

# Premio tesi di laurea

## Abstract

**Nome e cognome:** Daniele Innocenzi

**Università:** Università di Roma La Sapienza

**Autore:** Daniele Innocenzi

**Titolo tesi:** Simulazione numerica della risposta sismica di una diga di terra zonata mediante il codice di calcolo *Plaxis*

## Indice

<b>Scopo:</b> .....	2
<b>Sintesi sull'evoluzione del lavoro:</b> .....	2
<b>Durata:</b> .....	3
<b>Conclusioni:</b> .....	3

**Scopo:**

L'obiettivo principale dell'elaborato è quello di valutare la risposta sismica della diga di terra zonata di Montedoglio (AR) mediante la modellazione numerica delle fasi di costruzione della diga, di filtrazione in presenza dell'invaso e di risposta dinamica alle sollecitazioni sismiche. Particolare attenzione è stata prestata al fenomeno di amplificazione del moto sismico in cresta e all'influenza dell'applicazione combinata delle componenti orizzontale e verticale del moto sismico in ingresso sulla risposta della diga.

**Sintesi sull'evoluzione del lavoro:**

In primo luogo, è stata condotta un'analisi di letteratura sulla risposta sismica delle dighe di materiali sciolti, volta a confrontare i risultati delle simulazioni numeriche pubblicate in letteratura con le osservazioni effettuate in occasione di eventi sismici in prossimità di dighe strumentate. Tale confronto è stato effettuato in termini di variazione del fattore di amplificazione dell'accelerazione tra la base e la cresta della diga, in funzione dell'accelerazione di picco di base. I valori calcolati nelle analisi numeriche sono stati confrontati graficamente con la relazione analitica proposta da Lanzo et al. (2019), costruita sulla base di registrazioni accelerometriche di 74 eventi, registrate in corrispondenza di 39 dighe internazionali.

Le analisi dinamiche della diga di Montedoglio sono state precedute da una fase di calibrazione monodimensionale del codice di calcolo, eseguita prendendo come riferimento il progetto "Prenolin", in modo da confrontare i risultati ottenuti con *Plaxis* con quelli di altri codici di calcolo. Il modello costitutivo utilizzato nelle analisi non lineari è l'*HS-small*, i cui parametri sono stati determinati in modo tale da tarare le curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del fattore di smorzamento calcolate dal modello con quelle proposte da Vucetic e Dobry (1991).

Le analisi dinamiche della diga di Montedoglio sono state eseguite schematizzandone la sezione maestra con un modello di calcolo costituito da 5666 elementi finiti di dimensioni variabili in funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali. Le proprietà fisiche dei materiali del corpo diga e dei terreni di fondazione sono state determinate sulla base dello studio di rivalutazione della sicurezza sismica della diga effettuato da Lanzo (2018), mentre i parametri meccanici del modello geotecnico sono stati stimati effettuando uno studio di calibrazione con le misure assestimentriche effettuate in fase di costruzione nel corpo del rilevato.

Lo studio numerico è stato articolato in più fasi. A partire dall'analisi statica della diga in condizioni drenate si è effettuata un'analisi della filtrazione in moto stazionario, considerando l'invaso al livello di massima regolazione, successivamente si è stimata la frequenza di risonanza in campo elastico, calcolando la funzione di trasferimento tra un punto alla base della diga e uno in corrispondenza della cresta.

Successivamente, è stata eseguita una ricerca di segnali accelerometrici compatibili con lo studio sismotettonico del sito su *database* nazionali ed internazionali, che sono stati in seguito selezionati e scalati in modo tale da far risultare lo spettro medio in accordo con lo spettro di riferimento associato al sito e allo stato limite considerato, secondo la normativa vigente. Inizialmente sono state selezionate 35 registrazioni, successivamente ridotte a 30 dopo aver effettuato un confronto con le relazioni di attenuazione dell'intensità di Arias proposte da Travarasrou et al. (2003).

I segnali selezionati sono stati filtrati nel campo di frequenze tra 0.2 e 15 Hz e applicati alla base della *mesh*, in un primo momento esclusivamente in direzione orizzontale e poi combinando entrambe le componenti (orizzontale e verticale) dell'accelerogramma.

Per verificare l'attendibilità del modello si è effettuato un confronto, in termini di spettri di risposta in accelerazione e di storie temporali delle accelerazioni e degli spostamenti in cresta, con l'analisi effettuata con lo stesso input sismico da Lanzo (2018) con il codice di calcolo *Flac*.

Quindi sono state eseguite in totale 60 analisi dinamiche, di cui 30 applicando entrambe le componenti del moto sismico e 30 applicando esclusivamente la componente orizzontale.

Per ogni analisi si è calcolato il fattore di amplificazione dell'accelerazione in cresta e i risultati sono stati messi a confronto con le relazioni proposte da Lanzo et al. (2019) per le componenti orizzontale e verticale del moto.

Inoltre, si è valutata la variazione dei cedimenti residui, calcolati in cresta, in funzione dell'intensità di Arias del segnale di ingresso.

**Durata:**

9 mesi

**Conclusioni:**

Dall'analisi di letteratura si è constatato che le analisi numeriche permettono di riprodurre in maniera soddisfacente il fenomeno dell'amplificazione del moto sismico di base per le dighe di materiali sciolti. In particolare, specialmente per le dighe di terra, si è notata chiaramente l'influenza del comportamento non lineare del terreno sulla risposta sismica. Al crescere dell'accelerazione massima alla base della diga, si è osservata, infatti, una diminuzione dell'amplificazione, associabile all'incremento delle capacità dissipative dei materiali.

Nella fase di calibrazione monodimensionale, dal confronto degli spettri di risposta in accelerazione calcolati in superficie, si è osservato generalmente un buon accordo con gli altri codici di calcolo, anche se, nelle analisi non lineari, per i maggiori livelli di intensità sismica, *Plaxis* sembra sovrasmorzare le accelerazioni calcolate.

Per la calibrazione della fase di costruzione e successivo invaso della diga, dai risultati dell'analisi statica e dell'analisi di filtrazione si è osservato un ottimo riscontro con le misure assestometriche e piezometriche, confermando l'affidabilità del modello di calcolo adottato.

L'analisi dinamica eseguita con lo stesso input sismico applicato da Lanzo (2018) con *Flac* ha dato risultati coerenti sia in termini di spostamenti che di accelerazioni in cresta.

Per ognuna della 60 analisi dinamiche eseguite, si è calcolato il fattore di amplificazione dell'accelerazione in cresta e i risultati sono stati messi a confronto con le relazioni proposte da Lanzo et al. (2019) per le componenti orizzontale e verticale del moto. Il confronto ha messo in luce, ancora una volta, l'effetto della non linearità sulla risposta sismica delle dighe di terra, per il quale all'aumentare dell'accelerazione di picco alla base del rilevato si verifica una diminuzione dell'amplificazione in cresta. In direzione orizzontale si è osservato un buon accordo con la relazione proposta da Lanzo, mentre in direzione verticale i fattori di amplificazione calcolati presentano valori maggiori rispetto a quelli della relazione empirica. Una possibile spiegazione può essere data dal fatto che l'accelerazione verticale in cresta calcolata con *Plaxis* sia sovrastimata. Tuttavia, anche lo stesso Autore eseguendo analisi numeriche sulla stessa opera ha ottenuto amplificazioni più elevati in direzione verticale rispetto alla relazione proposta (Lanzo et al., 2019).

Inoltre, le analisi hanno permesso di effettuare uno studio della variazione dei cedimenti residui calcolati in cresta in funzione dell'intensità di Arias del segnale di ingresso. Dallo studio i cedimenti risultano essere ben correlati con l'intensità di Arias, mostrando con questa una proporzionalità diretta e mediamente risultano maggiori applicando entrambe le componenti del moto sismico.

Il valore massimo dei cedimenti in cresta è risultato pari a 27 cm, che rimane comunque ben lontano dal valore del franco di sicurezza della diga (franco netto 1.5 m).

In conclusione, si può osservare che le analisi numeriche rappresentano un valido strumento per valutare le prestazioni in condizioni sismiche delle dighe di materiali sciolti, nel caso in cui si disponga di un adeguato livello di caratterizzazione geotecnica dei materiali e di dati di monitoraggio attraverso i quali è possibile effettuare una robusta calibrazione dei modelli di calcolo.

### **Sviluppi futuri:**

Possibili sviluppi futuri possono essere l'implementazione di modelli costitutivi più avanzati che consentano di riprodurre in maniera ancora più accurata il comportamento della diga, con particolare riferimento alla calibrazione in fase di costruzione e di successivo invaso.