

## SIMULAZIONI MPM DELL'IMPATTO DI COLATE RAPIDE SU UN'OPERA IN TERRA RINFORZATA

Maria Mandalari (maria.mandalari@unirc.it), Marilene Pisano (marilene.pisano@unirc.it), Giuseppe Cardile (giuseppe.cardile@unirc.it),

*DICEAM, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria*

Francesca Ceccato (francesca.ceccato.1@unipd.it)

*DICEA, Università di Padova*

**ABSTRACT.** La valutazione del rischio da frane a cinematica rapida è un processo complesso che richiede la valutazione della pericolosità e l'analisi del danno potenziale sulla popolazione e sulle strutture e infrastrutture presenti nella zona interessata. Quest'ultimo aspetto è necessario per adottare le misure di mitigazione più idonee. Per poter progettare correttamente una barriera, risulta fondamentale il calcolo delle forze di impatto esercitate da un flusso su ostacolo rigido o flessibile. Le formulazioni esistenti si basano su parametri e ipotesi semplificative che restituiscono una forza di impatto sottostimata o sovrastimata rispetto al valore effettivo. Lo scopo di questa memoria è fornire un contributo riguardo le potenzialità dell'utilizzo dell'approccio numerico MPM al caso dell'impatto di un debris flow su opere di protezione. È stato modellato un flusso equivalente, con legge reologica di Bingham, posizionato con assegnata velocità iniziale di fronte ad una barriera rigida. I risultati sono riportati in termini di storia temporale della forza di impatto sul paramento e spostamenti della barriera alla base.

### 1. INTRODUZIONE

I debris flow sono flussi molto/estremamente rapidi di detriti saturi che scorrono in un canale ripido trascinando parecchio materiale e acqua dal percorso che attraversano (Hung et al., 2014). Si classificano pertanto come frane a cinematica rapida, ovvero fenomeni di prima rottura, caratterizzati da alte velocità durante la fase di propagazione e dalla quasi assenza di segnali premonitori. Queste caratteristiche, unite alle forti deformazioni della massa in frana e all'elevata capacità distruttiva degli elevati volumi mobilitati, rendono i debris flow dei fenomeni con elevato potere distruttivo. Di conseguenza, risultano fondamentali sia una corretta valutazione del rischio legato alla nascita di questi fenomeni di dissesto, sia una appropriata progettazione di interventi di mitigazione che risultino adeguati.

Per quanto concerne quest'ultimo punto, una possibilità è quella di utilizzare barriere per deviare, fermare o rallentare il flusso. Nella progettazione di tali opere, gioca un ruolo fondamentale la valutazione delle forze di impatto. Tuttavia, formulare espressioni empiriche che prendano in considerazione tutti i fattori che caratterizzano i debris flow è piuttosto complicato, data la presenza di pochi dati registrati da eventi reali e il fatto che i modelli attualmente disponibili non sono universalmente applicabili. Il flusso che caratterizza un debris flow è eterogeneo e i valori della sua densità, velocità e altezza evolvono nel tempo e nello spazio; ciò implica che essi dovrebbero essere considerati come variabili di campo (Kwan, 2012; Vagnon, 2020), ma tale assunzione è ovviamente piuttosto complessa.

Per superare i limiti delle formulazioni empiriche, negli ultimi anni si è fatto ricorso a diverse tecniche numeriche, quali: metodi agli elementi discreti (DEM), metodi euleriani, metodi arbitrari Lagrangiano-Euleriano (ALE), e metodi lagrangiani basati su particelle. In questo studio è stato utilizzato il Material Point Method (MPM), impiegato anche in precedenti studi (Ceccato, 2016; Ceccato et al., 2018; Ceccato & Simonini, 2016; Di Perna et al., 2022) riguardanti l'impatto di flussi, che erano stati modellati considerando il criterio di Mohr-Coulomb, su barriere rigide.

Il Material Point Method applica un approccio al continuo ed è stato specificatamente sviluppato per simulare problemi a grandi spostamenti. In questo metodo il continuo è rappresentato da punti lagrangiani, chiamati punti materiali (MPs), mentre il dominio in cui si prevede che il corpo si muova è discretizzato da una mesh agli elementi finiti. Le deformazioni del continuo sono modellate seguendo i MP che si muovono attraverso una mesh fissa euleriana. Quindi il metodo utilizza una descrizione ibrida euleriana-lagrangiana.

In questo studio è stato modellato l'impatto di un debris flow su una barriera rigida libera di scorrere alla base con legge attrittiva. Il debris flow è modellato come un fluido equivalente con legge reologica di tipo Bingham e viene posto immediatamente davanti la barriera con una velocità iniziale prefissata; quindi, non si considera l'intera fase di propagazione. Sono state calcolate le forze d'impatto sull'opera e valutato il suo

spostamento orizzontale. Le simulazioni sono state condotte con una versione appositamente modificata del codice open source Anura3D v.2022 ([www.anura3d.com](http://www.anura3d.com)).

## 2. DEFINIZIONE DEL MODELLO NUMERICO

È stato considerato un modello bidimensionale (*Figura 1*). La massa rappresentativa del flusso in frana è posizionata di fronte alla barriera con una velocità iniziale pari a 8.8 m/s, altezza 1 m e lunghezza 25 m. La barriera è alta 6 m con paramento inclinato rispetto all'orizzontale di  $\beta=70^\circ$ ; si assume che essa possa scorrere alla base. Il contatto tra barriera e flusso è di tipo liscio, mentre all'interfaccia barriera-fondazione è stato considerato un coefficiente di attrito pari a 0.45. Il flusso è modellato come fluido equivalente utilizzando il modello reologico di Bingham (Tabella 1); per la sua discretizzazione sono stati utilizzati 12 MPs per ogni elemento triangolare che lo compone. La barriera, invece, rappresenta un'opera in terra rinforzata caratterizzata da strati di terreno alternati a geosintetici con funzione di rinforzo. Essa è modellata come corpo rigido, ipotizzando un materiale secco con un peso dell'unità di volume pari a 20 kN/m<sup>3</sup>, pertanto si trascurano le deformazioni della stessa dovute all'impatto del flusso.

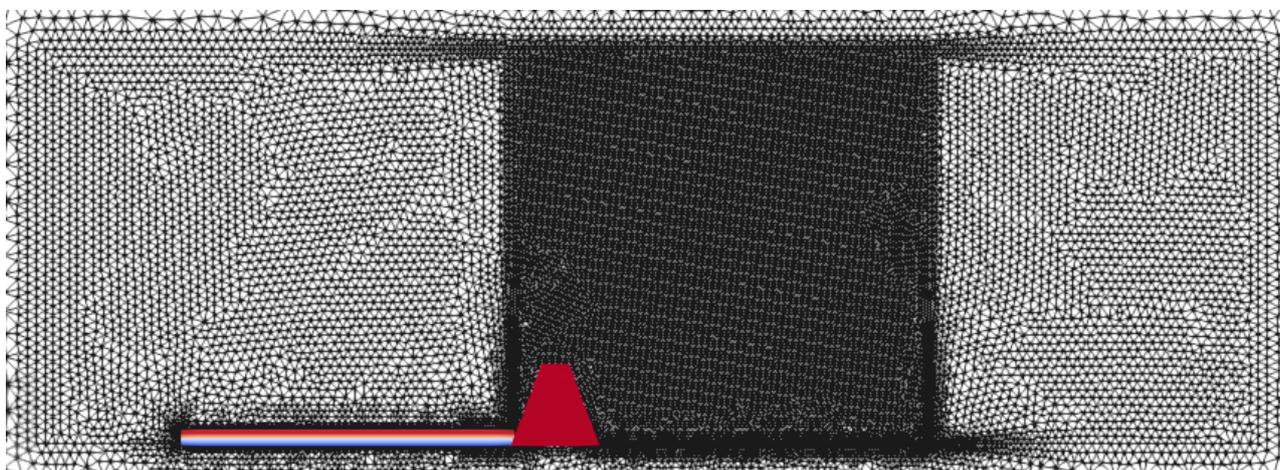


Figura 1. Mesh e geometria del modello.

Tabella 1. Parametri del modello costitutivo.

| PARAMETRI                               | SIMBOLI  | VALORI  |
|---|----------|---------|
| Densità del flusso [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_l$ | 1875    |
| Porosità [-]                            | $n$      | 0.45    |
| Bulk modulus [kPa]                      | $E_b$    | 4166    |
| Modulo di Young [kPa]                   | $E$      | 2500    |
| Modulo di Poisson [-]                   | $\nu$    | 0.40    |
| Viscosità del liquido [kPa/s]           | $\mu_l$  | 0.00088 |
| Yield stress [kPa]                      | $\tau_0$ | 0.36    |

### 2.1 Risultati

Quando il debris flow incontra la barriera, risale sul paramento trasmettendo una pressione sullo stesso che varia nel tempo. L'onda si increspa e ricade su sé stessa generando nuove sovrappressioni, mentre parte del flusso sorpassa la barriera (*Figura 2b-2c-2d-2e*). All'impatto, il flusso esercita una forza contro la barriera che è possibile scomporre in una componente in direzione orizzontale ( $F_x$ ) ed una in direzione verticale ( $F_y$ ) (*Figura 3a*). Entrambe tali componenti presentano un primo valore di picco indicativo del primo impatto (*Figura 2a*), poi

la forza diminuisce e ha andamento quasi costante fino al raggiungimento di un secondo picco, maggiore del precedente, causato dall'onda che nasce in seguito alla caduta del getto verticale del flusso, generatosi dopo il primo impatto, su sé stesso (Figura 2d e 3a).

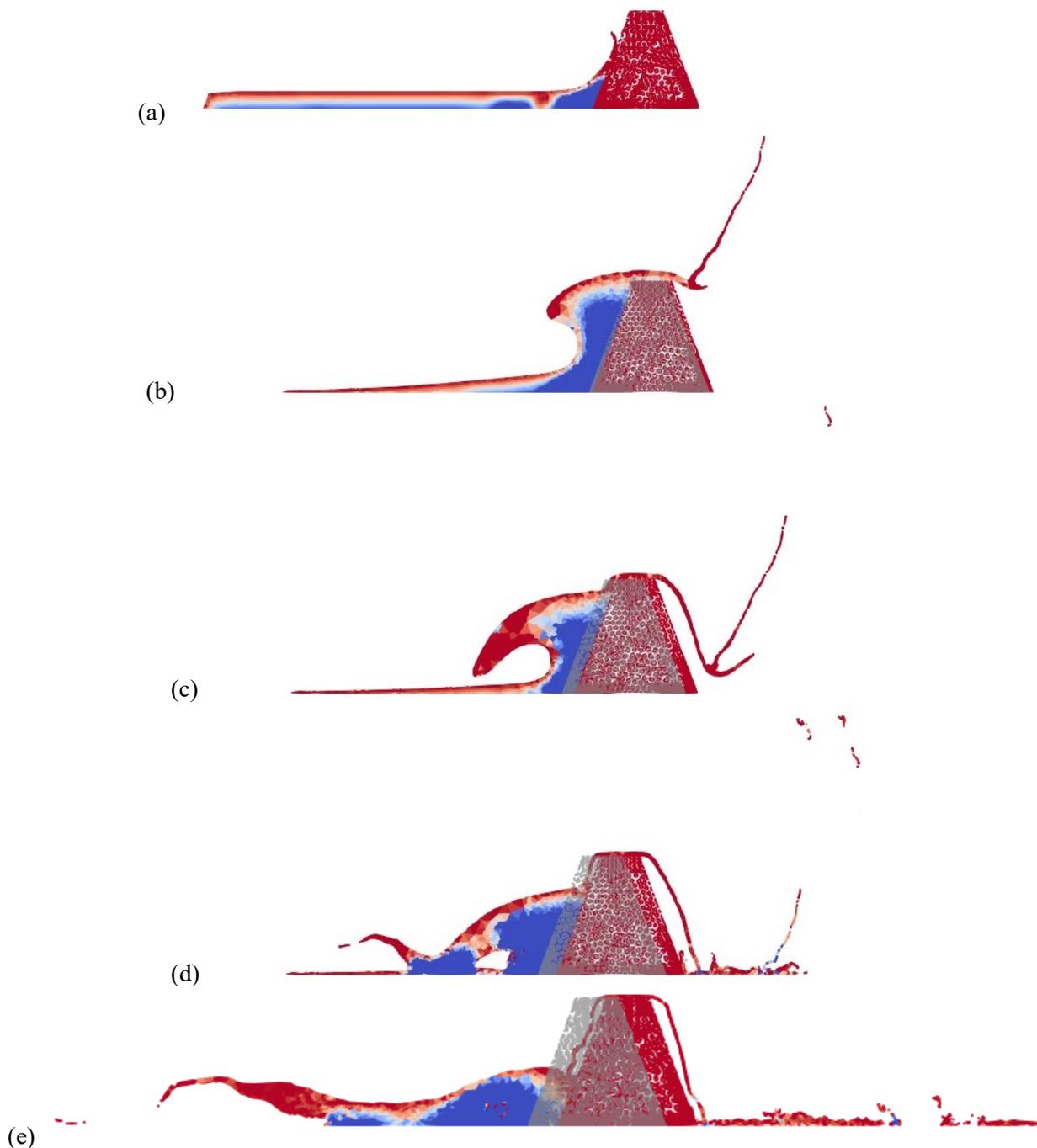


Figura 2. Fasi di impatto del flusso (a)  $t=0.2s$  (primo picco) ; (b)  $t=2.0s$  (tratto intermedio); (c)  $t=2.6s$  (istante precedente al secondo picco); (d)  $t=3.0s$  (secondo picco) (e)  $t=3.8s$  (tratto finale)

Altri aspetti utili nella progettazione di un'opera di mitigazione riguardano la valutazione dello spostamento della barriera alla base e il suo eventuale confronto con un valore ammissibile (qualora si decida di considerare ammissibile un certo valore di spostamento che consentirebbe di dissipare la forza di impatto, riuscendo al contempo a risparmiare in termini di oneri costruttivi), e la quantificazione dell'eventuale massa che tracima la barriera; questo è importante soprattutto nel caso di opere inserite in prossimità di contesti urbani o infrastrutture.

La barriera inizia a muoversi (Figura 2b) quando la forza di impatto supera la forza d'attrito alla base, quindi la velocità aumenta all'aumentare della forza d'impatto per poi diminuire leggermente intorno a 2,4s

(Figura 3b). A circa 3s, quando la forza d'impatto aumenta nuovamente, si ha un nuovo incremento della velocità e infine essa diminuisce con la forza fino ad annullarsi (tratto in cui lo spostamento cumulato rimane costante). Lo spostamento massimo dell'opera è di 1,4m. In Figura 2 sono rappresentati in grigio i MPs della barriera all'istante iniziale. È stato effettuato un confronto con le forze di impatto ricavate nel caso di barriera fissa, che risultano essere caratterizzate da un picco e un andamento della forza coincidente nella fase iniziale, mentre, successivamente, sia il secondo picco che l'andamento della forza differiscono leggermente tra i due casi (Figura 3a). La capacità dell'opera di traslare riduce quindi leggermente le forze d'impatto nei primi 3s.

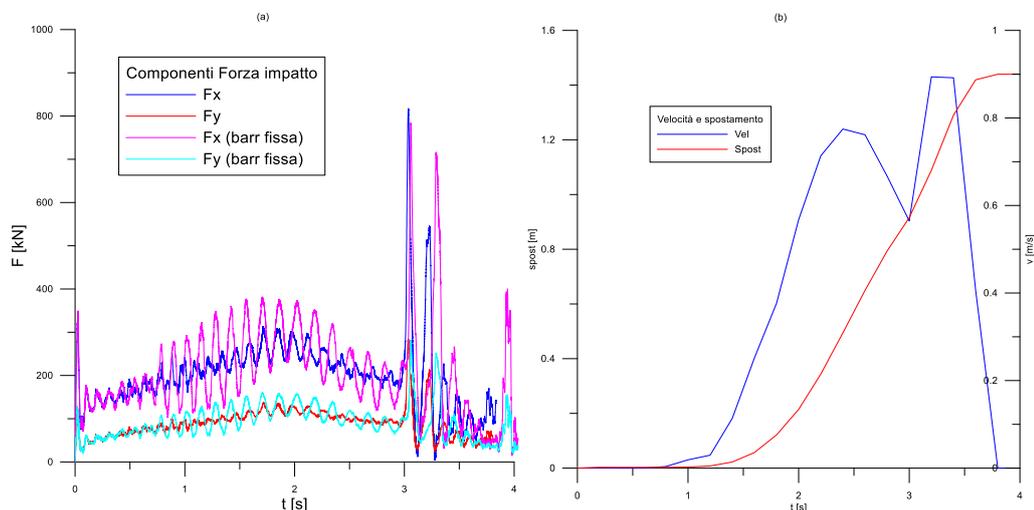


Figura 3. (a) Componente orizzontale e verticale della forza di impatto; (b) Velocità e spostamento dei punti materiali della barriera

### 3. CONCLUSIONE

Il presente lavoro riporta i risultati di alcune analisi preliminari che mostrano le potenzialità del metodo MPM nel simulare l'impatto di debris flow con comportamento viscoso su opere in terra rinforzata. Queste analisi possono essere utili per le verifiche di stabilità di queste strutture per le quali la letteratura scientifica è ancora carente in tema di progettazione sotto carico di impatto da colata rapida. I futuri sviluppi della ricerca analizzeranno la stabilità interna di queste barriere, la variazione della forza di impatto al variare delle caratteristiche geometriche della barriera e del flusso. Inoltre, ci si pone l'obiettivo di valutare delle soluzioni ottimali ed innovative in termini di progettazione delle opere in terra rinforzata.

### 4. BIBLIOGRAFIA

Ceccato F. (2016). Study of flow landslide impact forces on protection structures with the Material Point Method. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Proceedings of the 12th International Symposium on Landslides*, Napoli, Italy: 615–620.

Ceccato F., Redaelli I., di Prisco C., Simonini P. (2018). Impact forces of granular flows on rigid structures: Comparison between discontinuous (DEM) and continuous (MPM) numerical approaches. *Computers and Geotechnics*, 103: 201–217.

Ceccato F., Simonini P. (2016). Granular Flow Impact Forces on Protection Structures: MPM Numerical Simulations with Different Constitutive Models. *Procedia Engineering*, 158:164–169.

Di Perna A., Cuomo S., Martinelli M. (2022). MPM-modelling of Reinforced-Concrete walls as protection structures against flow-like landslides. *Proceedings of the International Conference on Natural Hazards and Infrastructure. (ICONHIC2022)*, Athens, Greece.

Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2): 167–194.

Kwan J. S. H. (2012). Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-resisting Barriers. Geotechnical Engineering Office, HKSAR, GEO Report, 270.

Vagnon F. (2020). Design of active debris flow mitigation measures: A comprehensive analysis of existing impact models. *Landslides*, 17(2):313–333.