

OPERE DI PROTEZIONE DA FRANE TIPO FLUSSO: MODELLAZIONE MPM E ANALISI DELLE PRESTAZIONI

Angela Di Perna

Università degli Studi di Salerno

adiperna@unisa.it

Sabatino Cuomo

Università degli Studi di Salerno

scuomo@unisa.it

Mario Martinelli

Deltares, Delft, Paesi Bassi

Mario.Martinelli@deltares.nl

Sommario

Il presente lavoro sintetizza alcuni risultati inerenti gli effetti prodotti dall'impatto di flussi granulari saturi sulle opere di protezione. Le tipologie di barriere prese in considerazione sono i muri in calcestruzzo armato (c.a.) e le barriere deformabili costituite da terreno granulare rinforzato con geogriglie. Le analisi proposte sono condotte con una tecnica numerica innovativa nota come Material Point Method (MPM). Gli schemi di calcolo tengono in conto le principali caratteristiche della massa impattante quali velocità, altezza di impatto, comportamento elasto-plastico e pressioni dell'acqua interstiziale. Vengono analizzate diverse configurazioni geometriche delle opere, portando in conto la deformabilità dei materiali tipicamente utilizzati e la possibilità che l'opera impattata possa traslare lungo la base. I risultati ottenuti mostrano come il metodo MPM possa adeguatamente simulare i molteplici meccanismi di impatto frane di tipo flusso contro tali tipologie di opere, in un contesto di grandi deformazioni e comportamento idro-meccanico accoppiato all'interno della frana.

1. Introduzione

Le frane tipo flusso sono fenomeni spesso catastrofici che forniscono scarsi segnali premonitori e che poi raggiungono velocità elevate e ragguardevoli distanze di propagazione (Cuomo et al., 2014). Per intercettare la propagazione di tali fenomeni franosi, possono utilizzarsi barriere artificiali rigide o deformabili che possono quindi contribuire ad evitare consistenti danni ad abitazioni ed infrastrutture (Fig. 1). La valutazione accurata delle forze d'impatto di una frana tipo flusso su eventuali opere di protezione è indispensabile per la loro corretta progettazione (Hübl et al. 2009; Bugnion et al., 2012; Mavrouli et al., 2014).

L'interazione di frane tipo flusso con strutture di protezione comunque è ancora una questione aperta nella letteratura scientifica. Infatti, la caratterizzazione dei meccanismi d'impatto sulle strutture di protezione pone ancora sfide scientifiche significative, soprattutto qualora si voglia tenere conto del comportamento idro-meccanico accoppiato dello scheletro solido e del fluido interstiziale nonché delle grandi deformazioni del flusso impattante e della barriera. Schematizzando il problema si potrebbe dire che l'impatto del flusso sulla barriera genera sollecitazioni addizionali (prevalentemente orizzontali) lungo il fronte impattato della struttura. Tale azione reciproca determina che: (i) il flusso decelera e (ii) la barriera scorre lungo la sua base e si deforma.

Larga parte della letteratura scientifica esistente (Hübl et al. 2009; Bugnion et al. 2012; Di Perna et al. 2022, tra molti altri) ha sviluppato formulazioni empiriche che stimano la forza d'impatto massima generata dai flussi e molti contributi hanno riguardato i flussi granulari asciutti. Tali formulazioni dipendono da coefficienti empirici da calibrare opportunamente nelle pratiche applicazioni.

Di recente sono stati anche adottati diversi metodi numerici per simulare flussi interagenti con barriere che hanno fornito elementi utili per la progettazione, come metodi agli elementi discreti (Leonardi A., 2015; Calvetti et al. 2017), oppure approcci al continuo basati sul metodo dei punti materiali (MPM) (Cuomo et al., 2019, 2021)



Fig. 1. Esempi di danni alle strutture, in seguito all'impatto di frane tipo flusso nei Comuni di Sarno (1998) e Cervinara (1999) (da Mavrouli et al. 2014 e Cascini et al. 2011)

2. Opere di protezione da frane tipo flusso: i muri e le barriere

Per contenere ed arrestare la propagazione di frane tipo flusso possono essere installate imponenti strutture di protezione, come muri o blocchi in calcestruzzo armato (Fig. 2a). I muri vengono tipicamente usati nelle aree collinari per contenere massi in caduta e detriti e la determinazione dello spostamento massimo di queste barriere diventa un problema di progettazione in condizioni di spazio limitato.

I muri in c.a. possono anche essere rinforzati con contrafforti. Tuttavia, essendo strutture snelle, la dinamica del flusso all'impatto deve essere valutata attentamente, in quanto l'opera deve trattenere il materiale in frana senza inflettersi e senza mostrare spostamenti eccessivi. Per questi motivi, le fondazioni di queste strutture sono particolarmente grandi.

Recentemente, alcuni studi (Gioffrè et al., 2017; Cuomo et al., 2019) hanno proposto l'utilizzo di rilevati in terra rinforzata composti da terreno granulare rinforzato da geogriglie come barriere di protezione da frane tipo flusso (Fig. 2b). Tali barriere vengono principalmente adoperate come misura di protezione da crolli in roccia e valanghe di neve. La stabilità interna del manufatto deriva dall'interazione tra il terreno di riempimento e le geogriglie, le quali forniscono resistenza a trazione al terreno. Le barriere armate sono strutture di protezione appropriate quando sono previsti eventi di frana con energia cinetica da media a molto elevata, ossia da poche centinaia di kJ a decine di MJ. Tuttavia, non possono essere installate su pendii molto ripidi e la loro costruzione richiede ampio spazio e accessibilità per i veicoli pesanti.



Fig. 2. Muro in calcestruzzo armato nella località Odda, Norvegia (Barbolini et al., 2009) e barriera deformabile per contenimento massi (Ronco et al., 2009).

In generale, la progettazione delle opere di protezione richiede principalmente due requisiti: i) devono essere considerate in primo luogo le condizioni geografiche e geologiche sito-specifiche; ii) le resistenze strutturali devono essere sempre maggiori delle azioni d’impatto esercitate sulla struttura. La resistenza della barriera può essere facilmente valutata dalla resistenza dei materiali costituenti la struttura. Tuttavia, una corretta progettazione richiede un’accurata stima delle azioni dinamiche in seguito all’impatto del fronte di un flusso contro la struttura. Infatti, sebbene non totalmente compresa dal punto di vista scientifico, la dinamica dell’interazione frana-struttura deve essere attentamente valutata per determinare i possibili stati limite ultimo della struttura sottoposta all’impatto.

3. Il Material Point Method (MPM)

Il Material Point Method (MPM) può essere considerato una evoluzione del metodo agli elementi finiti (FEM) particolarmente adatto per risolvere problemi di grandi deformazioni (Sulsky et al. 1994). Il corpo continuo è composto da un numero di punti lagrangiani (denominati punti materiali) che trasportano tutte le proprietà fisiche e i valori di sforzo-deformazione.

Per simulare l’interazione tra le fasi solida e liquida di un terreno saturo, è possibile utilizzare la cosiddetta formulazione “1-punto 2-fasi” (Ceccato et al., 2018). Questa formulazione descrive il comportamento del mezzo poroso saturo utilizzando un solo insieme di punti materiali contenente tutte le informazioni delle fasi. Le accelerazioni delle due fasi (solida e liquida) sono le incognite principali: l’accelerazione della fase solida \mathbf{a}_S si ottiene risolvendo il bilancio dinamico della quantità di moto della miscela (eq. 1), una volta nota quella relativa alla fase liquida \mathbf{a}_L che è calcolata dal bilancio dinamico della quantità di moto della fase liquida (eq. 2). La risoluzione delle leggi costitutive per lo scheletro solido e per il liquido (eq. 3 ed eq. 4, rispettivamente) consente di calcolare l’incremento della tensione effettiva $d\boldsymbol{\sigma}'$ e della pressione interstiziale in eccesso dp_L . L’equazione del bilancio di massa dello scheletro solido viene, dunque, utilizzata per aggiornare la porosità di ciascun punto materiale (eq. 5), mentre dal bilancio di massa totale si ottiene la velocità di deformazione volumetrica della fase liquida (eq. 6) poiché i flussi dovuti alla variabilità spaziale della massa liquida sono trascurati ($\nabla n\rho_L = 0$).

$$(1 - n)\rho_S\mathbf{a}_S = \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} - n p_L \mathbf{I}) + (\rho_m - n\rho_L)\mathbf{b} + \frac{n\mu_L}{k}(\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_S) \quad (1)$$

$$\rho_L\mathbf{a}_L = \nabla p_L - \frac{n\mu_L}{k}(\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_S) \quad (2)$$

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\sigma}' - d\varepsilon_{vol} \quad (3)$$

$$dp_L = \mathbf{K}_L d\varepsilon_{vol} \quad (4)$$

$$\frac{Dn}{Dt} = (1 - n)\nabla \cdot \mathbf{v}_S = 0 \quad (5)$$

$$\frac{D\varepsilon_{vol}}{Dt} = \frac{(1-n)}{n}\nabla \cdot \mathbf{v}_S + n\nabla \cdot \mathbf{v}_L \quad (6)$$

Nelle eq.1-6, ρ_L è la densità del liquido, p_L la pressione del liquido, μ_L la viscosità dinamica del liquido, k la permeabilità intrinseca del liquido, \mathbf{v}_S e \mathbf{v}_L sono le velocità del solido e del liquido, \mathbf{b} è il vettore delle forze di massa, n la porosità, ρ_S la densità del solido, ρ_m la densità della miscela ($\rho_m = (1 - n)\rho_S + n\rho_L$), $\boldsymbol{\sigma}$ il tensore della tensione totale della miscela, \mathbf{D} la matrice tangente di rigidità, $\boldsymbol{\Omega}$ è il tensore di rotazione, \mathbf{K}_L rigidità volumetrica elastica del liquido. L’eq. 3 è derivata utilizzando il tasso di variazione della tensione di Jaumann, al fine di ottenere risultati indipendenti dalla mesh in presenza di grandi deformazioni.

Il contatto tra corpi diversi (base-barriera) è gestito con un algoritmo di contatto per attrito (Martinelli & Galavi, 2022), in cui la velocità della fase liquida viene corretta per impedire sia l’afflusso che il deflusso attraverso la superficie di contatto, e la velocità della fase solida è corretta per avere sforzi di taglio all’interfaccia compatibili con la resistenza lungo il contatto

4. Simulazioni numeriche MPM

4.1 Schema numerico e dati di ingresso

Le analisi numeriche sono state condotte con una versione del Software Anura3D sviluppata da Deltares (Martinelli & Galavi, 2022). Vengono di seguito analizzati alcuni schemi di calcolo semplificati per delineare le principali differenze nell'utilizzo di muri in c.a. e barriere deformabili rinforzate con geogriglie. Le caratteristiche geometriche di flusso, muro e barriera che costituiscono lo schema numerico sono riportate in Fig. 3, mentre i valori numerici di tali grandezze sono riportati in Tab. 1. Le analisi numeriche consentono la simulazione integrata della propagazione del flusso che si muove partendo da una assegnata velocità iniziale (5 oppure 10 m/s) e dell'interazione flusso-struttura. Il flusso è una miscela satura con distribuzione iniziale di tipo lineare della pressione dell'acqua interstiziale e con criterio di rottura elastico perfettamente plastico con legge del flusso plastico non associata. La resistenza al taglio è stata assunta nulla al contatto con il piano campagna su cui si muove la frana. Per l'opera di protezione si ipotizza: materiale secco, con contatto attritivo lungo la base per consentire lo scorrimento, e comportamento elastico perfettamente plastico a rottura. Sia per il muro che per la barriera, nella modellazione numerica viene adoperato un materiale equivalente omogeneo che considera unicamente tutti i materiali costituenti la struttura (i.e. terreno-geogriglie, calcestruzzo-armatura).

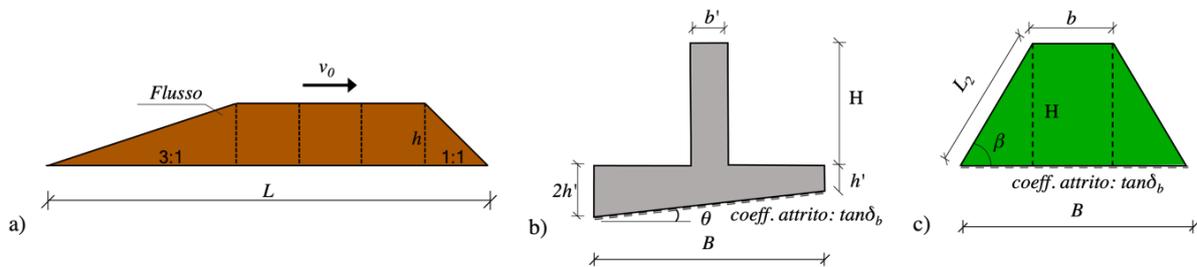


Fig. 3. Geometrie utilizzate nelle analisi numeriche per: a) flusso; b) muro in c. a.; c) barriera.

Tab. 1. Valori delle grandezze geometriche delle barriere di protezione per i diversi scenari di impatto

ID	B (m)	H (m)	d (m)	θ (°)	b' (m)	h' (m)	β (°)	L_2 (m)	b (m)
1	6	6	3	0	1.2	1.2	70	6.39	1.63
2	6	6	3	11.3	1.2	1.2	80	6.09	3.88
3	11	6	3	0	1.2	1.2	70	6.39	6.63
4	11	6	3	6.2	1.2	1.2	80	6.09	8.88
5	6	6	3	0	1.8	1.2	70	6.39	1.63
6	6	6	3	11.3	1.8	1.2	80	6.09	3.88
7	11	6	3	0	1.8	1.2	70	6.39	6.63
8	11	6	3	6.2	1.8	1.2	80	6.09	8.88

Le proprietà meccaniche del muro in c.a. sono state determinate da Ardiaca (2009), considerando il calcestruzzo con una resistenza caratteristica alla compressione di 25 MPa.

I parametri elastoplastici (i.e., angolo di attrito interno φ' , modulo di Young E' , coefficiente di Poisson ν) da impostare per il materiale equivalente della barriera hanno i valori tipicamente impiegati per il terreno di riempimento nelle applicazioni pratiche. Inoltre, la resistenza a trazione del materiale equivalente è pari alla resistenza a taglio ultima della geogriglia. Il termine di coesione è stato ricavato in modo da ottenere lo stesso Fattore di Sicurezza (FS) di stabilità interna sia per la barriera composita e sia per la barriera equivalente (metodo di Morgenstern-Price).

L'interfaccia di base suolo-calcestruzzo/geogriglia è gestita con un contatto di attrito, imponendo un coefficiente ($\tan \delta_b / \tan \varphi'_{base}$) pari a 0.67 per il muro in c.a. e 0.80 per la barriera (Cuomo et al., 2019), assumendo un angolo di resistenza al taglio per il terreno di fondazione (φ'_{base}) di 20°. Le proprietà meccaniche sia della massa satura del flusso che delle opere di protezione sono riportate in Tab. 2.

Tab. 2. Parametri meccanici dei materiali impostati nelle analisi numeriche

Materiale	ρ_m (kg/m ³)	n (-)	E' (MPa)	ν (-)	ϕ' (m)	c' (kPa)	σ_t (kPa)	$\tan(\delta_b)$	k (m/s)	μ_L (Pas)	K_L (MPa)	v_0 (m/s)
Flusso	1800	0.5	2	0.25	20	0	-	0	10 ⁻⁴	10 ⁻³	30	5-10
Muro c.a.	2500	-	30	0.25	35	510	750	0.24	-	-	-	-
Barriera	2000	-	15	0.25	38	35*	50*	0.29	-	-	-	-
						58**	100**					

*combinazione 1 (FS=2.71), **combinazione 2 (FS=3.73)

4.2 Analisi dei risultati

Alcuni risultati significativi sono stati selezionati e mostrati quali la distribuzione spaziale della pressione dell'acqua interstiziale e le deformazioni interne dell'opera di protezione a diversi istanti di tempo della fase di propagazione (Fig. 4). Le caratteristiche geometriche delle opere analizzate in Fig. 4 sono riportate in Tab. 1 per l'ID 7, ossia strutture con stessa altezza e base, entrambe resistenti all'azione di impatto. Durante l'impatto del flusso, la pressione iniziale dell'acqua interstiziale (< 30 kPa) cambia nel tempo, con il valore massimo nei primi istanti del processo d'impatto (t=0.5 s) per poi diminuire nel tempo fino a quasi azzerarsi. Confrontando le due tipologie di strutture, si nota che il muro in c.a. (Fig. 4a) subisce uno spostamento elevato (11 m) rispetto alla barriera, senza subire significative deformazioni interne. La barriera, invece, esibisce uno spostamento più contenuto (2 m), ma le deformazioni locali in corrispondenza della zona di impatto sono più accentuate.

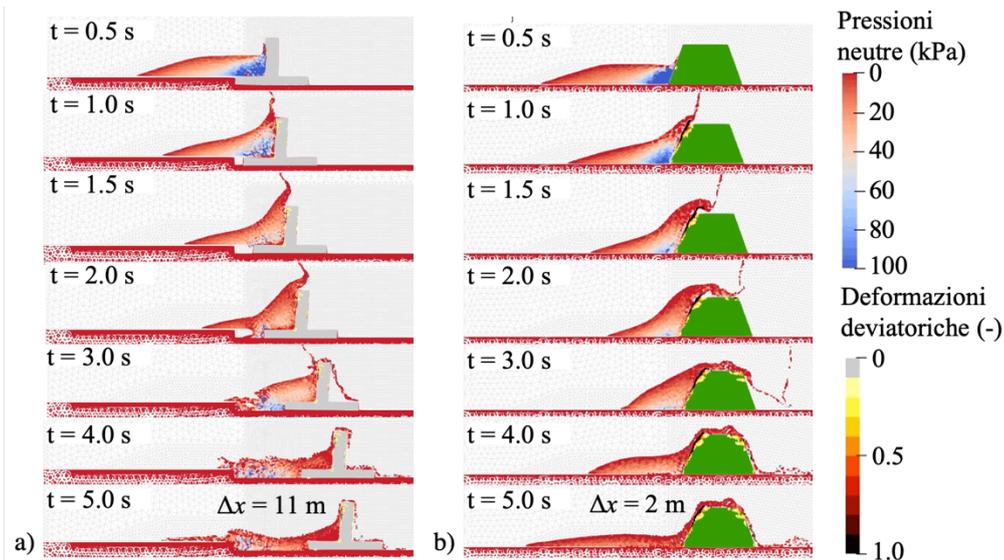


Fig. 4. Distribuzione di pressioni neutre del flusso e di deformazioni all'interno del muro (a) e della barriera (b)

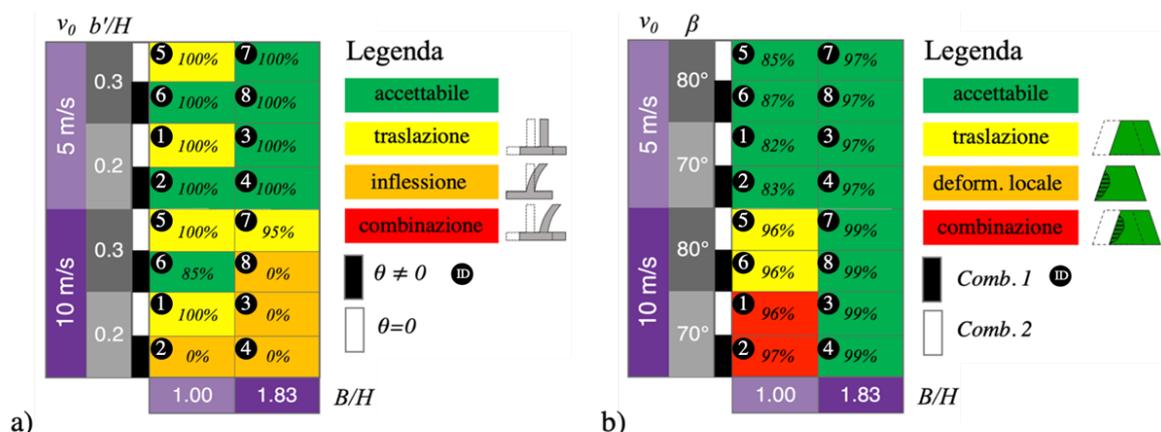


Fig. 5. Confronto tra tutti gli scenari considerati in termini di SLU per muri (a) e per barriere (b)

In Fig. 5 è riportato un confronto generale di tutte le simulazioni di Tab. 1, con i diversi stati limite ultimo della struttura e la percentuale di volume in frana trattenuto dalla struttura. A parità di B/H, le barriere risultano più efficaci dei muri in c.a., i quali sono particolarmente idonei nel contenere flussi a bassa energia cinetica. Inoltre, si può notare ad esempio che una fondazione inclinata del muro riduce notevolmente lo spostamento finale del muro (ipotizzato accettabile per valori < 5 m).

5. Conclusioni

Le analisi numeriche MPM hanno consentito di investigare l'efficacia dei muri in c.a. e delle barriere rinforzate con geogriglie nel contenere la propagazione delle frane tipo flusso, evidenziando che una corretta progettazione della geometria dell'opera è necessaria per evitare la perdita di funzionalità della struttura ed il superamento da parte del materiale in frana.

Bibliografia

- Ardiaca, D. H. (2009). Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. *Plaxis Bulletin*, 25, 12-15.
- Mavrouli O., Fotopoulou S., Pitilakis K., Zuccaro G., Corominas J., Santo A., Ulrich T. (2014). Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 265–289.
- Cuomo S., Pastor M., Cascini L., Castorino G.C. (2014). Interplay of rheology and entrainment in debris avalanches: a numerical study. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(11), 1318-1330.
- Bugnion L., McArdell B.W., Bartelt P., Wendeler C. (2012). Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, 9(2), 179–187.
- Hübl J., Suda J., Proske D., Kaitna R., Scheidl C. (2009). Debris flow impact estimation. In Proc. of the 11th int. symposium on water management and hydraulic engineering, 1–5.
- Di Perna A., Cuomo S., Martinelli M. (2022). Empirical formulation for debris flow impact and energy release. *Geoenvironmental Disasters*, 9(1), 1–17.
- Calvetti F., Di Prisco C.G., Vairaktaris E. (2017). DEM assessment of impact forces of dry granular masses on rigid barriers. *Acta Geotechnica*, 12(1), 129–144.
- Leonardi A., Wittel F.K., Mendoza M., Vetter R., Herrmann H.J. (2016). Particle–fluid–structure interaction for debris flow impact on flexible barriers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(5), 323–333.
- Cuomo S., Di Perna A., & Martinelli M. (2021). Material point method (MPM) hydro-mechanical modelling of flows impacting rigid walls. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(11), 1730–1743.
- Cuomo S., Moretti S., Aversa S. (2019). Effects of artificial barriers on the propagation of debris avalanches. *Landslides*, 16(6), 1077–1087
- Gioffrè D., Mandaglio M.C., Di Prisco C., Moraci N. (2017). Evaluation of rapid landslide impact forces against sheltering structures. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 3(1), 79–91
- Sulsky, D., Chen, Z., Schreyer, H. L. (1994). A particle method for history-dependent materials. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 118(1-2), 179–196.
- Ceccato F., Yerro A., Martinelli, M. (2018). Modelling soil-water interaction with the material point method. Evaluation of single-point and double-point formulation. *Num. Meth. in Geotechnical Engineering IX*, 351–357.
- Martinelli, M., & Galavi, V. (2022). An explicit coupled MPM formulation to simulate penetration problems in soils using quadrilateral elements. *s*, 145, 104697.
- Ronco, C., Oggeri, C., Peila, D. (2009). Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Natural Hazards and earth system sciences*, 9(4), 1189-1199
- Barbolini, M., Domaas, U., Faug, T., Gauer, P., Hákonardóttir, K. M., Harbitz, C. B., Rammer, L. (2009). The design of avalanche protection dams recent practical and theoretical developments.