

MODELLAZIONE NUMERICA DEL COMPORTAMENTO SISMICO DI DIGHE IN TERRA

Introduzione e caso studio

Il lavoro di tesi ha trattato lo studio del comportamento sismico di dighe in terra caratterizzate da rivestimento a monte impermeabilizzante in conglomerato bituminoso. La criticità principale di queste dighe è costituita dalla resistenza nei confronti delle azioni sismiche, che inducono spostamenti considerevoli nella struttura, concentrati in larga parte nel primo terzo superiore. Il rivestimento bituminoso, a causa degli spostamenti orizzontali subiti, sperimenta sollecitazioni e deformazioni assiali, che per eventi sismici particolarmente intensi superano i rispettivi valori limite di cracking. Ne consegue la fessurazione dello stato impermeabilizzante e l'infiltrazione d'acqua all'interno del corpo diga.

Alla luce delle criticità evidenziate, la finalità del lavoro è la formulazione di valori sismici soglia, definiti in termini di accelerazione del terreno (PGA – Peak Ground Acceleration), ai quali è associato il raggiungimento dello stato limite di fessurazione nel rivestimento bituminoso.

La modellazione agli elementi finiti creata per questo primo scopo è stata quindi utilizzata per l'implementazione ad una struttura geotecnica esistente di un legame costitutivo non lineare avanzato per terreni a grana grossa, conosciuto in letteratura con il nome di "Gajo-Wood". L'obiettivo principale è il confronto e la validazione reciproca del modello Gajo-Wood rispetto al classico Mohr-Coulomb, oltre alla ricerca di problematiche di applicabilità a casi esistenti, legate soprattutto al maggior carico computazionale dovuto all'utilizzo di un modello costitutivo avanzato.

Il lavoro è stato condotto mediante la modellazione agli elementi finiti dello sbarramento artificiale del bacino di Godey, la diga in terra più alta del territorio svizzero, che, con un'altezza pari a 32m ed una lunghezza di quasi 160m, forma un bacino di quasi 1 milione di m³ d'acqua. In figura 1 sono riportate le caratteristiche geometriche del rilevato.

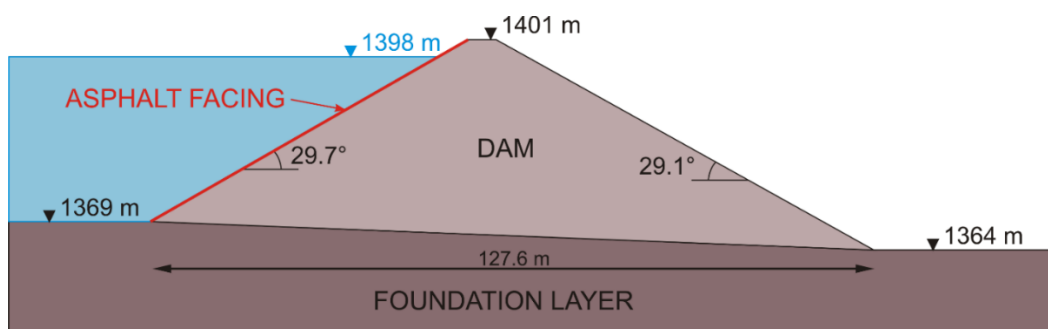


Figura 1: sezione trasversale della diga di Godey.

Modellazione agli elementi finiti

Il comportamento sismico della diga di Godey è stato simulato mediante un modello agli elementi finiti, figura 2. Le caratteristiche geometriche del rilevato sono aderenti con quanto riportato dal progetto della diga, mentre i parametri meccanici dei terreni della diga e dello strato di fondazione sono stati desunti dalle analisi di laboratorio condotte all'epoca della costruzione.

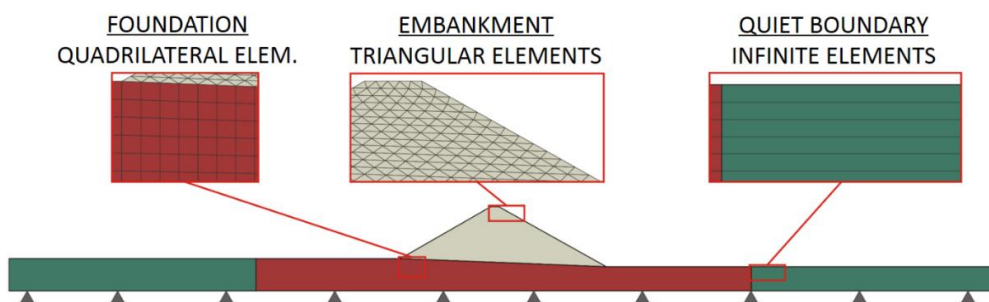


Figura 2: modello agli elementi finiti della diga di Godey.

La simulazione è composta da diversi step di carico, ordinati secondo un criterio temporale: la prima fase, di tipo geostatico, prevede il calcolo delle tensioni di esercizio nel terreno della diga, dovute esclusivamente ai carichi gravitazionali degli elementi strutturali. Verosimilmente a quanto accade a fine costruzione del rilevato, si procede quindi all'applicazione del carico idrostatico dovuto all'acqua presente all'interno del bacino ed alla successiva determinazione delle pressioni geostatiche. L'evento sismico viene infine simulato mediante analisi dinamica non lineare con l'applicazione al passo di una storia di accelerazioni generata appositamente a partire dallo spettro di risposta del sito di Godey. In figura 3 sono riportate le diverse storie di accelerazione utilizzate nell'analisi.

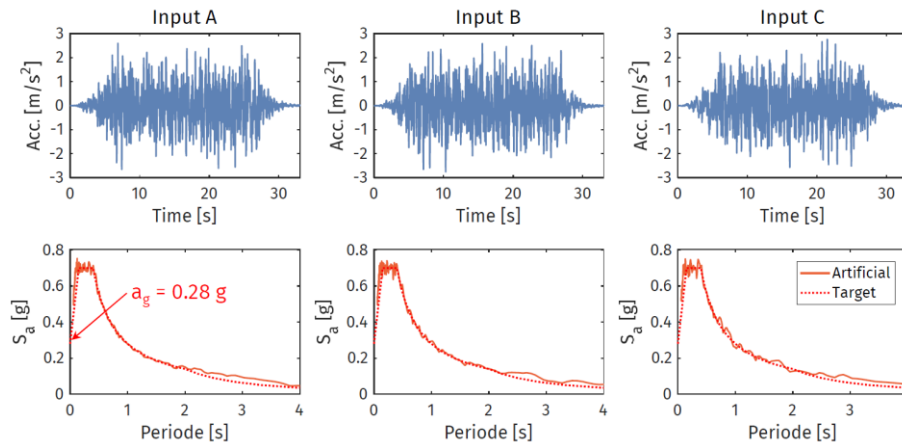


Figura 3: accelerogrammi utilizzati nelle analisi.

Risultati delle analisi dinamiche non lineari

I risultati delle analisi dinamiche non lineari evidenziano una distribuzione di spostamenti orizzontali concentrati nel terzo medio superiore del lato a valle della diga. Contrariamente, nel versante a monte la pressione idrostatica dell'acqua del bacino permette di contenere gli spostamenti, almeno fino alla prossimità del pelo libero. Superato il livello dell'acqua, anche il lato monte sperimenta spostamenti orizzontali confrontabili con i corrispettivi lato valle.

L'analisi della distribuzione degli spostamenti orizzontali permette in anticipo di definire la zona nella quale si concentreranno i maggiori problemi di fessurazione per lo strato di rivestimento. In prossimità del pelo libero, dove la pressione idrostatica dell'acqua viene meno, il rivestimento subisce gli effetti maggiori degli spostamenti orizzontali della diga, deformandosi e fessurandosi. In figura 4 e 5 rispettivamente il campo di spostamenti e l'andamento degli spostamenti in cresta.

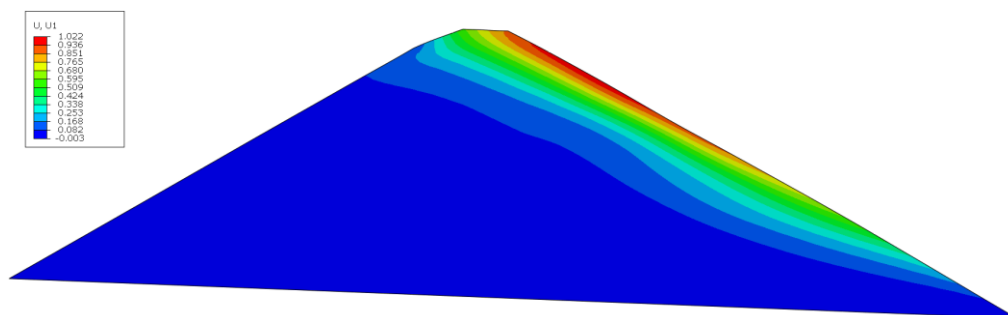


Figura 4: distribuzione degli spostamenti orizzontali all'interno della diga.

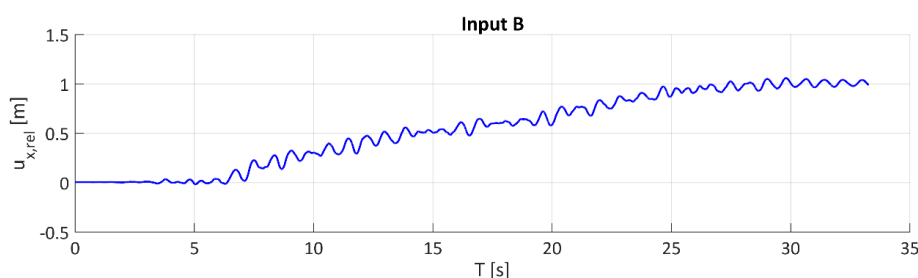


Figura 5: valori di spostamento della cresta della diga.

Una volta simulato il comportamento dinamico della diga mediante analisi dinamiche non lineari e svolte diverse analisi parametriche per quantificare l'influenza dei diversi parametri geometrici e meccanici della diga, il lavoro si è concentrato nella stima reale dei valori di deformazione raggiunti nel rivestimento impermeabilizzante.

Il secondo livello di modellazione agli elementi finiti ha visto quindi l'implementazione dello strato di rivestimento, modellato mediante l'utilizzo di elementi monodimensionali beam, in prima analisi perfettamente incollati alla diga stessa.

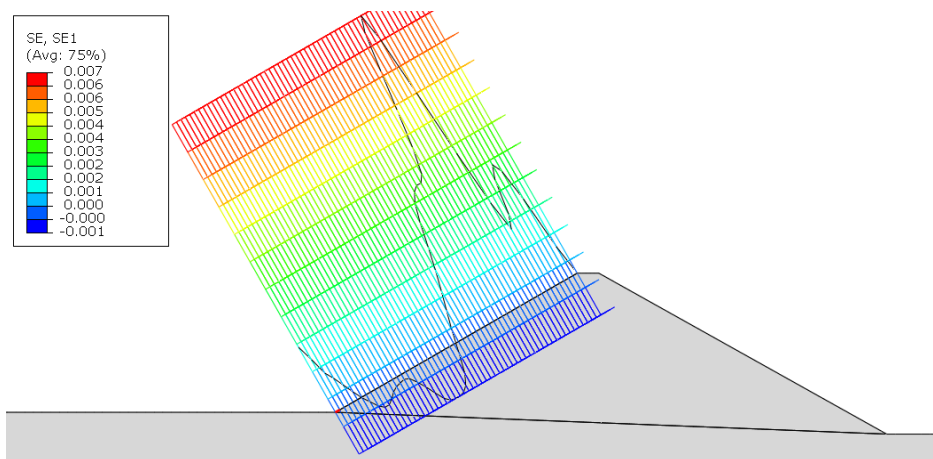


Figura 6: deformazioni assiali nel rivestimento post-sisma.

I risultati ottenuti dalle simulazioni confermano quanto atteso: il picco di deformazione assiale si ottiene in corrispondenza del pelo libero del bacino, dove l'effetto confinante della pressione idrostatica dell'acqua viene meno, con conseguente aumento degli spostamenti orizzontali. In figura 6 l'andamento delle deformazioni assiali nello strato di rivestimento.

I valori massimi di deformazione totale (definita come somma delle componenti assiale e flessionale) raggiungono lo 0,95%, molto prossimo al valore di cracking, il quale è stato assunto pari all'1%, sulla base delle caratteristiche meccaniche dello strato bituminoso. Un secondo picco di deformazione è registrato alla base della diga, ma non raggiunge valori rilevanti (0,3%).

Dal punto di vista della sicurezza globale dello sbarramento, i risultati sono positivi: infatti, benché la possibilità di fessurazione sia concreta, la zona a rischio è caratterizzata da pressioni idrostatiche limitate o del tutto assenti. Pertanto, la pressione dell'acqua è troppo limitata per instaurare un moto di filtrazione che possa compromettere realmente la stabilità globale della diga.

Per ottenere una visione più ampia del fenomeno, le successive analisi si sono focalizzate nella determinazione dell'influenza di diversi fattori meccanici nella stima del valore di deformazione: attrito fra rivestimento e diga, rigidità del terreno della diga, etc. L'ipotesi di strato di rivestimento perfettamente incollato è penalizzante per il calcolo della deformazione: con questa ipotesi infatti lo scorrimento relativo fra strato di rivestimento e diga è nullo e conseguentemente le deformazioni assiali sono massime, come si vede in figura 7.

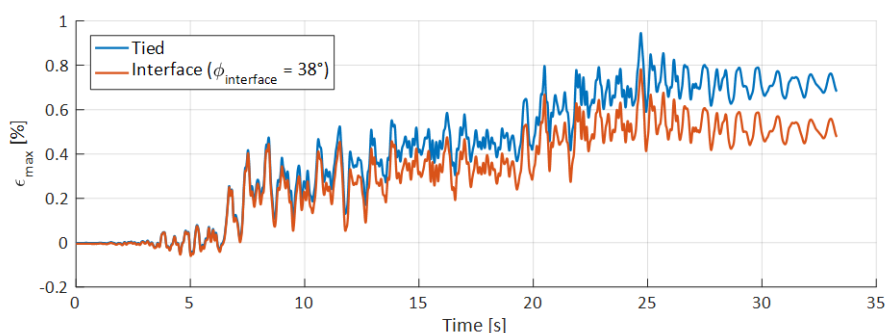


Figura 7: confronto andamento deformazioni totali nell'ipotesi di scorrimento nullo e con attrito.

In conclusione, si è definito quindi un abaco di riferimento per la correlazione diretta fra PGA e deformazione assiale attesa per il rivestimento, nel caso di una diga assunta come standard, le cui caratteristiche geometriche siano simili a quelle della diga di Godey (figura 8).

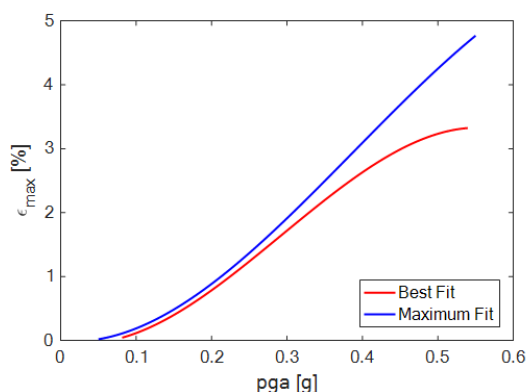


Figura 8: abaco di relazione fra PGA e deformazione attesa nel rivestimento

Modello costitutivo Gajo – Wood

Il modello costitutivo non lineare avanzato per la simulazione del comportamento di terreni a grana grossa è stato presentato per la prima volta nel 1999. Il vantaggio del modello consiste nella definizione attendibile del comportamento non lineare di terreni a grana grossa di qualsiasi densità relativa e per qualsiasi pressione di confinamento applicata. Il modello descrive correttamente sia il comportamento edometrico sia il comportamento ciclico del terreno, cogliendo correttamente la perdita di rigidità del provino all'avvicinarsi del punto di rottura. La chiave del modello consiste nella definizione di un parametro di stato funzione delle caratteristiche del terreno che ne determina le dimensioni delle superfici di resistenza e di snervamento.

La calibrazione dei parametri del modello costitutivo è avvenuta riproducendo il comportamento delle prove triassiali condotte sui provini di terreno estratti direttamente dal corpo diga, riportato in linea discontinua in figura 9.

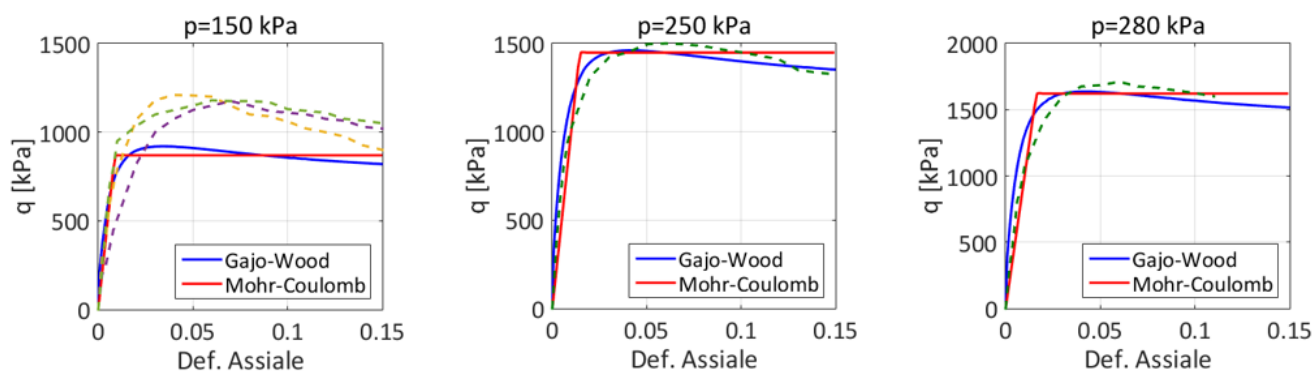


Figura 9: confronto risultati prove TxCD reali e per terreni simulati con modello MC e GW

Calibrati i parametri per la definizione del comportamento del terreno della diga, quest'ultimo è stato implementato all'interno del modello FEM mediante UMAT (User-defined material model). I risultati delle analisi non lineari evidenziano come gli spostamenti orizzontali in cresta fra i due modelli siano in larga parte sovrapponibili, mentre gli spostamenti verticali siano molto maggiori nel caso di modello GW rispetto al classico MC, figura 10.

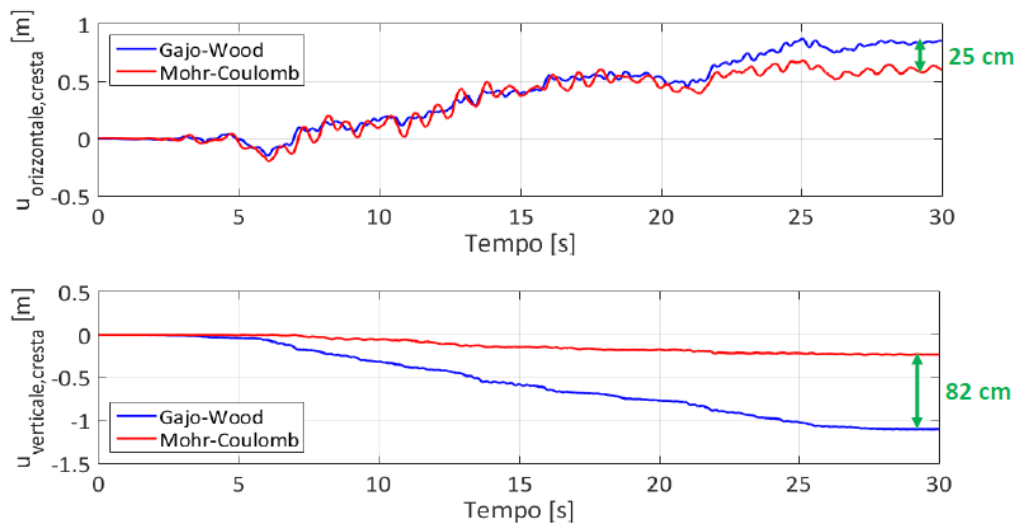


Figura 10: spostamenti orizzontali e verticali in cresta della diga fra modello MC e GW

I cedimenti verticali maggiori, ottenuti con il modello costitutivo avanzato, sono dovuti all'accumulo di deformazione volumetrica di contrazione per piccoli range di scorrimento, tenuta correttamente in considerazione dal modello GW e trascurata invece dal modello MC. Questo è evidente nella simulazione agli elementi finiti di una prova di taglio semplice, dove, per piccoli valori di scorrimento, il modello di Mohr-Coulomb fornisce valori di deformazione volumetrica maggiore o uguale a zero, mentre il modello di Gajo-Wood simula correttamente la contrazione e la successiva espansione, figura 11-prova di taglio semplice.

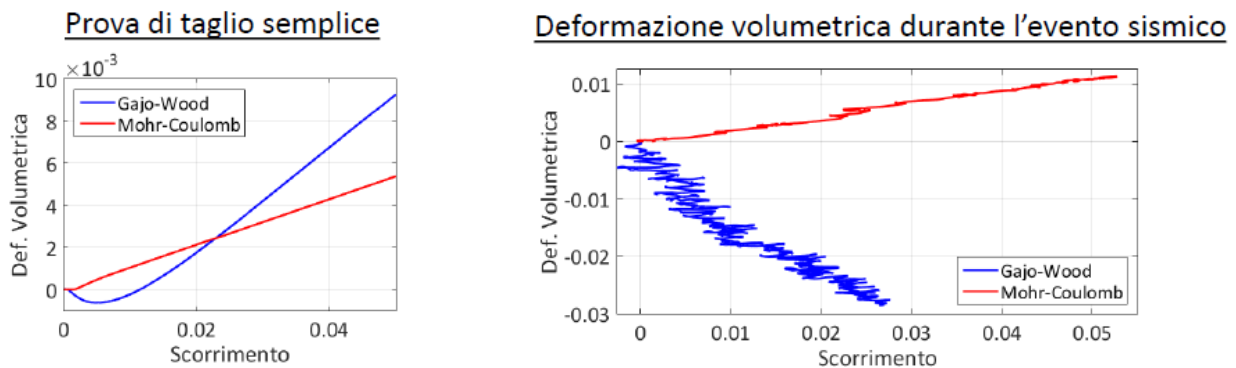


Figura 11: risultati della prova di taglio semplice del terreno della diga secondo i due modelli costitutivi e deformazione volumetrica totale accumulata in cresta a fine evento sismico

Lo stato di sollecitazione di un campione di terreno della diga durante l'evento sismico è paragonabile allo stato di sollecitazione di un provino soggetto a prova di taglio semplice. I valori di scorrimento misurati durante le simulazioni dell'evento sismico sono compresi nella zona in cui il provino nella prova di taglio semplice sperimenta una contrazione di volume, secondo il modello avanzato GW. Contrariamente secondo il modello MC il provino non subisce variazioni volumetriche oppure espande. Pertanto, come si vede in figura 11-deformazione volumetrica, le simulazioni condotte con il modello costitutivo avanzato evidenziano un accumulo di contrazioni verticali in cresta alla diga (linea blu) che si traduce in un abbassamento della cresta stessa, figura 10. Contrariamente, il modello MC, in armonia con i risultati della prova di taglio semplice, stima una leggera espansione del provino (linea rossa), e pertanto gli spostamenti verticali durante il sisma sono nettamente inferiori, figura 10.