

# MODELLAZIONE DEL COLLASSO ARGINALE INDOTTO DA SOLLEVAMENTO AL PIEDE 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

Fabio Gabrieli (fabio.gabrieli@unipd.it)

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

**ABSTRACT.** In questo contributo viene indagato un tipico meccanismo di collasso arginale, indotto da sovrappressioni nei terreni di fondazione. Tale meccanismo è caratterizzato dal sollevamento al piede dell'argine e da una perdita di resistenza che può favorire localizzazione di deformazioni e lo scivolamento profondo. Una possibile conseguenza è la propagazione della superficie di rottura con l'interessamento del corpo arginale, e la formazione di una triplice superficie di scorrimento di forma non circolare. Questo fenomeno complesso viene per la prima volta analizzato mediante il Metodo dei Punti Materiali (MPM) che consente l'analisi delle fasi di formazione della superficie di scivolamento e collasso, senza i vincoli degli approcci agli elementi finiti (FEM). Attraverso la riproduzione di un esperimento in centrifuga geotecnica, il contributo si propone di testare l'abilità dell'MPM come strumento predittivo di questo tipo di fenomeno e di supportare analisi di rischio affidabili, non troppo conservative. Il confronto con approcci numerici convenzionali supporta la tesi e conclude il contributo.

## 1. MODELLAZIONE SPERIMENTALE E NUMERICA DEL COLLASSO PER SOLLEVAMENTO AL PIEDE

### 1.1 Esperimento in centrifuga geotecnica

L'esperimento di riferimento è stato condotto presso la centrifuga geotecnica della TU Delft nel 2003 (Allersma e Rohe, 2003). Il modello consiste in un argine di argilla (caolino) poggiante su un primo livello dello stesso materiale a cui segue un livello di sabbia (visibile in Fig. 1a). Le dimensioni del rilevato sono riportate sempre in Fig. 1a. La generazione di pressioni nel livello sabbioso avviene a mezzo di un serbatoio sul lato interno, direttamente collegato con un tubo al livello stesso. La filtrazione nel corpo arginale viene impedita attraverso una membrana impermeabile di plastica che riveste il paramento interno dell'argine. A lato campagna viene posizionato un dreno alla quota fissa di 2cm, che controlla il livello piezometrico nella sabbia in quella zona. Il modello viene inserito nella centrifuga geotecnica con un iniziale battente d'acqua a metà altezza dell'argine, successivamente innalzato fino ad una quota superiore alla cresta arginale (grazie all'utilizzo di un setto in sommità arginale visibile in Fig. 1a). Il fattore di amplificazione della gravità cresce da 1g a 120g (Allersma e Rohe, 2003). A circa 100g inizia ad essere visibile una superficie di scivolamento circolare che evolve nella triplice superficie (circolare+rettilenea+lineare) come evidente in Fig. 1b. La superficie più profonda, lineare, si localizza chiaramente all'interfaccia fra sabbia e argilla, mentre una seconda superficie si localizza nel corpo arginale. Quest'ultima è probabilmente indotta dai cedimenti dell'argine in fase di costruzione e dalla progressiva crescita dell'accelerazione.

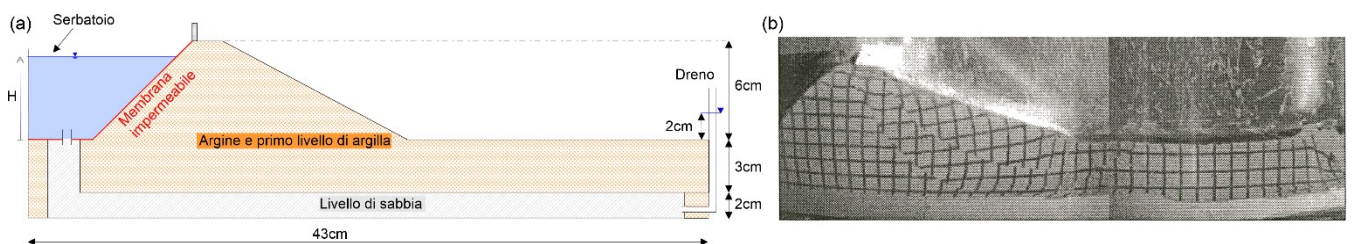


Figura 1. Caratteristiche principali dell'esperimento in centrifuga (a), configurazione finale dell'argine collassato (b) a seguito del sollevamento al piede indotto dalle sovrappressioni nel livello di sabbia in fondazione.

## 1.2 Riproduzione del fenomeno con il Metodo dei Punti Materiali

Il modello MPM considera una formulazione dinamica accoppiata, bifase per terreni parzialmente saturi (Ceccato et al., 2021) implementata nel codice open source Anura3D (Anura3D, 2022).

La geometria è alla scala del prototipo, dunque le lunghezze sono aumentate di un fattore 120 rispetto al modello sperimentale. Si assumono condizioni di stato piano di deformazione: il modello numerico è dunque 2D. Le proprietà del solido e del liquido specificate per ciascuno dei due materiali sono riportate in Tabella 1. Il liquido è caratterizzato da densità  $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$ , viscosità  $\mu_L = 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$ , e modulo di bulk  $K_L = 60 \cdot 10^3 \text{ kPa}$ . Le curve di ritenzione sono in via semplificata di tipo lineare, e la pendenza della curva di ritenzione è controllata dal coefficiente  $a_v$  riportato in Tabella 1. La conducibilità idraulica è assunta costante, pari al valore in condizioni sature e non variabile in dipendenza del grado di saturazione. Il valore di tale parametro per l'argilla è aumentato rispetto al valore reale, in quanto, essendo il codice di calcolo esplicito, valori bassi di conducibilità idraulica implicano tempi computazionali estremi (mesi), non accettabili nell'ambito di una verifica di stabilità di un argine come nel caso in esame. Il valore scelto viene calibrato in via preliminare, e genera dei risultati in buon accordo con l'esperimento, con l'unica differenza che il fenomeno di instabilità è anticipato. I parametri meccanici sono assegnati sulla base delle informazioni descritte nell'esperimento (Allersma & Rohe, 2003). Il criterio di rottura adottato è di tipo Mohr-Coulomb e i parametri drenati di attrito e coesione sono ricavati da prove triassiali CIU preliminari all'esperimento in centrifuga.

Tabella 1. Proprietà dei materiali e parametri idro-meccanici.

	Sabbia	Argilla
$\rho_s [\text{kg/m}^3]$	2610	2542
$n [-]$	0.355	0.3
$a_v [1/\text{kPa}]$	$6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$k_{sat} [\text{m/s}]$	$7.44 \cdot 10^{-3}$	$7.44 \cdot 10^{-5}$
$E [\text{kPa}]$	55860	5520
$\nu [-]$	0.33	0.15
$\phi' [^\circ]$	37	22
$c' [\text{kPa}]$	0.0	10

La configurazione geometrica sperimentale viene semplificata nel modello numerico tramite un'opportuna gestione delle condizioni al contorno. Infatti al posto del serbatoio progressivamente riempito e collegato con un tubo verticale al livello di sabbia in fondazione, si decide di applicare una distribuzione di pressioni nodali con andamento lineare lungo la base del modello. In questo modo la pressione cresce comunque "dal basso". La distribuzione di pressioni mantiene sempre una quota fissa al nodo più a valle, per riprodurre l'effetto del tubo aperto ( $H=2.4\text{m}$ ), mentre il valore dal lato fiume cresce in tre fasi (si veda Fig. 2). Per simulare l'effetto stabilizzante del serbatoio sul paramento interno, quest'ultimo viene bloccato in termini di spostamenti nelle due direzioni, e reso impermeabile per rappresentare la membrana che impedisce il flusso di filtrazione nel corpo arginale.

L'inizializzazione delle tensioni avviene utilizzando la procedura  $K0$ , con  $K0=0.5$ , seguita da uno step di convergenza quasi-statica. L'argine e il primo strato di fondazione costituito dallo stesso materiale sono in questa fase iniziale in condizioni di parziale saturazione, solo lo strato sabbioso è saturo. Successivamente una prima fase di durata 8 minuti impone una pressione costante alla base del modello corrispondente alla quota piezometrica del dreno. Seguono le tre fasi di incremento di pressione, mantenute rispettivamente per 45 min, 116 min e 182min, che risultano in distribuzioni lineari di pressione lungo l'interfaccia fra sabbia e argilla, come evidenziato in tre istanti rappresentativi di Fig. 2.

La zona potenzialmente instabile tende ad approfondirsi progressivamente in risposta alla crescita di pressione. Gli spostamenti di Fig. 2 suggeriscono un movimento inizialmente di sola rotazione che evolve in una superficie di tripla forma composta da una parte circolare nel corpo arginale dove agisce la spinta attiva, un tratto di scorrimento orizzontale lungo l'interfaccia fra sabbia e argilla, in corrispondenza del piede e un ultimo tratto lineare, dove la superficie di rottura emerge al piano campagna (azione della spinta passiva). Gli spostamenti sono di entità moderata a seguito dei due primi incrementi di pressione, e il rilevato arginale non è irrimediabilmente danneggiato. Viceversa, l'ultima fase genera grandi spostamenti (ordine del m) che determinano il collasso dell'opera. Tale livello di pressione nella sabbia può essere definito come critico per la stabilità dell'opera, in

quanto controbilancia la tensione verticale totale nell'intorno e induce l'annullamento delle tensioni verticali efficaci.

E' visibile e quantificabile un significativo abbassamento della cresta, con un valore massimo pari a 80cm. Il sollevamento al piede (che tuttavia era già iniziato nella fase precedente) raggiunge un valore massimo di 50cm. Quest'ultima fase genera una configurazione deformata molto simile a quella sperimentale, a meno della seconda superficie di scivolamento più superficiale e dello spostamento in cresta che nell'esperienza sembra leggermente meno marcato.

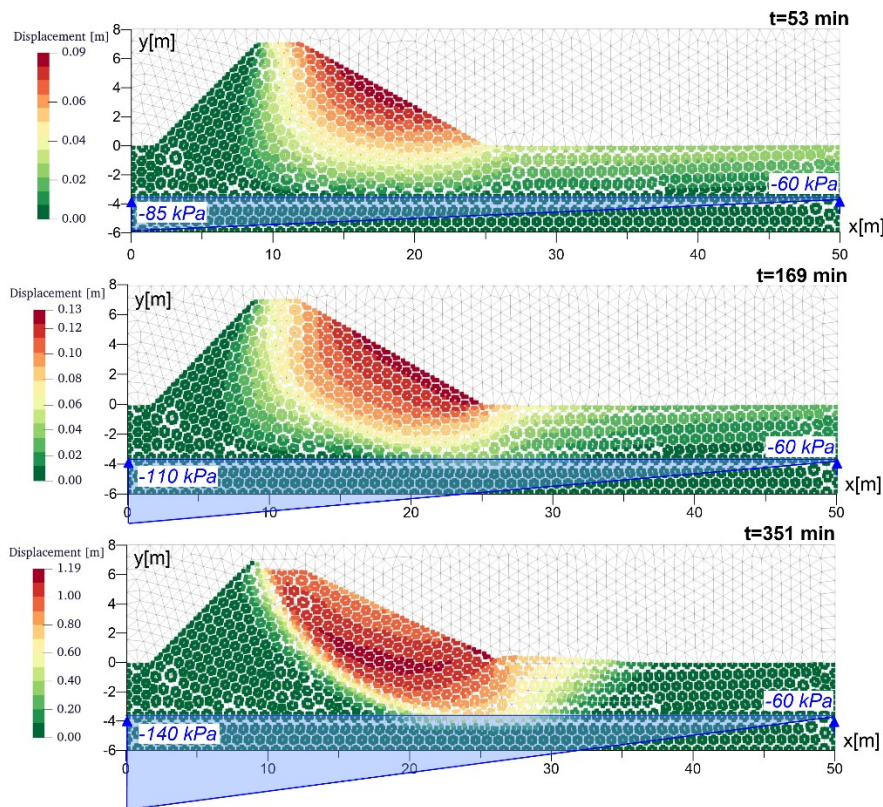


Figura 2. Evoluzione degli spostamenti (norma) nelle tre fasi principali della simulazione con il metodo dei punti materiali. Si riporta a titolo indicativo la distribuzione delle pressioni lineari all'interfaccia fra i materiali sabbia e argilla.

## 2. CONFRONTO CON APPROCCI CONVENZIONALI: METODO DI VAN E METODO AGLI ELEMENTI FINITI

L'analisi con l'MPM del fenomeno di collasso indotto dal sollevamento al piede permette non solo di individuare la distribuzione di pressioni critiche, l'innescò del fenomeno, ma anche di quantificare gli spostamenti, ovvero l'estensione del danno alla struttura arginale e le possibili conseguenze in termini di inondazioni delle aree limitrofe agli argini. Queste informazioni, a supporto delle analisi di rischio associate ai collassi arginali, non si possono ottenere con altre tecniche numeriche diffuse nella pratica professionale. In particolare, il caso in esame viene simulato con il Metodo di Van (Van et. al 2005) e il Metodo agli Elementi Finiti (FEM). Il metodo di Van è basato sul metodo dei conchi, e rappresenta un'estensione del metodo di Bishop attraverso l'utilizzo di una superficie di scivolamento composta da due tratti circolari separati da un tratto orizzontale, sottostante alla zona di piede dell'argine. Il metodo non considera la deformabilità dei terreni e permette solo di quantificare il fattore di sicurezza (FS) considerando l'equilibrio delle forze e dei momenti. Nel codice D-Stability (D-Stability, 2021) utilizzato in questo studio, la distribuzione delle pressioni dipende dall'assegnazione di uno o più livelli piezometrici che rappresentano una condizione stazionaria. L'analisi FEM, condotta con il software Midas (Midas GTS NX, 2019), permette invece di considerare il comportamento tenso-deformativo dei terreni, con la limitazione di piccoli spostamenti. La simulazione è di tipo semplicemente accoppiato "one-way" (risoluzione prima del problema idraulico e successivamente del problema meccanico) e per generare le pressioni nel livello di sabbia vengono applicate delle condizioni di carico idraulico alle estremità dello strato. La Fig. 3 propone un confronto fra i risultati ottenuti con i tre metodi, in particolare per MPM e FEM si considerano le deformazioni deviatoriche in uno stesso range di valori. La simulazione FEM (Fig. 3b) non converge dopo il secondo incremento di pressione,

e le deformazioni risultanti evidenziano sia la superficie circolare sia una zona di localizzazione in profondità. Tuttavia gli spostamenti massimi lungo il paramento lato campagna ( $\approx 10\text{cm}$ ) non sono rappresentativi. L'analisi con il metodo di Van fornisce  $FS=0.963 < 1$  in corrispondenza della seconda distribuzione di pressioni (Fig. 3c) che tende a ridursi ulteriormente per la terza distribuzione di pressioni  $FS=0.834$  (Fig. 3d). Tuttavia la scarpata è in realtà già deformata in risposta alle pressioni precedenti, mentre la valutazione del FS è rappresentativa della sola configurazione indeformata. L'analisi congiunta dei tre metodi permette di comprendere come la valutazione del FS basata su considerazioni di solo equilibrio tenda ad essere più conservativa.

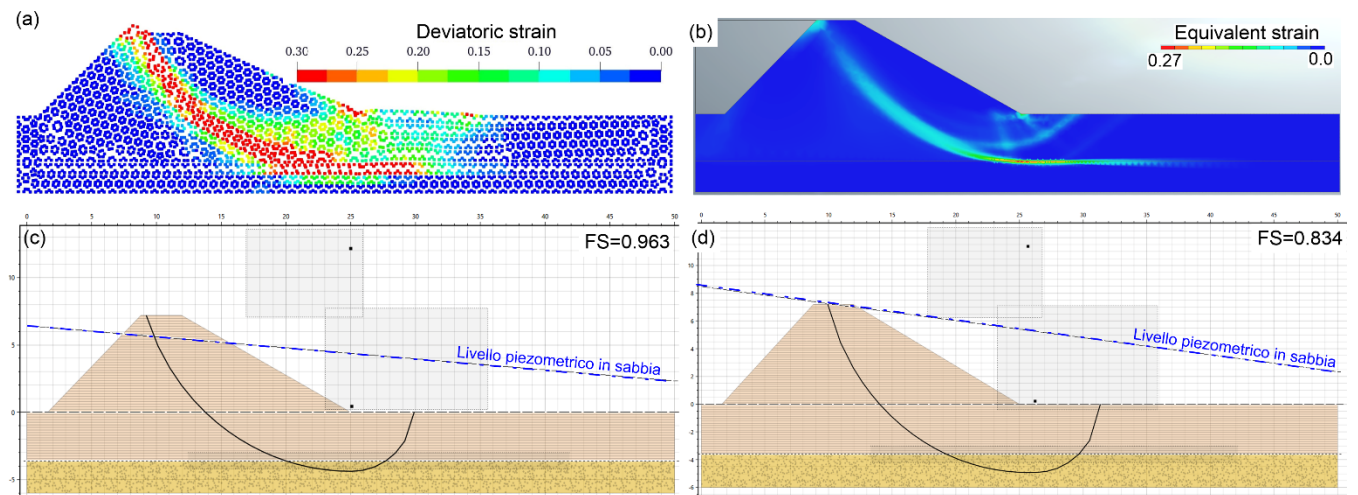


Figura 3. Confronto fra i risultati del modello di argine con l'MPM (a), il FEM (b) e il metodo di Van (c).

### 3. CONCLUSIONI

In questo studio è stata presentata un'indagine circa il meccanismo di instabilità arginale per sollevamento al piede, condotta mediante un esperimento in centrifuga e la sua riproduzione con l'MPM. L'MPM dimostra la sua efficacia nel cogliere aspetti fondamentali del meccanismo di collasso indotto dal sollevamento al piede: in primis, l'incremento di pressione in fondazione che riduce le tensioni efficaci e la resistenza al taglio, favorendo localizzazione di deformazioni e scivolamento all'interfaccia fra i due diversi terreni di fondazione. In secondo luogo, la propagazione della superficie di scorrimento circolare verso la cresta dell'argine, con movimento rotazionale della scarpata lato campagna e la formazione di una zona di spinta passiva a valle, che delimita la porzione di terreno interessata dal sollevamento. L'MPM fornisce un quadro chiaro dell'evoluzione degli spostamenti a diverse altezze dell'opera e in profondità. Questo aspetto supporta le valutazioni di rischio associate al collasso arginale, fornendo una possibile distinzione tra situazioni di moderata instabilità, dove l'opera continua a svolgere la sua funzione di protezione, rispetto alle situazioni in cui si sviluppano grandi spostamenti e il collasso di parti dell'opera stessa è irreversibile. Il confronto finale con i metodi tradizionali usati nell'ambito delle previsioni di comportamento dei rilevati arginali permette di capire l'avanzamento metodologico introdotto dall'MPM e le conseguenti possibilità in termini di analisi di sicurezza più affidabili e ottimizzate.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- Allersma H. e Rohe A. (2003). Centrifuge tests on the failure of dikes caused by uplift pressure, *Int J of Ph Mod in Geot* 3 (2003) 45–53. URL: <https://doi.org/10.1680/ijpmg.2003.030104>.
- Ceccato F., Yerro A., Girardi V., Simonini P. Two-phase dynamic MPM formulation for unsaturated soil, *Computers and Geotechnics* 129 (2021) 103876. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103876>.
- Anura3D MPM Research Community (2022), ANURA3D version 2022 source code. URL: [https://github.com/Anura3D/Anura3D\\_OpenSource](https://github.com/Anura3D/Anura3D_OpenSource)
- Van M. A., Koelewijn A. R., Barends F. B., Uplift phenomenon: Model, validation, and design, *Int J of Geom* 5 (2005) 98–106. doi:10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:2(98)
- R. V. der Meij, D-Stability - Computer Software, 2021. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/d-stability/>.
- Midas GTS NX v2019 - Computer Software, 2020. URL: <https://globalsupport.midasuser.com/helpdesk/KB/View/32636343-midasgtsnxmanualsandtutorials>.