

PREMIO TESI DI LAUREA

ABSTRACT

NOME E COGNOME: **EDOARDO LUSINI**

UNIVERSITA': **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA**

AUTORE/I: **EDOARDO LUSINI**

TITOLO TESI: **COMPORTAMENTO E STABILITÀ DELLA SPALLA DESTRA DELLA DIGA DI RIDRACOLI**

DURATA: **circa 7 mesi – discussa il 22 luglio 2019**

INDICE:

CAPITOLO 1: presentazione sintetica della diga di Ridracoli, con particolare enfasi sul contesto idro-geologico;

CAPITOLO 2: caratterizzazione dell'ammasso roccioso di spalla destra (sintesi prove di laboratorio e prove di sito) e analisi del monitoraggio del comportamento (per mezzo di estensimetri, pendoli e piezometri);

CAPITOLO 3: descrizione della spalla destra e dei lavori che l'hanno interessata, con dettaglio dei tiranti installati e delle fasi di scavo adottate;

CAPITOLO 4: introduzione teorica al metodo all'equilibrio limite e al suo utilizzo per accertare la stabilità di spalle di dighe ad arco. Segue l'applicazione pratica del metodo per la verifica della spalla destra della diga di Ridracoli in condizioni statiche e sismiche (con approccio pseudostatico);

CAPITOLO 5: cenni sul metodo agli elementi finiti, sulla sua implementazione su Plaxis®2D e sul modello costitutivo Jointed Rock; segue la modellazione numerica bidimensionale della spalla destra della diga di Ridracoli, limitatamente alle fasi di scavo pre-costruzione.

SCOPO:

L'obiettivo principale dell'elaborato di tesi qui presentato è quello di verificare le condizioni di stabilità attuali della spalla destra della diga di Ridracoli, riprendendo e aggiornando, anche alla luce degli sviluppi normativi, quanto analizzato dai progettisti della diga nell'ambito del Progetto Esecutivo. Sono inoltre analizzate le condizioni di stabilità e deformabilità della stessa spalla destra durante i lavori di scavo funzionali alla costruzione dell'opera, per mezzo di analisi all'equilibrio limite e agli elementi finiti, allo scopo di approfondire lo stato di conoscenza sulla storia deformativa dell'ammasso.

SINTESI SULL'EVOLUZIONE DEL LAVORO:

L'occasione per lo sviluppo di questo tema nasce dalla volontà dei Dirigenti di Romagna Acque - Società delle Fonti S.p.A., estremamente sensibili alla sicurezza dell'opera pubblica più importante storicamente realizzata nel territorio della Provincia di Forlì-Cesena. In particolare, la verifica della stabilità della spalla destra si inquadra nell'ambito della rivalutazione delle condizioni di sicurezza sismica degli impianti esistenti, richiesta dalle recenti norme tecniche in materia di dighe. A titolo esemplificativo si riporta un passo tratto dalle istruzioni ministeriali del 2018 (Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18) "Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie", 2018) ove si può leggere che ad *oggi*, a

circa quindici anni dall'emanazione del DL 79/2004, il processo di rivalutazione delle condizioni di sicurezza sismica delle dighe è nel pieno del suo svolgimento e vede impegnati in primo luogo i concessionari, a cui è demandato l'onere di effettuare le verifiche.

Romagna Acque – Società delle Fonti ha messo a disposizione dello scrivente il materiale presente in archivio riguardante la diga, dalla progettazione al monitoraggio, comprese le risultanze dell'articolata campagna di indagini sull'ammasso roccioso di fondazione svolte in sede progettuale. L'opera, del tipo ad arco-gravità, poggia su una roccia sedimentaria di origine turbiditica denominata Formazione Marnoso-Arenacea. L'analisi delle discontinuità evidenzia la presenza tre famiglie pressoché ortogonali: superfici di strato (ST), giunti lungo l'immersione (KI) e giunti lungo la direzione di strato (KD). È stata inoltre ravvisata, all'interno della successione stratigrafica affiorante in spalla destra, la presenza di tre strati di marna laminata con caratteristiche di resistenza critiche ai fini della stabilità, accertate dalle risultanze di numerose prove di taglio diretto in sito. Le analisi si sono concentrate sullo studio di possibili cinematismi di collasso impostati su due di questi livelli marnosi denominati "primo strato laminato" e "secondo strato laminato".

Altro aspetto di interesse per i gestori dell'impianto riguarda l'effetto sulla stabilità delle opere di consolidamento a mezzo di tiranti di ancoraggio realizzate durante i lavori di scavo propedeutici alla costruzione della diga. Tali tiranti, necessari per la sicurezza delle maestranze al fronte di scavo, furono poi lasciati in tensione una volta terminati i lavori, per tutti gli anni di esercizio dell'impianto fino ad oggi. Uno degli obiettivi del lavoro di tesi è pertanto quello di determinare se il loro impatto sul comportamento dell'ammasso roccioso sia o meno trascurabile.

Dopo la descrizione sintetica dell'impianto di ritenuta nel suo complesso, che occupa interamente il primo capitolo, l'elaborato passa a descrivere le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso su cui insiste la diga, attraverso la rievitazione critica di tutte le prove geognostiche in sito e in laboratorio eseguite in fase di progettazione e per tutta la durata dei lavori di costruzione (Capitolo 2). Nel successivo Capitolo 3 l'attenzione si sposta sulle opere di consolidamento della spalla, rappresentate principalmente dai tiranti di ancoraggio: se ne descrivono le caratteristiche tecniche e le operazioni di installazione, nonché il controllo strumentale in termini di spostamenti eseguito per mezzo di estensimetri ad asta lunga. La descrizione e l'interpretazione delle misure di monitoraggio interessanti la porzione di ammasso oggetto di studio completa e conclude questo terzo capitolo. I risultati più originali sono riportati nei successivi capitoli, nei quali si analizza la stabilità della spalla destra della diga, attraverso approcci di crescente complessità, con lo scopo di definire il più probabile cinematismo di collasso e il relativo coefficiente di sicurezza.

Nel quarto capitolo la stabilità viene studiata attraverso l'applicazione del metodo all'equilibrio limite: la relativa semplicità di questo approccio consente di studiare una molteplicità di casi e scenari e di valutare l'influenza di vari fattori sulla stabilità. Viene descritta la realizzazione del modello tridimensionale del terreno e l'individuazione di cunei di roccia potenzialmente instabili su cui eseguire le analisi di stabilità. La forma delle porzioni di roccia potenzialmente instabili è definita secondo le indicazioni di massima contenute nel capitolo dedicato alle dighe ad arco delle linee guida per la valutazione degli impianti idroelettrici redatte dalla commissione federale degli Stati Uniti per la regolamentazione in materia energetica (Federal Energy Regulatory Commission, 2018). In esso è suggerito di considerare la formazione di cunei, in corrispondenza delle spalle della diga, separati dal resto dell'ammasso da tre superfici di discontinuità che, in questo caso, sono:

- una superficie con orientazione coincidente con quella dei piani di stratificazione (ST);
- una superficie con orientazione coincidente con quella della famiglia di discontinuità KKI;
- un piano verticale di rilascio al di sotto della struttura della diga che non offre alcun contributo resistente.

Le analisi all'equilibrio limite sono state svolte per mezzo di fogli di calcolo Excel®, con attivazione di macro, realizzati appositamente dallo scrivente, con i quali sono implementati i metodi all'equilibrio limite bidimensionale e tridimensionale. In particolare viene implementato il procedimento messo a punto da Warburton (1981) per lo studio all'equilibrio limite di un singolo cuneo roccioso di forma poliedrica, separato dall'ammasso circostante da un numero di discontinuità qualsiasi. Le analisi restituiscono sinteticamente le condizioni di stabilità della spalla sotto forma di coefficiente di sicurezza in vari scenari che comprendono la perdita di efficacia del sistema di tiranti, la variazione delle condizioni idrauliche e, soprattutto, l'applicazione dell'azione sismica equivalente, secondo un approccio pseudostatico.

Il quinto e ultimo capitolo affina la sola analisi bidimensionale attraverso una modellazione numerica agli elementi finiti. Per rappresentare l'ammasso viene utilizzato il modello Jointed Rock all'interno della piattaforma FEM Plaxis® 2D. I risultati di questa analisi sono costituiti dai campi di deformazione all'interno dell'ammasso e da mappe di localizzazione dei punti in cui sono raggiunte condizioni di plasticizzazione. Viene altresì calcolato un coefficiente di sicurezza riducendo di un fattore uniforme i parametri di resistenza, in modo da istituire un confronto con i risultati dell'analisi all'equilibrio limite del capitolo precedente.

CONCLUSIONI:

Attraverso le analisi effettuate è stato dapprima possibile ripercorrere l'iter progettuale della diga di Ridracoli, limitatamente alla stabilità della spalla destra. I coefficienti di sicurezza ottenuti in fase di progetto sono stati riconfermati quando sono stati adottati gli stessi parametri geotecnici, testando in tal modo l'affidabilità dei fogli di calcolo Excel® realizzati dallo scrivente per le analisi.

I principali contributi originali allo studio di stabilità sono stati ottenuti tramite analisi all'equilibrio limite tridimensionale. Nonostante si tratti di una rivalutazione sismica di un'opera esistente, soggetta in generale a prescrizioni meno severe, l'accelerazione al suolo per lo stato limite ultimo di collasso (SLC) risulta particolarmente elevata ($PGA = 0,449g$), diventando ancora maggiore se si considera l'amplificazione topografica ($S_T = 1,4$). In termini di forze pseudostatiche equivalenti la componente orizzontale del sisma corrisponde a circa il 17% della forza peso, mentre la componente verticale a circa l'8%. Il valore dell'accelerazione attesa al suolo sopra riportato è stato dedotto da uno specifico studio sismotettonico, recentemente commissionato dall'ente gestore dell'impianto all'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale. Le analisi all'equilibrio limite mostrano che la direzione critica per l'azione sismica è approssimativamente quella Nord-Sud per entrambi i cunei considerati. Sotto queste condizioni di carico la scelta estremamente cautelativa dei progettisti di porre una coesione nulla sulle superfici di discontinuità dell'ammasso non appariva più sufficiente a verificare le condizioni di stabilità. Applicando invece parametri geotecnici più aderenti ai risultati delle prove sperimentali (che hanno evidenziato una coesione non trascurabile), sebbene cautelativamente ridotti, le condizioni di sicurezza risultano sempre verificate, anche sotto l'azione sismica più gravosa, con un coefficiente di sicurezza minimo in corrispondenza del "primo strato laminato".

Altro aspetto distintivo di queste nuove analisi rispetto a quelle progettuali consiste nell'aver considerato le forze impresse da tiranti all'ammasso roccioso nelle verifiche di stabilità. L'opera di consolidamento, infatti,

non era stata compresa nelle verifiche di stabilità geotecniche della diga in esercizio poiché considerata come temporanea e ad esclusivo servizio delle operazioni di scavo. È importante sottolineare, tuttavia, che i tiranti sono stati mantenuti in tensione dopo la fine dei lavori di costruzione e lo sono tuttora, sebbene non se ne conosca con precisione la tensione residua. Dalle analisi effettuate le forze di ancoraggio risultano ridurre il coefficiente di sicurezza rispetto allo scorrimento del volume di roccia potenzialmente instabile, e sono quindi sfavorevoli ai fini della stabilità. Se future analisi in sito evidenziassero una perdita, anche consistente, di tensione nei tiranti di ancoraggio, questa evenienza influirebbe positivamente sulla stabilità globale della spalla, incrementando il coefficiente di sicurezza rispetto allo scorrimento dei blocchi potenzialmente instabili su cui si appoggia la struttura.

Oltre alle verifiche nelle condizioni attuali con impianto in esercizio, sono state svolte anche analisi bidimensionali e tridimensionali all'equilibrio limite nella situazione in cui si presentava la spalla durante i lavori di scavo. Anche queste analisi sono state confrontate con quelle di progetto (Bavestrello, 1983) e hanno confermato i risultati ottenuti all'epoca. Grazie alla natura quasi bidimensionale del meccanismo di collasso in questa condizione, è stato possibile svolgere parallelamente analisi agli elementi finiti (FEM) del fronte di scavo in condizioni piane di deformazione.

I risultati delle analisi FEM confermano quanto ottenuto con l'analisi all'equilibrio limite in termini di coefficiente di sicurezza e aggiungono informazioni circa la deformazione pre-rottura dell'ammasso. Sul codice di calcolo numerico agli elementi finiti Plaxis® 2D gli strati laminati sono stati modellati come interfacce dotate di un criterio di resistenza alla Mohr-Coulomb; il resto dell'ammasso, invece, è stato schematizzato come un continuo elasto-plastico isotropo a giunti ubiquitari Jointed Rock, in cui la giacitura dei piani di debolezza coincide con quella dei piani di stratificazione (ST). I tiranti di ancoraggio, elemento essenziale per la stabilità nelle condizioni di scavo aperto, una volta introdotti nelle analisi, hanno mostrato la loro efficacia nel prevenire le rotture superficiali spostando le zone a maggior comportamento plastico in corrispondenza del più profondo "terzo strato laminato", non intaccato dalle operazioni di scavo. È stata svolta un'analisi di sensitività sul parametro di coesione negli strati laminati, facendolo variare tra 60 kPa e 0 kPa. Si è notato come, assegnando all'ammasso valori di resistenza per coesione via via inferiori, la superficie di scorrimento critica tendesse a migrare verso gli strati più superficiali, e in particolare in corrispondenza del "primo strato laminato", ma importanti deformazioni plastiche occorressero anche in corrispondenza del secondo strato; utilizzando gli stessi parametri dell'analisi all'equilibrio limite ($\phi_{ST} = 13^\circ$; $c_{ST} = 50$ kPa), invece, il meccanismo di rottura risultava circoscritto allo scorrimento sul "secondo strato laminato". Oltre a migliorare le condizioni di stabilità della spalla, i tiranti di ancoraggio permettono anche di ridurre fortemente l'entità delle deformazioni plastiche negli strati di roccia più superficiali, aumentando la rigidezza dell'ammasso consolidato.

SVILUPPI FUTURI:

Già durante lo sviluppo della tesi è emersa la necessità di approfondire gli argomenti trattati nell'ambito di un quadro conoscitivo più ampio che non si limitasse alla trattazione della sola spalla destra con il solo utilizzo del metodo all'equilibrio limite. Sulla base di queste considerazioni sono state avviate due principali linee di sviluppo.

La prima, oggetto della convenzione tra Romagna Acque – Società delle Fonti e l'Università di Bologna a cui fa capo l'attuale attività di dottorato dello scrivente, ha come oggetto lo sviluppo di un modello tridimensionale dell'intero ammasso di fondazione della diga che possa consentire di modellare sia il comportamento statico sia quello dinamico in condizioni sismiche del sistema terreno-struttura. Tale

modello potrà anche migliorare le analisi qui presentate fornendo, ad esempio, una migliore approssimazione delle tensioni trasmesse dalla diga alla spalla rispetto al metodo analitico semplificato impiegato in sede di tesi (Tölke & Ludin, 1938).

L'altra direzione di approfondimento, oggetto di una tesi di laurea in corso di svolgimento, riguarda lo studio della stessa spalla destra in condizioni sismiche con il metodo agli spostamenti. Rispetto al metodo implementato in questa tesi il metodo agli spostamenti consente l'applicazione di accelerogrammi reali per studiare il comportamento della spalla e permette una stima degli spostamenti attesi.

BIBLIOGRAFIA:

Federal Energy Regulatory Commission (F.E.R.C.), 2018. *Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects*. [Online] available at:
<https://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap11.pdf>

Tölke , F. & Ludin, A., 1938. *Wasserkraftanlagen*. Berlin: Julius Springer.

Warburton, P. M., 1981. *Vector stability analysis of an arbitrary rock block with any number of free faces*. International Journal of Rock Mechanics, Issue 18, pp. 415-428.