

# ANALISI NUMERICA MPM DI IMPATTI DI BLOCCHI IN ROCCIA SU STRATI GRANULARI AMMORTIZZANTI

Matteo Zerbi (matteo.zerbi@polimi.it)  
*Politecnico di Milano*

Pietro Marveggio (pietro.marveggio@polimi.it)  
*Politecnico di Milano*

Claudio di Prisco (claudio.diprisco@polimi.it)  
*Politecnico di Milano*

**ABSTRACT.** In passato, l'uso di metodi numerici basati sulla meccanica del continuo per lo studio dell'impatto di blocchi di roccia su strati granulari è stato alquanto limitato per l'assenza sia di codici di calcolo capaci di risolvere problemi in grandi spostamenti che di modelli costitutivi idonei a descrivere il comportamento del materiale granulare soggetto a velocità di deformazione elevate. In questa memoria, l'impatto di un blocco sferico su di uno strato orizzontale è simulato usando un codice di calcolo basato sul Metodo del Punto Materiale in cui è stato recentemente implementato un modello costitutivo multi-regime, cioè un modello in grado di riprodurre il comportamento di un mezzo granulare sia in condizioni quasi-statiche che dinamiche. L'affidabilità dei risultati numerici è valutata confrontando gli stessi con dati sperimentali in vera grandezza.

## 1. INTRODUZIONE

La comprensione dei processi meccanici che governano l'impatto dinamico di blocchi in roccia su strati granulari ammortizzanti è fondamentale per valutare in modo affidabile il rischio associato al fenomeno della caduta massi e per progettare in modo sostenibile sistemi di protezione.

Negli ultimi anni, il Metodo degli Elementi Discreti (DEM), basato sulla meccanica del discontinuo, è stato largamente impiegato nello studio di questo fenomeno (di Prisco et al., 2022; Shen et al., 2021, Zhang et al., 2017). L'uso di metodi numerici basati sulla meccanica del continuo è invece rimasto alquanto limitato (Peila et al., 2007) per l'assenza sia di codici di calcolo capaci di risolvere problemi in grandi spostamenti che di modelli costitutivi idonei a descrivere il comportamento del materiale granulare soggetto a velocità di deformazione elevate.

Recentemente, di Prisco et al., 2023 hanno implementato un modello costitutivo multi-regime in grado di simulare la transizione di fase solido-fluido nel codice di calcolo basato sul Metodo del Punto Materiale (MPM) ANURA3D, basato sulla meccanica del continuo, in grado di risolvere problemi in grandi spostamenti. Questo strumento è stato impiegato con successo nella descrizione dei fenomeni di fluidificazione/solidificazione che avvengono quando una colata di detriti secca impatta contro un muro rigido (di Prisco et al., 2023).

In questo lavoro, i risultati numerici sono confrontati con quelli sperimentali ottenuti da Calvetti e di Prisco, 2012, e si riferiscono all'impatto di un blocco sferico su di uno strato orizzontale omogeneo costituito da sabbia densa. La memoria è così articolata: dopo una descrizione del modello numerico impiegato (Paragrafo 2), sono mostrati i risultati numerici (Paragrafo 3) e nel Paragrafo 4 sono riassunte le principali conclusioni evinte dalla discussione dei risultati ottenuti.

## 2. MODELLO NUMERICO

Le analisi numeriche sono state condotte con il codice ANURA3D, in cui è implementata una formulazione con punto singolo del Metodo del Punto Materiale (Yerro et al., 2014), impiegando il modello assialsimmetrico riportato in Figura 1. La fase di caduta libera non è stata simulata ed il blocco è generato direttamente in contatto con lo strato con velocità iniziale  $V_0 = \sqrt{2gH}$ , dove  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $H$  l'altezza di caduta. Lo strato di terreno è stato assunto di forma cilindrica con dimensione  $b = 3m$ , sufficientemente grande da poter trascurare gli effetti della riflessione dell'onda di compressione generata dall'impatto. Gli spostamenti sui bordi sono stati impediti. È stata impiegata una mesh non strutturata e sono stati considerati 6 punti materiali per elemento inizialmente occupato dal terreno e uno per elemento occupato dal blocco. Il blocco impattante è modellato come corpo rigido (Zambrano-Cruatty e Yerro, 2020) mentre per il terreno è stato impiegato il modello costitutivo multi-

regime di Marveggio et al., 2022, modificato come in di Prisco et al., 2023 (parametri in Tabella 1). La tecnica di calibrazione dei parametri è descritta in di Prisco et al., 2023. I parametri riportati in Tabella 1 sono stati ottenuti simulando il comportamento meccanico del materiale descritto in di Prisco et al., 2022. Un contatto attritivo (Bardenhagen et al., 2001) è stato introdotto tra i 2 corpi (coefficiente d'attrito  $\mu = 0.45$ ). Lo strato di terreno è stato ipotizzato di porosità  $n_0 = 0.35$  costante lungo la profondità. Tale valore è stato scelto a partire dai dati riportati in di Prisco et al., 2022. Lo stato di sforzo è stato inizializzato imponendo un rapporto tra gli sforzi orizzontali e verticali  $k_0 = 0.5$ .

Lo strumento numerico è stato impiegato per simulare la prova sperimentale in grande scala a minore energia d'impatto tra quelle realizzate da Calvetti e di Prisco, 2012. In particolare, è stato simulato l'impatto di un blocco sferico di raggio  $R = 0.45m$ , massa  $m = 850kg$  lasciato cadere da un'altezza di  $H = 4.9m$  ( $V_0 = 9.80m/s$ ).

Tabella 1. Parametri del modello costitutivo impiegati.

$\rho_p$ [ $kg/m^3$ ]	$d_p$ [m]	$E_p$ [MPa]	$\mu_p$ [-]	$\varepsilon_n$ [-]	$e_m$ [-]	$e_{cc}$ [-]	$e_{ce}$ [-]	$\beta$ [-]	$\gamma$ [-]	$\delta_1$ [-]	$\delta_2$ [-]
2650	0.0006	180	0.35	1	1.5	0.755	0.77	0.5	4.3	1	0.8
$\theta_{cc}$ [-]	$\theta_{ec}$ [-]	$\theta_\psi$ [-]	$c_{pc}$ [-]	$c_{p\psi}$ [-]	$B_p$ [-]	$\xi_\psi$ [-]	$a$ [-]	$k$ [-]	$b$ [-]	$\nu$ [-]	
0.166	0.209	0.5	15	10	0.001	2.75	0.148	120	0.33	0.25	

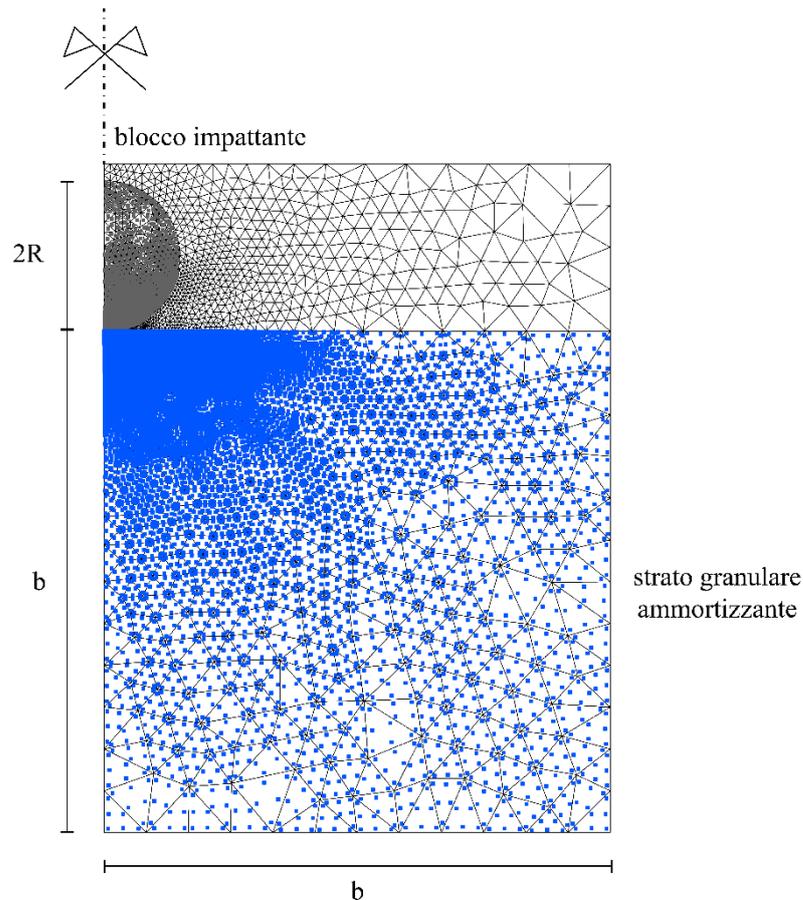


Figura 1. Modello numerico.

### 3. RISULTATI NUMERICI

In Figura 2 sono riportati i dati sperimentali (linea tratteggiata) e la simulazione numerica (linea continua) concernenti l'andamento dell'accelerazione verticale  $a_z$ , della velocità verticale  $v_z$  e dello spostamento verticale  $u_z$  nel tempo  $t$ . Il confronto più che soddisfacente testimonia la capacità del modello numerico di simulare la cinematica del processo d'impatto.

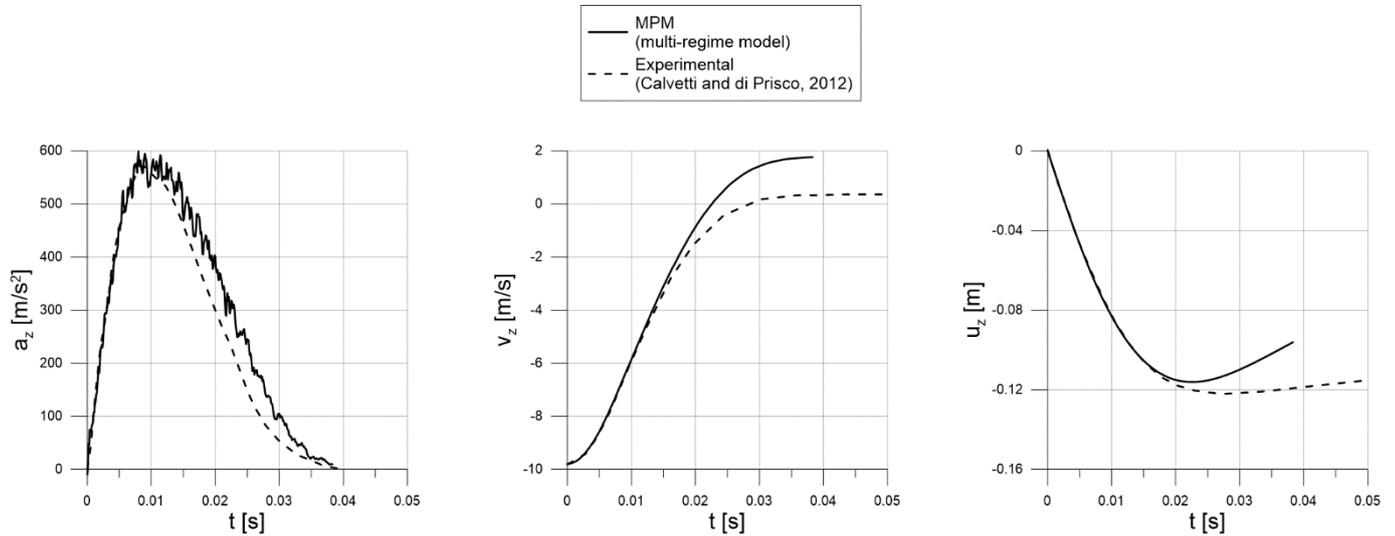


Figura 2. Confronto tra risultati numerici MPM (linea continua) e misura sperimentale (linea tratteggiata) a) dell'accelerazione, b) della velocità e c) dello spostamento verticali del blocco

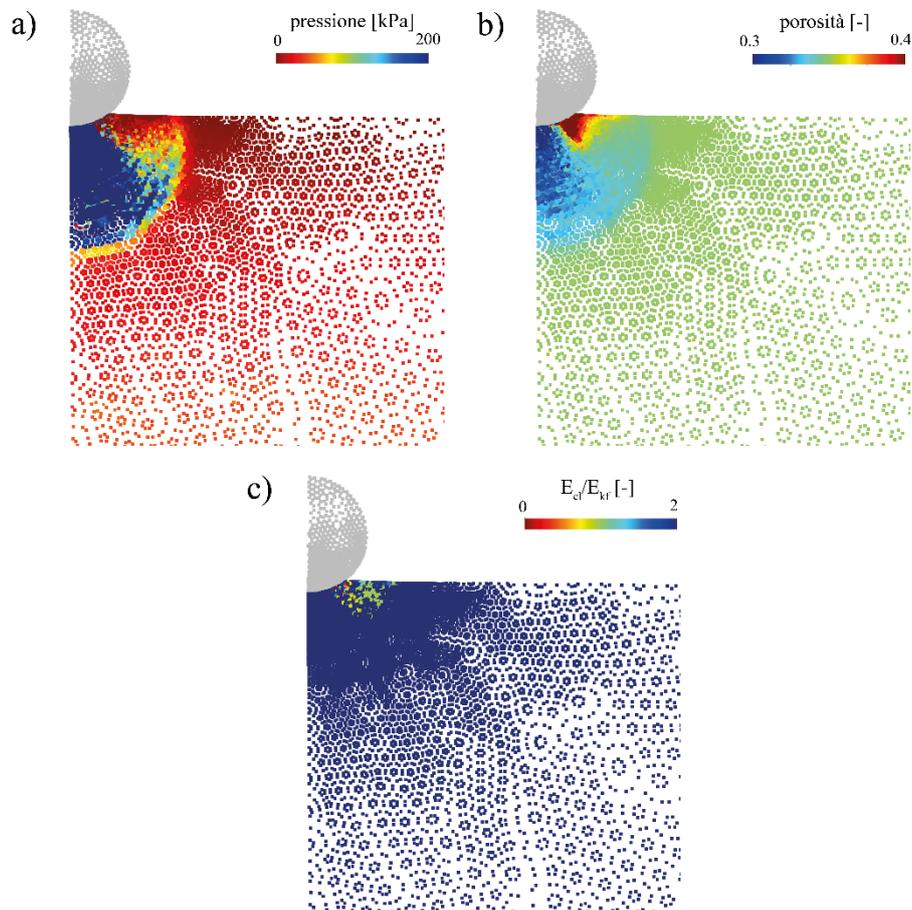


Figura 3. Distribuzione spaziale a) della pressione efficace, b) della porosità e c) del rapporto tra energia elastica totale ed energia cinetica fluttuante a  $t = 0.1$ s

Il modello numerico è in grado di descrivere anche la propagazione spaziale dell'onda di compressione nello strato ammortizzante. In particolare, in Figura 3a per l'istante temporale  $t = 0.1s$ , coincidente con il picco di Figura 2a, è rappresentata la diffusione della pressione. Si noti che essa si diffonde prevalentemente in direzione radiale escludendo le zone laterali all'orma d'impatto. Come evidente in Figura 3b, l'onda di compressione causa una compattazione del materiale sottostante (il fronte dell'onda di compressione definisce una marcata diminuzione della porosità). Lateralmente, al contrario, l'impatto causa un aumento della porosità e una variazione del regime da solido a inerziale (Figura 3c).

Il passaggio da regime solido a inerziale è infatti testimoniato dal rapporto  $E_{el}/E_{kf}$  (ove  $E_{el}$  rappresenta l'energia elastica totale immagazzinata localmente dal materiale, mentre  $E_{kf}$  l'energia cinetica di fluttuazione). Infatti, quando il materiale si trova in regime solido  $E_{el}/E_{kf} \gg 1$ , al contrario quando  $E_{el}/E_{kf} \ll 1$  il materiale si trova in regime fluido, mentre  $E_{el}/E_{kf} \cong 1$  il regime è detto inerziale (Marveggio et al., 2022, di Prisco et al., 2023). Quest'ultimo è caratterizzato da un elevato stato di agitazione per cui la rete di contatti (collisioni o catene di forza) è in continua evoluzione ma caratterizzata da un "tempo di volo" (o "tempo di riarrangiamento" nel caso di catene) minore della durata del contatto.

#### 4. CONCLUSIONI

L'uso di metodi numerici basati sulla meccanica del continuo per lo studio dei problemi d'impatto di blocchi su strati granulari ammortizzanti è stato sino ad oggi alquanto limitato per l'assenza dell'implementazione in codici di calcolo in grandi spostamenti di un modello costitutivo in grado di descrivere il comportamento del materiale quando soggetto a elevate velocità di deformazione. In questa memoria viene mostrato come il codice di calcolo basato sul Metodo del Punto Materiale ANURA3D, all'interno del quale è implementato un modello costitutivo multi-regime, sia in grado di riprodurre la cinematica di una prova d'impatto sperimentale in grande scala, di descrivere la propagazione dell'onda di pressione all'interno del mezzo e di cogliere il cambio di fase subito dal materiale posto a lato dell'orma d'impatto, causato dalla dinamicità del fenomeno. L'ottimo accordo tra risultati numerici e sperimentali indicano che lo strumento numerico impiegato è in grado di riprodurre la complessa interazione dinamica tra blocco e strato e spingono gli autori ad applicarlo a diverse geometrie/energie d'impatto.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Bardenhagen S., Guilkey J., Roessig K., Brackbill J., Witzel W., Foster J. (2001). An improved contact algorithm for the Material Point Method and application to stress propagation in granular material. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*
- Calvetti, F., di Prisco, C. (2012). Rockfall impacts on sheltering tunnels: Real-scale experiments. *Geotechnique*, 62(10), 865–876.
- Di Prisco C, Redaelli I, Zerbi M. (2022). Inclined block impacts on granular strata: DEM-FDM numerical results and rheological modelling. Submitted to *Rock Mech. Rock Eng.*
- Di Prisco C., Marveggio P., Redaelli I., Zerbi M. (2023). How simulating impacts of dry granular flows against rigid barriers by using a MPM approach accounting for material phase transition. Under preparation
- Marveggio P., Redaelli I., di Prisco C. (2022). Phase transition in monodisperse granular materials: How to model it by using a strain hardening visco-elastic-plastic constitutive relationship. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomechanics*.
- Marveggio P., Zerbi M., di Prisco C. (2023) Modelling phase transition in saturated granular materials in MPM. Accepted for CNRIG2023
- Peila, D., Oggeri, C., Castiglia, C., 2007. Ground reinforced embankments for rockfall protection: Design and evaluation of full scale tests. *Landslides*, 4(3), 255–265.
- Shen, W., Zhao, T., Dai, F., 2021. Influence of particle size on the buffering efficiency of soil cushion layer against rockfall impact. *Nat. hazards*, 108(2), 1469-1488.
- Zambrano Cruzatty L., Yerro A., 2020. Numerical simulation of a free fall penetrometer deployment using the material point method. *Soils and Foundations*, 60 (3), 668-682.
- Zhang, L., Lambert, S., Nicot, F., 2017. Discrete dynamic modelling of the mechanical behaviour of a granular soil. *Int. J. Impact Eng.*, 103, 76–89.