

## **ANALISI DINAMICHE AL PASSO SU UN MODELLO 3D PER LA VERIFICA SISMICA DELLA DIGA DEL LISCIA IN SARDEGNA**

### **Indice della Tesi**

- Capitolo 1: Introduzione
- Capitolo 2: Le dighe a gravità
- Capitolo 3: Progettazione sismica delle dighe
- Capitolo 4: La diga del Liscia
- Capitolo 5: Modellazione FEM
- Capitolo 6: Analisi modale dei diversi modelli
- Capitolo 7: Analisi sismiche con spettro di risposta
- Capitolo 8: Analisi dinamiche con terremoti spettro compatibili
- Capitolo 9: Conclusioni

### **Scopo dello studio**

La tesi ha avuto come obiettivo lo studio di una diga a gravità alleggerita a vani interni, con conci tipo 'Marcello', presente in Sardegna e costruita tra il 1958 e il 1962, in assenza di particolari prescrizioni normative antisismiche. Di questa tipologia di dighe si trovano esempi in diverse parti d'Italia e d'Europa ma esistono pochi studi che considerino modellazioni tridimensionali e analisi dinamiche al passo sotto terremoti reali.

In Italia è presente un numero elevato di grandi dighe di cui circa il 77% è stato costruito prima del 1974, anno in cui con la Legge 64/1974 viene considerato per la prima volta il problema della sicurezza sismica. Più di tre quarti delle dighe esistenti, quindi, sono state realizzate senza criteri progettuali antisismici. È di fondamentale importanza perciò studiare la vulnerabilità sismica di queste opere per poter eventualmente eseguire mirati interventi di adeguamento sismico.

La valutazione del comportamento delle dighe sotto azione sismica viene spesso eseguita su modelli bidimensionali con metodi di analisi semplificati. Molto più raramente si eseguono modelli tridimensionali ed integrazione al passo delle equazioni dinamiche del moto sotto terremoti reali, tenendo anche conto dell'interazione dello sbarramento sia con il bacino di acqua, sia con il terreno di fondazione.

Nel lavoro di tesi è stato affrontato il problema della valutazione del comportamento sismico delle dighe a gravità con conci 'Marcello', utilizzando modelli via via più completi e complessi e applicando diversi metodi di analisi lineare, da quello semplificato con Spettro di Risposta a quello più completo con analisi dinamica con terremoti reali. I risultati di tale studio hanno permesso di evidenziare le carenze dei metodi di analisi semplificati e dei modelli bidimensionali nello studio di tale tipologia di diga.

### **Breve descrizione della struttura**

La diga del Liscia è situata nel comune di Luras, in provincia di Sassari, nella parte nord-ovest della Sardegna. Si tratta di una diga a gravità alleggerita, formata da 9 elementi cavi del tipo 'Marcello', realizzata tra il 1958 e il 1962 sotto progetto dell'Ing. Claudio Marcello, ideatore degli elementi cavi messi in opera. L'opera di ritenuta, che realizza un serbatoio di capacità utile di 104 milioni di m<sup>3</sup> è stata costruita a scopi irrigui, per le piane di Arzachena e Olbia, e per alimentare gli acquedotti della Gallura, in fase di costruzione in quegli anni. Lo sbarramento è costituito, oltre che dai 9 conci, da uno scarico di superficie alla destra idraulica e da una spalla massiccia alla sinistra idraulica, per uno sviluppo totale, alla quota del coronamento, di 267 m. Rientra inoltre nella categoria 'grandi dighe' secondo la Normativa Italiana di riferimento (D.M. 26 Giugno 2014) in quanto la sua altezza massima, rispetto al piano di fondazione, è di 69 metri. Ciascun elemento è costituito da due speroni uniti tra loro, a monte e a valle, formanti due ordini di cavità, uno esterno e uno interno, perfettamente simmetrico, il quale cessa a 9 metri al di sotto del coronamento, cosicché l'elemento, al di sopra di questa quota, appare costituito da una struttura massiccia. Il paramento di monte è verticale fino alla quota 173,50 m s.l.m. e inclinato con pendenza 0,45 al di sotto; il paramento di valle è verticale fino ad 1,50 m al di sotto del coronamento e poi inclinato con pendenza 0.45.

## Evoluzione del lavoro

### Fase 1. Costruzione dei modelli a complessità crescente e analisi modale

Con l'ausilio del software AutoCAD, sono stati realizzati diversi modelli geometrici tridimensionali della struttura, esportati successivamente nel software Abaqus 6.13, ognuno dei quali caratterizzato da una complessità e da un numero di elementi crescente. Uno dei problemi più delicati nella costruzione di ciascun modello è stato quello della scelta del tipo di elementi volumetrici e della dimensione ottimale della mesh. In particolare, si è dovuto trovare un compromesso tra la realizzazione di una mesh regolare, caratterizzata da un numero contenuto di elementi distorti, e limitare l'onere computazionale, che cresce al crescere del numero totale di elementi componenti il modello. La scelta è ricaduta su elementi denominati 'C3D10', ossia elementi tetraedrici quadratici a 10 nodi, utilizzati per tutti i solidi rappresentanti il modello ad eccezione del solido di acqua, per il quale è stato necessario impiegare elementi della famiglia 'Acoustic' chiamati 'AC3D10', cioè elementi tetraedrici quadratici acustici a 10 nodi.

I modelli realizzati sono 5:

- **Modello Concio\_Centrale**, in cui si rappresenta il concio centrale n°5 caratterizzato dalla maggiore altezza;
- **Modello Tre\_Conci**, in cui si aggiungono al modello precedente i conci 4 e 6, posizionati rispettivamente, con vista da valle, alla sinistra e alla destra del concio centrale;
- **Modello Diga**, rappresentante tutti i 9 conci che compongono la diga del Liscia;
- **Modello Diga+Terreno**, in cui si rappresenta il terreno alla base dello sbarramento e una porzione che si sviluppa in direzione di monte, lo scarico di superficie alla destra idraulica e una spalla massiccia in sponda sinistra;
- **Modello Diga+Terreno+Acqua**, in cui si introduce un solido che si sviluppa in direzione monte per una lunghezza di 210 m rappresentante l'acqua del bacino formato dallo sbarramento.

Il primo modello realizzato, chiamato modello Concio\_Centrale (Fig.1) rappresenta il concio centrale numero 5, quello caratterizzato dalla maggiore altezza. Lo studio del modello del solo concio centrale ha consentito di eseguire un'analisi di sensibilità alla variazione del valore dei parametri meccanici, quali modulo elastico e coefficiente di Poisson. Le Norme Tecniche per le Costruzioni indicano, infatti, che, in caso di presenza di fessurazioni nel calcestruzzo, i valori dei parametri meccanici devono essere ridotti. I risultati ottenuti dall'analisi modale hanno mostrato che, nel presente caso di studio, una riduzione del valore del modulo elastico non andrebbe a favore di sicurezza in quanto comporterebbe un allungamento del periodo fondamentale, che implica in genere una riduzione delle ordinate spettrali e quindi delle forze sismiche di verifica con conseguente sottostima degli effetti sismici (Fig.2).

A favore di sicurezza, perciò, si è deciso di adottare il modulo elastico del materiale integro.



Figura 1 Modello Concio\_Centrale

### Analisi modale

Estrazione dei periodi propri di vibrazione

Periodo proprio della struttura			
$\nu=0,1$			
	$T_1$ [s]	$T_2$ [s]	
$E_1 = 30 \cdot 10^9$	1,017	0,433	
$E_{175} = 0,75 E_1$	1,174	0,500	
$E_{130} = 0,5 E_1$	1,438	0,612	

Periodo proprio della struttura			
$\nu=0,2$			
	$T_1$ [s]	$T_2$ [s]	
$E_1 = 30 \cdot 10^9$	1,027	0,435	
$E_{175} = 0,75 E_1$	1,186	0,502	
$E_{130} = 0,5 E_1$	1,453	0,615	

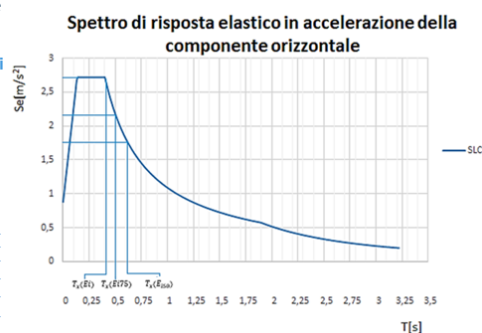


Figura 2 Spettro di risposta SLC e risultato analisi modale sul modello Concio\_Centrale a seguito della variazione dei parametri meccanici

Si è poi proceduto con la realizzazione degli altri modelli, via via più completi e complessi (Fig.3, Fig.4, Fig.5). Tutti i modelli sono stati sottoposti ad analisi modale per la ricerca delle frequenze di vibrazione. Il periodo proprio di vibrazione dei primi tre modelli, in cui si rappresentano solo i conci componenti la diga incastrati alla base, è sempre pari a 0,291 s, coincidente con il periodo fondamentale del concio centrale n 5, caratterizzato

dalla maggiore altezza e quindi dalla maggiore massa. Nel modello Diga+Terreno si registra un lieve incremento del valore del periodo in quanto, da una parte, aumenta il valore della massa ma, allo stesso tempo, diminuisce anche il valore di rigidità in quanto non vi è più un vincolo di incastro alla base dei conci. Il periodo fondamentale del modello Diga+Terreno+Acqua è pari a 0,301 s, a dimostrazione del fatto che un aumento della massa del modello porta alla diminuzione della frequenza di vibrazione.

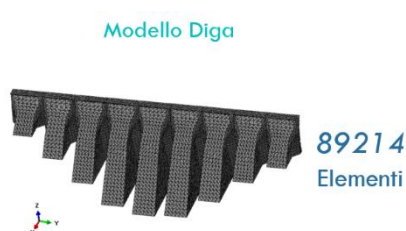


Figura 3 Modello Diga, Abaqus 6.13

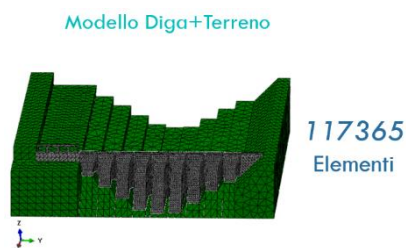


Figura 4 Modello Diga +Terreno, Abaqus 6.13

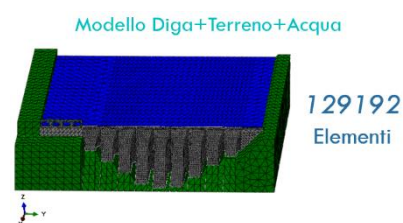


Figura 2 Modello Diga+Terreno+Acqua, Abaqus 6.13

## Fase 2. Analisi sismica con Spettro di Risposta

Il lavoro prosegue sottoponendo i modelli ad una analisi sismica attraverso il metodo della Analisi Modale con Spettro di Risposta, considerando sia la componente orizzontale che quella verticale allo stato limite di collasso (Fig.6 e Fig.7).



Figura 6 Spettro di risposta SLC, componente orizzontale



Figura 7 Spettro di risposta SLC, componente verticale

Le analisi mostrano che il modello Diga ha lo spostamento massimo, dell'ordine di 1,25 cm, nella sommità del concio di massima altezza e il massimo sforzo, pari a  $3,74 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ , alla sua base. Anche nel modello Diga+Terreno i massimi valori di spostamento si hanno alla sommità del concio con maggiore altezza e massimo sforzo di trazione alla base, con un lieve incremento rispetto al modello senza terreno.

Per eseguire l'analisi con spettro di risposta del modello Diga+Terreno+Acqua, composto da 129192 elementi, servirebbe un processore con prestazioni superiori rispetto a quelle a disposizione e per questo motivo, per tener conto della presenza dell'inerzia derivante dall'acqua nel bacino a contatto con la diga, si è utilizzato il metodo semplificato di Westergaard nel quale l'azione idrodinamica viene assimilata a quella prodotta da un solido di forma parabolica. La massa derivante da tale volume d'acqua può essere considerata come massa aggiuntiva rispetto a quella degli elementi della diga (Fig.8). In realtà però solo la massa in direzione ortogonale alla diga produce azioni inerziali. ABAQUS però non consente di separare le masse aggiunte nelle diverse direzioni. Per valutare l'influenza di queste masse aggiuntive, è stata eseguita l'analisi modale con spettro di risposta del modello con massa aggiunta nelle tre direzioni (Fig.9) e del modello privo della massa dell'acqua. Osservando i risultati ottenuti si evince che gli spostamenti derivanti dai primi modi di vibrare della struttura si hanno in direzione y, lungo l'asse della diga, direzione in cui non agisce l'azione idrodinamica e non c'è inerzia aggiuntiva dovuta all'acqua. In ogni caso, confrontando le frequenze proprie di vibrazione del modello Diga+Terreno e del modello Diga+Terreno+AcquaFittizia si può osservare che trascurare le masse aggiuntive dovute all'acqua va a favore di sicurezza, in quanto il valore del periodo proprio è inferiore e interseca la parte ad accelerazione costante dello spettro di risposta (SLC), mentre aggiungere la massa dell'acqua farebbe

aumentare il valore del periodo fondamentale e quindi considerare valori più bassi di accelerazione spettrale (Fig.10).

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

Concio	Densità Iniziale conco	Nuova densità
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	23.00	4.045
2	23.00	4.397
3	23.00	4.605
4	23.00	4.677
5	23.00	4.737
6	23.00	4.731
7	23.00	4.649
8	23.00	4.466
9	23.00	4.220

Figura 8 Nuovi valori di densità da assegnare ai conci



Figura 9 Modello Diga+Terreno+Acqua Fittizia, Abaqus 6.13



Figura 10 Valori del periodo a seguito di analisi modale con SdR del modello Diga+Terreno e Diga+Terreno+Acqua Fittizia

### Fase 3. Analisi dinamica con accelerogrammi spettro-compatibili

Infine, è stata eseguita un'analisi dinamica con integrazione al passo per la quale è stato necessario impiegare elementi tetraedrici lineari a 4 nodi, con dimensione pari a 5, appartenenti alla famiglia 'Explicit' (Fig.11). È stato utilizzato un'accelerogramma naturale compatibile con lo spettro in accelerazione (SLC) definito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, estratto mediante l'utilizzo del software Rexel (Fig.12). Essendo la Sardegna una zona a bassa sismicità, il software ha avuto difficoltà ad estrarre accelerogrammi per le due componenti e di conseguenza si è deciso di applicare lo stesso accelerogramma (compatibile con lo spettro allo stato limite di collasso) sia in direzione x che in direzione y. Dai risultati si evidenzia che gli spostamenti massimi si hanno nella sommità del concio centrale, mentre gli sforzi massimi si registrano alla base dei conci. Questi risultati hanno interesse sia per lo studio di eventuali fenomeni di martellamento che per la verifica della tenuta della diga alla base dei conci.

18283 elementi 'Explicit' tetraedrici lineari a 4 nodi, dimensione 5

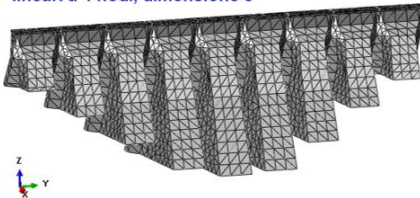


Figura 11 Modello Diga per analisi time-history

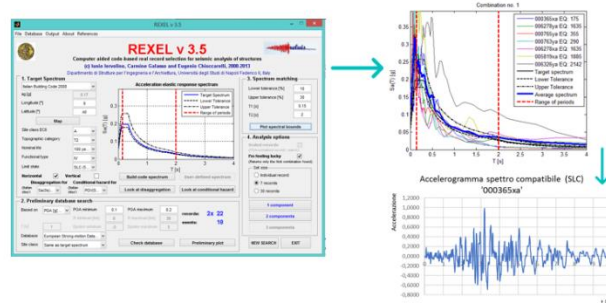


Figura 12 Accelerogramma spettro compatibile estratto mediante Rexel

### Fase 4. Analisi dei principali risultati ottenuti

I massimi valori di spostamento ottenuti attraverso l'analisi modale con spettro di risposta (Fig.13) e l'analisi time-history (Fig.14), sono dell'ordine di 2,5 cm. Per evitare il martellamento tra conci contigui sarebbe necessario che ci fosse perciò una distanza tra i conci dell'ordine di 5 cm. Poiché i giunti tra i conci presenti nella diga del Liscia hanno dimensione di 20 cm, il fenomeno del martellamento è scongiurato.

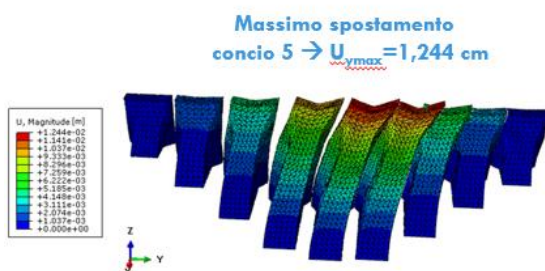


Figura 13 Massimo spostamento del Modello Diga, analisi modale con Spettro di risposta

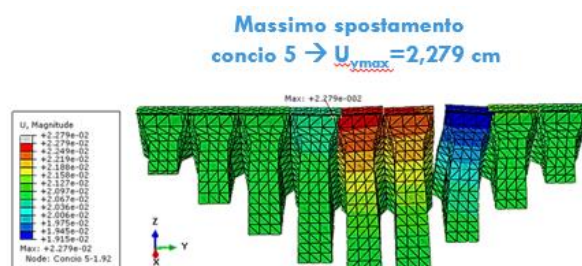


Figura 14 Massimo spostamento del Modello Diga, analisi time-history

Un punto di criticità è messo però in evidenza dallo studio degli sforzi sismici. I risultati numerici ottenuti sia con l'analisi modale con spettro di risposta (Fig.15) che con l'analisi con integrazione al passo (Fig.16), evidenziano la presenza di sforzi di trazione alla base del concio centrale, vedi Figure 15 e 16. Questi sforzi di trazione potrebbero provocare un distacco di alcuni conci dal terreno, con il pericolo di fenomeni di infiltrazione dell'acqua presente nel bacino che potrebbero provocare problemi di tenuta della struttura.

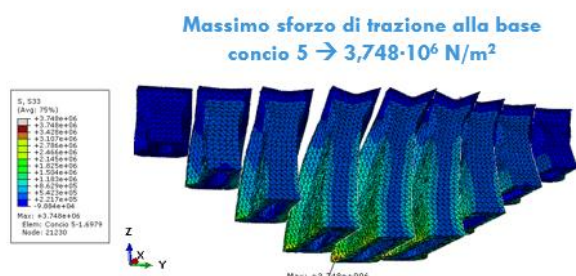


Figura 15 Massimo sforzo del Modello Diga, analisi modale con spettro di risposta

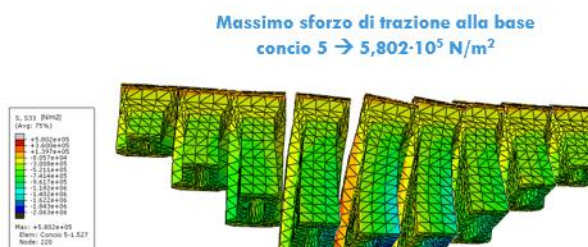


Figura 16 Massimo sforzo del Modello Diga, analisi time-history

## Conclusioni

Alcune degli aspetti evidenziati dallo studio sono i seguenti:

- Per una corretta presa in conto dell'azione idrodinamica mediante l'utilizzo del metodo semplificato di Westergaard, sarebbe opportuno inserire nel modello delle masse aggiuntive solo in direzione ortogonale rispetto all'asse della diga. Tale inserimento può comportare problemi in fase di modellazione. Trascurare comunque la presenza di tali masse aggiuntive va in genere a favore di sicurezza.
- Nonostante l'analisi modale sia un'analisi semplificata rispetto all'analisi dinamica con integrazione al passo e quindi dovrebbe essere più cautelativa, tale analisi fornisce valori di spostamento massimo alla sommità della diga inferiori rispetto a quelli registrati con analisi time history.
- Per la diga in esame viene esclusa la possibilità che si abbiano fenomeni di martellamento tra i conci durante gli eventi sismici più violenti in quanto lo spostamento massimo in sommità di ciascun concio è dell'ordine di 2 cm (quindi presupporrebbe un giunto di almeno 5 centimetri), mentre tra i conci si ha un giunto di 20 centimetri come risulta dai dati progettuali.
- Sia con l'analisi con Spettro di Risposta che con l'analisi al passo con accelerogrammi spettro-compatibili si sono trovate azioni di trazione alla base dei conci che potrebbero avere effetti molto pericolosi per l'eventuale distacco del concio dal terreno e il conseguente passaggio d'acqua con problemi di tenuta in corrispondenza della zona di stacco. Questo problema potrebbe riscontrarsi anche in altre dighe della stessa tipologia, ossia a conci cavi di tipo 'Marcello'.
- Si evidenzia l'importanza di realizzare modelli tridimensionali rappresentanti lo sbarramento, grazie ai quali è possibile eseguire analisi che consentono di tener conto degli effetti sismici nelle due direzioni x e y, di determinare problemi di sforzo ortogonali al piano della diga (trazioni all'estremità del concio), di calcolare gli spostamenti laterali dei conci considerando i contributi di tutti i modi (anche quelli fuori dal piano), di eseguire analisi complete che tengano conto dell'interazione dello sbarramento sia con il terreno e con il bacino e di effettuare analisi dinamiche time-history con due o tre componenti del terremoto.

L'importanza del presente lavoro risiede nella modellazione e nell'analisi 3D di un particolare tipo di diga a gravità (con conci 'Marcello') di cui si trovano esempi in diverse parti d'Italia e d'Europa. Tale tipo di struttura molto raramente è stata studiata con analisi così complete. Lo studio esposto nella presente tesi è parte di un lavoro di ricerca più ampio che prevederà anche l'analisi dinamica al passo con altri accelerogrammi spettro-compatibili considerando sia la sola diga che il modello Diga+Terreno ed infine anche analisi complete del modello Diga+Terreno+Acqua, comprendenti il fenomeno di interazione fluido-struttura.