

Valutazione numerica della forza d'impatto di masse in frana su pile da ponte

M. Zerbi

Politecnico di Milano

C. di Prisco

Politecnico di Milano

ABSTRACT: L'impatto di masse in frana su pile da ponte è causa frequente di dissesti/collassi inattesi di viadotti stradali e ferroviari. Le frane in terra, specialmente quelle caratterizzate da velocità di spostamento elevate, possono esercitare forze d'impatto considerevoli, che devono essere adeguatamente valutate per definire una strategia progettuale in grado di garantire la stabilità strutturale dell'opera. La forza d'impatto dipende da vari fattori, tra cui la velocità e la densità del terreno, la geometria dell'ostacolo e la geomorfologia locale. In letteratura sono state sviluppate diverse formule per la valutazione della forza d'impatto. Queste formule spesso assumono che l'interazione sia bidimensionale, trascurando gli effetti tridimensionali. In questo lavoro, sono state svolte analisi numeriche tridimensionali dell'impatto di un flusso granulare secco contro un ostacolo rigido di dimensioni finite. È stato utilizzato a tal fine il codice commerciale PFC3D, basato sul Metodo degli Elementi Discreti (DEM), capace di tenere in conto la dinamicità del problema e i grandi spostamenti. I risultati delle analisi numeriche sono analizzati criticamente per (i) evidenziare come la tridimensionalità del problema, nel caso di impatto frana-pila, influisca sulla storia temporale della forza di impatto, e (ii) discutere l'applicabilità delle formule esistenti basate su approcci bidimensionali per la valutazione delle azioni sulla pila.

1 INTRODUZIONE

Il termine "flussi granulari" è utilizzato per indicare frane che si spostano a velocità estremamente elevate, coinvolgendo masse di terreno enormi in cui non sono presenti zone di deformazione localizzata. Nella valutazione della stabilità e della sicurezza di strutture stradali e ferroviarie, l'impatto di flussi granulari su pile da ponte rappresenta un tema di fondamentale importanza (Salciarini et al., (2024)). Queste frane possono infatti generare forze di impatto significative, che variano in funzione di parametri come la velocità, la densità del terreno coinvolto e le caratteristiche geometriche dell'ostacolo (Marveggio et al., (2024)). Una valutazione accurata di queste forze risulta essenziale per la progettazione e per la mitigazione del rischio di collasso delle infrastrutture esposte.

Nonostante la rilevanza di questi impatti, molte delle formule esistenti per stimare la forza d'impatto delle frane sono basate su approcci semplificati bidimensionali (Calveti et al., (2017), Redaelli et al., (2021)). Tali modelli trascurano gli effetti tridimensionali nell'interazione dinamica tra la massa della frana e l'ostacolo, limitando così la precisione delle previsioni e, di conseguenza, la sicurezza strutturale.

In questo lavoro, sono state svolte analisi numeriche tridimensionali dell'impatto di un flusso granulare secco contro un ostacolo rigido di dimensioni finite, utilizzando il codice commerciale PFC3D basato sul Metodo degli Elementi Discreti (DEM). Il DEM è particolarmente adatto per simulare problemi dinamici che coinvolgono grandi spostamenti. Tuttavia, il suo impiego è generalmente circoscritto allo studio di masse granulari secche, salvo che venga integrato con un altro metodo numerico per tenere conto degli effetti legati alla presenza dell'acqua (Leonardi et al., (2014), Li & Zhao, (2018)).

Le analisi numeriche sono state svolte considerando diverse geometrie di impatto al fine di (i) evidenziare come la tridimensionalità del problema, nel caso di impatto frana-pila, influisca sulla storia temporale della forza di impatto, e (ii) discutere l'applicabilità delle formule esistenti basate su approcci bidimensionali per la valutazione delle azioni sulla pila.

2 MODELLI NUMERICI

Analogamente agli studi condotti da Calvetti et al., (2017), Calvetti et al., (2019) e Redaelli et al., (2021), le analisi numeriche sono state svolte andando a generare la massa impattante immediatamente prima dell'ostacolo. Nello specifico, la massa è costituita da particelle sferiche polidisperse (Tabella 1), ed inizializzata con velocità u_o e porosità n_o uniformi. In particolare, la rotazione delle particelle è stata bloccata, al fine di simulare l'ingranamento tra le particelle che si osserva nelle sabbie e ghiaie a causa della non sfericità dei grani (Calvetti, (2008)). L'ostacolo è assunto rigido (non è preso in considerazione il collasso della struttura e tutta l'energia viene dissipata all'interno della massa in frana. Gli ostacoli sono inoltre assunti sufficientemente alti da evitare che la massa impattante possa scavalcarli.

Nel caso di impatti bidimensionali, l'ostacolo è rappresentato da un muro verticale e le condizioni di deformazione piana sono imposte confinando il flusso tra due muri laterali lisci (Figura 1). Lo spessore del canale s (corrispondente nel caso bidimensionale alla larghezza del muro b) è uguale a $10 \cdot D$, per prevenire effetti di bordo e limitare il numero di particelle nel modello. La massa impattante è di forma parallelepipedica, con lunghezza L , altezza h_o e inclinazione del fronte α_o .

Nel caso di impatti tridimensionali invece, l'ostacolo è rappresentato da un parallelepipedo a base quadrata (di lato $b = 10 \cdot D$). Per la simmetria del problema, è stato possibile simulare solo una larghezza della massa impattante coincidente con la spaziatura tra le pile s (Figura 2), a condizione di confinare il flusso tra due muri laterali lisci. In questo modo, l'espansione laterale del flusso viene cautelativamente trascurata. La massa impattante è assunta, anche in questo caso, di forma parallelepipedica, con lunghezza L , altezza h_o e inclinazione del fronte α_o .

In questa memoria, al fine di porre in evidenza unicamente l'influenza della geometria della massa impattante sull'evoluzione temporale della forza d'impatto, si è deciso di illustrare i risultati numerici relativi al caso $n_o = 0.45$, $u_o = 8 \text{ m/s}$ e $h_o = 3 \text{ m}$ (numero di Froude $Fr_o = u_o/\sqrt{gh_o} = 1.47$ dove $g = 9.81 \text{ m/s}^2$) e $\alpha_o = 60^\circ$, mentre sono state variate la larghezza s e la lunghezza L .

Tabella 1. Proprietà delle particelle

Diametro medio D	0.2m
Rapporto diametro massimo e minimo D_{max}/D_{min}	2.4
Densità delle particelle ρ	2600 kg/m
Rigidezza normale del contatto k_n/D	300 MPa
Rigidezza tangenziale del contatto k_s/D	75 MPa
Coefficiente di attrito interparticellare μ	0.3

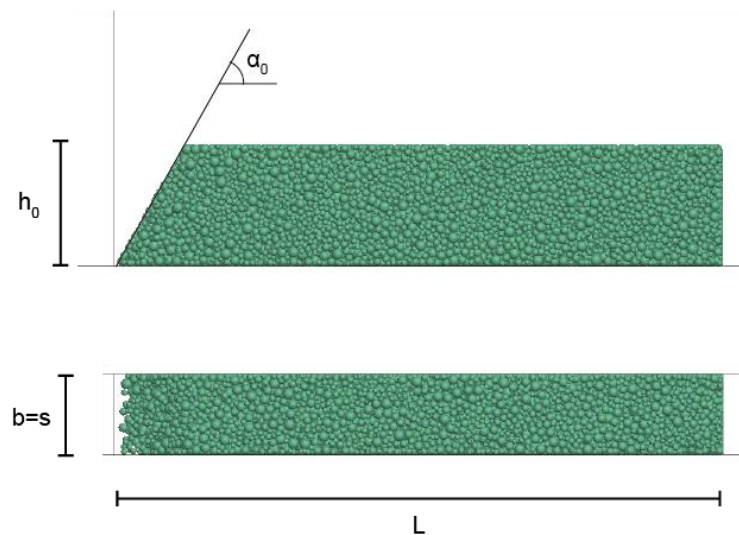


Figura 1 Configurazione di impatto bidimensionale ($s/b=1$ e $L=15m$) a) vista laterale b) vista dall'alto

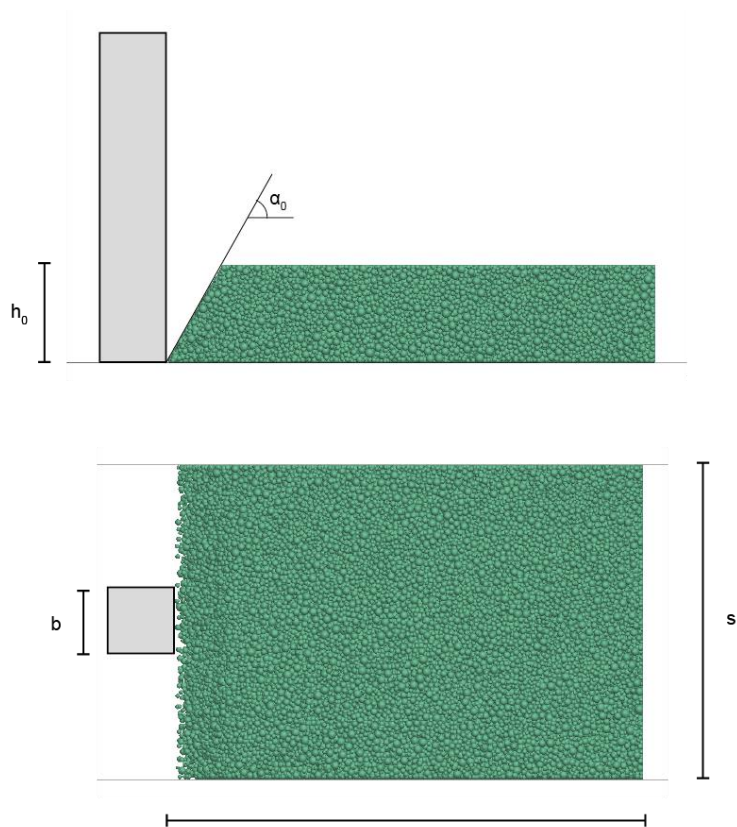


Figura 2 Configurazione di impatto tridimensionale ($s/b=5$ e $L=15m$) a) vista laterale b) vista dall'alto

3 RISULTATI NUMERICI

In questa sezione, sono riportati i risultati numerici ottenuti considerando diverse larghezze s e diverse lunghezze L della massa impattante al fine di evidenziare l'influenza della tridimensionalità del problema sull'andamento temporale di F .

Nel caso di impatti bidimensionali ($s/b = 1$), tutta la massa impattante è trattenuta dall'ostacolo. Al contrario, per configurazioni con $s/b > 1$, parte della massa in frana riesce a superarlo (Figura 3). La quantità di massa che supera l'ostacolo, rispetto alla massa in frana, dipende fortemente dalla geometria del problema (Figura 4): all'aumentare del rapporto s/b , la massa passante cresce rispetto alla massa impattante, grazie all'energia dissipata nell'impatto con l'ostacolo. Al contrario, tale rapporto diminuisce significativamente con l'aumento della lunghezza L .

Questa dipendenza si ritrova anche nell'evoluzione temporale della forza d'impatto F .

Nel caso di configurazione di impatto bidimensionale (Figura 5a), l'evoluzione temporale della forza d'impatto F risulta infatti poco influenzata dalla lunghezza della massa in frana L . In particolare, il valore di picco della forza è praticamente indipendente da L . Tuttavia, come osservato da Redaelli et al., (2021), per $L/H < 20$ la forza residua sul muro cresce con L , grazie all'aumento dello spessore dell'accumulo di materiale a monte dell'ostacolo.

Nel caso di geometrie tridimensionali si osserva che il valore della forza d'impatto F è praticamente dovuto unicamente alla pressione esercitata dalla massa impattante sulla faccia anteriore della pila, mentre risulta trascurabile la pressione sulle facce laterali e sulla faccia posteriore. Nei casi $s/b > 1$ (tridimensionali), le oscillazioni dovute alla discretizzazione numerica risultano più significative rispetto al caso bidimensionale ($s/b = 1$).

Dal confronto tra le Figure 5a e 5b, si osserva che il valore della forza di picco è scarsamente influenzato dal rapporto s/b per cui il valore della forza di picco valutato nel caso 2d può essere assunto come rappresentativo anche per il caso 3d.

L'evoluzione temporale di F risulta invece significativamente influenzata dal rapporto s/b . In particolare, si osserva che, al crescere di s/b , dopo il valore di picco, la forza d'impatto F tende ad essere maggiore nei casi tridimensionali rispetto al caso bidimensionale (Figura 5). Per valori di L sufficientemente elevati, si evidenzia un plateau assente nel caso $s/b=1$.

L'evoluzione temporale post primo picco dei casi 3d per valori di L crescenti si differenzia sempre più rispetto al caso 2d. L'evoluzione temporale sembra quindi caratterizzata da 3 fasi: (i) impatto dinamico sull'ostacolo, (ii) scorrimento viscoso e (iii) arresto della massa interagente con l'ostacolo (Figura 6).

Si osserva inoltre che la spinta residua sul muro diminuisce all'aumentare di s/b . Infatti, al crescere di s/b , l'altezza residua in fase di deposizione h_{res} (Figura 3) diminuisce.

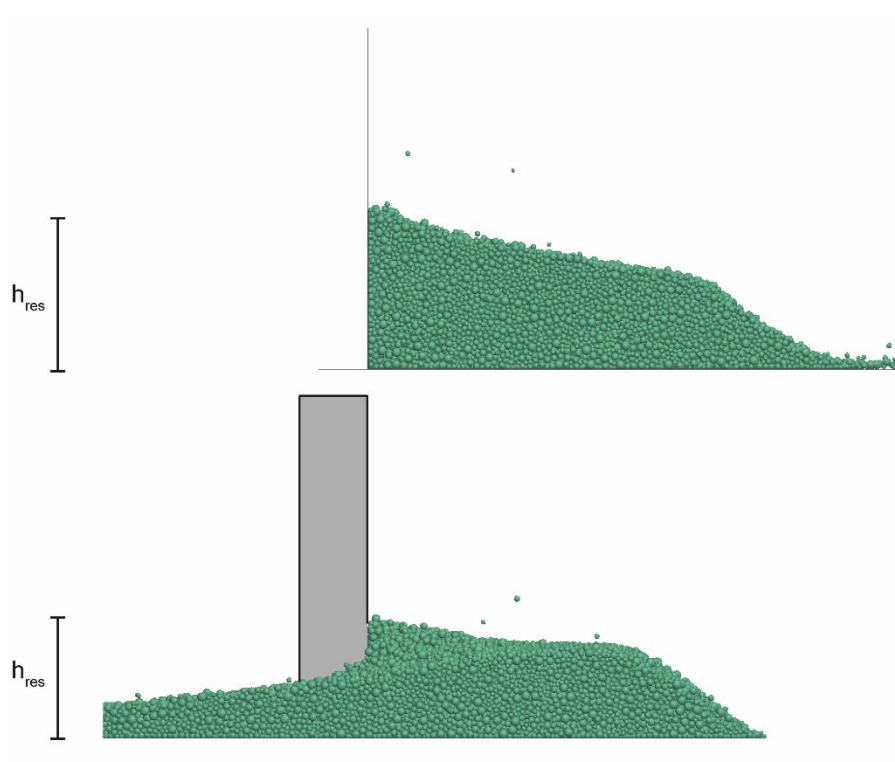


Figura 3 Profili in fase di deposizione a) impatto bidimensionale ($s/b=1$ e $L=15m$) e b) impatto tridimensionale ($s/b=5$ e $L=15m$)

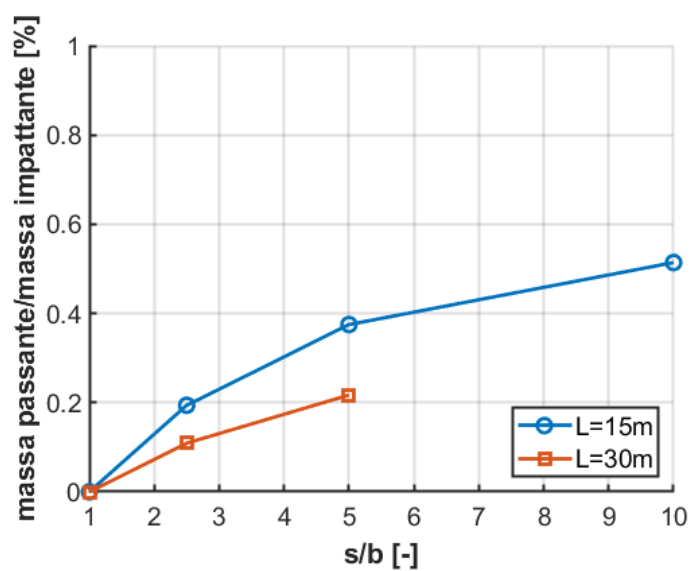
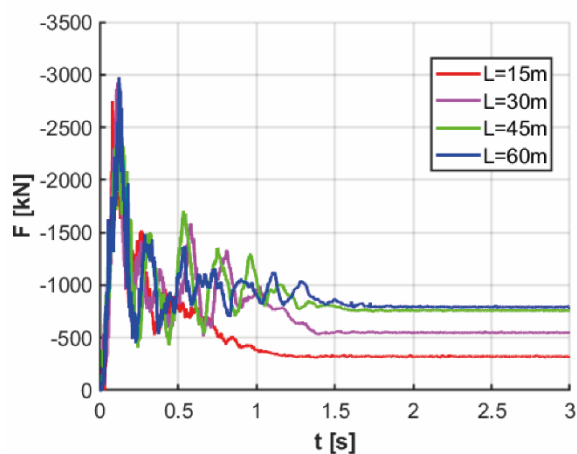


Figura 4 Rapporto tra massa passante e massa impattante in funzione della geometria del corpo di frana: influenza di s/b e L

a) $s/b=1$



b) $s/b=5$

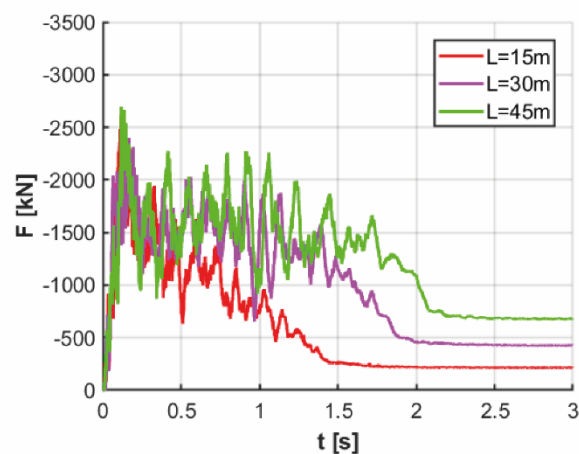
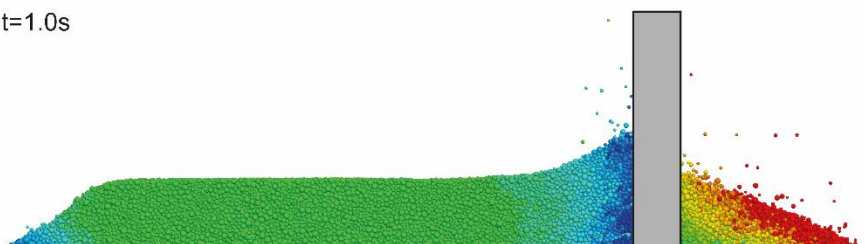


Figura 5 Forza d'impatto sull'ostacolo al variare della lunghezza della massa impattante L a) $s/b=1$ e b) $s/b=5$

a) $t=0.3s$



b) $t=1.0s$



c) $t=2.0s$

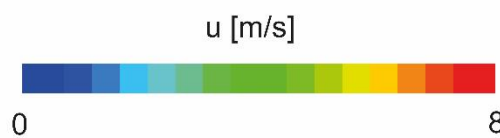
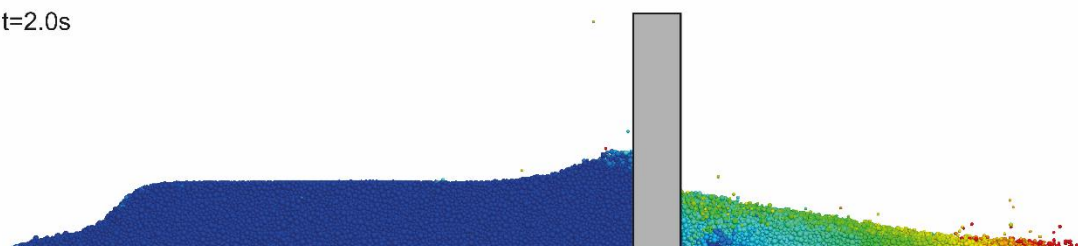


Figura 6 Distribuzione spaziale della velocità delle particelle a diversi istanti temporali nella sezione verticale in corrispondenza della mezzzeria del muro a) $t=0.3s$, b) $t=1.0s$ e c) $t=2.0s$ per il caso $s/b=5$ $L=30m$

4 CONCLUSIONI

Per la valutazione delle forze di impatto di flussi granulari su pile da ponte in letteratura sono disponibili solamente formule che assumono che l'interazione frana-ostacolo sia bidimensionale, trascurando gli effetti tridimensionali.

In questa nota sono riportati i risultati relativi ad analisi numeriche di impatti di flussi secchi su ostacoli rigidi, svolte con il Metodo degli Elementi Discreti (DEM). Le analisi sono state svolte andando a considerare geometrie di impatto sia bidimensionali che tridimensionali per mettere in luce come la tridimensionalità del problema influenzi l'evoluzione temporale della forza d'impatto.

I risultati numerici hanno messo in luce che la forza di picco risulta scarsamente influenzata dalla tridimensionalità del problema. Per lunghezze della massa impattante sufficientemente elevate, l'evoluzione temporale della forza F è fortemente influenzata dal rapporto s/b in quanto si evidenziano 3 fasi distinte (assenti nel caso di ostacolo bidimensionale): quella di impatto dinamico, quella di scorrimento viscoso e quella di deposizione/arresto.

BIBLIOGRAFIA

Calvetti F. 2008 Discrete modelling of granular materials and geotechnical problems. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 12 (7-8), 951-965

Calvetti F., di Prisco C., Vairaktaris E. 2017. DEM assessment of impact forces of dry granular masses on rigid barriers. *Acta Geotechnica* 12(1):129-144.

Calvetti F., di Prisco C., Redaelli I., Sganzerla A., Vairaktaris E. 2019. Mechanical interpretation of dry granular masses impacting on rigid obstacles. *Acta Geotechnica*. 14(5):1289-1305.

Leonardi, A., Wittel, F.K., Mendoza, M., Herrmann, H.J. 2014. Coupled DEM-LBM method for the free-surface simulation of heterogeneous suspensions. *Computational Particle Mechanics* 1 (1), 3–13.

Li, X., Zhao, J. A unified CFD-DEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 42, (14): 1565-1761

Marveglio, P., Zerbi M., Redaelli I., & di Prisco C. 2024. Granular material regime transitions during high energy impacts of dry flowing masses: MPM simulations with a multi-regime constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 48(15):3699-3724.

Redaelli I., di Prisco C., Calvetti F. 2021. Dry granular masses impacting on rigid obstacles: numerical analysis and theoretical modelling. *Acta Geotechnica*. 16(12):3923-3946.

Salciarini A., Cernuto E., Capati G., Dezi F., Brezzi L., Gibin F., Gabrieli F., Stacul S., Doglioni A., Lupattelli A., Squeglia N., Simeone V., Simonini P. 2024. Landslide-bridge interaction: Insights from an extensive database of Italian case studies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 114, 104983.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato da Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) Partenariato Esteso RETURN “Multi-Risk sciEnce for resilientT commUnities under a changiNg climate”.

ABSTRACT

EVALUATION OF IMPACT FORCES FROM FAST FLOW-LIKE LANDSLIDES IN DRY MATERIAL ON BRIDGE PIERS

Keywords: DEM, impact, landslide-bridge interaction, granular flows

The impact of landslides on bridge piers is a frequent cause of unexpected failures or collapses of road and railway viaducts. Landslides, particularly those characterized by high velocities, can exert considerable impact forces that must be adequately assessed to define a design strategy capable of ensuring the structural stability of the structure. The impact force depends on various factors, including the velocity and density of the soil, the geometry of the obstacle, and the local geomorphology.

In the literature, several formulas have been developed to estimate the impact force. These formulas often assume that the interaction is two-dimensional, neglecting three-dimensional effects. In this work, three-dimensional numerical analyses of the impact of a dry granular flow against a rigid obstacle of finite dimensions were conducted. For this purpose, the commercial PFC3D code, based on the Discrete Element Method (DEM), was used, allowing consideration of the problem's dynamic nature and large displacements.

The results of the numerical analyses are critically analyzed to (i) highlight how the three-dimensionality of the problem, in the case of landslide-pier impact, affects the time history of the impact force and (ii) discuss the applicability of existing formulas based on two-dimensional approaches for evaluating the forces acting on the pier.