

VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI UNO SVASO RAPIDO SULLA STABILITÀ DEL PETTO ARGINALE CON IL METODO DEI PUNTI MATERIALI

Veronica Girardi (veronica.girardi.1@phd.unipd.it)

DICEA - Università degli Studi di Padova, via Ognissanti 39, Padova

Francesca Ceccato (francesca.ceccato@icea.unipd.it)

DICEA - Università degli Studi di Padova, via Ognissanti 39, Padova

ABSTRACT. Le verifiche di sicurezza delle opere artificiali in terra e delle scarpate naturali si concretizzano nelle analisi di stabilità, di prassi condotte mediante metodi consolidati quali l'equilibrio limite e il metodo agli elementi finiti. Tuttavia, lo studio dell'evoluzione del collasso, caratterizzabile come un fenomeno di grande deformazione, non può essere compiutamente valutato mediante suddette tecniche. A questo scopo è necessario adottare un metodo capace di modellare grandi spostamenti per una quantificazione effettiva dei volumi di terreno mobilitati e delle distanze percorse. Il presente contributo mira ad esplorare le potenzialità del Metodo dei Punti Materiali per la valutazione di stabilità dei rilevati arginali. In particolare viene adottata una formulazione multifase, la 2phase-Double Point (bifase a due punti), per analizzare e quantificare gli effetti di uno svaso rapido sulla stabilità del petto arginale; il confronto con il fattore di sicurezza FS risultante dalle analisi LEM e FEM permette di valutare il contributo effettivo del metodo ad una migliore quantificazione e comprensione del fenomeno.

1. INTRODUZIONE

La sicurezza delle opere in terra e delle opere di ritenuta idraulica è un tema di particolare rilevanza in diversi paesi. Il collasso di tali strutture può essere causato da diversi meccanismi, ad esempio instabilità globale, sormonto, erosione (interna e esterna), tutti potenzialmente governati dalla complessa interazione solido-fluido e dal comportamento non-lineare del terreno. Nonostante la frequenza e l'impatto dei problemi di erosione, attualmente al centro di numerose attività di ricerca (Yerro, A. et al., 2017; Bonelli, S., 2013), il presente contributo si focalizza solo sui fenomeni di macro-instabilità delle banche arginali a causa dell'alterazione del regime delle pressioni interstiziali.

Le analisi di stabilità vengono generalmente condotte mediante metodi all'equilibrio limite (Limit Equilibrium Method: LEM) e metodi agli elementi finiti (Finite Element Method: FEM). L'evoluzione nel tempo del fattore di sicurezza FS può essere valutato con entrambi i metodi, e ad ogni istante viene identificato il più probabile meccanismo sulla base delle ipotesi del problema, tuttavia non può essere analizzata la propagazione del collasso. La comprensione dell'evoluzione spaziale e temporale dei meccanismi di instabilità è l'elemento chiave a supporto delle valutazioni di rischio e della pianificazione di misure di attenuazione. A questo scopo, è necessario adottare una metodologia numerica capace di gestire grandi deformazioni, come il metodo dei punti materiali (Material Point Method: MPM). Nell'MPM (Sulsky, D. & Schreyer, H.L., 1994) i corpi vengono discretizzati mediante set di punti materiali (Material Points: MPs) che si muovono conservando tutte le quantità cinematiche e tensionali. Una griglia computazionale che ricopre tutto il potenziale dominio di spostamento del corpo viene utilizzata per risolvere le equazioni di bilancio; tuttavia non si deforma assieme, consentendo la valutazione degli spostamenti effettivi tramite i MPs. All'inizio di ogni passo temporale le informazioni vengono mappate dai MPs ai nodi della mesh, mediante funzioni interpolanti. Le equazioni di governo vengono risolte e i valori nodali delle velocità vengono utilizzati per aggiornare deformazioni e tensioni ai MPs. A questo punto, la mesh può essere arbitrariamente modificata, ma viene solitamente resettata alla posizione iniziale.

In tempi recenti sono state sviluppate diverse formulazioni idromeccaniche di tipo accoppiato per modellare il terreno in condizioni sature (Jassim, I. et al., 2013; Bandara, S. & Soga K., 2015) e di parziale saturazione (Yerro, A. et al., 2015; Wang, B. et al., 2018). Tali formulazioni possono distinguersi sulla base del numero di fasi, oppure sulla base di layer distinti di punti materiali assegnati a ciascuna fase (Figura 1 a). Formulazioni di tipo 1-, 2- o 3-phase indicano il numero di fasi del modello matematico, ad esempio nel caso 2-phase le equazioni di bilancio delle fasi solida e liquida sono considerate separatamente tenendo conto anche dell'interazione reciproca. Approcci single- o double-point indicano invece il numero di tipologie di punti materiali usati nel modello, ad esempio single point indica che il continuo è discretizzato con un solo tipo di MP che rappresenta la miscela solido-liquido-gas ma trasporta le informazioni di tutte le fasi.

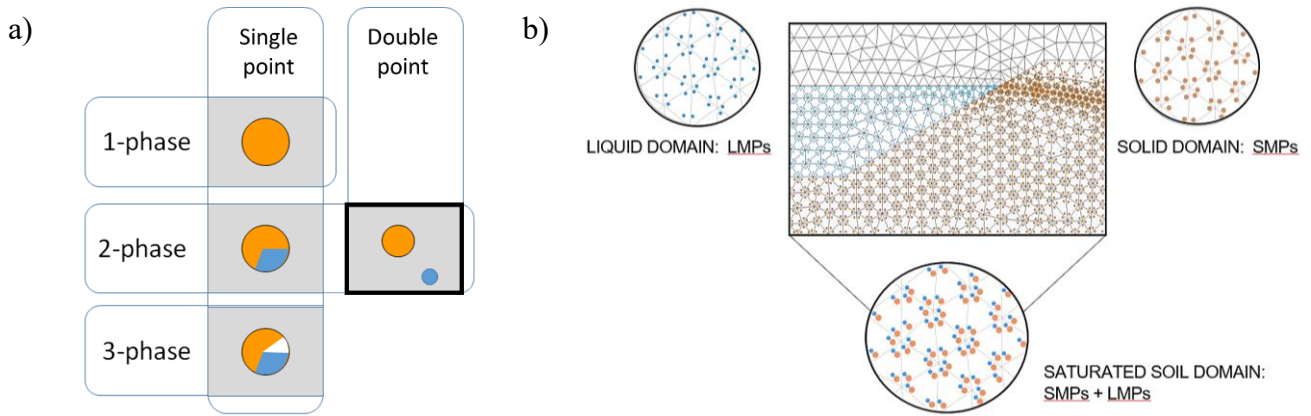


Figura 1. a) Formulazioni multifase del MPM attualmente disponibili b) Modellazione delle singole fasi e del mezzo saturo nella formulazione bifase a due punti.

2. LA FORMULAZIONE 2PHASE-DOUBLE POINT

La formulazione 2Phase-Double Point riproduce il comportamento del mezzo poroso saturo mediante l'approccio dei continui indipendenti sovrapposti: lo scheletro solido e il fluido acqua sono rappresentati da due set distinti di punti materiali, chiamati SMPs (*solid material points*) e LMPs (*liquid material points*). La definizione di due specifici set di MPs permette di identificare tre diversi domini (Figura 1, b): il dominio dell'acqua libera, ovvero solo LMPs, il dominio del terreno secco (usando solo SMPs) e il dominio del mezzo poroso saturo, laddove i SMPs e i LMPs condividono lo stesso elemento della mesh computazionale.

Il comportamento dinamico del continuo viene descritto attraverso le equazioni della quantità di moto del solido e del liquido che restituiscono come incognite principali le accelerazioni del solido \mathbf{a}_S e del liquido \mathbf{a}_L . Le equazioni di conservazione della massa della fase solida e della miscela e le equazioni costitutive vengono poste ai punti materiali corrispondenti, ai fini di aggiornare le variabili secondarie (Martinelli, M. & Rohe, A., 2015).

Il liquido è assunto come debolmente compressibile specificando il modulo di Bulk K_L , mentre per quanto concerne gli sforzi tangenziali nella fase fluida è possibile tenerne conto, ma solo in elementi di tipo liquido. Le equazioni di conservazione della quantità di moto vengono discretizzate nello spazio mediante l'approssimazione di Galerkin e integrate nel tempo mediante uno schema semi-esplicito. La formulazione 2P-DP è stata testata in diversi casi applicativi dove predomina l'interazione solido-fluido come il collasso di colonne di terreno sature (Ceccato et al, 2018), i processi di fluidizzazione e sedimentazione (Bolognin, M. et al., 2017) e il sormonto di un argine (Liang et al, 2017).

3. SIMULAZIONE DELLO SVASO RAPIDO

3.1 Allestimento del modello MPM

La geometria del modello viene impostata assumendo l'ipotesi di deformazione piana, di conseguenza bidimensionale. Viene analizzata la sola scarpata lato fiume per ridurre il costo computazionale dell'analisi. La mesh è costituita da elementi triangolari lineari. Inizialmente vengono assegnati 3 LMPs e 3 SMPs agli elementi della porzione di terreno saturo, 3 LMPs agli elementi appartenenti al dominio del fiume (acqua libera) e 3 SMPs agli elementi sopra la superficie freatica, assunti come terreno secco. Per quanto concerne le condizioni di bordo: gli spostamenti dei SMPs sono impediti in entrambe le direzioni al bordo inferiore del modello, mentre per bordi laterali sono impediti solo gli spostamenti perpendicolarmente ad essi. Per il liquido tutti i bordi sono impermeabili.

I parametri dei materiali sono riassunti nella Tabella 1. Il livello della superficie freatica è assunto inizialmente orizzontale e le tensioni vengono inizializzate mediante una fase quasi-statica dove agisce solo la gravità. Successivamente, viene simulato lo svaso rapido mediante rimozione progressiva dei LMPs rappresentativi dell'acqua libera nel fiume. Tale processo è suddiviso in 5 load step che garantiscono il raggiungimento del livello minimo (0m) in 30 minuti complessivi. A questo punto la simulazione procede valutando un arco temporale di altre 5 ore per visualizzare l'evoluzione effettiva degli spostamenti del petto arginale.

Tabella 1. Proprietà dei materiali del modello MPM.

Property	Value	Property	Value
Densità del solido [kg/m ³]	2650	Densità del liquido [kg/m ³]	1000
Porosità iniziale [-]	0.4	Viscosità del liquido [Pa s]	10 ⁻³
Angolo d'attrito [°]	28	Modulo di Bulk liquido [kPa]	10 ⁵
Coesione [kPa]	2	Permeabilità intrinseca [m ²]	4.08 10 ⁻¹²
Modulo di Young [kPa]	30000		
Rapporto di Poisson [-]	0.3		

3.2 Risultati e confronto con metodi LEM e FEM

L'evoluzione del movimento della scarpata, durante e a seguito dello svaso rapido, è riportata in Figura 1: gli spostamenti dei SMPs in m e la posizione dei LMPs sono tracciati in 3 istanti di tempo successivi. All'inizio dello svaso gli spostamenti sono molto piccoli, e lo sviluppo di una zona di accumulo di deformazioni che si trasformerà nella superficie di scorrimento occorre quando il livello del fiume raggiunge 0,6 m. All'istante $t_2=26.7$ min lo spostamento superficiale massimo è pari a 0,18m. Il petto dell'argine si stabilizza rapidamente ad una successiva configurazione deformata: a 33.3 minuti il massimo spostamento è pari a soli 0.20m e dopo le 5 ore di monitoraggio diventa 0.21 m. La forma della superficie di scorrimento è concorde a quella delle analisi LEM e FEM presentate in Figura 2 (vengono raffigurate solo le scarpate interne, ma i modelli sono basati sulla sezione completa). I parametri fisico-meccanici del terreno sono identici a quelli relativi alla fase solida utilizzati nel modello MPM.

L'analisi LEM viene condotta mediante il software *Geostudio2019*: in serie viene condotta un'analisi della filtrazione in condizioni stazionarie (permeabilità $k = 4 \cdot 10^{-6}$ m/s) seguita da una fase transitoria per riprodurre l'abbassamento del livello, infine la distribuzione di pressioni risultante costituisce uno degli input dell'analisi LEM successiva mediante il metodo di Bishop. Il fattore 1.06 rappresenta una situazione "borderline", ovvero la scarpata potrebbe essere sensibile a un'instabilità a seguito di un'ulteriore sollecitazione o per una riduzione di resistenza. Sempre in figura 2 vengono raffigurati il FS e il contour degli spostamenti risultanti dall'analisi FEM condotta con il software *Plaxis2D*. In questo caso viene adottata la procedura della "*phi-c reduction*", alla fine della fase transitoria di filtrazione conseguente allo svaso, e il fattore di sicurezza risultante è pari a 0.97. Questo valore simboleggia l'occorrenza della mobilitazione della scarpata quantificata in un massimo di 12 mm che tuttavia non sono rappresentativi di alcuna condizione realistica, noti i sopramenzionati limiti del metodo. Risulta dunque cruciale l'analisi del risultato prodotto mediante l'MPM che mostra chiaramente l'insorgenza di una superficie di scorrimento senza però generare il collasso del paramento e ripristinando una nuova configurazione stabile, dopo le 5 ore.

A titolo esplorativo vengono inoltre condotte delle analisi riducendo l'angolo d'attrito interno del materiale a 24°. In questo caso l'analisi LEM restituisce un FS=0.93 mentre l'analisi MPM mostra un'insorgenza anticipata della superficie di scorrimento e uno spostamento massimo al termine dell'analisi pari a 0,6m.

4. CONCLUSIONI

Questo articolo ha brevemente presentato un'applicazione della formulazione bifase a due punti del metodo dei punti materiali. Grazie alla completa trattazione in termini di spostamenti, è stato quantificato l'effetto del fenomeno di svaso rapido sulla stabilità del petto arginale. Le analisi basate sui metodi LEM e FEM avrebbero indotto a valutare la scarpata interna come "instabile o al limite della sicurezza", senza però fornire indicazioni sugli spostamenti attesi post-collasso. Viceversa l'MPM si è dimostrato capace di individuare, senza ipotesi preliminari su forma e localizzazione, una superficie di potenziale scorrimento e di mostrare che, anche dopo diverse ore dallo svaso completo, l'opera ritrova una nuova configurazione stabile e può assolvere alle sue funzioni nel breve periodo, garantendo ad esempio la possibilità di interventi di rinforzo e/o ripristino mirati. Differenti scenari possono aprirsi modificando geometria e parametri meccanici del terreno, offrendo dunque la possibilità di valutare con questa moderna tecnica numerica i rischi per la struttura arginale.

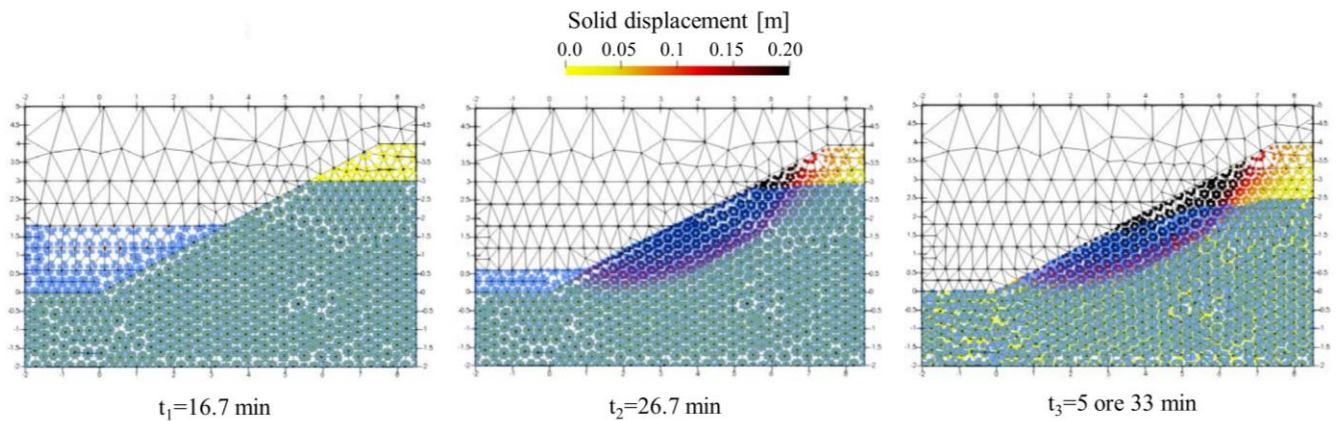


Figura 2. Spostamenti dei SMPs durante successivi istanti del fenomeno indagato

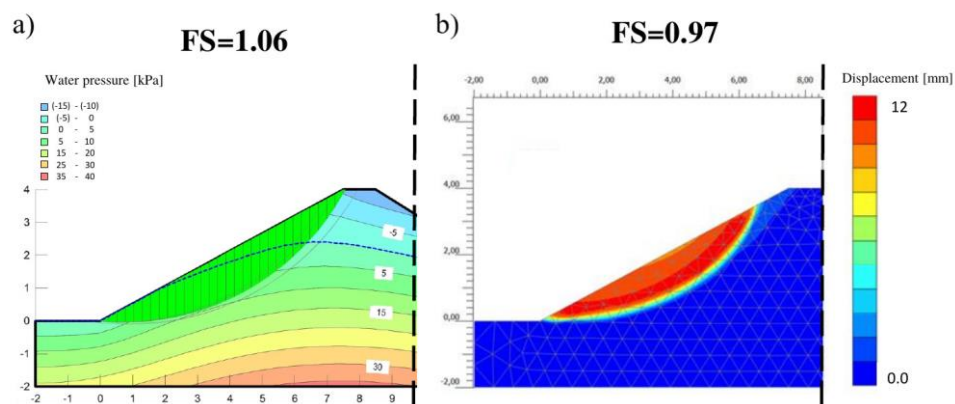


Figura 3. Risultati delle analisi di stabilità con metodi LEM a) e FEM b)

5. BIBLIOGRAFIA

- Bandara S, Soga K. Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method. *Comput. Geotech.*, 63, 199–214, 2015.
- Bolognin M, Martinelli M, Bakker KJ, Jonkman SN. Validation of material point method for soil fluidisation analysis, 1st International Conference on the Material Point Method, MPM 2017, 2017, Elsevier B.V., pp.233–41.
- Bonelli, S. Erosion in geomechanics applied to dams and levees. Ed. 2013. John Wiley & Sons, London, UK.
- Ceccato F, Yerro A, Martinelli M. Modelling soil-water interaction with the Material Point Method. Evaluation of single-point and double-point formulations. *Numer. Methods Geotech. Eng. IX*, Vol. 1 Proc. 9th Eur. Conf. Numer. Methods Geotech. Eng. (NUMGE 2018), 1–8, 2018.
- Jassim I, Stolle D, Vermeer P. Two-phase dynamic analysis by material point method. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. Anal. methods Geomech.*, 37, 2502–22, 2013.
- Liang D, Zhao X, Rohe A. Simulation of seepage and overtopping induced dam failures, 2nd International Conference on the Material Point Method for Modelling Soil-Water-Structure Interaction, 2019, pp.278–83.
- Martinelli M, Rohe A. Modelling fluidisation and sedimentation using material point method, Proc. 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015), Buenos Aires, Argentina, (Idelsohn S, Sonzogni V, Coutinho A, Cruchaga M, Lew A, Cerrolaza M ed.), 2015.
- Sulsky D, Chen Z, Schreyer HL. A particle method for history-dependent materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 118, 179–96, 1994.
- Wang B, Vardon PJ, Hicks MA. Rainfall-induced slope collapse with coupled material point method. *Eng. Geol.*, 239, 1–12, 2018.
- Yerro A, Alonso EE, Pinyol NM. The material point method for unsaturated soils. *Geotechnique*, 65, 201–17, 2015.