

**6° Edizione Premio ITCOLD**



**Tesi di Laurea su temi attinenti le Dighe**

# **Analisi dinamiche al passo su un modello 3D per la verifica sismica della diga del Liscia in Sardegna**

**Università degli Studi di Cagliari**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Strutture**



***Relatori:***

***Prof.ssa Ing. M.C. Porcu***

***Prof. Ing. M. Sassu***

***Candidata:***

***Daniela Loddi***



## DIGA DEL LISCIA

Costruita tra il 1958 e il 1962

Legge 64/1974  
1° normativa sismica nazionale





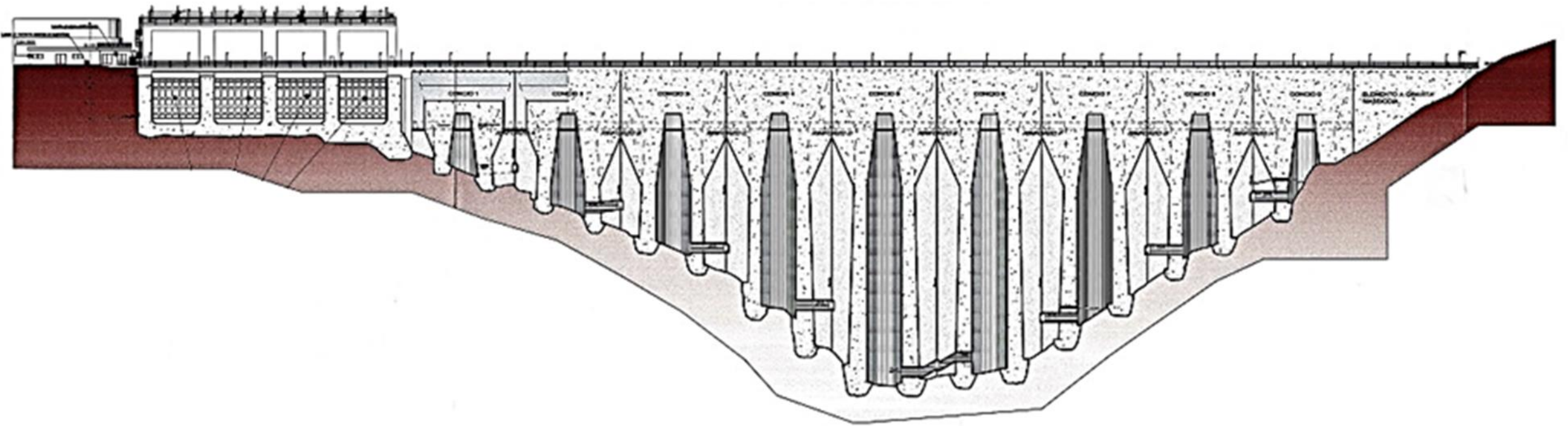
# DIGA A GRAVITÀ ALLEGGERITA CON CONCI CAVI 'MARCELLO'

Sezione longitudinale  
Vista da valle

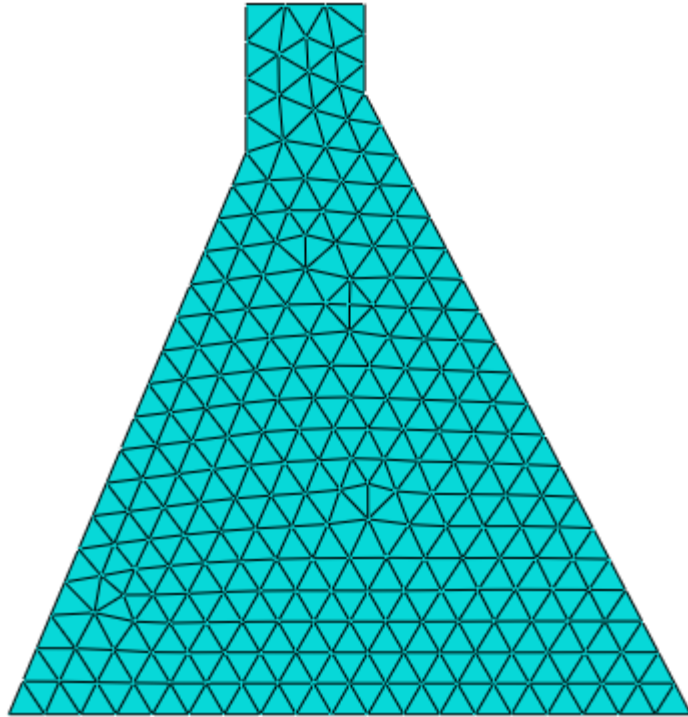
Scarico di  
superficie

9 Conci

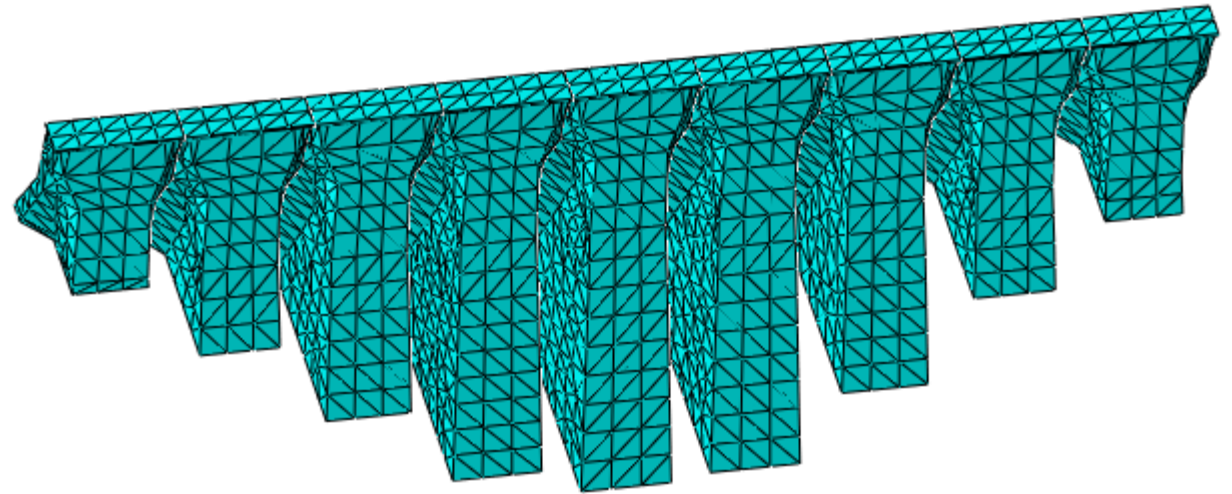
Spalla  
massiccia



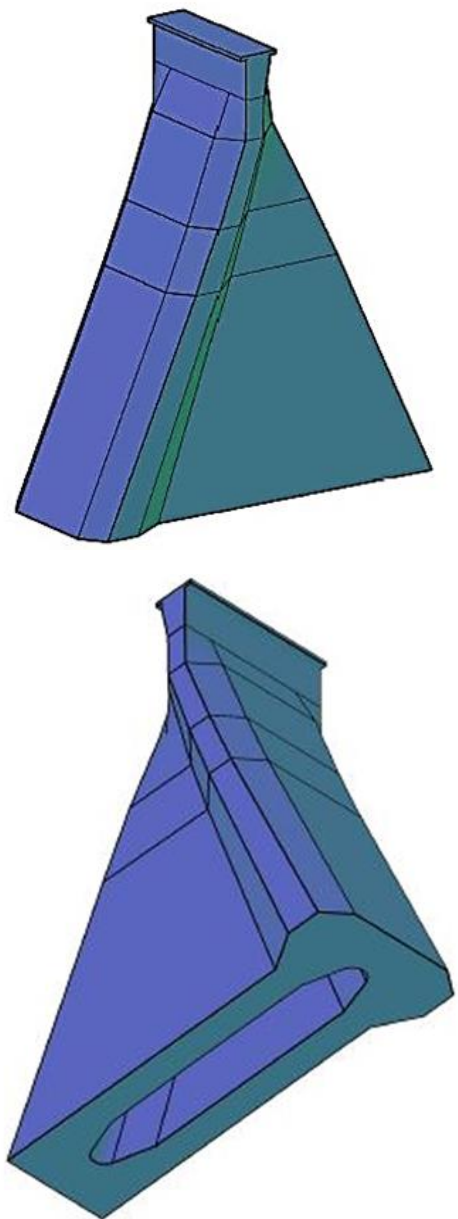
## Modello 2D



## Modello 3D



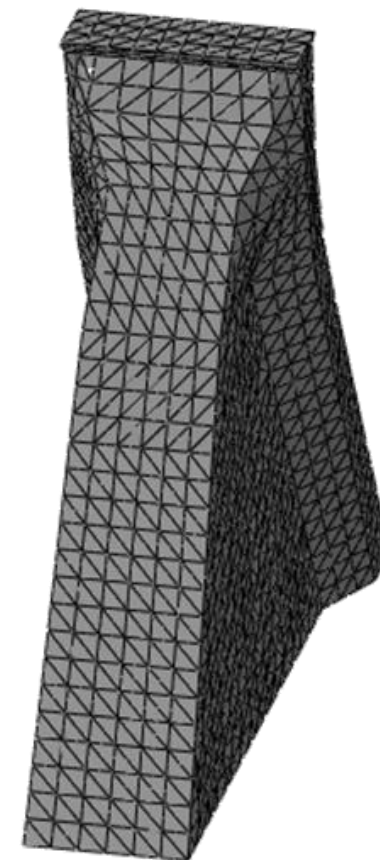
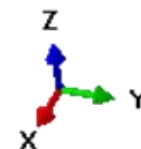
# Abaqus 6.13



## Modello Concio\_Centrale

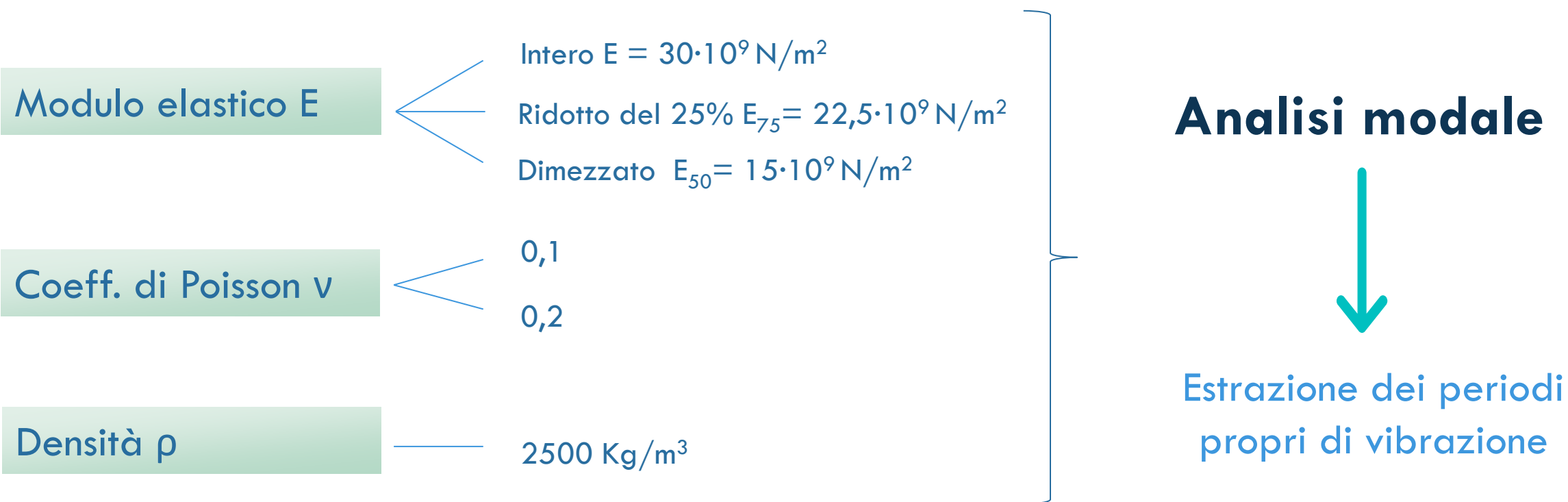


Formato IGES



Calcestruzzo C20/25  
Densità  $\rho = 2500 \text{ Kg/m}^3$   
Modulo elastico  $E = 30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$   
Coef. Di Poisson  $\nu = 0,1$

# Analisi di sensibilità alla variazione del coefficiente di Poisson e del modulo elastico



# Analisi di sensibilità alla variazione del coefficiente di Poisson e del modulo elastico

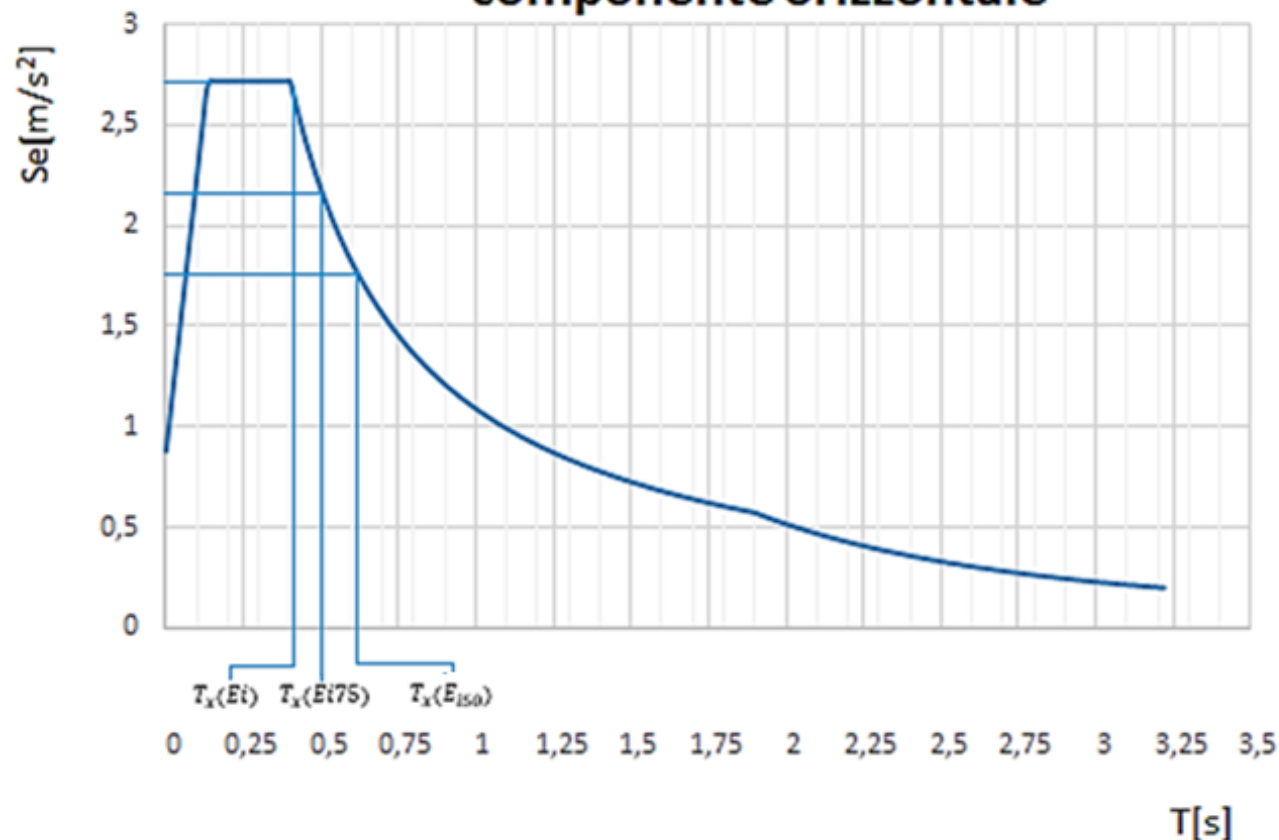
## Analisi modale

Estrazione dei periodi propri di vibrazione

Periodo proprio della struttura		
$\nu=0,1$		
	$T_y$ [s]	$T_x$ [s]
$E_i = 30 \cdot 10^9$	1,017	0,433
$E_{i75} = 0,75 E_i$	1,174	0,500
$E_{i50} = 0,5 E_i$	1,438	0,612

Periodo proprio della struttura		
$\nu=0,2$		
	$T_y$ [s]	$T_x$ [s]
$E_i = 30 \cdot 10^9$	1,027	0,435
$E_{i75} = 0,75 E_i$	1,186	0,502
$E_{i50} = 0,5 E_i$	1,453	0,615

Spettro di risposta elastico in accelerazione della componente orizzontale



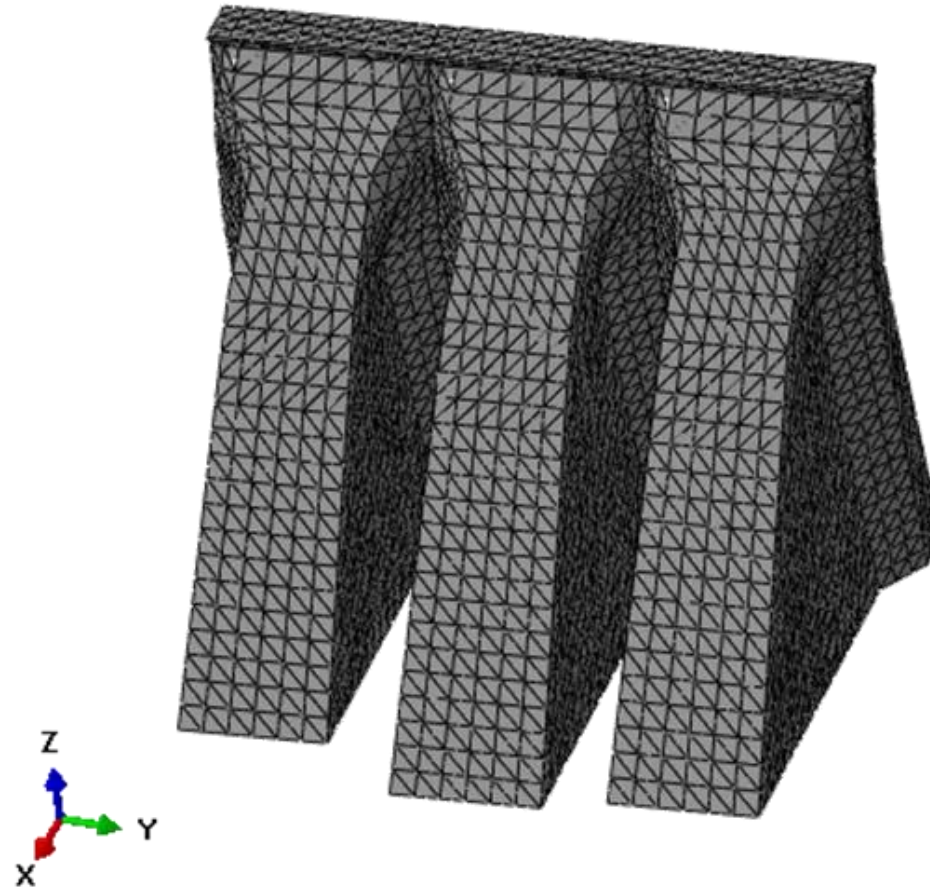
Modulo elastico materiale integro → **favore di sicurezza** ✓



# Modello Tre\_Conci

## Modello Tre\_Conci

- Concio centrale n° 5
- Concio 4 (alla sx del 5)
- Concio 6 (alla dx del 5)



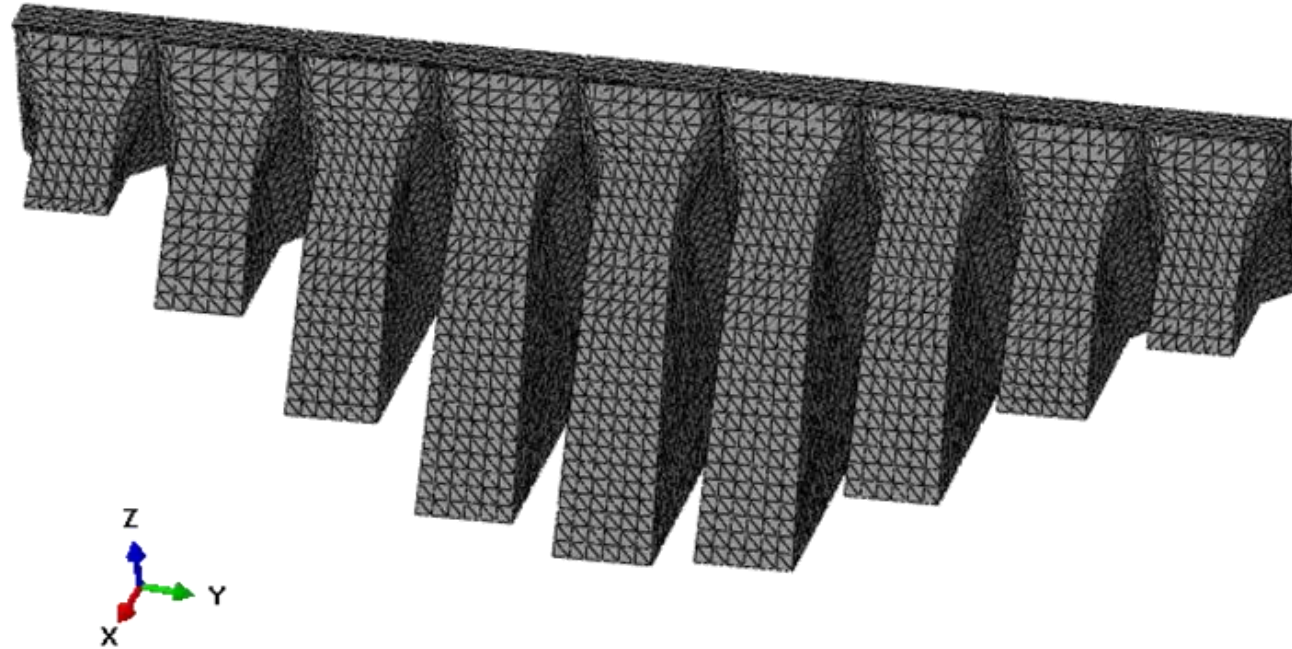
45484  
Elementi



# Modello Diga

## Modello Tre\_Conci

- Concio 1
- Concio 2
- Concio 3
- Concio 4
- Concio 5
- Concio 6
- Concio 7
- Concio 8
- Concio 9

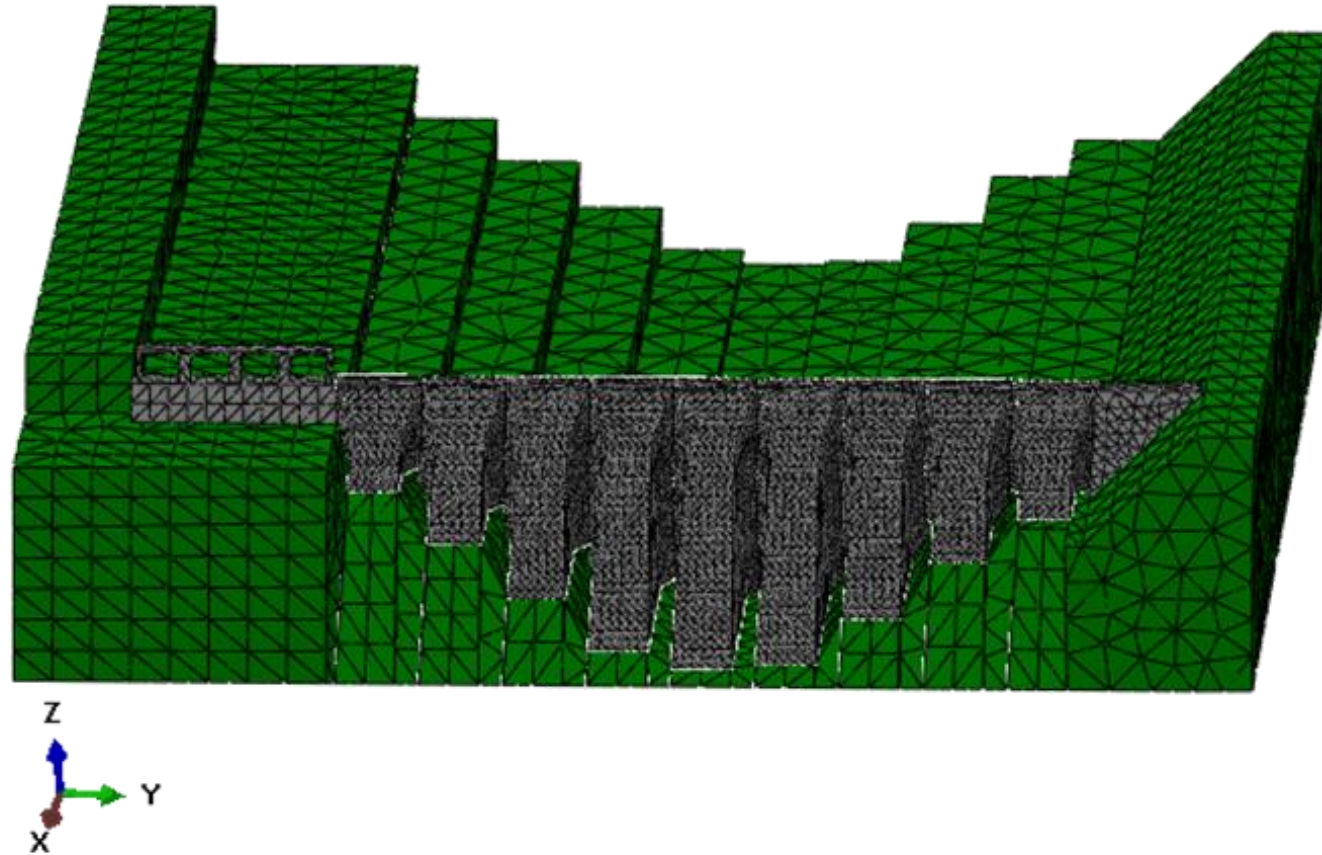


89214  
Elementi

# Modello Diga+Terreno

## Modello Diga+Terreno

- Concio 1
- Concio 2
- Concio 3
- Concio 4
- Concio 5
- Concio 6
- Concio 7
- Concio 8
- Concio 9
- Scarico
- Spalla
- Terreno

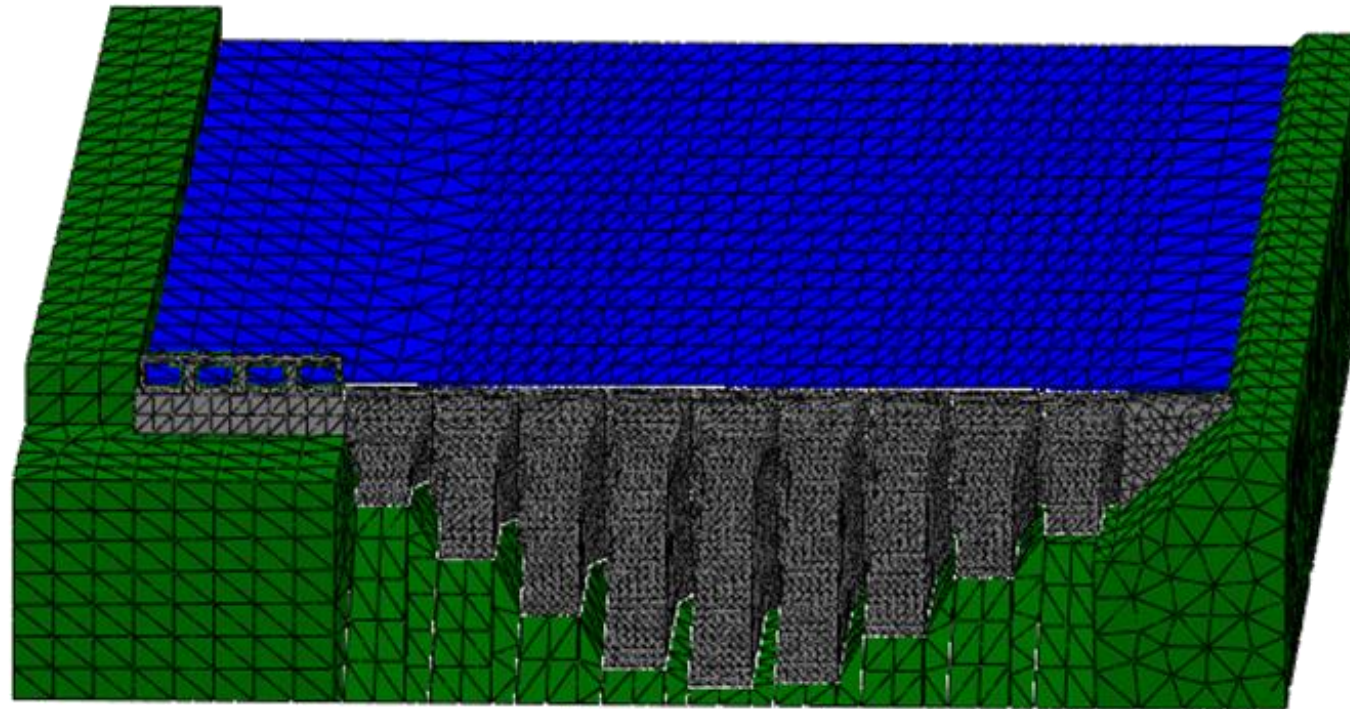


117365  
Elementi

# Modello Diga+Terreno+Acqua

## Modello Diga+Terreno+ Acqua

- Concio 1
- Concio 2
- Concio 3
- Concio 4
- Concio 5
- Concio 6
- Concio 7
- Concio 8
- Concio 9
- Scarico
- Spalla
- Terreno
- Acqua



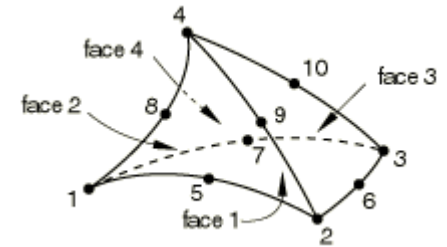
129192  
Elementi

Mesh di diversa dimensione per struttura, terreno e acqua

# Scelta degli elementi finiti

- 9 conci
- Scarico di superficie
- Spalla massiccia
- Terreno

Elementi 3D Stress  
'C3D10' Elementi tetraedrici  
quadratici a 10 nodi

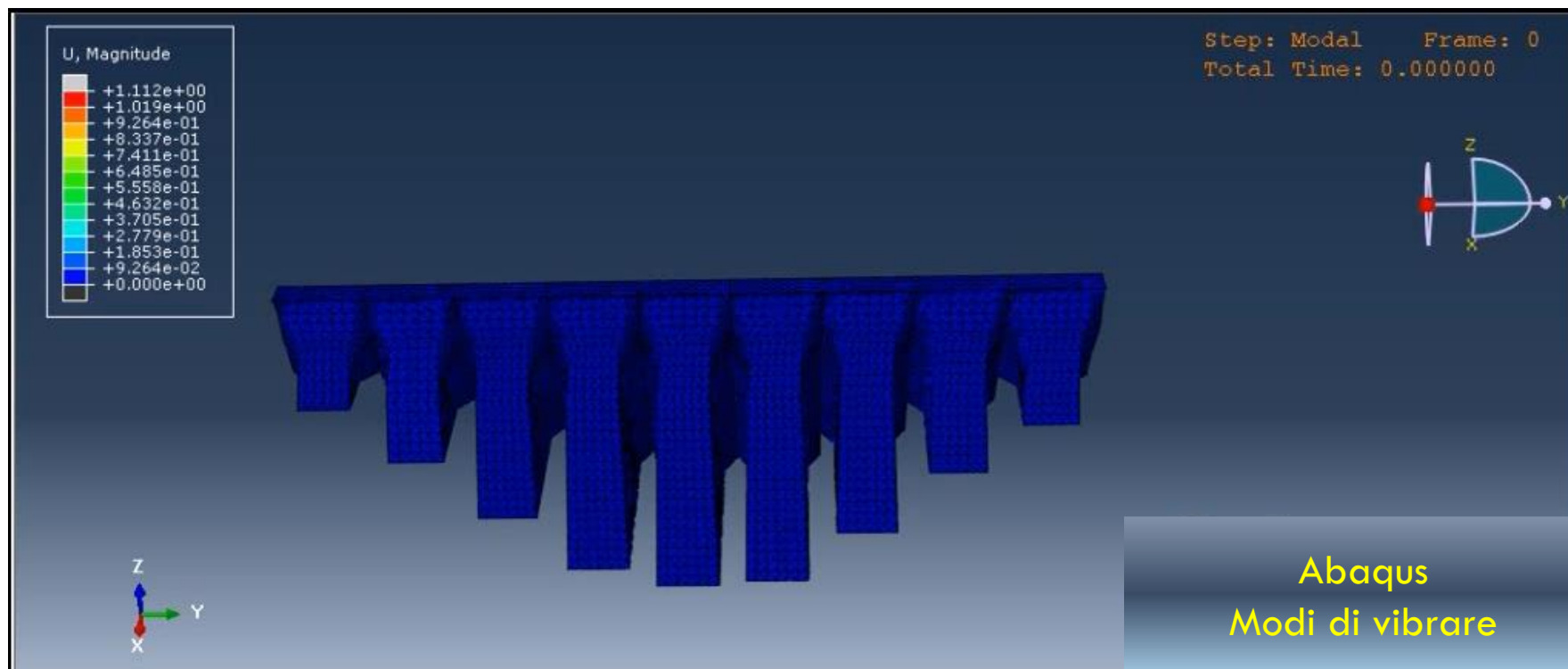


- Acqua del bacino

Elementi 'Acoustic'  
'AC3D10' Elementi tetraedrici  
quadratici acustici a 10 nodi

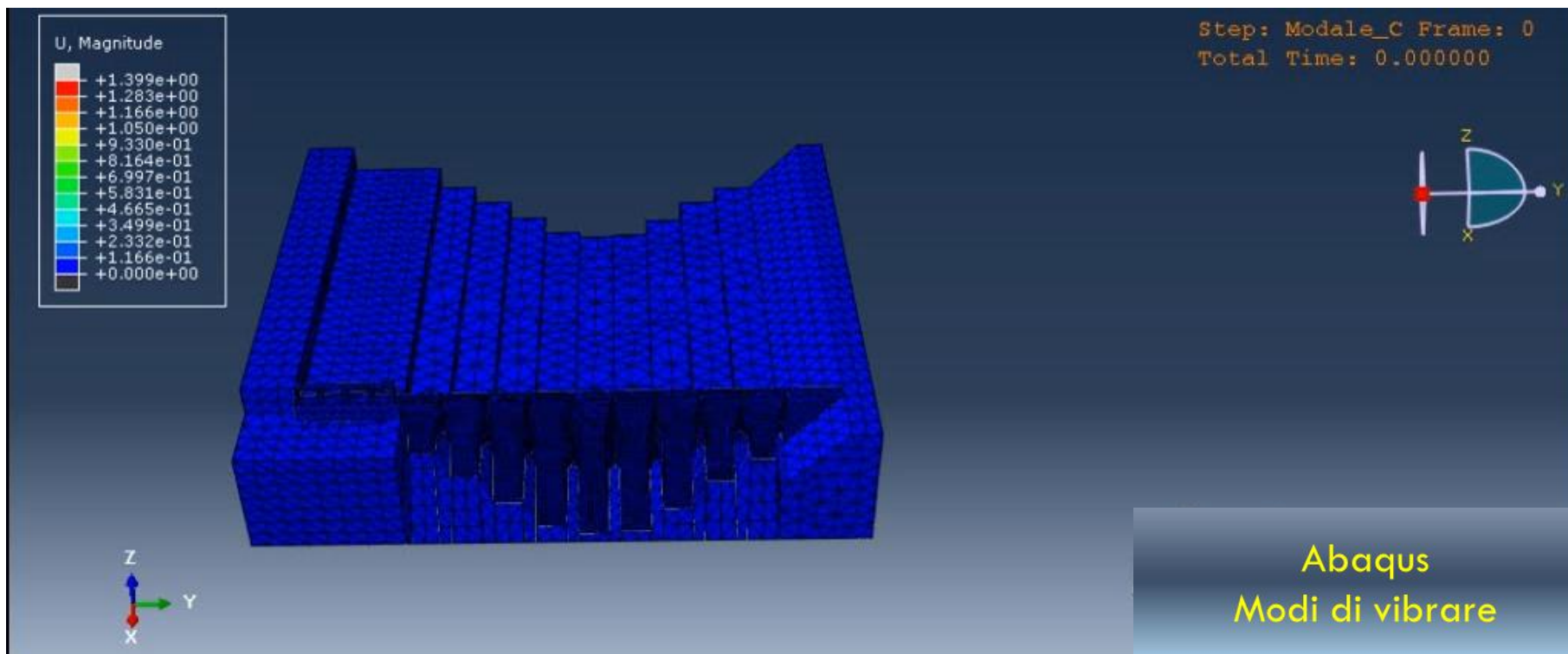


# Analisi modale modello Diga



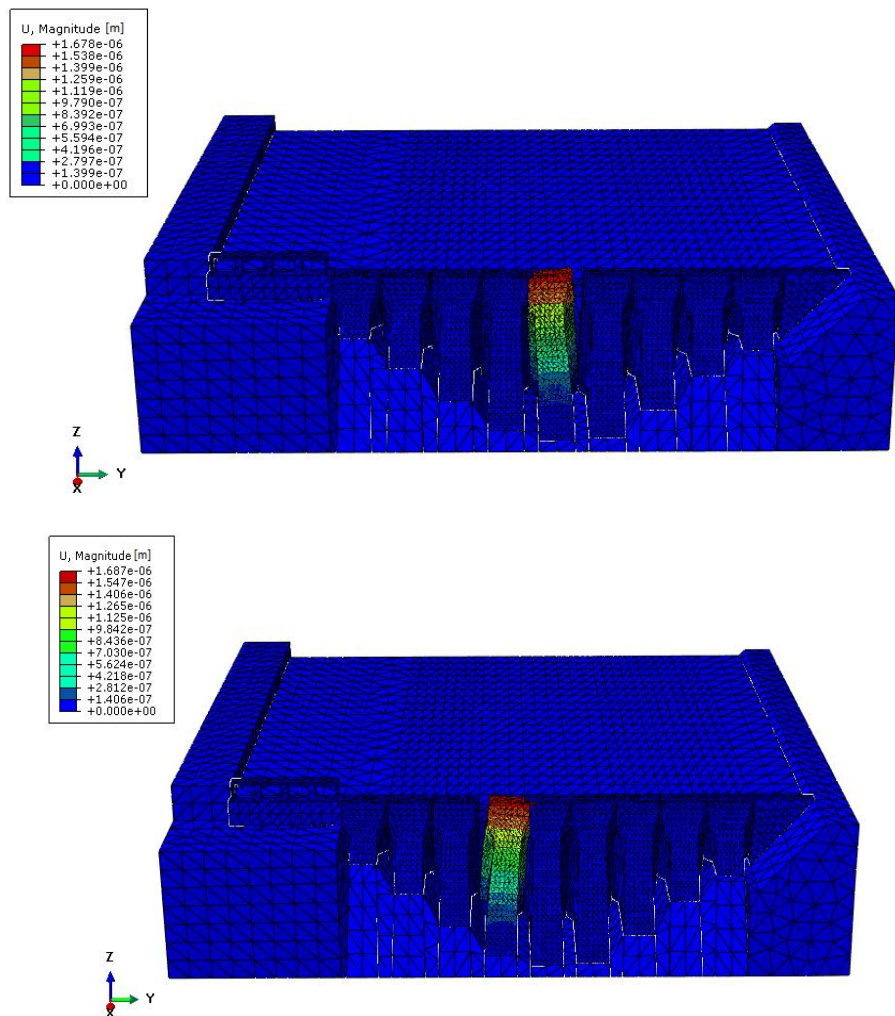
Modo	Frequenza [Hz]	Periodo [s]
1	3,4356	0,291
2	3,5169	0,284
3	3,7805	0,265
4	4,6711	0,214
5	5,2549	0,190
6	7,2488	0,138
7	7,6816	0,130
8	7,7709	0,129
9	8,0525	0,124

# Analisi modale modello Diga+Terreno



Modo	Frequenza [Hz]	Periodo [s]
1	3,3351	0,3
2	3,3958	0,294
3	3,5935	0,278
4	4,2965	0,233
5	4,7756	0,209
6	6,3596	0,157
7	7,2372	0,138
8	7,5517	0,132
9	7,6149	0,131
10	7,8157	0,128

# Analisi modale Modello Diga+Terreno+Acqua

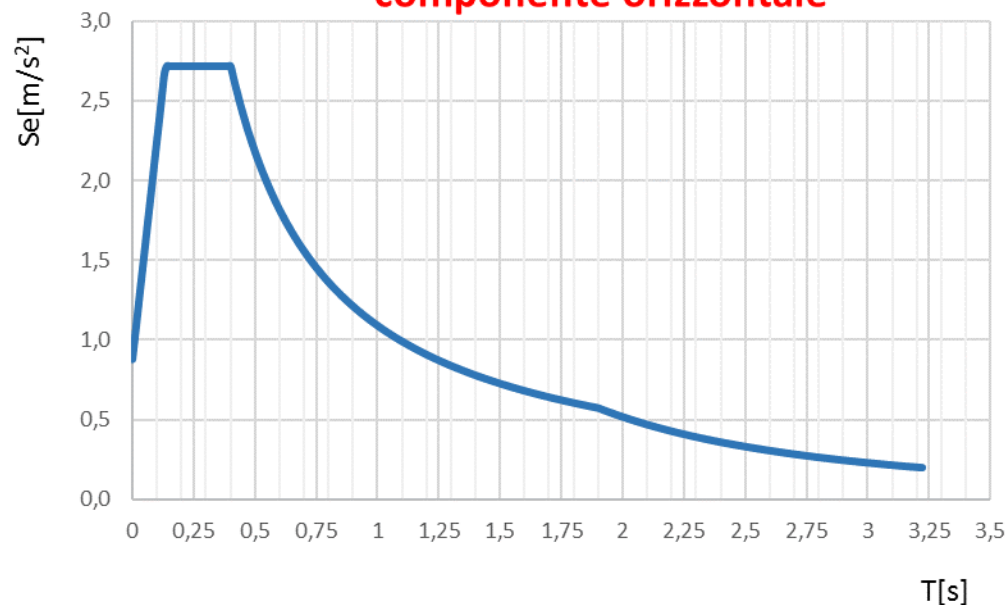


Modo	Frequenza	Periodo
	[Hz]	[s]
1	3,3234	0,301
2	3,384	0,296
3	3,582	0,279
4	4,2809	0,234
5	4,7596	0,21
6	6,343	0,158
7	6,3979	0,156
8	6,8829	0,145
9	7,0065	0,143
10	7,2122	0,139

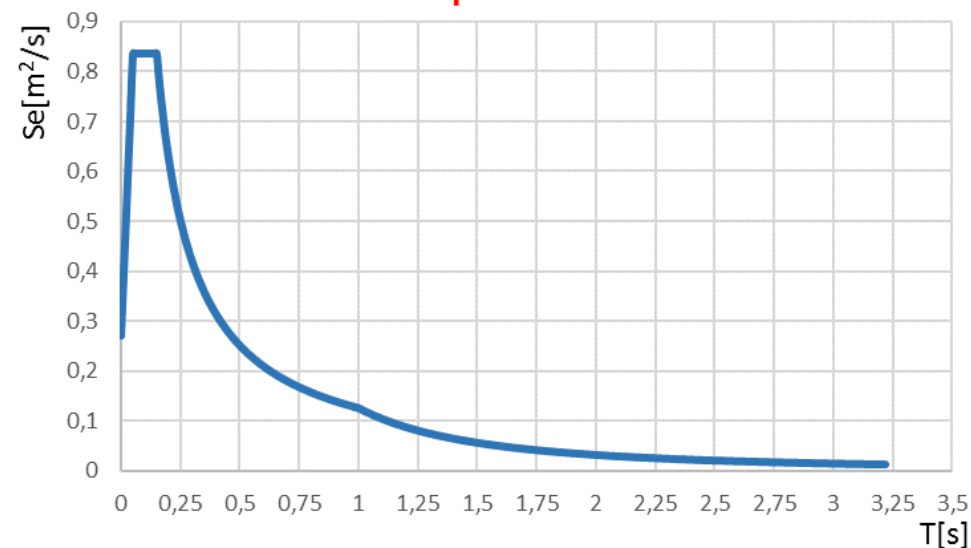
# Analisi modale con spettro di risposta

## Stato limite di collasso

Spettro di risposta elastico in accelerazione della  
componente orizzontale



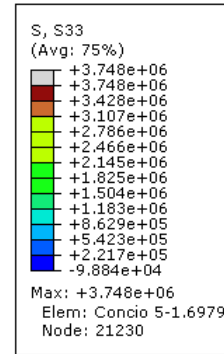
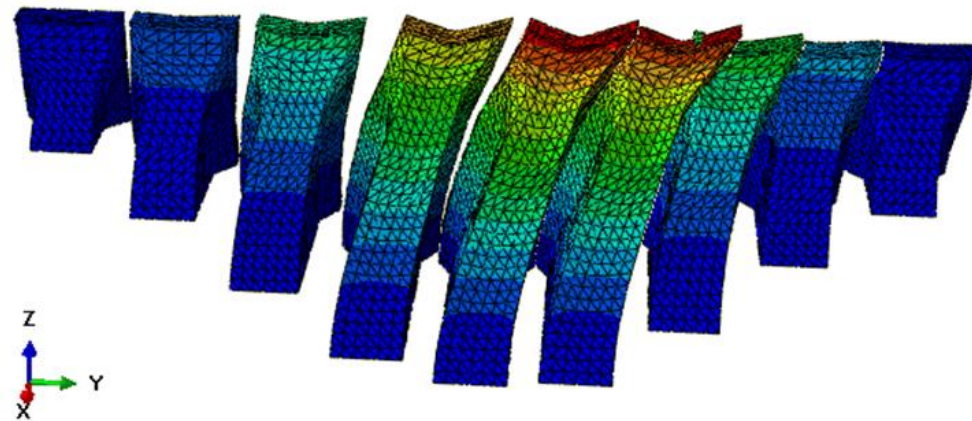
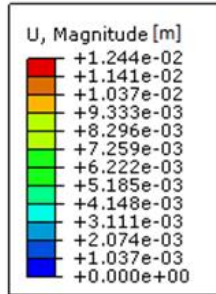
Spettro di risposta elastico in accelerazione della  
componente verticale



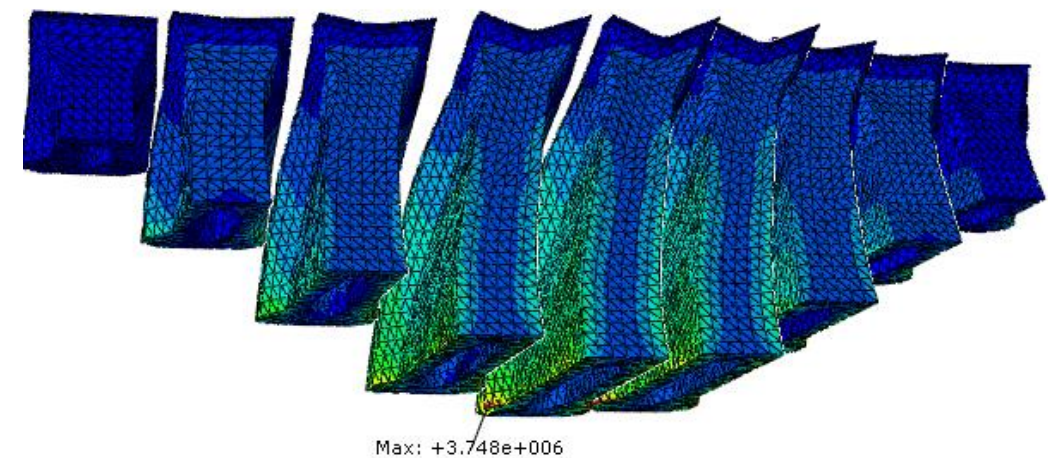


# Analisi modale con spettro di risposta modello *Diga*

Massimo spostamento  
conco 5  $\rightarrow U_{y\max} = 1,244 \text{ cm}$

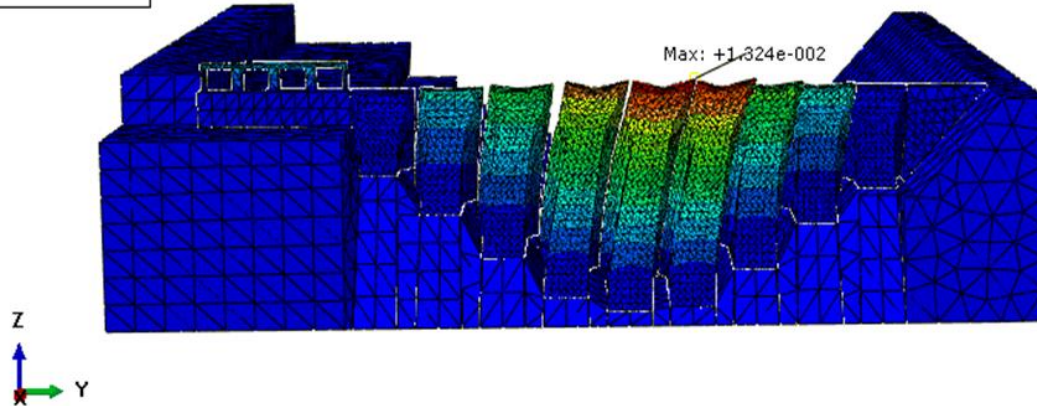
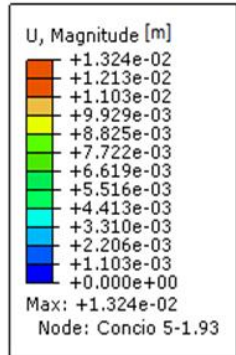


Massimo sforzo di trazione alla base  
conco 5  $\rightarrow 3,748 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

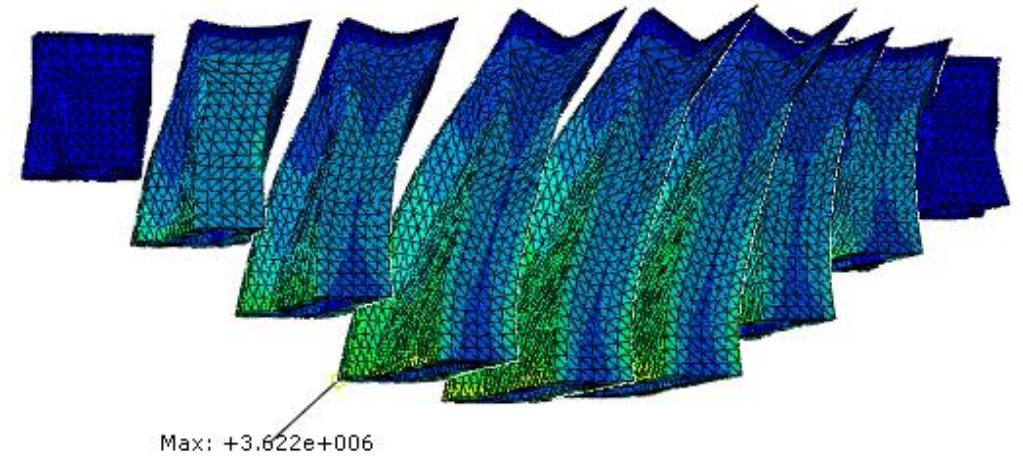
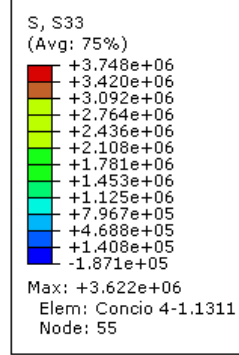


# Analisi modale con spettro di risposta modello *Diga+Terreno*

Massimo spostamento  
conco 5  $\rightarrow U_{y\max} = 1,324 \text{ cm}$

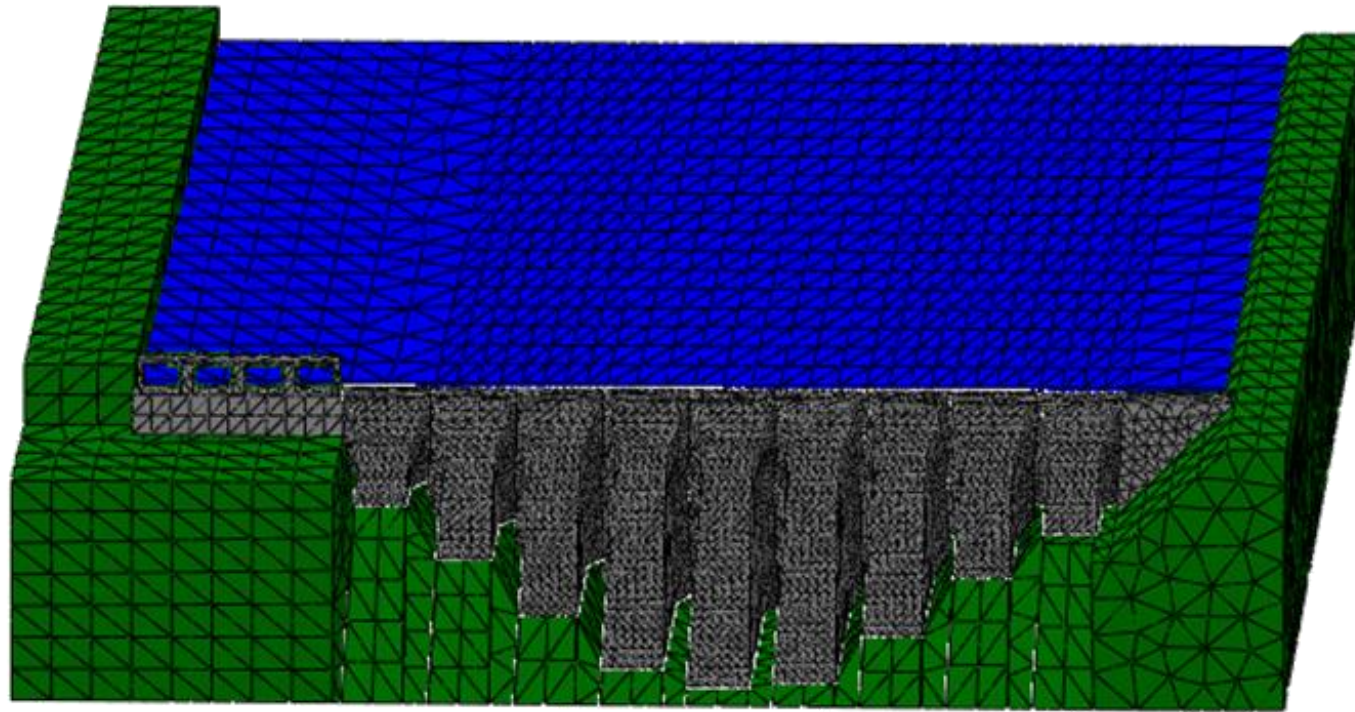


Massima trazione alla base  
conco 4  $\rightarrow 3,622 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$





# Analisi modale con spettro di risposta modello *Diga+Terreno+ Acqua*



1 291 92  
Elementi



*Prestazioni  
elevate*

# Azione idrodinamica

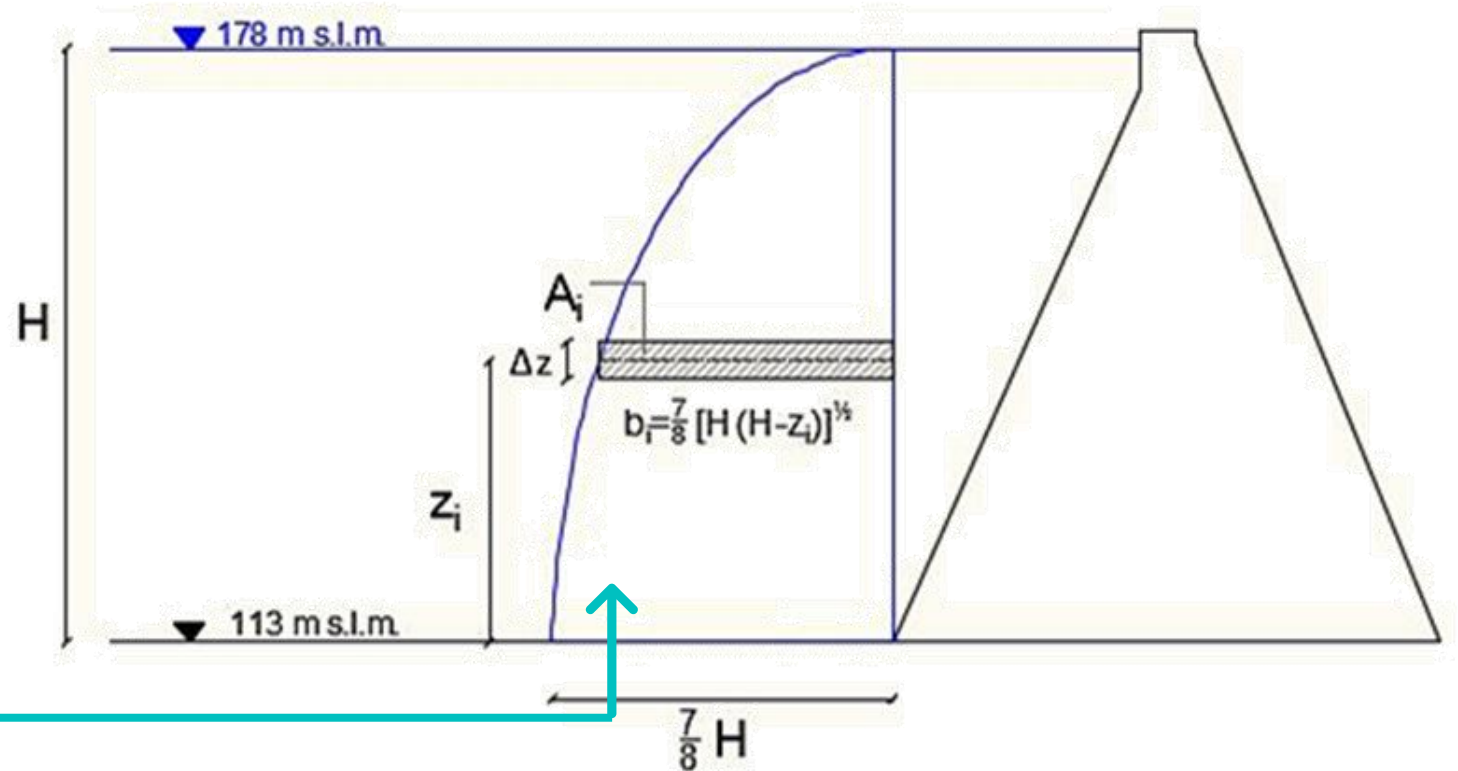
Metodo semplificato di  
Westergaard



Azione idrodinamica  
assimilata a quella prodotta  
da

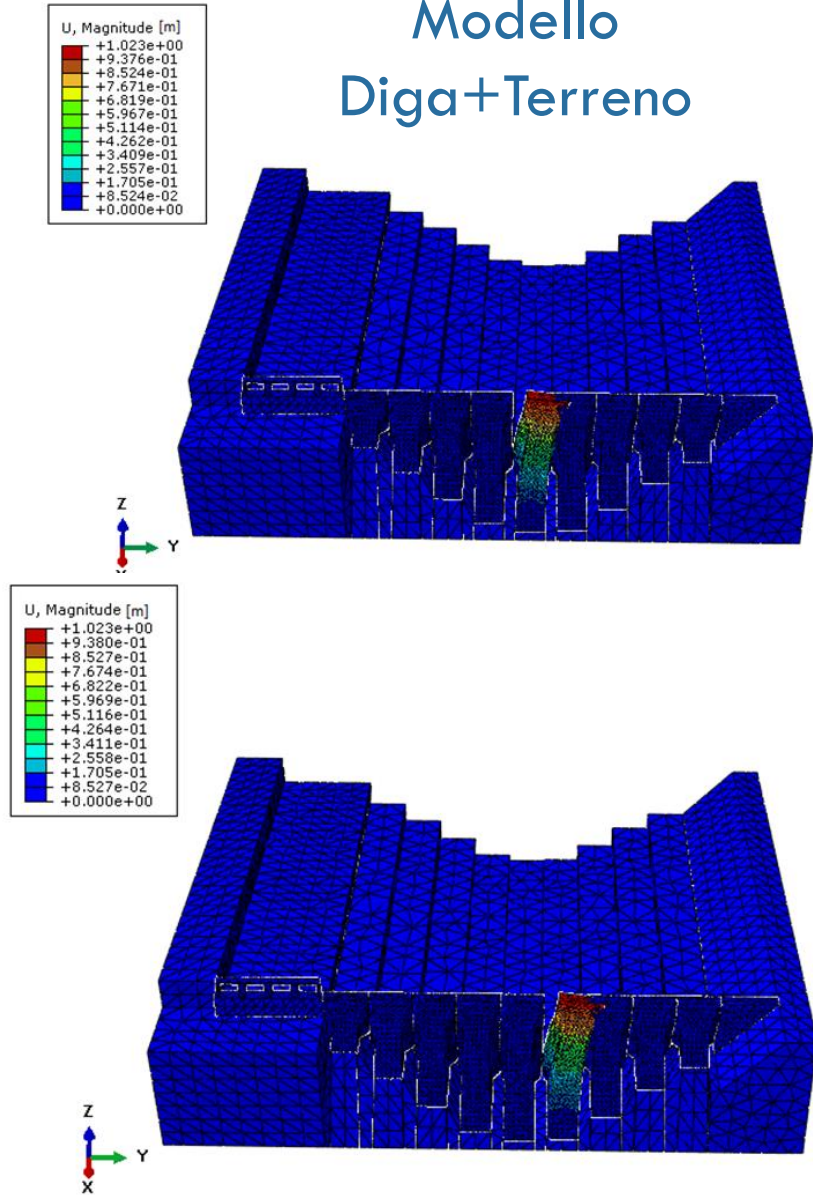


Solido di forma  
parabolica

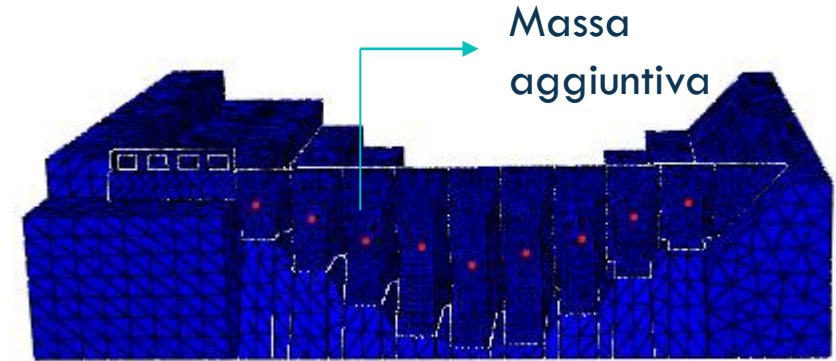




## Modello Diga+Terreno



## Modello Diga+Terreno+AcquaFittizia



*Nuove densità da assegnare ai  
conci per tener conto del volume di  
acqua che insiste su di essi*

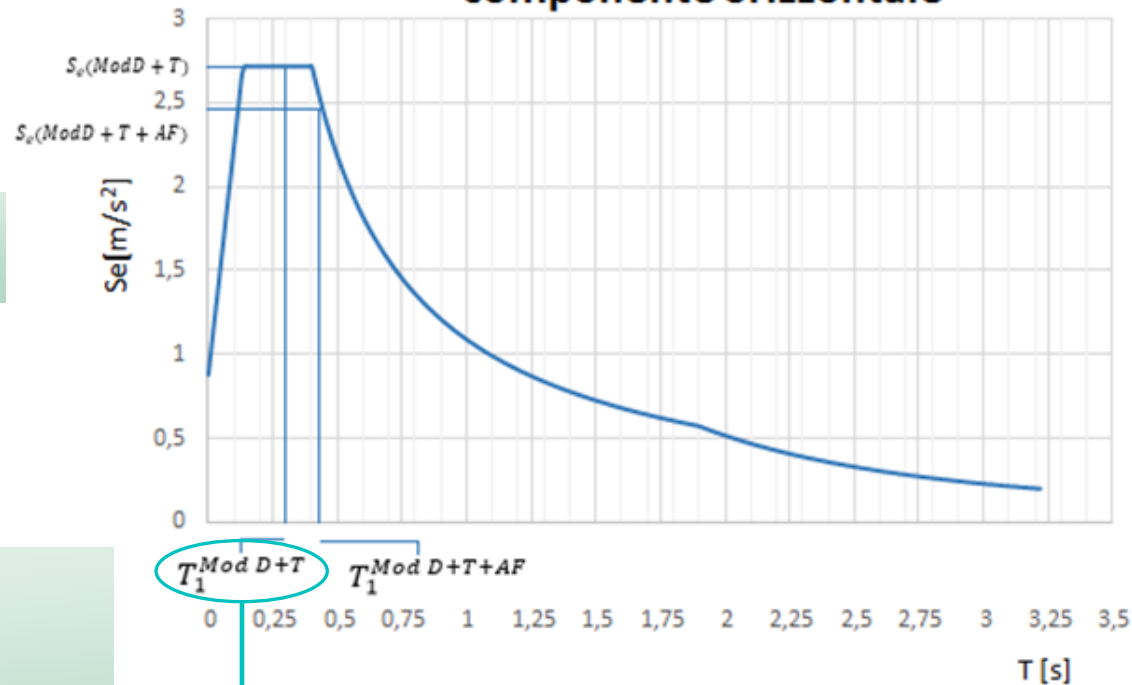
Concio	Densità iniziale concio	Nuova densità
	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]
1	2500	4045
2	2500	4397
3	2500	4605
4	2500	4677
5	2500	4737
6	2500	4731
7	2500	4649
8	2500	4466
9	2500	4220

Modello Diga+  
Terreno

Bacino vuoto

1° periodo di  
vibrazione:  
0,3 s

Spettro di risposta elastico in accelerazione della  
componente orizzontale



Favore di sicurezza

Modello  
Diga+Terreno+  
Acqua-Fittizia

Massimo invaso a quota  
178 m s.l.m.

1° periodo di  
vibrazione:  
0,413 s



# Analisi dinamica con integrazione al passo

Analisi  
esplicita

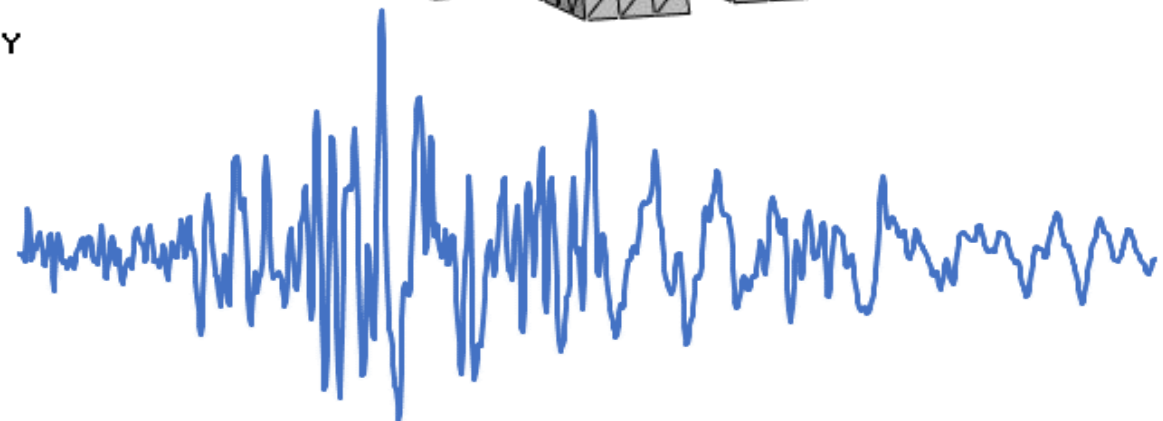
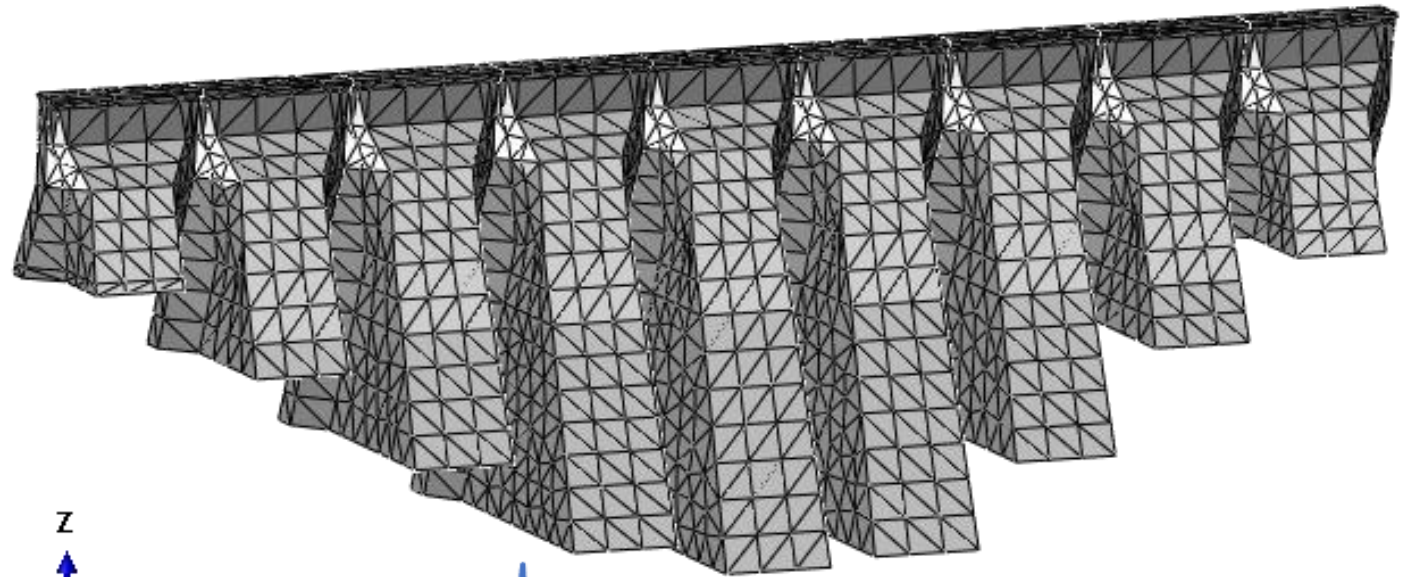


Cambiano gli elementi e  
aumenta la dimensione  
della mesh

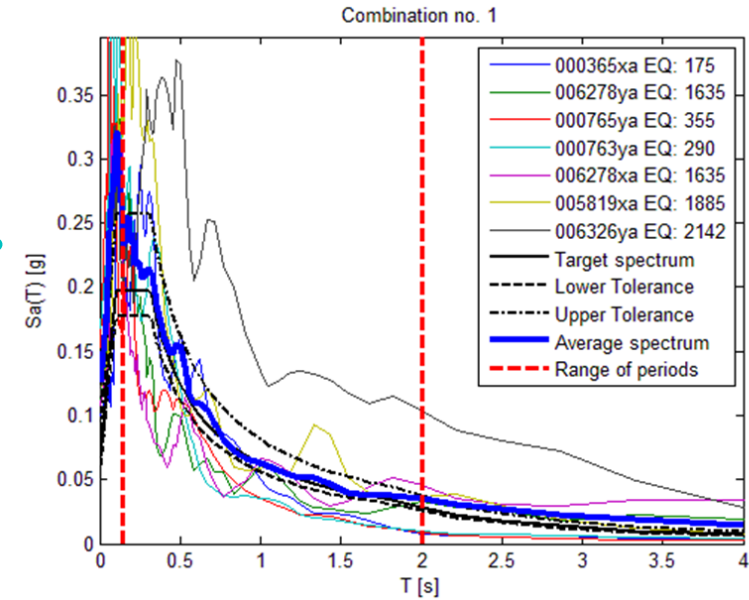
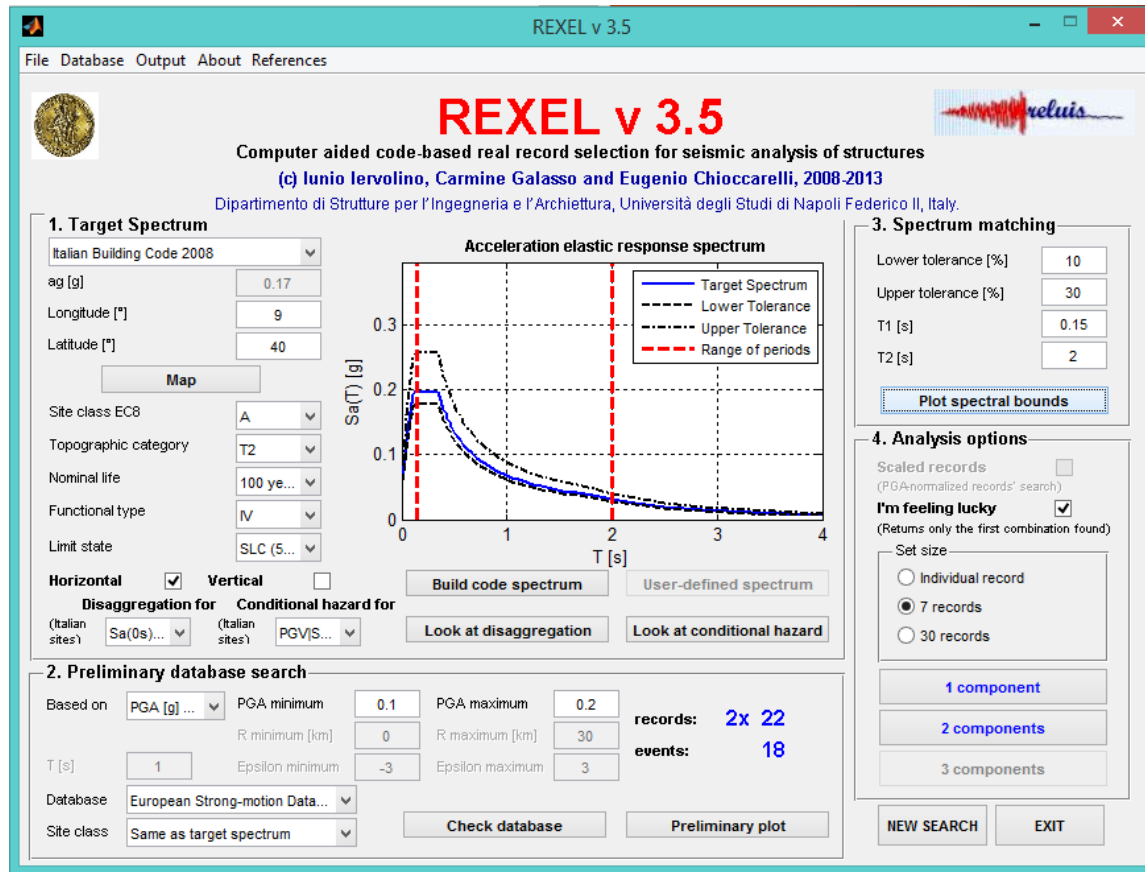


Elementi 'Explicit'  
tetraedrici lineari a 4  
nodi, con dimensione 5

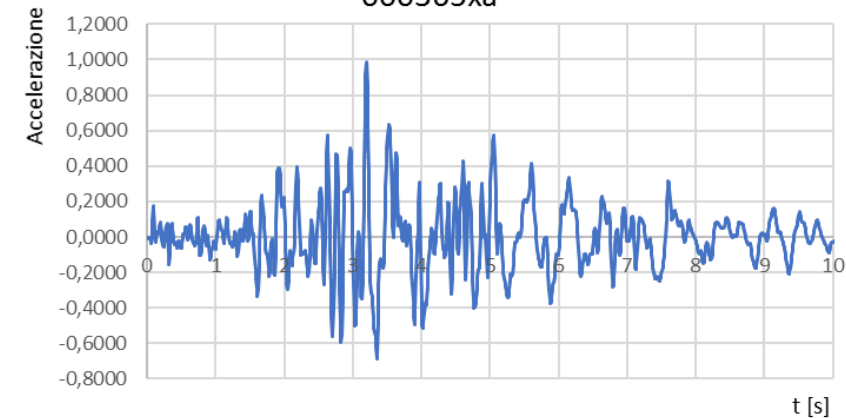
18283 elementi



# Analisi dinamica con integrazione al passo

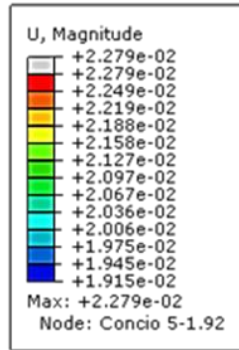


Accelerogramma spettro compatibile (SLC)  
'000365xa'

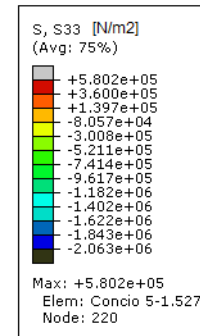
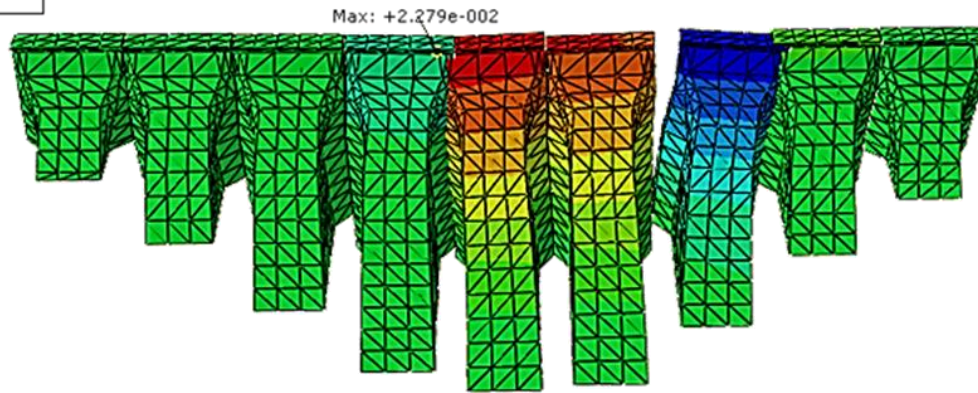




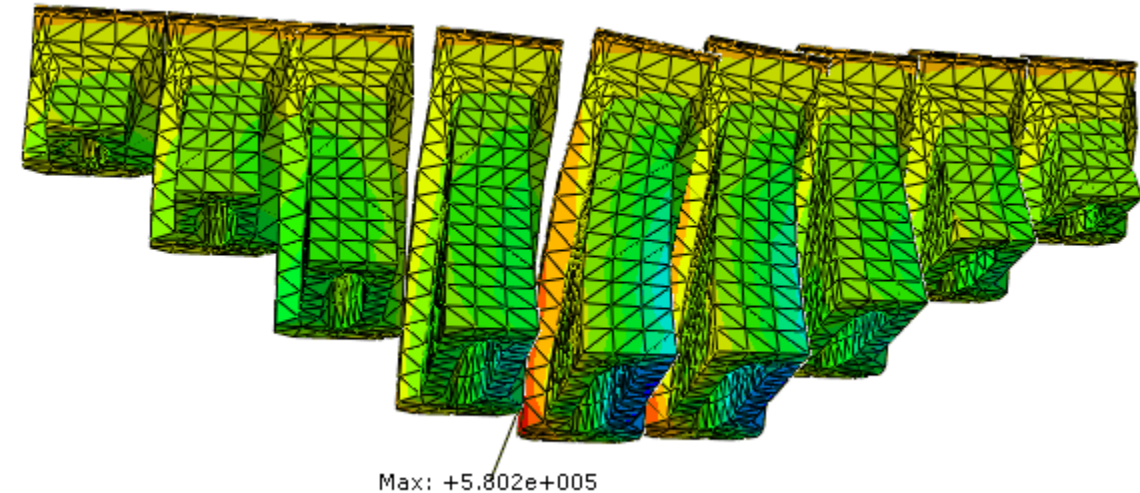
# Analisi dinamica con integrazione al passo modello Diga



Massimo spostamento  
concio 5  $\rightarrow U_{y\max} = 2,279$  cm



Massimo sforzo di trazione alla base  
concio 5  $\rightarrow 5,802 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>



Dall'analisi con spettro di risposta SLC  $\rightarrow U_{y\max} = 1,244$  cm      Dall'analisi con spettro di risposta SLC  $\rightarrow$  Sforzo max  $= 3,622 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>

# Conclusioni

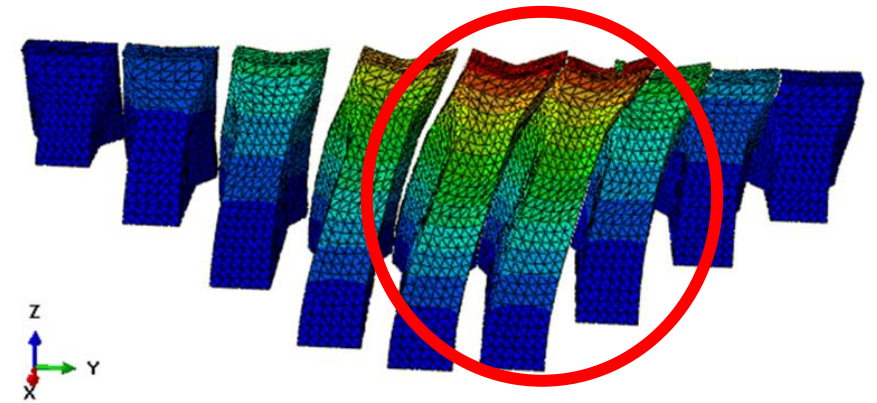
## ❑ **Analisi tridimensionale della diga**

- Consente di tener conto degli effetti sismici nelle due direzioni  $x$  e  $y$
- Consente di determinare problemi di sforzi ortogonali al piano della diga (trazioni all'estremità del concio)
- Consente di calcolare gli spostamenti laterali dei conci considerando i contributi di tutti i modi (anche quelli fuori dal piano)
- Consente di effettuare analisi complete che tengano conto dell'interazione con il terreno e con il bacino di acqua
- Consentono di effettuare analisi dinamiche time-history con due o tre componenti del terremoto

# Analisi dei principali risultati ottenuti

## ☐ Fenomeno di martellamento tra i conci

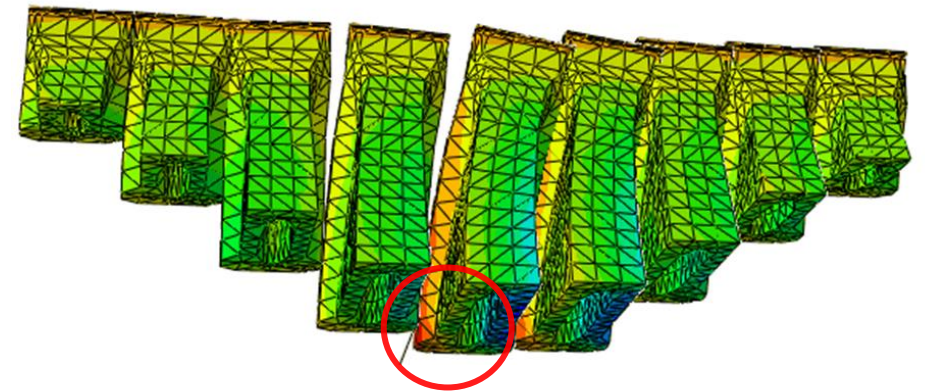
- I giunti tra i conci sono di 20 cm
- Lo spostamento massimo del concio centrale è di circa 2,5 cm
- Il giunto per evitare il martellamento deve essere almeno di 5 cm
- Quindi i giunti sono correttamente dimensionati



# Analisi dei principali risultati ottenuti

## □ Sforzi di trazione alla base del concio centrale

- Pericolo di distacco del concio centrale in uno degli spigoli di base
- Possibile fenomeno di infiltrazione dell'acqua in corrispondenza della zona di distacco
- Problema legato alla tipologia di diga con conci separati incastrati alla base
- Un problema analogo si potrebbe avere in dighe simili





# Lavori in corso e sviluppi futuri

- Analisi time-history modello Diga+Terreno
- Analisi time-history modello Diga+Terreno+Acqua
- Set di accelerogrammi spettro-compatibili
- Pubblicazione dei risultati





**Grazie per  
l'attenzione!**



