure 1: Advances in the mechanical scheme adopted in the proposed macro-element approach: (A) plane element [15], (B) regular three-dimensional element [16], (C) irregular 3D element [18], (D) irregular 3D element with interfaces on all faces.



1. Discrete Macro-Element Modeling approach: (a) two- and (b) three-dimensional mechanical configurations.

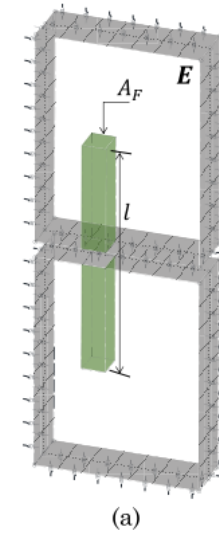
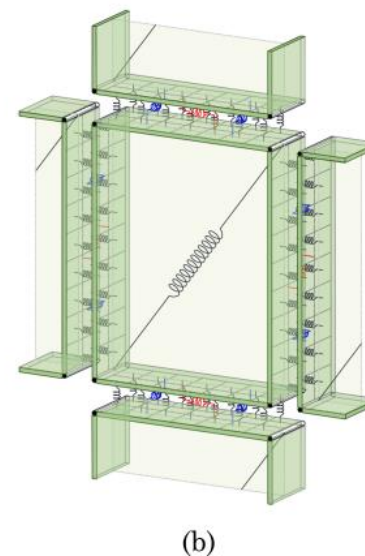
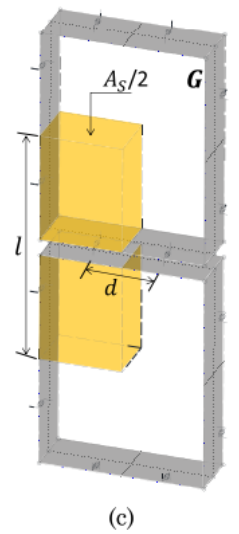
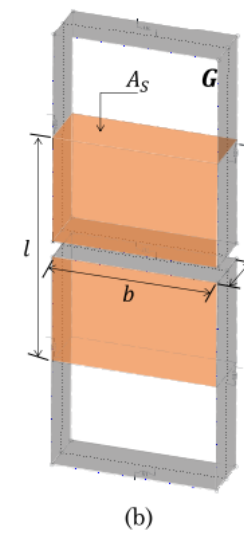


Fig. 2. Fiber calibration procedure for: (a) transversal links, (b) in-plane and (c) out of plane sliding links.





I risultati ottenuti da questo studio sono in buon accordo con quelli ottenuti nei modelli FEM, che dimostrano l'applicabilità di questa strategia per scopi pratici con una significativa riduzione del costo computazionale delle analisi.

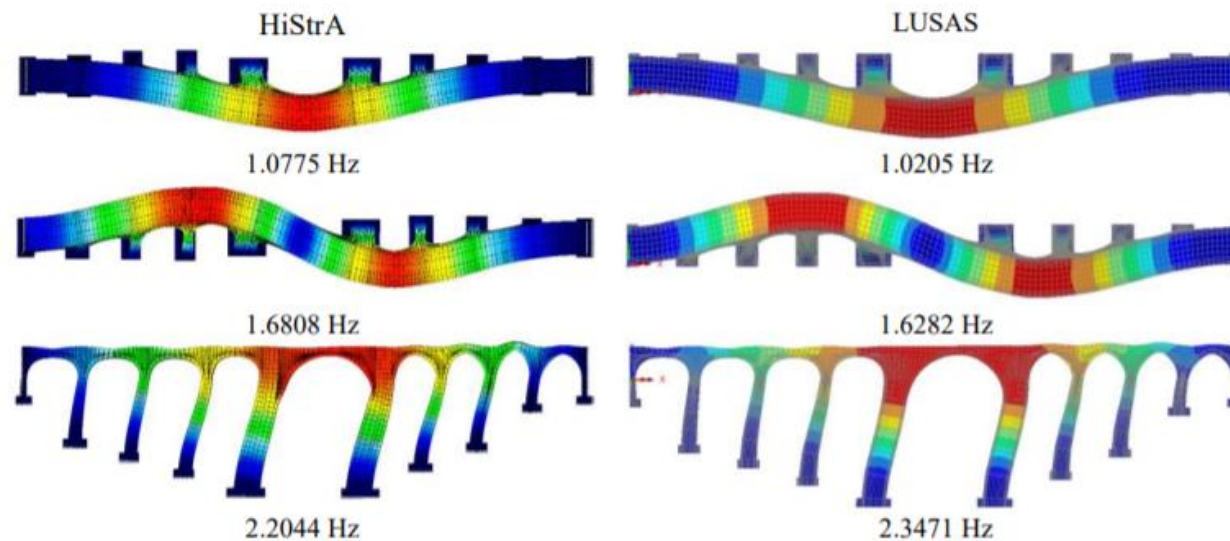


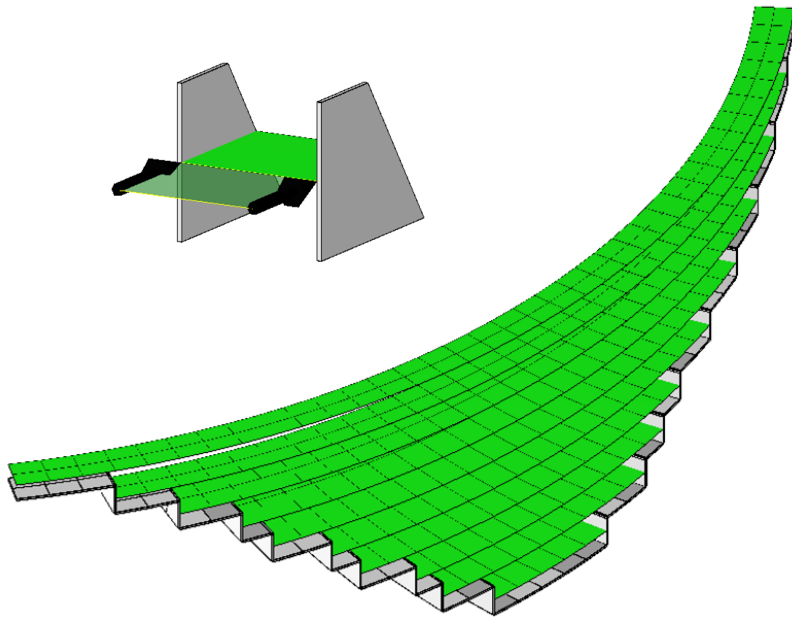
Figure 5: HiStrA (DMEM) versus LUSAS (FEM). Comparison between the first three vibration frequencies and the corresponding vibration modes.

### Bibliografia sintetica di riferimento

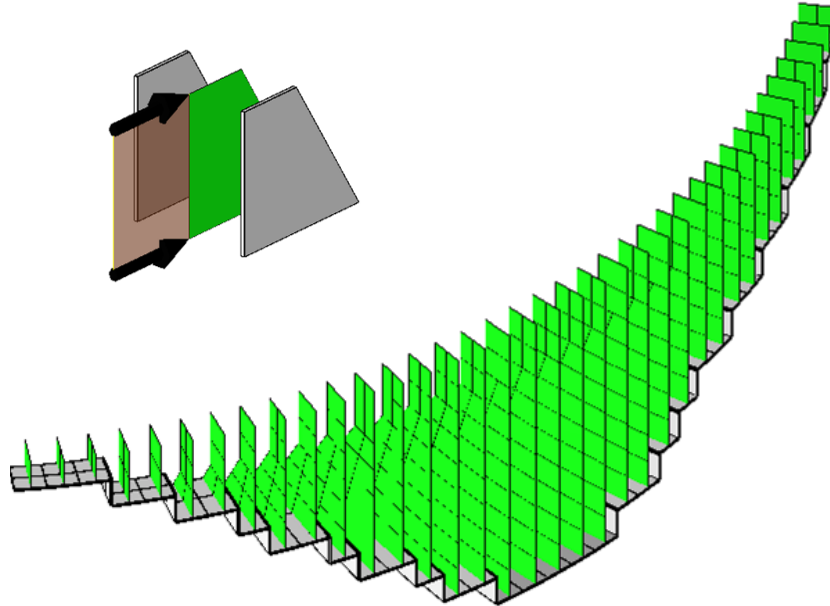
- Caliò, M. Marletta, B. Pantò, A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings, *Engineering Structures*, 40, 327- 338, 2012.
- B. Pantò, F. Cannizzaro, I. Caliò, P.B. Lourenço, Numerical and experimental validation of a 3D macro-model element method for the in-plane and out-of-plane behaviour of unreinforced masonry walls, *International Journal of Architectural Heritage*, 11(7), 946- 964, 2017.
- B. Pantò, L. Giresini, M. Sassu, I. Caliò, Non linear modeling of masonry churches through a discrete macro-element approach, *Earthquake and Structures*, 12(2), 223-236, 2017.
- B.Pantò, F.Cannizzaro, S.Caddemi, I.Caliò, 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches, *Advances in Engineering Software*, 97, 40-59, 2016.
- S. Caddemi, I. Caliò, F. Cannizzaro and B. Pantò, New Frontiers on Seismic Modeling of Masonry Structures, *Front. Built Environ*, 2017.
- [20] F. Cannizzaro, B. Pantò, S. Caddemi, I. Caliò, A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches, *Engineering Structures*, 168, 243-256, 2018.
- Seismic vulnerability of URM structures based on a Discrete Macro-Element Modeling (DMEM) approach César Chácaraa, Francesco Cannizzaro , Bartolomeo Pantò , Ivo Caliò , Paulo B. Lourenço, *Engineering Structures*, 2019



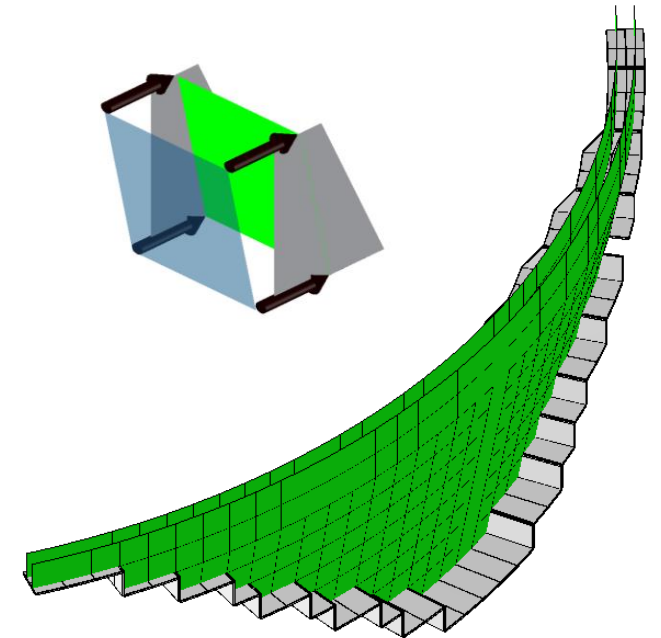
## MODELLAZIONE A MACROELEMENTI



MOD1 - Orizzontale



MOD2 - Trasversale

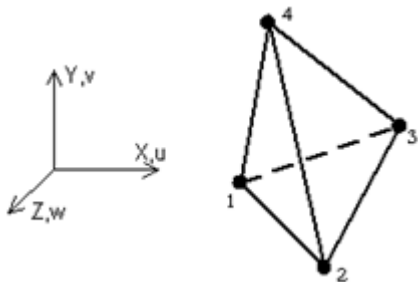
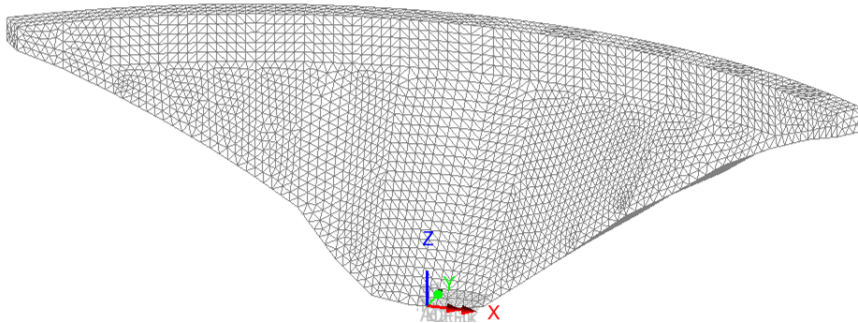


MOD3 - Verticale

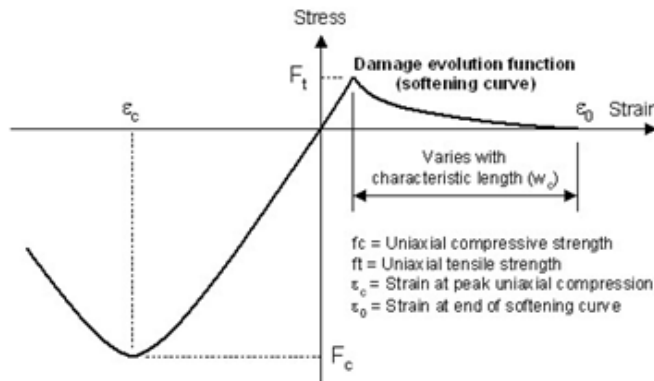
**Gradi di libertà = 2772**

# LUSAS

# MODELLAZIONE FEM



Elementi tetraedrici tipo TH4 lineari.



Legame costitutivo Model 109

Concrete (Nonlinear)	
Concrete	Smoothed multi-crack (model 109) <span>Advanced...</span>
Creep	None <span>Options...</span>
Shrinkage	None
Component	Value
Young's modulus	11,6E6
Poisson's ratio	0,16
Mass density	2,268
Uniaxial compressive strength	16,7E3
Uniaxial tensile strength	2,0E3
Strain at peak uniaxial compression	2,2E-3
Fracture energy per unit area	0,13

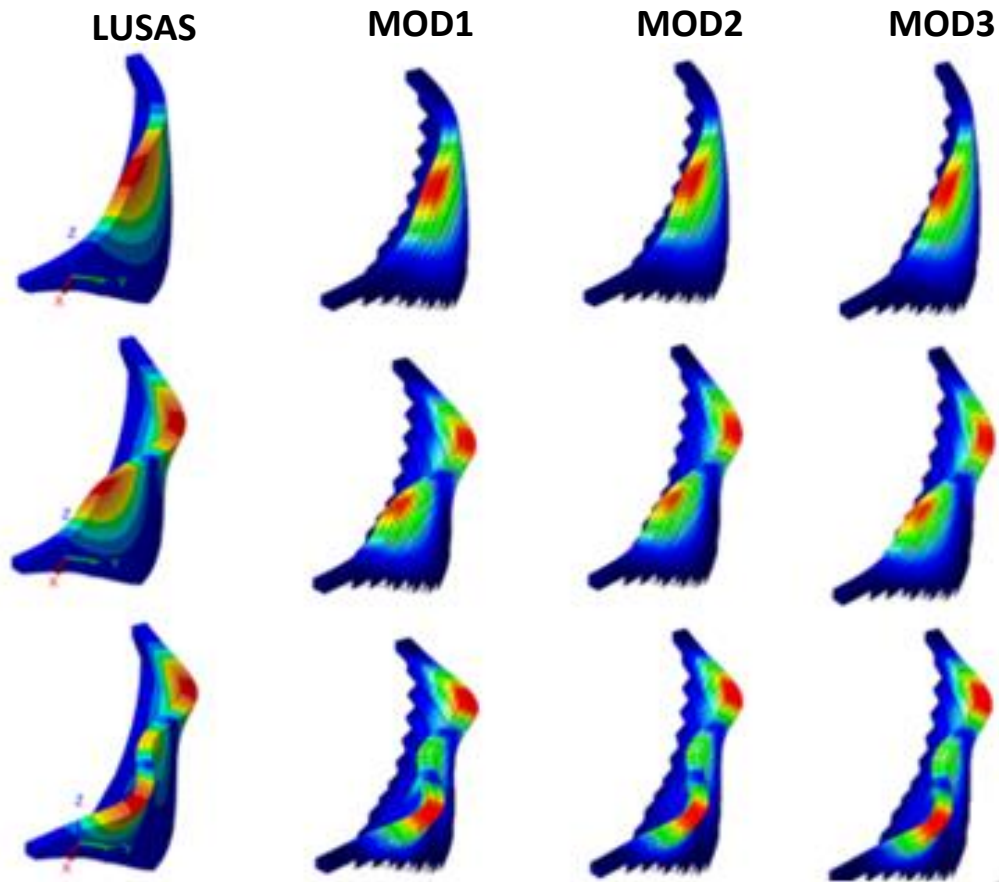
**Gradi di libertà = 68490**

gdl di Histra=4% dei gdl di LUSAS

## MODEL UPDATING E ANALISI AUTOVALORI ED AUTOVETTORI

Tutti i modelli sono stati calibrati mediante un processo iterativo nel quale al variare del modulo di Young (E) si è valutato il valore della funzione obiettivo in termini di frequenze, per la diga piena considerando la presenza dell'acqua come massa aggiunta.

$$O(k_E) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\omega_j(k_E) - \tilde{\omega}_j}{\tilde{\omega}_j} \right)^2}$$



	IN PRESENZA DI ACQUA					IN ASSENZA DI ACQUA			
	TARGET	LUSAS	MOD1	MOD2	MOD3	LUSAS	MOD1	MOD2	MOD3
E[Mpa]		11687,5	13050,0	11600,0	12400,0	11687,5	13050,0	11600,0	12400,0
f <sub>1</sub> [Hz]	5,737	5,625	5,556	5,746	5,619	6,272	6,108	6,248	6,128
f <sub>2</sub> [Hz]	7,172	7,163	7,229	7,304	7,180	7,781	7,756	7,723	7,638
f <sub>3</sub> [Hz]	8,606	8,722	8,788	8,769	8,714	9,364	9,378	9,180	9,184
O			0,01708	0,02960	0,00274		0,13729	0,13517	0,11566
s[mm]		1,268	1,969	1,468	1,890				
Δs[%]			55,30%	15,78%	49,13%				

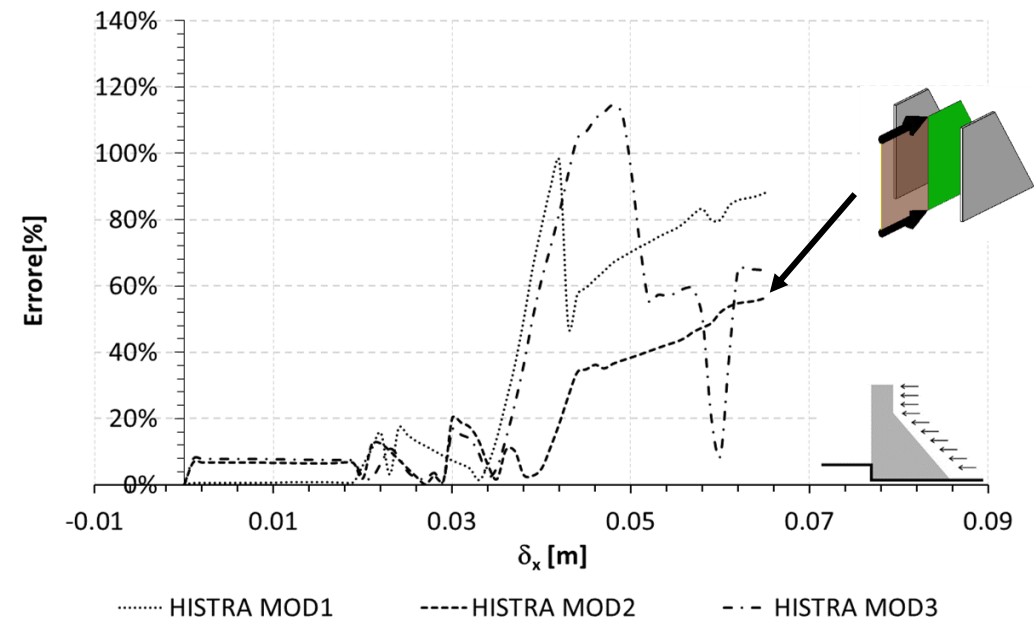
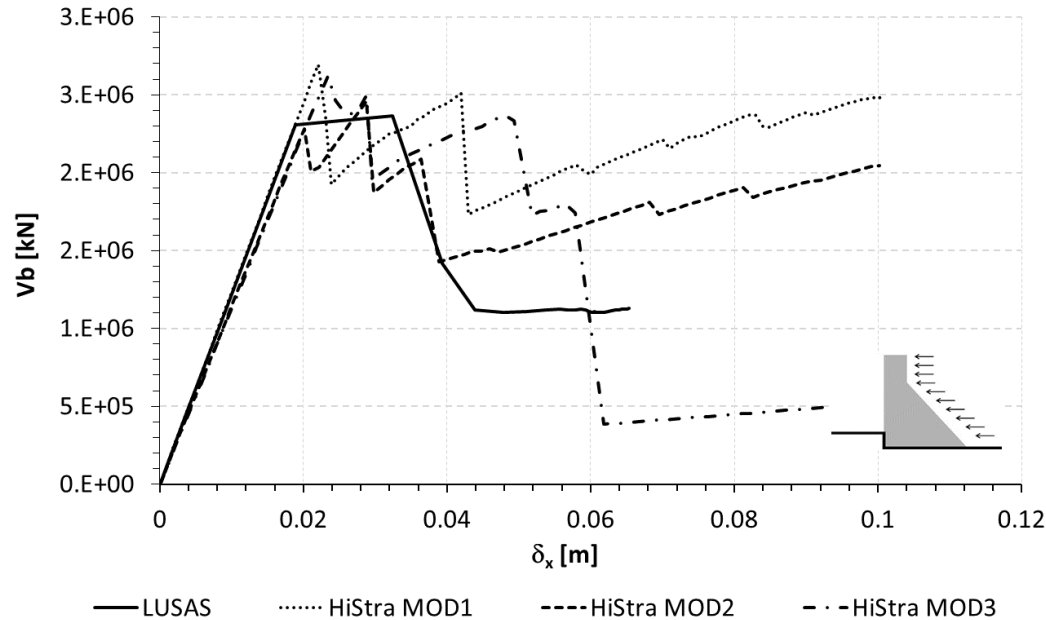
Incremento di frequenza considerando la diga vuota

INCREMENTO FREQUENZA				
	LUSAS	MOD1	MOD2	MOD3
f <sub>1</sub> [Hz]	10,31%	9,03%	8,03%	8,31%
f <sub>2</sub> [Hz]	7,93%	6,79%	5,42%	5,99%
f <sub>3</sub> [Hz]	6,85%	6,29%	4,48%	5,12%

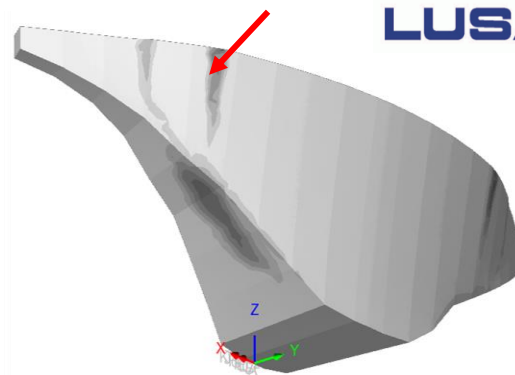
I risultati ottenuti con i modelli DMEM si sovrappongono apprezzabilmente a quelli ottenuti con modello FEM.



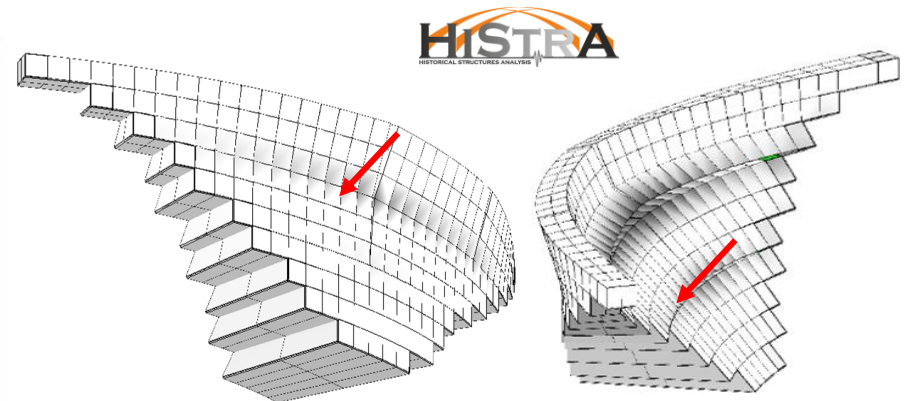
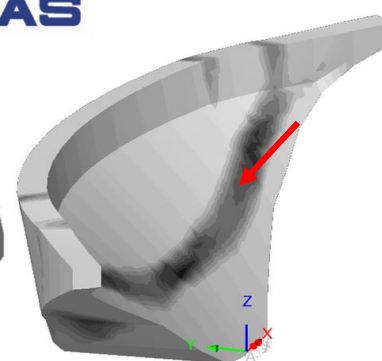
## ANALISI: DIGA VUOTA - PROFILO DI CARICO PROPORZIONALE ALLE MASSE - DIREZIONE MONTE



Migliore sovrapposizione dei risultati per il **modello 2** in campo inelastico. In termini di rigidezze non si notano differenze tali da determinare una differente risposta dinamica o statica.

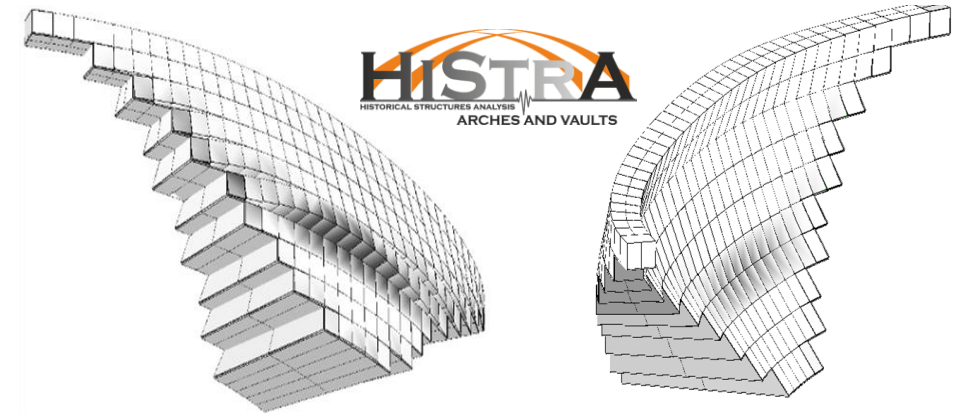
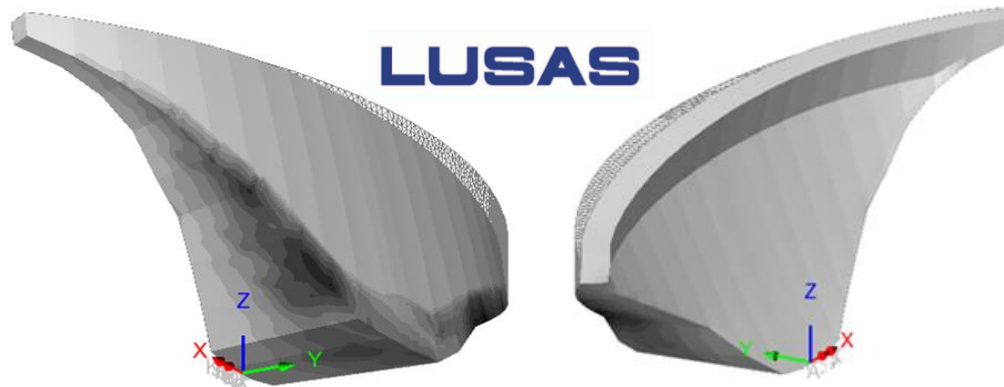
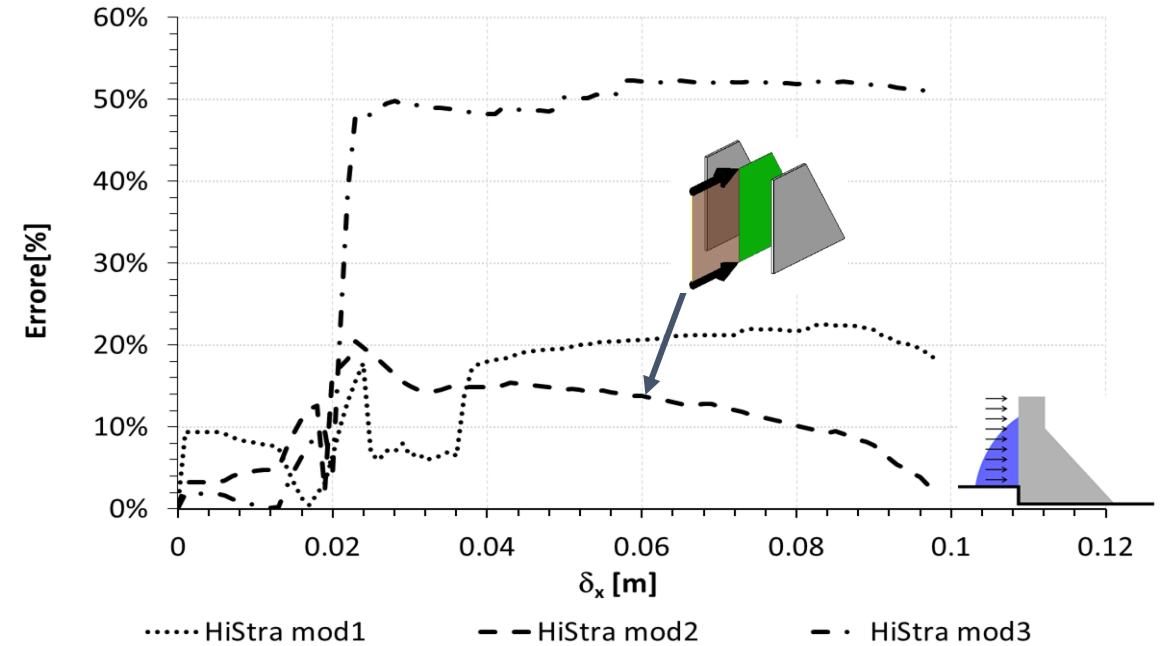
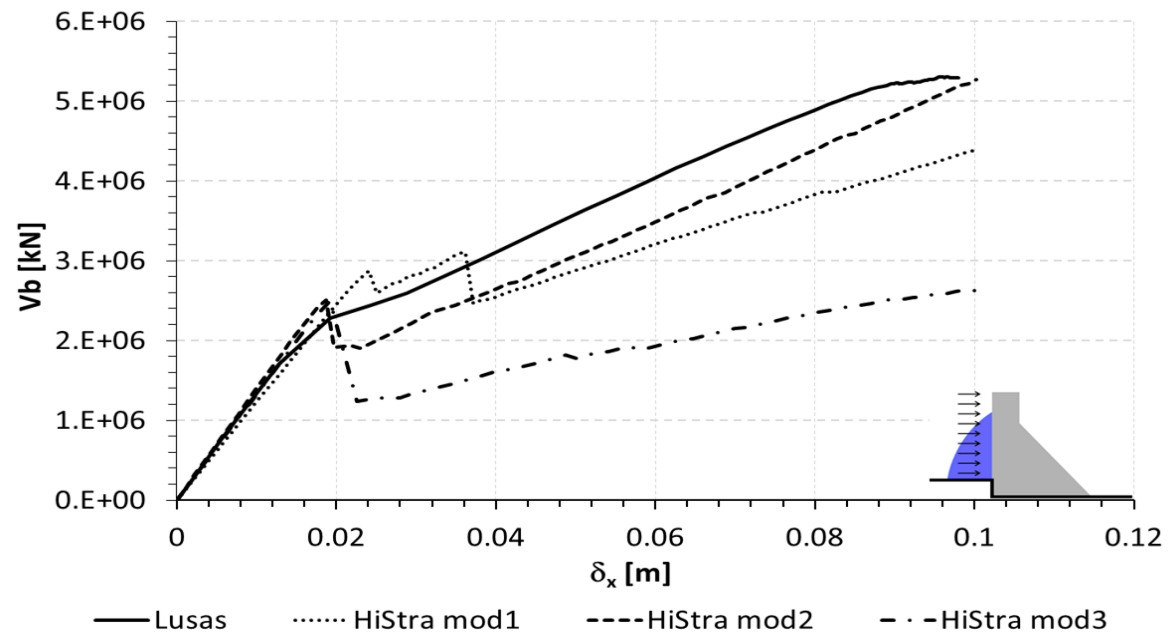


LUSAS

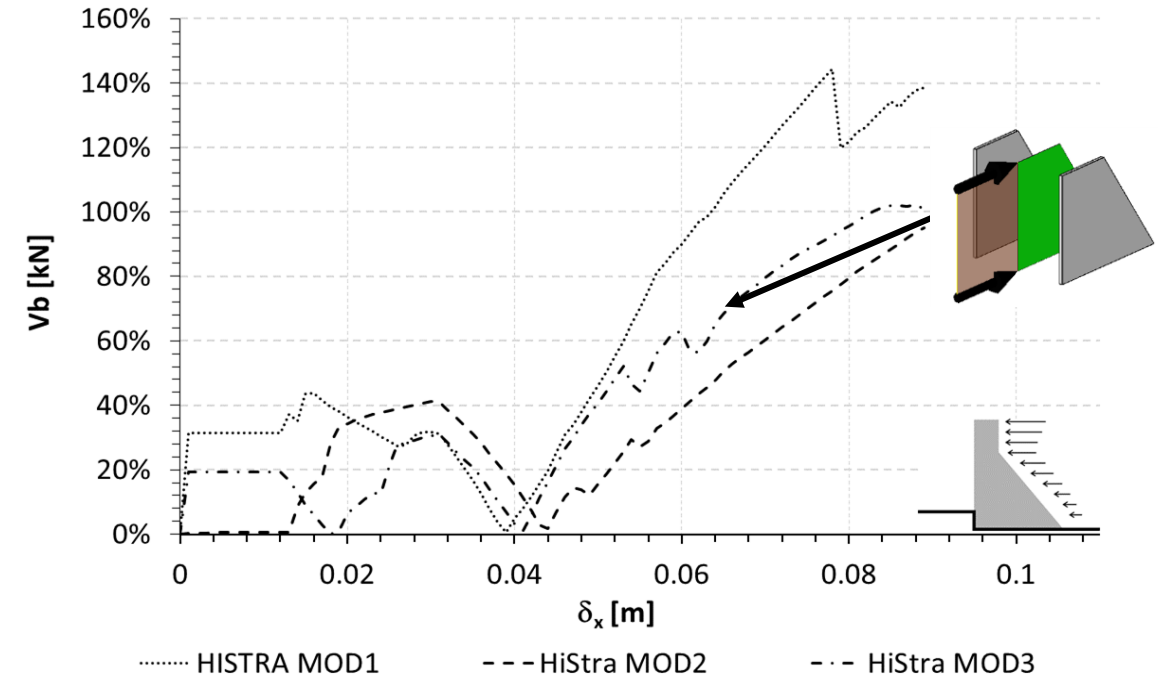
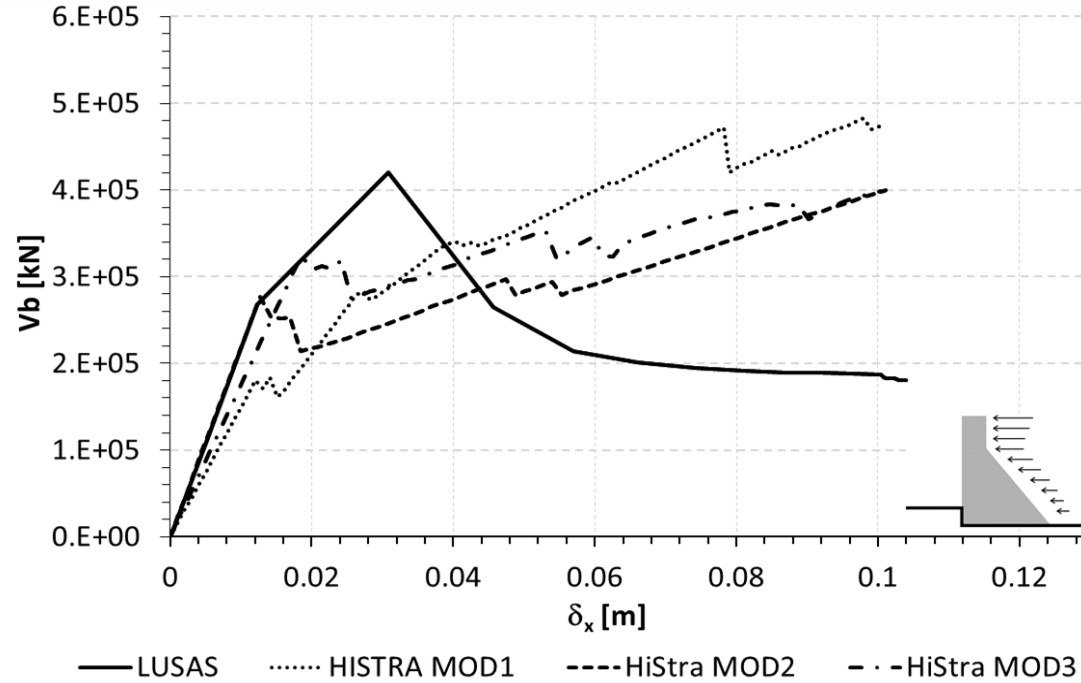


HISTRA

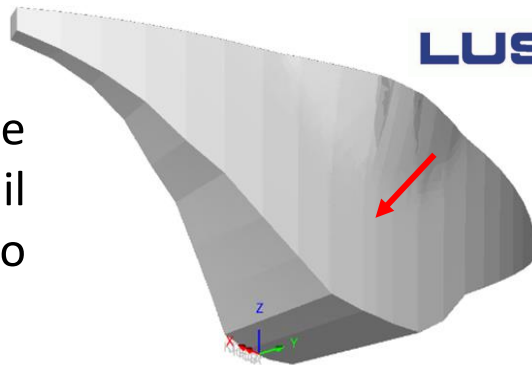
## ANALISI : DIGA PIENA - PROFILO DI CARICO PROPORZIONALE ALLE MASSE - DIREZIONE VALLE



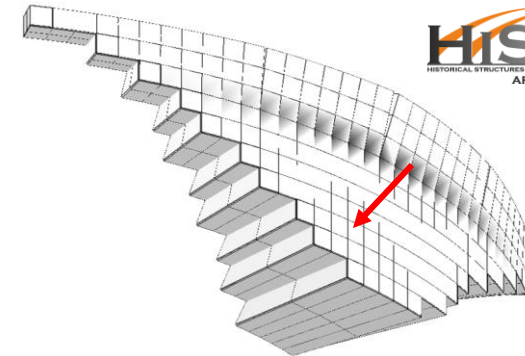
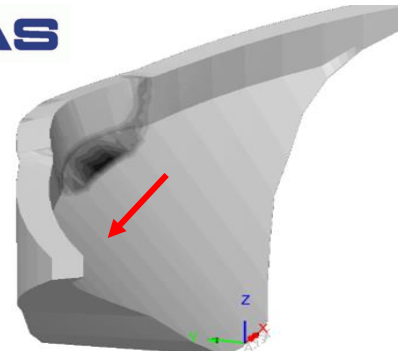
## ANALISI : DIGA VUOTA - PROFILO DI CARICO PROPORZIONALE AL I MODO - DIREZIONE MONTE



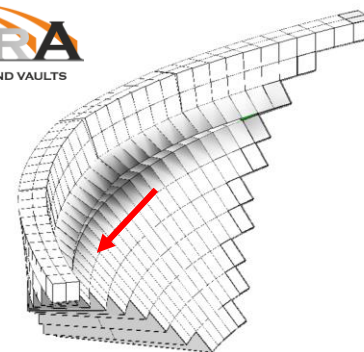
migliore sovrapposizione dei risultati per il modello 2 in campo inelastico.



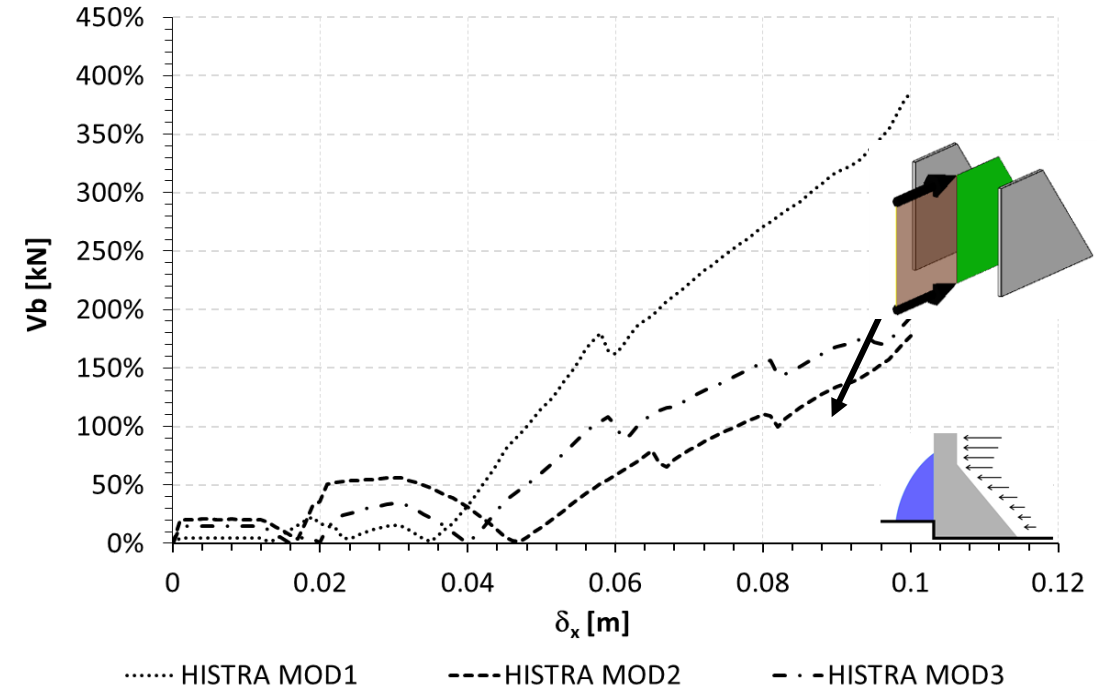
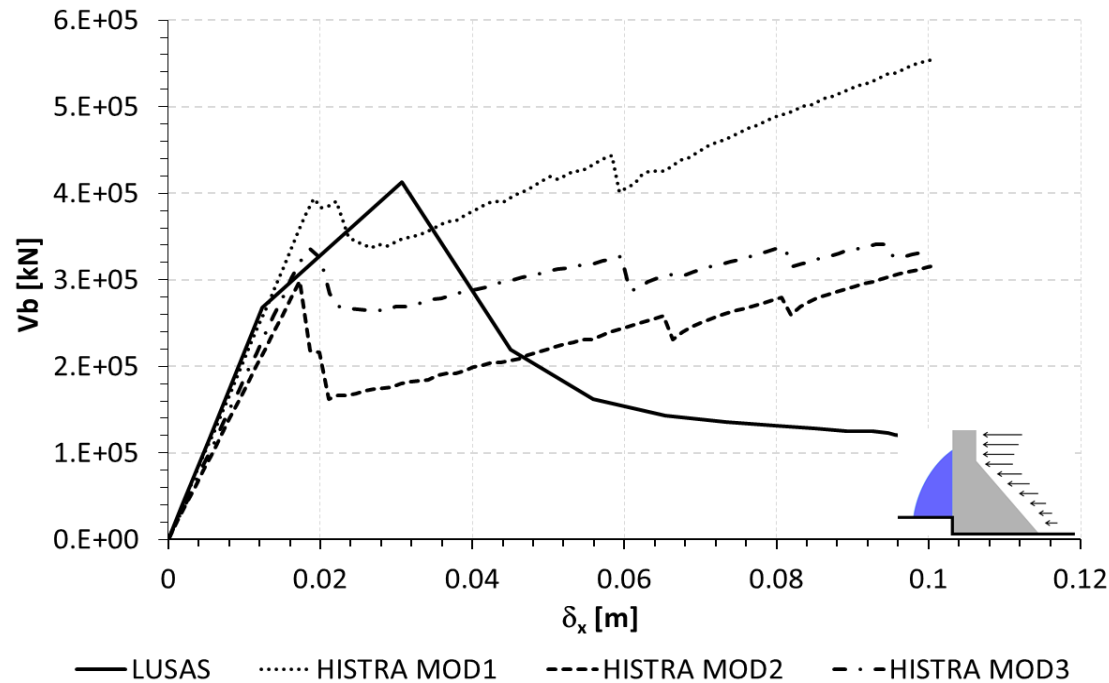
LUSAS



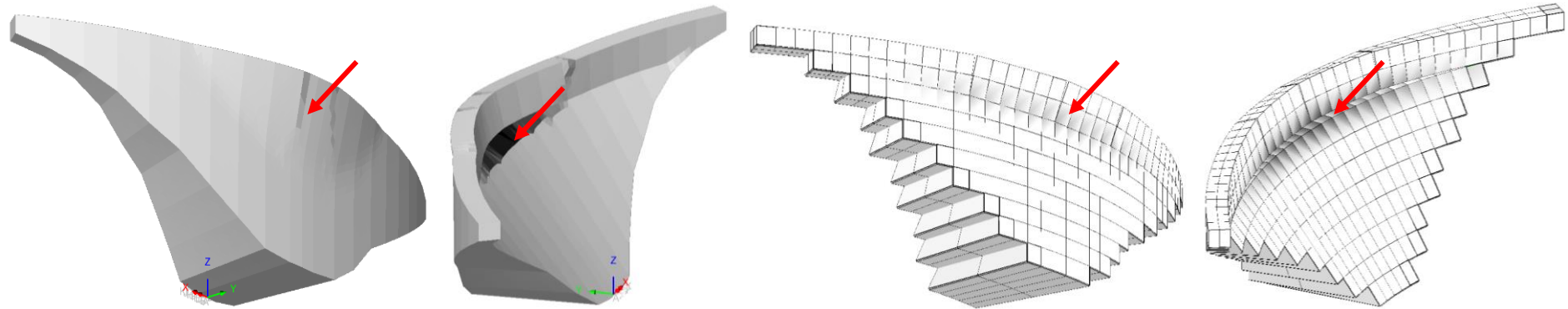
HISTRA  
HISTORICAL STRUCTURES ANALYSIS  
ARCHES AND VAULTS



## ANALISI : DIGA PIENA - PROFILO DI CARICO PROPORZIONALE AL I MODO - DIREZIONE MONTE

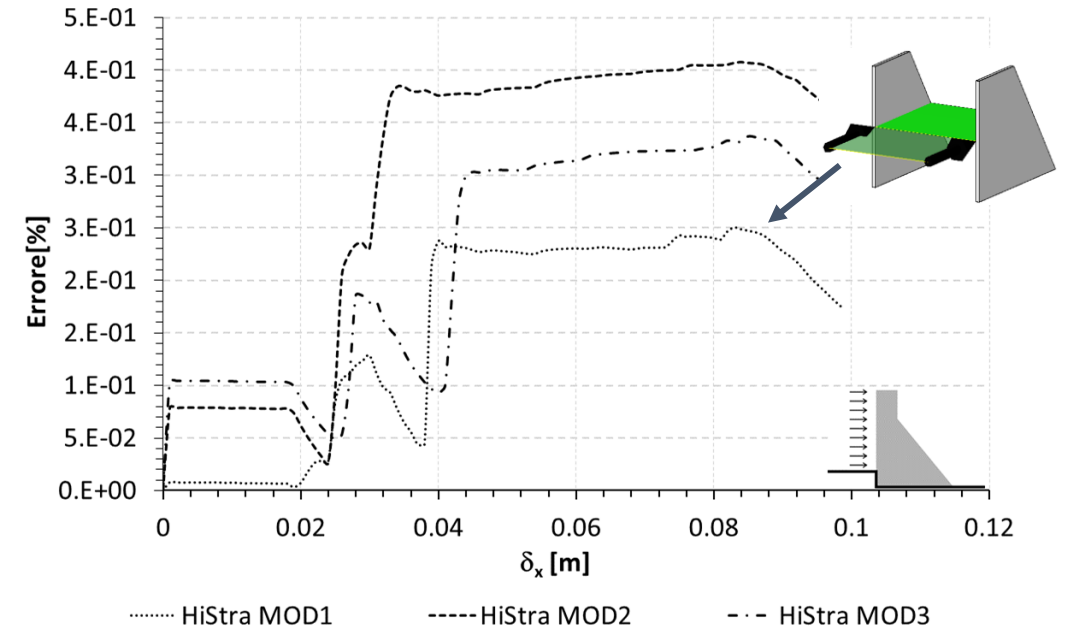
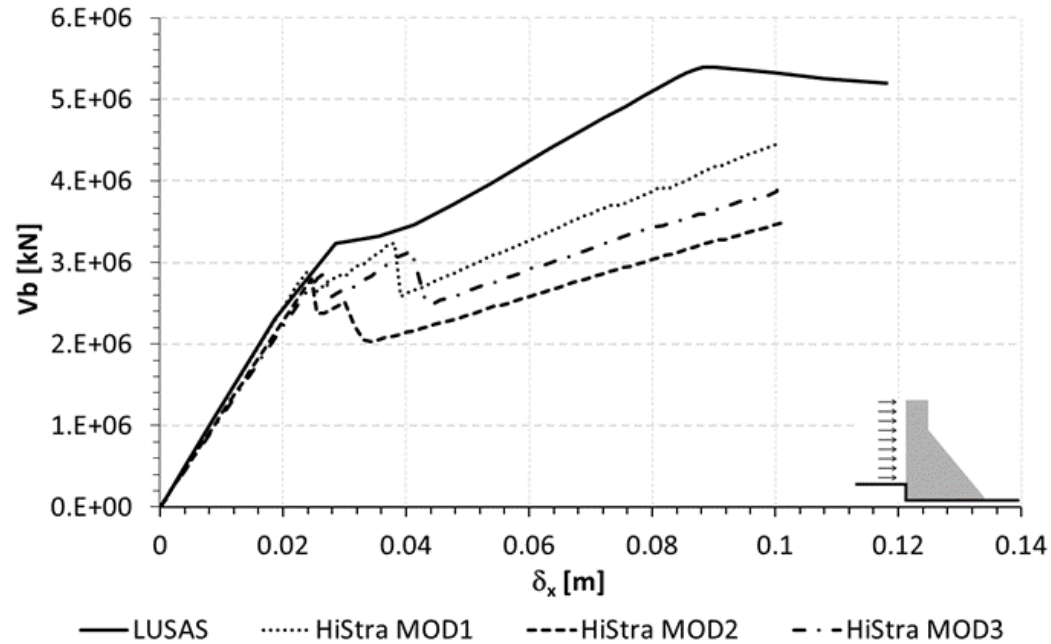


migliore sovrapposizione dei risultati per il modello 2 in campo inelastico.

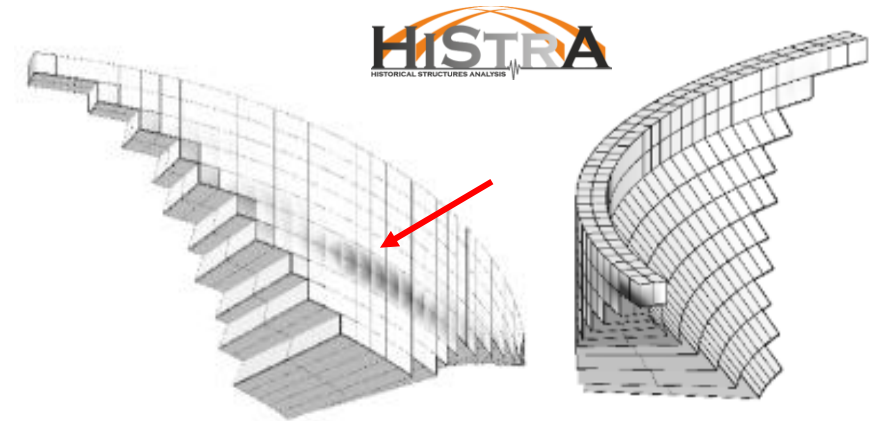
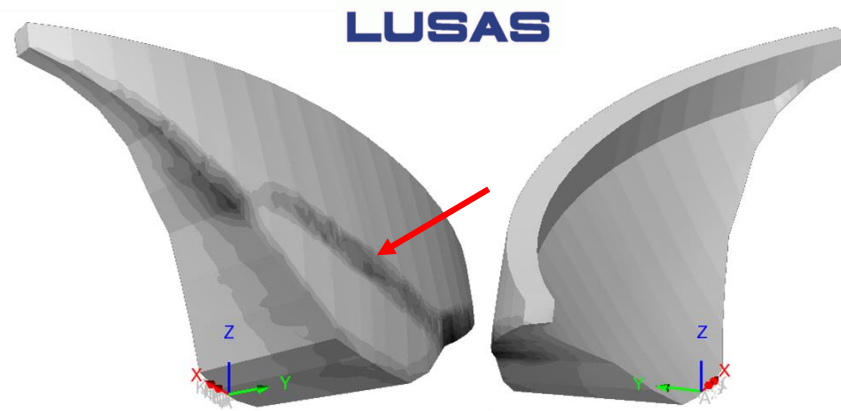




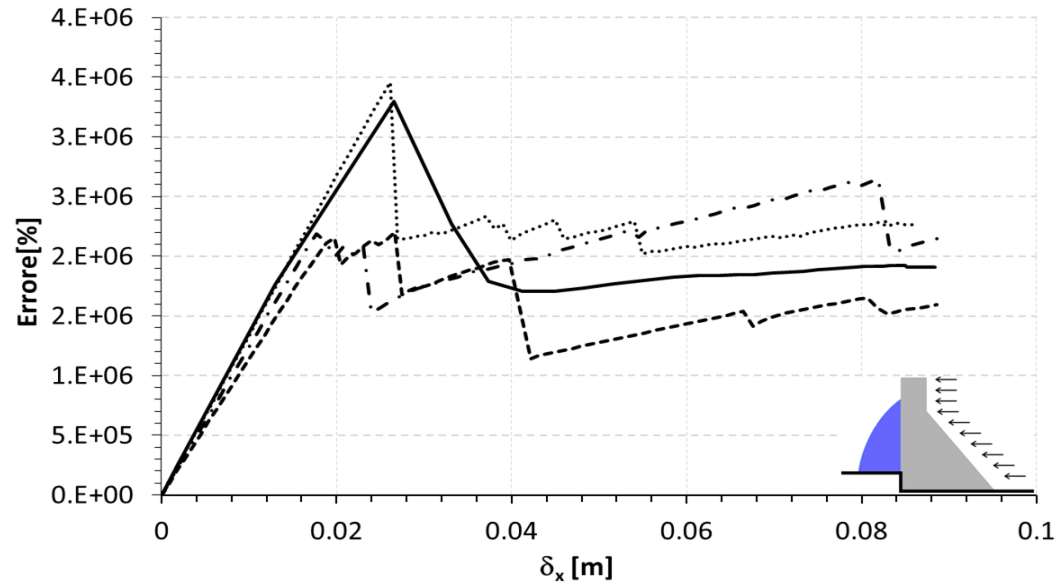
## ANALISI : DIGA VUOTA - PROFILO DI CARICO PROPORZIONALE ALLE MASSE - DIREZIONE VALLE



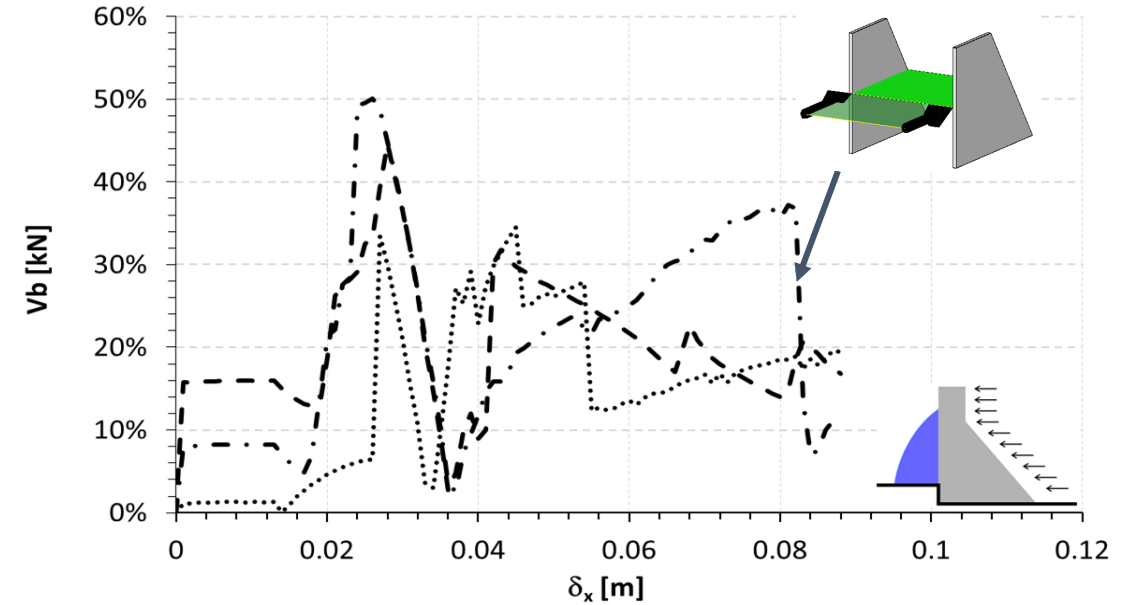
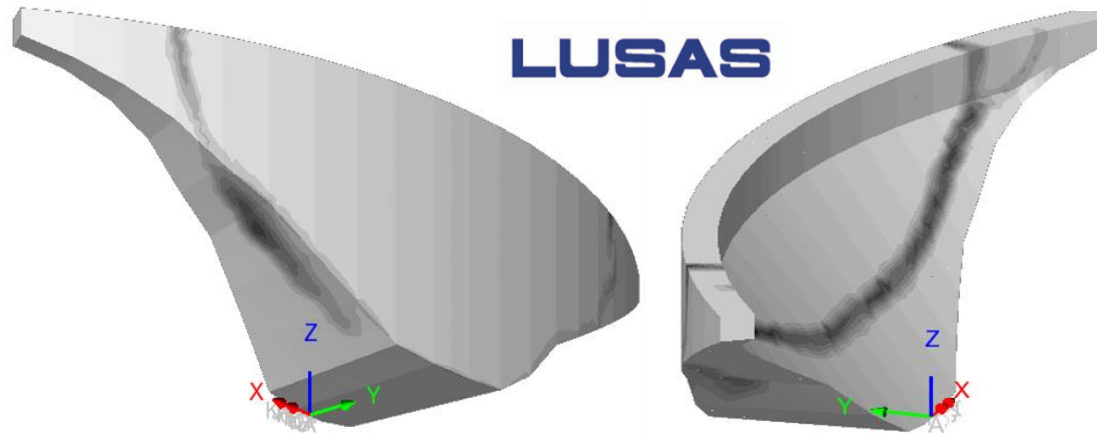
L'errore si mantiene minore nel **modello 1** individuando anche una migliore corrispondenza in termini di rigidezze elastiche.



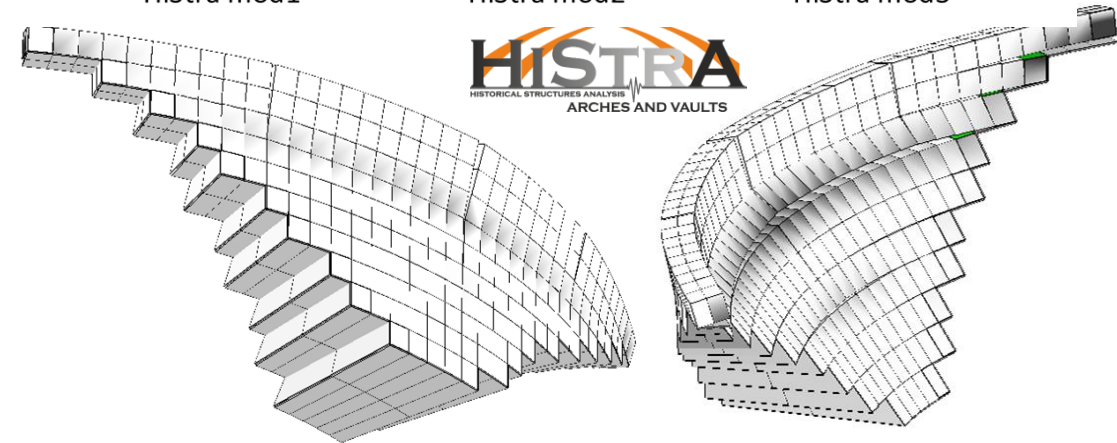
## ANALISI : DIGA PIENA - PROFILO DI CARICO PROPORZIONALE ALLE MASSE - DIREZIONE MONTE



— LUSAS    ..... HiStra mod1    ---- HiStra mod2    - · - HiStra mod3



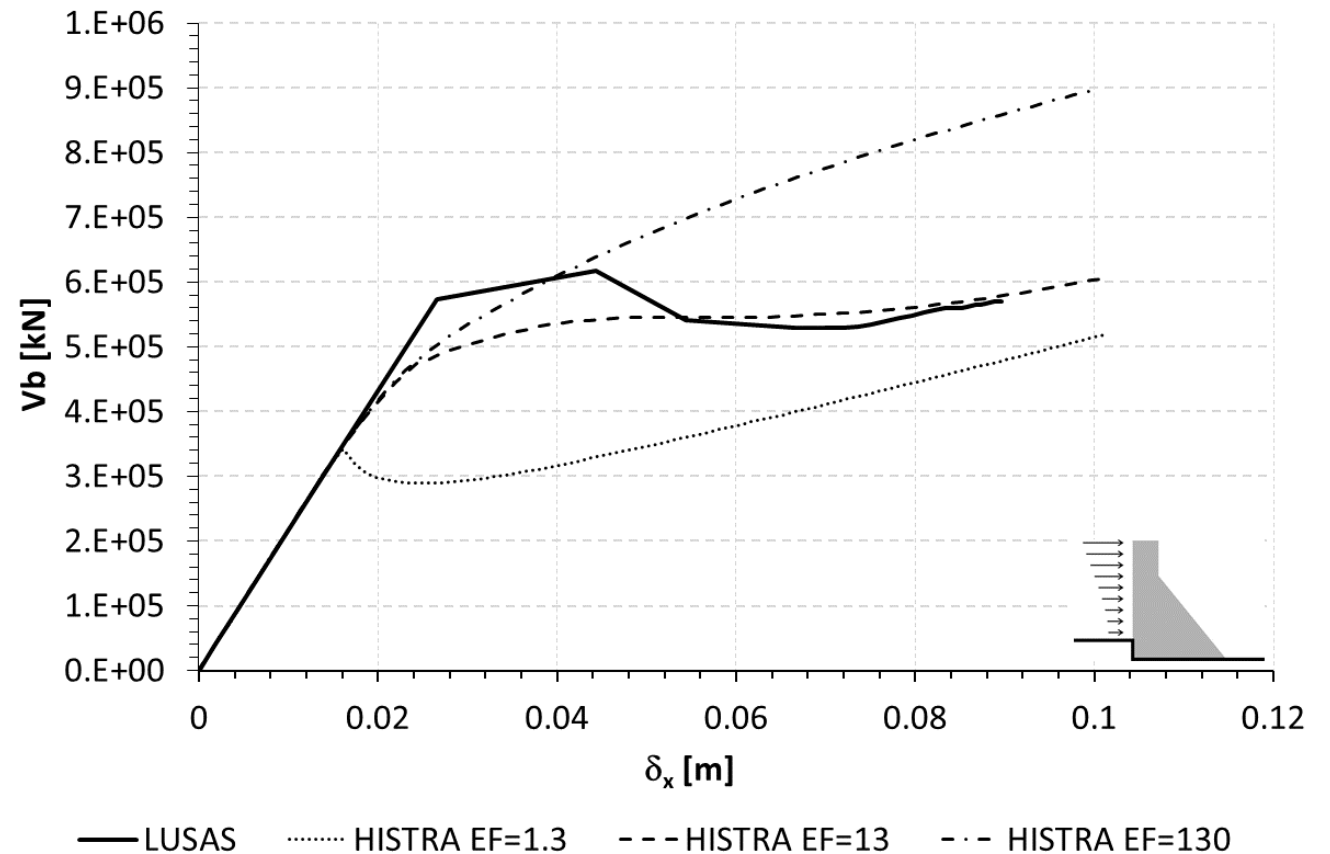
..... HiStra mod1    ---- HiStra mod2    - · - HiStra mod3



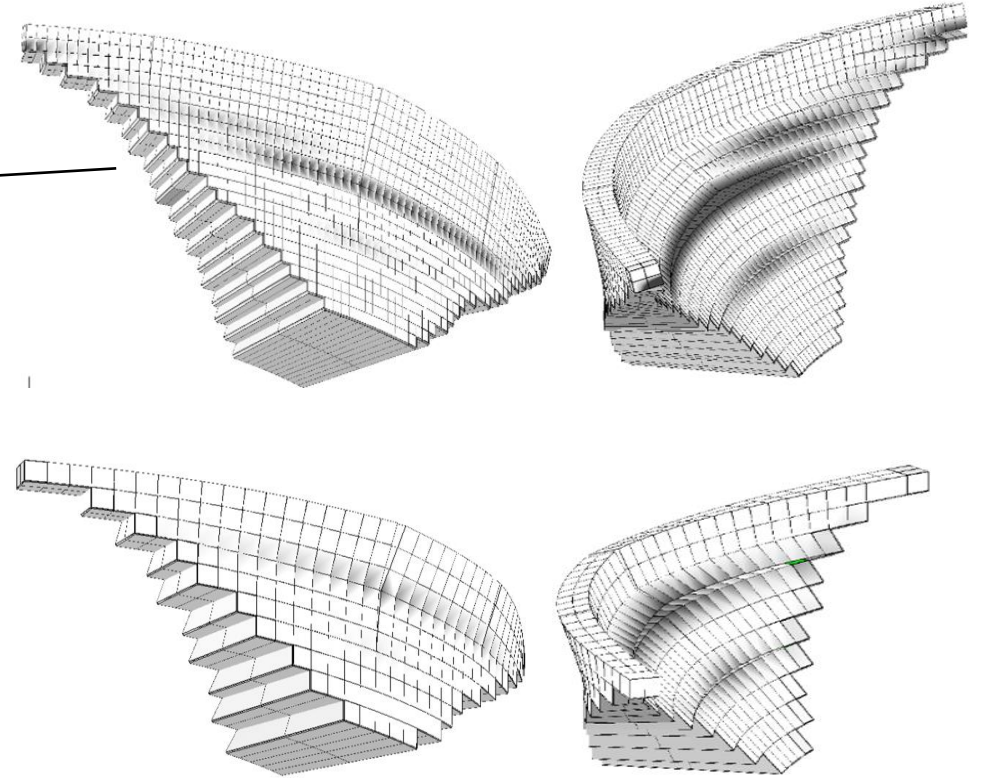
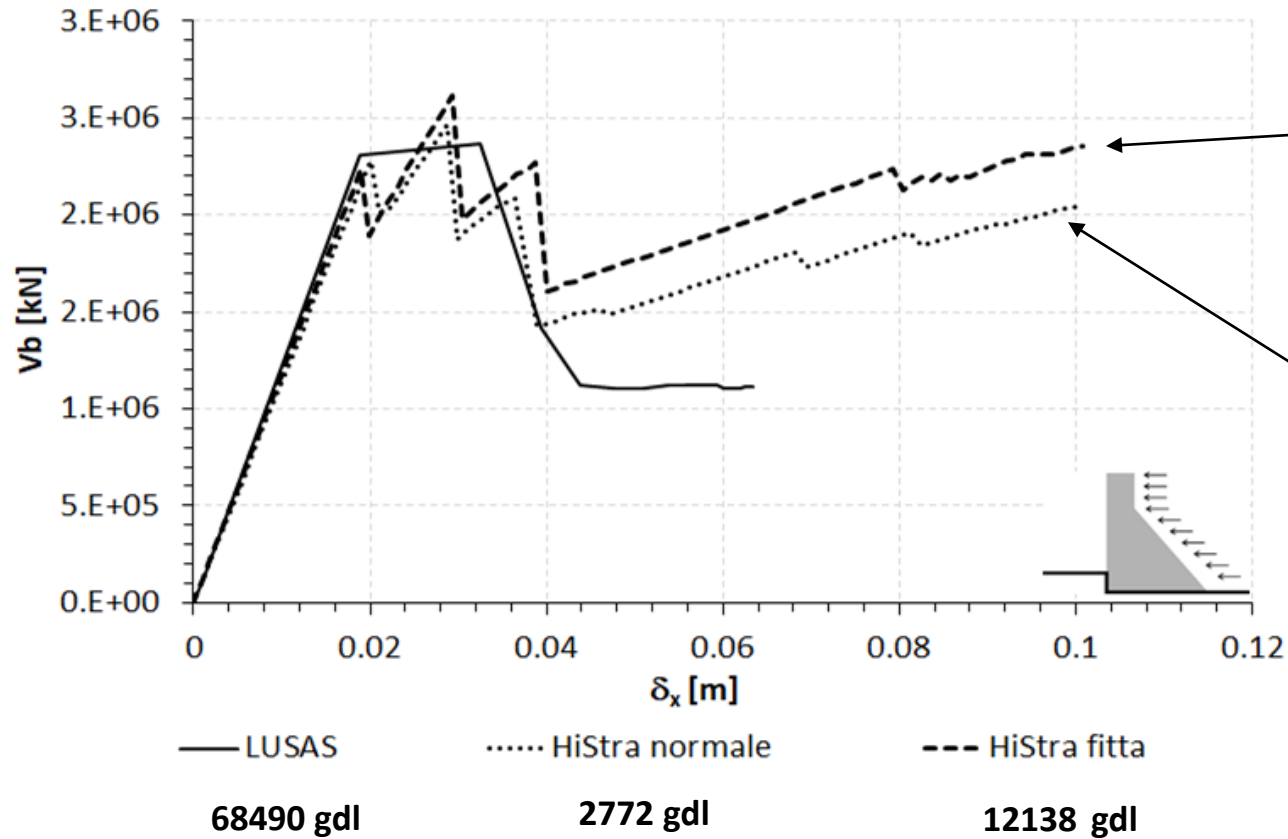
## INCIDENZA DEL VALORE DI ENERGIA DI FRATTURA

Si è condotta un'analisi di sensitività sui seguenti valori di energia di frattura (1.3, 13, 130) che simulano un comportamento da fragile ad infinitamente duttile.

In tutti i casi il ramo elastico risulta coerente con quello FEM. Di contro il valore di picco, come da attesa, risulta sensibile alla scelta. Il valore di 13 appare un buon compromesso soprattutto per la parte post-picco in cui ripercorre il ramo plastico.



## INFLUENZA DELLA MESH





# CONCLUSIONI

## OBIETTIVI INIZIALI

- Adozione di modelli a macroelementi discreti (DMEM) per:
  - Risposta statica lineare
  - Risposta modale
  - Risposta statica non lineare
- Valutazione l'influenza della deformazione a taglio nella risposta
- Verificare l'influenza di parametri quali la densità di mesh ed energia di frattura

## GOAL

- In campo tridimensionale e con un ridotto onere computazionale si sono raggiunti i seguenti risultati:
- A seguito della calibrazione basata sulle frequenze il modello DMEM è coerente con quello più dettagliato FEM.

## PROCESSO DI VALIDAZIONE PER L'USO DI DMEM PER LE DIGHE

COMPORTAMENTO  
STATICO LINEARE

COMPORTAMENTO  
STATICO NONLINEARE

COMPORTAMENTO DINAMICO  
LINEARE

COMPORTAMENTO DINAMICO  
NONLINEARE

# CONCLUSIONI

## OBIETTIVI INIZIALI

- Adozione di modelli a macroelementi discreti (DMEM) per:
  - Risposta statica lineare
  - Risposta modale
  - Risposta statica non lineare
- Valutazione l'influenza della deformazione a taglio nella risposta
- Verificare l'influenza di parametri quali la densità di mesh ed energia di frattura

## GOAL

In campo tridimensionale e con un ridotto onere computazionale si sono raggiunti i seguenti risultati:

- A seguito della calibrazione basata sulle frequenze il modello DMEM è coerente con quello più dettagliato FEM.
- Le risposte statiche sia lineari che non lineari (pushover) restituiscono sovrapponibili curve di capacità e quadri di danno. Alcune differenze possono essere oggetto di ulteriori studi.
- Il possibile orientamento di un piano di deformazione a taglio preferenziale ha mostrato che quello parallelo alle forze restituisce valori mediamente migliori.
- I risultati sono scarsamente sensibili alla densità di mesh nel modello DMEM.

## PROCESSO DI VALIDAZIONE PER L'USO DI DMEM PER LE DIGHE

COMPORTAMENTO  
STATICO LINEARE

COMPORTAMENTO  
STATICO NONLINEARE

COMPORTAMENTO DINAMICO  
LINEARE

COMPORTAMENTO DINAMICO  
NONLINEARE

# PROCESSO DI VALIDAZIONE PER L'USO DI DMEM PER LE DIGHE

COMPORTAMENTO  
STATICO LINEARE

COMPORTAMENTO  
STATICO NONLINEARE

COMPORTAMENTO DINAMICO  
LINEARE

COMPORTAMENTO DINAMICO  
NONLINEARE

## POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

Il modello numerico validato in questa tesi ed i risultati ottenuti lasciano intravedere ulteriori sviluppi. Tra questi sono di certo da annoverare:

- Estensione delle analisi confrontando analisi dinamiche non lineari con le push-over per la valutazione della loro applicabilità;
- Approfondimenti rispetto alla simulazione delle spinte idrodinamiche;
- Approfondimenti in merito ai criteri di stima della vulnerabilità;
- Approfondimenti sull'interazione suolo-struttura-fluido.

Si possono ulteriormente supporre applicabilità ai seguenti campi:

- **Curve di Fragilità;**
- **Analisi di Sensitività** legate all'input sismico ed alle proprietà elasto-meccaniche.



**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**