

Analisi FEM del comportamento in condizioni sismiche di un bacino di decantazione di sterili minerari

A. Geppetti

Università degli Studi di Firenze

J. Facciorusso

Università degli Studi di Firenze

C. Madaia

Università degli Studi di Firenze

SOMMARIO: I bacini di decantazione di sterili minerari comunemente noti come Tailings Dams (TD) o Tailings Storage Facilities (TSF) sono strutture suscettibili a incidenti con conseguenze, in molti casi, catastrofiche per i territori e le popolazioni coinvolte. Una delle cause di rottura più frequenti di questo tipo di strutture è la liquefazione sismica. In questo lavoro è stato studiato il comportamento in condizioni sismiche di un Tailings Dam situato in Toscana. Le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti l'impianto sono state indagate approfonditamente tramite prove di laboratorio e indagini in sito. I risultati sperimentali ottenuti sono stati utilizzati per calibrare modelli costitutivi avanzati con l'obiettivo di simulare in modo accurato il comportamento di tali materiali. Attraverso le analisi condotte con il Metodo agli Elementi Finiti (FEM) è stato esaminato il comportamento della struttura in condizioni sismiche applicando un set di 7 input sismici, opportunamente selezionati. La risposta è stata esaminata in termini di decremento delle tensioni efficaci e di spostamenti indotti.

1 INTRODUZIONE

L'industria mineraria rappresenta un'attività fondamentale per lo sviluppo delle società, in quanto fornisce le materie prime essenziali per numerosi settori, tra cui: edilizia, tecnologia, agricoltura, ecc. D'altra parte, le attività estrattive producono enormi quantità di rifiuti, costituiti dalla frazione del materiale estratto priva di valore. Se questi materiali, risultanti dalla frantumazione delle rocce, sono trattati fino ad assumere la consistenza di un impasto, prendono il nome di tailings (Vick 1990). Una pratica piuttosto comune è quella di utilizzare le frazioni più grossolane del rifiuto per realizzare, in aree prossime alla miniera, delle arginature in modo da contenere i tailings che vengono progressivamente stoccati al loro interno, andando a formare dei bacini di decantazione noti come Tailings Dams (TD) o Tailings Storage Facilities (TSF). Esistono tre metodologie principali di realizzazione di questa tipologia di dighe: il metodo downstream, in cui il corpo diga viene accresciuto procedendo verso valle rispetto al terrapieno iniziale; il metodo centerline in cui lo sviluppo avviene sull'asse centrale del rilevato e il metodo upstream in cui le arginature sono sviluppate procedendo verso monte rispetto al terrapieno iniziale. I tailings dams sono strutture fortemente suscettibili ad incidenti, con un tasso di collasso di due ordini di grandezza maggiore rispetto alle dighe di ritenuta idraulica (ICOLD 2001). I TSF realizzati con il metodo upstream sono i più diffusi, poiché i più economici, ma sono anche i più suscettibili al collasso specialmente in aree sismiche (Rico et al. 2008, Lyu et al. 2019, Picullo et al. 2022, Stark et al. 2022). Una delle cause di collasso più frequenti è la liquefazione sismica (ICOLD 2001, WISE Uranium Project, World mine tailings failures-from 1915, TSF failures from 1915). In questo studio è stato analizzato il comportamento sismico di un bacino di decantazione di sterili minerari situato nel sud della Toscana. Dopo una breve descrizione dell'impianto in esame, è illustrata la definizione del modello geotecnico della struttura, basato su dati derivanti da prove di laboratorio e indagini in sito di campagne precedenti, integrati con nuovi sopralluoghi e indagini specificamente svolti. I tailings contenuti nel bacino sono stati approfonditamente studiati tramite prove di laboratorio, comprendenti: prove di caratterizzazione, analisi delle immagini ottenute con microscopio elettronico, analisi chimiche, prove triassiali monotone e cicliche eseguite sia su provini ricostituiti, sia su provini indisturbati prelevati con una

metodologia innovativa ed economica basata sul congelamento con azoto liquido. I dati raccolti hanno permesso di calibrare modelli costitutivi avanzati, successivamente impiegati nelle modellazioni numeriche condotte con il software opensource agli elementi finiti OpenSees. Le analisi sono state eseguite utilizzando un set di sette segnali sismici, opportunamente selezionati in accordo con lo spettro elastico atteso al sito su sottosuolo di categoria A (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2018) - NTC 2018) in un prefissato periodo di ritorno. I risultati delle analisi numeriche, in termini di decremento delle tensioni efficaci e di spostamenti indotti, sono infine presentati e discussi.

2 INQUADRAMENTO DEL CASO STUDIO

L'opera studiata si trova in nel Sud della Toscana, nella zona della Maremma, nel Parco Nazionale delle Colline Metallifere. Il sottosuolo di questo territorio è stato sfruttato per l'attività estrattiva fin da tempi molto antichi, come testimoniano i reperti archeologici attribuiti a comunità Etrusche che si erano stanziati in quest'area alla ricerca di materie prime quali rame, piombo, argento e ferro (Camporeale 2005). Tuttavia, come nel resto d'Europa, le attività minerarie in questa zona si sono sviluppate fino ad assumere un carattere industriale solo nell'Ottocento. In particolare, la miniera da cui è stato estratto il materiale accumulato nel bacino di decantazione oggetto di studio è stata aperta nel 1846 (Capperi & Nannoni 1997). L'area su cui si sviluppa l'impianto è rappresentata in Figura 1, dove è possibile osservare l'insieme costituito da 4 bacini di decantazione e 5 argini. La numerazione attribuita ai bacini e agli argini segue l'ordine cronologico di costruzione, iniziata con il bacino n. 1 nel 1957. Nel presente studio è stato esaminato il comportamento sismico del bacino e argine n. 2, che rappresentano le strutture più importanti sia in termini dimensionali, sia per le conseguenze che potrebbero derivare da un loro eventuale collasso. L'argine n. 2 è stato costruito con il metodo upstream e raggiunge un'altezza di 36.5 m (Figura 1); il relativo bacino presenta una superficie di circa 55.000 m² e contiene un volume di circa 600.000 m³ di rifiuti minerari.

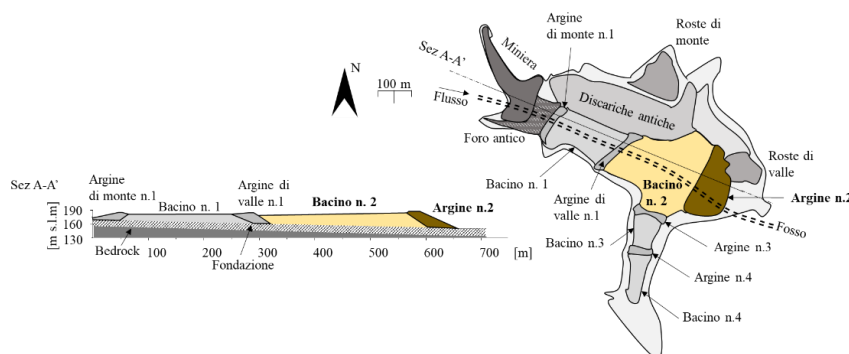


Figura 1. Sezione e planimetria d'insieme con il bacino di decantazione studiato (Bacino n. 2 e Argine n. 2).

3 MODELLO GEOTECNICO

Il sito in esame è stato oggetto di numerose campagne geognostiche succedutesi negli anni. In Figura 2 sono indicate l'ubicazione, la tipologia e l'anno di esecuzione delle indagini e sono sintetizzate la tipologia e la numerosità delle prove in sito e di laboratorio eseguite.

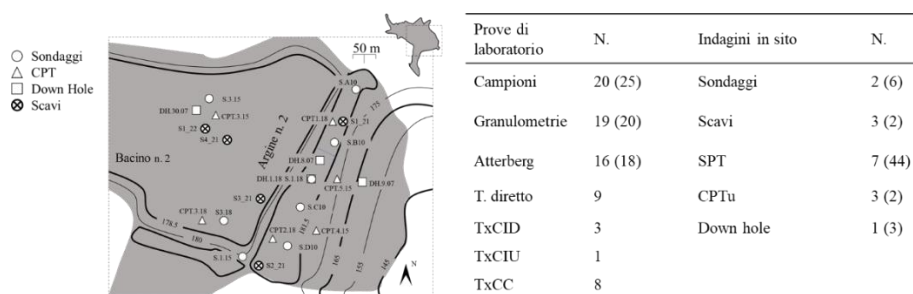


Figura 2. Ubicazione e tipologia delle indagini e tipologia e numerosità di prove in sito e di laboratorio nel bacino e sull'argine (in parentesi).

Dagli scavi realizzati all'interno del bacino sono stati prelevati campioni di terreno indisturbato tramite l'utilizzo di azoto liquido con una metodologia innovativa ispirata a quella proposta da Wichtmann et al. (2019). Considerata la buona omogeneità del materiale, i campioni sono stati prelevati a profondità limitata (< 1 m), previa realizzazione di scavi eseguiti a mano.

I risultati delle indagini in sito e di laboratorio hanno consentito di definire il modello geotecnico del complesso struttura-terreno di fondazione, nel quale si identificano tre principali unità: i materiali d'argine (MAR), i sedimenti di bacino (SBA), e i terreni di fondazione (TDF). I terreni di fondazione (TDF) del bacino di decantazione sono costituiti prevalentemente da argilliti e siltiti, appartenenti alla formazione delle Argille a Palombini. Questi materiali sono caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio (V_s) inferiori a 800 m/s per uno spessore di circa 15 m. Al di sotto di questa profondità, in base a misure geofisiche che hanno evidenziato valori di V_s pari o superiori a 800 m/s, è stata individuata la posizione del bedrock sismico. Le informazioni disponibili sui terreni di fondazione sono piuttosto limitate, essenzialmente derivanti da: tre prove di taglio diretto eseguite su campioni prelevati nella parte più superficiale, che hanno permesso di determinare i parametri di resistenza al taglio, con angolo di resistenza al taglio $\varphi' = 23^\circ$ e coesione $c' = 6$ kPa; una prova CPTu dalla quale è stato stimato il valore della rigidezza a taglio iniziale $G_0 = 258$ MPa; prove di classificazione. I materiali d'argine (MAR), costituenti il corpo diga, sono composti dalla frazione più grossolana del rifiuto minerario. A causa di questa forte componente grossolana non è stato possibile eseguire prove di laboratorio per la caratterizzazione meccanica su questi materiali, ma solo prove di classificazione. Le caratteristiche meccaniche sono state stimate mediante prove SPT e CPTu, da cui sono stati stimati un valore di rigidezza a taglio iniziale pari a 100 MPa, una densità relativa $D_R = 36\%$ e un angolo di resistenza al taglio $\varphi' = 41^\circ$. I sedimenti di bacino (SBA) sono la frazione più fine del rifiuto minerario che sono trattenuti dalla diga. Questi materiali sono stati approfonditamente indagati con prove in sito e di laboratorio. In particolare, il comportamento meccanico è stato studiato con quattro prove triassiali monotone e otto prove triassiali cicliche. Le prove monotone sono state condotte a deformazioni controllata su provini di 5 cm di diametro e 10 cm di altezza ricostituiti tramite moist tamping con contenuto in acqua posto pari al 5%. I risultati in termini di deformazione volumetrica e di sforzo deviatorico in funzione della deformazione assiale sono riportati nelle Figure 3 a e b. In Figura 3 c sono rappresentati i percorsi tensionali delle quattro prove, da cui è stato possibile ricavare l'inclinazione della linea di stato critico $M = 1.459$ e quindi $\varphi' = 36^\circ$. Prove triassiali cicliche, isotropicamente consolidate a sforzo controllato, sono state eseguite su cinque campioni ricostituiti e su tre campioni indisturbati prelevati con il metodo del congelamento. Dopo il montaggio all'interno della cella triassiale, ciascun provino congelato è stato lasciato scongelare per circa 24 ore ad una pressione di confinamento di 10 kPa. I risultati in termini di rapporto di sforzo ciclico ($CSR = q/2p'_0$) in funzione del numero di cicli a rottura N sono rappresentati in Figura 3 d.

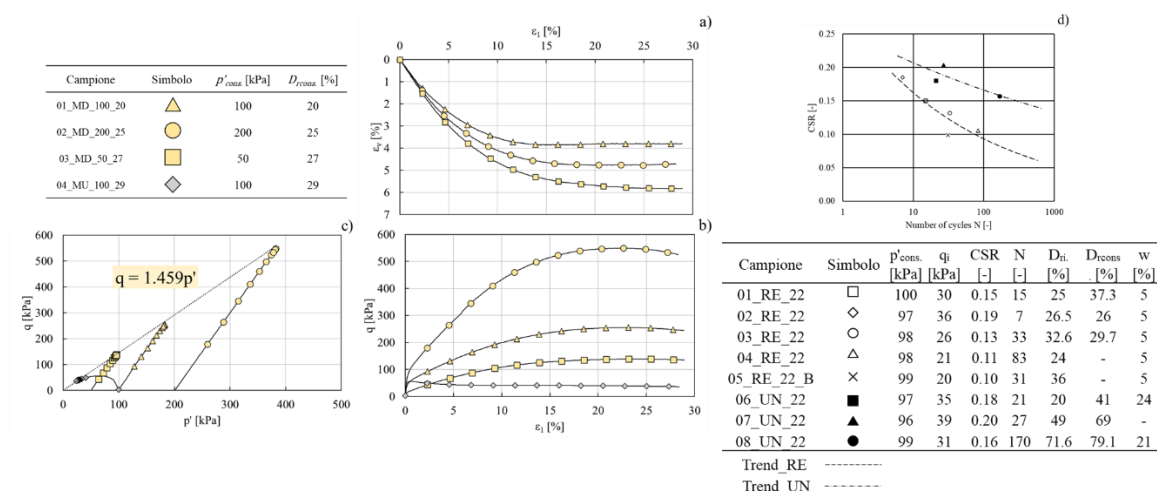


Figura 3. Prove triassiali monotone (drenate MD e non drenate MU) e cicliche: a) deformazione volumetrica ε_v vs deformazione assiale ε_1 ; b) sforzo deviatorico (q) vs deformazione assiale (ε_1); c) percorsi tensionali sul piano p' - q ; (p'_{cons} e D_{rcons} sono la pressione efficace media ($p' = \sigma'_1 + 2\sigma'_3/3$) e la densità relativa media a fine consolidazione); d) risultati delle prove triassiali cicliche in termini di rapporto di sforzo ciclico (CSR) vs numero di cicli a rottura (N) (RE e UN si riferiscono rispettivamente a campioni ricostituiti e congelati; D_{ri} e D_{rcons} sono la densità relativa media iniziale e a fine consolidazione, w il contenuto d'acqua).

Le condizioni di rottura sono state definite a seguito del raggiungimento di un rapporto di pressione interstiziale (rapporto tra pressione interstiziale e pressione efficace media di consolidazione) pari a 0.95 o per raggiungimento di un valore di deformazione assiale pari al 5%. Dalla Figura 3 d è possibile evincere come siano presenti due distinti trend di interpolazione dei valori ottenuti per i campioni indisturbati e per quelli ricostituiti e che risultano quasi paralleli. Questa differenza nei risultati potrebbe essere ricondotta a differenti valori della densità relativa tra i campioni indisturbati e quelli ricostituiti o anche a fenomeni di rimodellamento dei provini (una trattazione più dettagliata è riportata in Geppetti (2023)). In Figura 4 è rappresentato lo schema del modello geotecnico in cui sono sintetizzati i principali parametri meccanici e fisici assunti per i diversi litotipi.

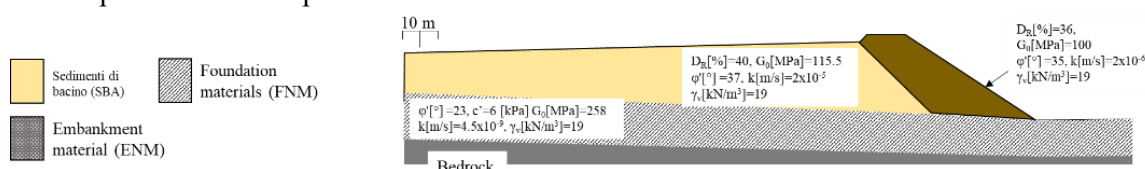


Figura 4 Modello geotecnico con i principali parametri

4 INPUT SISMICO

L'input sismico è stato definito tramite il software Scalcons (Lai & Zuccolo 2017) messo a disposizione dalla Regione Toscana. Questo programma, applicabile all'intero territorio toscano, restituisce un set di 7 segnali (comprensivi di accelerogramma, velocigramma, sismogramma e spettro di risposta elastico) con uno spettro di risposta elastico medio compatibile con quello di normativa (NTC 2018) atteso al sito, assegnando come dati in ingresso le coordinate geografiche del sito e il tempo di ritorno dell'evento sismico. Per l'opera studiata, il tempo di ritorno da considerare secondo le indicazioni delle NTC 2018 sarebbe 3900 anni. Tuttavia, poiché la definizione della pericolosità sismica sul territorio italiano è limitata a un periodo di ritorno massimo di 2475 anni, per la definizione dell'input sismico si è fatto riferimento a quest'ultimo valore, anche in accordo con la normativa relativa agli sbarramenti di ritenuta (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2014) - DM 26 giugno 2014).

5 MODELLAZIONE NUMERICA

La simulazione del comportamento sismico dell'opera è stata condotta per via numerica con il software freeware e open source agli elementi finiti OpenSees, mediante il quale sono stati anche preliminarmente calibrati alcuni parametri di input dei modelli costitutivi confrontando i risultati ottenuti dalle prove sperimentali e dalle simulazioni delle stesse. In base alle caratteristiche geometriche e geotecniche dell'opera, si è ritenuto adeguato condurre analisi bidimensionali su una sezione rappresentativa.

5.1 Modelli costitutivi e parametri di input

Per la simulazione numerica del comportamento dei materiali sono stati assunti tre differenti modelli costitutivi avanzati. In particolare, il modello SANISAND (Dafalias & Manzari 2004) per i materiali di bacino, PM4Sand (Boulanger & Ziotopoulou 2017) per il materiale di riempimento della diga e Pressure Independent Multi Yield (PIMY) (Yang et al. 2003, Elgamal et al. 2004, Yang et al. 2004, Khosravifar 2012, Khosravifar et al. 2018) per i terreni di fondazione. In SANISAND, che si basa sulla teoria dello stato critico, con superficie di snervamento è alla Drucker-Prager, le deformazioni elastiche sono controllate dallo stato tensionale, mentre le deformazioni plastiche dipendono dagli sforzi deviatorici. Questo modello costitutivo richiede la definizione di 15 parametri di input. PM4Sand è stato sviluppato a partire dai concetti fondamentali che stanno alla base del modello SANISAND con alcune differenze. In particolare, PM4Sand è formulato nel campo delle deformazioni piane e presenta formulazioni molto diverse da SANISAND per quanto concerne gli effetti microstrutturali. PIMY è un modello elastoplastico, non inquadrato nella teoria dello stato critico, basato sulla teoria delle multi-superfici plastiche di Prevost (1985). Superfici di snervamento di forma cilindrica, delle quali la maggiore indica la rottura, definiscono l'incrudimento del materiale. Questo modello richiede la definizione di 7 parametri di input. I valori dei parametri di input assegnati ai tre modelli costitutivi impiegati sono riportati in Tabella 1. Per il significato dei parametri dei modelli costitutivi utilizzati si rimanda ai lavori originari precedentemente citati, mentre le procedure seguite per la loro calibrazione sono descritte in dettaglio in Geppetti (2023).

Tabella 1. Parametri di input calibrati per i modelli costitutivi.

SANISAND		PIMY		PM4Sand	
G_0 [-]	107	G_r [MPa]	315	D_R [%]	36
ν [-]	0.05	B_r [MPa]	630	G_0 [MPa]	100
M_c [-]	1.46	$\gamma_{max,r}$ [-]	0.1	h_{p0} [-]	0.6
c [-]	0.7	p'_r [kPa]	100	h_0 [-]	2
λ_c [-]	0.0208	d [-]	0.5	e_{max} [-]	0.8
e_0 [-]	1.16	NYS [-]	20	e_{min} [-]	0.5
ξ [-]	0.7	c [kPa]	37	n^d [-]	0.1
m [-]	0.01			n^b [-]	0.5
h_0 [-]	60			A_{d0} [-]	1
c_h [-]	0.91			z_{max} [-]	1
n^b [-]	1.2			c_z [-]	250
A_0 [-]	0.5			c_e [-]	1
n^d [-]	3			ϕ_{cv} [°]	33
z_{max} [-]	12			C_{GD} [-]	2
c_z [-]	900			C_{DR} [-]	1
				C_{kaf} [-]	1
				Q [-]	10
				R [-]	1.5
				m [-]	0.01
				$F_{sed,min}$ [-]	1
				$p'_{sed,o}$ [-]	1

5.2 Geometria della mesh e condizioni iniziali e al contorno

La sezione rappresentativa analizzata ha una lunghezza totale di circa 274 m, ovvero circa quattro volte la proiezione orizzontale dell'argine (circa 67 m). La mesh è stata realizzata con elementi quadrangolari a nove nodi di cui quattro (posizionati sui vertici) a 3 gradi di libertà (traslazione orizzontale e verticale, e pressione dell'acqua) e i restanti 5 a due gradi di libertà (traslazione). La

dimensione degli elementi, pari a circa 3 m, è stata determinata mediante successive analisi gravitazionali, in cui è stata ridotta progressivamente, calcolando gli spostamenti verticali e orizzontali fino a raggiungere un sufficiente grado di convergenza. In tutto il modello è costituito da 1278 elementi e 2664 nodi. I nodi di base del modello sono stati collegati in modo che i loro movimenti orizzontali risultassero coincidenti e vincolati con carrelli che ne impedissero lo spostamento in direzione verticale. Le condizioni geostatiche presenti nella struttura sono state riprodotte modellando il progressivo innalzamento della diga in tre fasi. L'input sismico in forma di velocigramma è stato assegnato a uno smorzatore viscoso alla Lysmer-Kuhlemeyer (1969), collegato al nodo di base di estrema sinistra del modello, che ha convertito il segnale in una storia temporale di forze tramite il metodo di Joyner and Chen (1975). Per evitare un'irrealistica riflessione delle onde sismiche ai bordi del modello gli elementi alle estremità sono stati modellati come colonne massive attribuendo a questi elementi uno spessore di diversi ordini di grandezza maggiore rispetto agli altri.

6 RISULTATI

I risultati delle analisi sismiche ottenuti applicando i sette segnali di input, selezionati come descritto nel Capitolo 4, sono presentati in termini di spostamento dei nodi della struttura e di decadimento delle tensioni efficaci secondo l'equazione proposta da Machaček et al. (2018):

$$\zeta = -\sigma'_{ii}(t^{dyn}) - \sigma'_{ii}(t^0) / \sigma'_{ii}(t^0) \quad (1)$$

In cui $\sigma'_{ii}(t^{dyn})$ è la traccia del tensore delle tensioni efficaci in un certo istante t dall'inizio del moto e $\sigma'_{ii}(t^0)$ è la traccia del tensore delle tensioni efficaci per $t=0$. La quantità ζ descrive in maniera estremamente efficace la diminuzione delle tensioni efficaci dovuta all'incremento delle sovrappressioni durante il terremoto. In particolare, se ζ è uguale a 1 significa che le tensioni efficaci ad un certo istante si sono annullate mentre se ζ è uguale a 0 significa che le tensioni efficaci ad un certo istante sono eguali a quelle prima dello scuotimento. In Figura 5 a sono rappresentati, per ciascuno dei sette segnali di input, i risultati in termini di diminuzione delle tensioni efficaci nel modello, in corrispondenza dell'istante in cui è raggiunto il valore massimo di ζ . Nella Figura 5 a è possibile osservare che l'annullamento completo delle tensioni efficaci, per certi istanti dall'inizio dello scuotimento, è ottenuto con tutti i segnali. In particolare, per i segnali da 1 a 4, il fenomeno si concentra al piede della diga. Nel bacino, l'annullamento delle tensioni avviene, nella maggior parte dei casi, nello strato più superficiale. In Figura 5 b sono riportati, per ciascuno dei sette segnali di input, i risultati in termini di spostamento dei nodi del modello. Per una migliore comprensione dei risultati il valore degli spostamenti è stato amplificato di un fattore 10. A fianco di ciascun modello sono stati riportati i valori ottenuti dalle analisi (non amplificati) delle componenti verticale e orizzontale del nodo più esterno della cresta della diga. Dall'osservazione della Figura 5 b è possibile dedurre che le deformazioni maggiori della struttura sono state ottenute a seguito dell'applicazione del segnale S1, al quale è associato un movimento discendente del nodo esterno della cresta di 40 cm. In tutti i casi, il movimento generale della massa è diretto verso l'esterno e verso il basso.

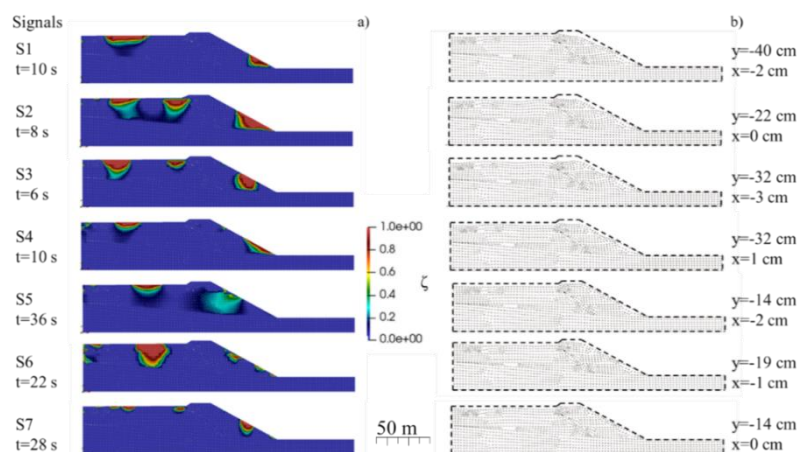


Figura 5. Risultati: a) riduzione delle tensioni efficaci ζ e b) spostamenti finali e valori degli spostamenti orizzontali (x) e verticali (y) relativi al nodo esterno in cresta.

7 CONCLUSIONI

È stato analizzato il comportamento sismico di un bacino di decantazione di sterili minerari situato in Toscana. Il modello geotecnico è stato definito combinando le informazioni di campagne geognostiche pregresse con i dati ottenuti mediante nuove indagini in situ e sofisticate prove di laboratorio che hanno permesso di calibrare modelli costitutivi avanzati per descrivere il comportamento dinamico dei materiali presenti. L'analisi sismica è stata eseguita tramite modellazione agli elementi finiti, impiegando un set di segnali spettro-compatibili con la sismicità locale. I risultati indicano la presenza di zone critiche all'interno dell'impianto, caratterizzate da una rapida e significativa riduzione delle tensioni efficaci. L'evoluzione temporale e l'estensione delle aree interessate dall'annullamento delle pressioni efficaci variano in funzione del segnale sismico impiegato. Per quattro dei sette segnali analizzati, il fenomeno si manifesta nei primi 10 secondi e si concentra prevalentemente al piede della diga. Queste condizioni risultano particolarmente critiche, in quanto possono innescare una drastica riduzione della resistenza del materiale, con il rischio di rottura della struttura e conseguente rilascio di sterili nell'ambiente circostante. In termini di spostamenti, le analisi evidenziano movimenti diretti verso l'esterno e verso il basso. I valori della componente verticale dello spostamento cumulato, relativi al nodo più esterno della cresta della diga, variano tra 14 cm e 40 cm, mentre per la componente orizzontale si hanno valori dell'ordine di 1-2 cm.

BIBLIOGRAFIA

- Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2017). PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Rep. No. UCD/CGM-17/01. Davis, CA: Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of California
- Camporeale, G. (2005). Massa Marittima (GR): gli scavi dell'Accesa: campagna 2005. Massa Marittima (GR): gli scavi dell'Accesa: campagna 2005, 429-432
- Capperi, M., & Nannoni, R. (1997). La miniera di Fenice Capanne (Grosseto). *Rivista mineralogica italiana*, (1), 63-82.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2014). DM 26 giugno 2014. Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse). *Gazzetta ufficiale* n. 156 dell'8 luglio 2014
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2018). DM 17 gennaio 2018. Norme tecniche per le costruzioni. G.U. n.42 del 20 febbraio 2018
- Dafalias, Y. F., & Manzari, M. T. (2004). Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering mechanics*, 130(6), 622-634.
- Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E., & Ragheb, A. (2003). Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils. *International Journal of Plasticity*, 19(6), 883-905.
- Geppetti, A. (2023). Experimental and numerical investigations on the behaviour of tailings storage facilities under seismic loading. Doctoral Thesis, Università degli Studi di Firenze

- ICOLD, U. (2001). Tailings dams—risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences (bulletin 121). Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 155.
- Joyner, W.B. & Chen, A.T.F. (1975). "Calculation of nonlinear ground response in earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No. 5, pp. 1315-1336, October 1975.
- Khosravifar, A. (2012). Analysis and design for inelastic structural response of extended pile shaft foundations in laterally spreading ground during earthquakes. University of California, Davis.
- Khosravifar, A., Elgamal, A., Lu, J., & Li, J. (2018). A 3D model for earthquake-induced liquefaction triggering and post-liquefaction response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 43-52.
- Lai, C. G., Zuccolo E (2017). Prosecuzione delle attività di definizione di input sismici sismocompatibili e spettrocompatibili per i comuni della regione Toscana. Scientific Report
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *J. Eng. Mech. Div.*, 95(4), 859-877.
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., & Cao, J. (2019). A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-18.
- Piciullo, L., Storøsten, E. B., Liu, Z., Nadim, F., & Lacasse, S. (2022). A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 106657.
- Prevost, J. H. (1985). A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(1), 9-17.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 846-852.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. doi:10.1038/nmeth.2089
- Stark, T. D., Moya, L., & Lin, J. (2022). Rates and Causes of Tailings Dam Failures. *Advances in Civil Eng.*, 2022.
- TSF failures from 1915. CSP2. (n.d.). Retrieved March 23, 2023, from <http://www.csp2.org/tsf523 failures-from-1915>
- Vick, S. G. (1990). Planning, design, and analysis of tailings dams. BiTech Publishers Ltd.
- Wichtmann, T., Steller, K., Triantafyllidis, T., Back, M., & Dahmen, D. (2019). An experimental parametric study on the liquefaction resistance of sands in spreader dumps of lignite opencast mines. *Soil Dyn. and Earth. Eng.*, 122, 290-309
- WISE Uranium Project - Tailings Dam Safety. (n.d.). <https://www.wise-uranium.org/indexm.html>.
- World mine tailings failures-from 1915. World Mine Tailings Failuresfrom 1915. (n.d.). Retrieved March 23, 2023, from <https://worldminetailingsfailures.org/>.
- Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119-1127.
- Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K., & Sharp, M. K. (2004). Earth dam on liquefiable foundation and remediation: numerical simulation of centrifuge experiments. *Journal of engineering mechanics*, 130(10), 1168-1176.

ABSTRACT

FEM ANALYSIS OF THE SEISMIC BEHAVIOUR OF A TAILINGS DAM

Keywords: tailings dams, liquefaction, numerical analysis

Tailings Dams (TD) or Tailings Storage Facilities (TSF) are structures extremely susceptible to accidents with generally catastrophic consequences for the affected territories and populations. One of the most frequent causes of failure of this type of structures is seismic liquefaction. In this work, the seismic behavior of a Tailings Dam located in South Tuscany was studied. The mechanical behavior of the soil materials constituting the system were thoroughly investigated by means of laboratory and site tests. Advanced constitutive models were also calibrated through experimental results from laboratory tests. Through analyses conducted with the Finite Element Method (FEM), the behavior of the structure was analyzed under a set of 7 seismic inputs, appropriately defined, in terms of decrease in effective stresses and displacements.