

Análise Numérica da Influência das Propriedades Mecânicas do Terreno e da Geometria do Bloco em Eventos de Queda de Rocha

Luan Pascoal dos Santos

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, pascoal.luan@gmail.com

Fabrizio Fernández

Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, fabricio.fernandez@ucn.cl

Eurípedes Amaral Vargas Júnior

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, eavargasjr@gmail.com

Felipe Gobbi

Geobrug AG, Porto Alegre, Brasil, felipe.gobbi@geobrug.com

RESUMO: O estudo apresenta os resultados de uma análise numérica sobre a influência das propriedades mecânicas do terreno e da geometria de blocos em eventos de queda de blocos de rochas, com ênfase no alcance e na dissipação de energia cinética durante a trajetória dos blocos. As simulações numéricas foram realizadas usando o Método do Ponto Material (MPM) para considerar grandes deformações durante o impacto dos blocos em problemas bidimensionais e tridimensionais. Os resultados das simulações revelaram que quando o bloco atinge a superfície, o talude rompe localmente conforme as propriedades de resistência do solo. Tanto a forma do bloco quanto a resistência do material do talude influenciam diretamente na determinação se, após o impacto, o bloco mantém energia suficiente para superar a rampa formada pela cicatriz de ruptura e continuar sua queda. Além disso, observou-se que diferentes orientações iniciais de queda, especialmente em blocos alongados e lascas, afetam a dissipação de energia e, por conseguinte, o alcance dos blocos.

PALAVRAS-CHAVE: Método do Ponto Material, Queda de Rochas.

ABSTRACT: The study presents the results of a numerical analysis on the influence of the mechanical properties of the terrain and the geometry of blocks on rockfalls events, with emphasis on the range and dissipation of kinetic energy during the trajectory of blocks. Numerical simulations were performed using the Material Point Method (MPM) to consider large deformations during block impact in two- and three-dimensional problems. The simulation results revealed that when the block reached the surface, the slope failed locally according to the soil resistance properties. Both the shape of the block and the resistance of the slope material directly influence the determination of whether, after the impact, the block maintains enough energy to overcome the ramp formed by rupture healing and continue its fall. Furthermore, it has been observed that different initial drop orientations, especially on elongated and chipped blocks, affect energy dissipation and therefore the reach of the blocks.

KEYWORDS: Material Point Method; Rockfall.

1 INTRODUÇÃO

Eventos de queda de blocos de rocha são movimentos caracterizados por grandes deformações e deslocamentos durante a evolução do processo. A dinâmica de queda de rochas é, especialmente, a quantificação da dissipação de energia durante a complexa interação rocha-solo, ainda pouco conhecida. A simulação da provável trajetória de queda ajuda a descrever o movimento que esses blocos irão desenvolver durante o processo e determinar seu alcance. Para tal, é necessário o conhecimento da encosta, dos materiais que a compõem e da sua geometria. O entendimento da dependência do formato dos blocos está bem

estabelecido, mas atualmente, existe pouca base experimental sobre como o risco de queda de rochas aumenta com a massa, tamanho e formato da rocha (Caviezel *et al*, 2021).

O fenômeno de queda de rochas envolve uma variedade de movimentos, como queda-livre, saltos, rolamento e deslizamento, que possuem diferentes condições de disparo e são determinados pelo estado cinemático da rocha em queda e pela interação entre rocha e terreno. Portanto, uma moderna abordagem de previsão de trajetória de queda de rochas deve estar dentro de uma estrutura tridimensional, considerando formas arbitrárias de blocos, a interação de contato entre rocha e terreno e os quatro movimentos de queda mencionados anteriormente, bem como a transição entre eles (Yan *et al*, 2020). Além do fato de que as propriedades do material do terreno e as condições de impacto serem incertas e variáveis, a modelagem de queda de blocos também deve considerar a variabilidade na geometria dos blocos, associada à diversidade geológica das regiões de queda de rocha.

O Método do Ponto Material (MPM), que vem sendo desenvolvido para simular problemas de grandes deformações, desponta como um grande aliado no estudo e entendimento de processos de queda de rocha e de seus efeitos. No MPM o corpo contínuo é representado por um conjunto de pontos Lagrangeanos, chamados pontos materiais esses pontos se movem através de uma malha computacional Euleriana e armazenam em si as propriedades físicas do contínuo (Llano-Serna, 2012). Uma das grandes vantagens do MPM é o fato do método ser capaz de simular problemas de grandes deformações sem a inconveniente distorção da malha (Fernández, 2020). O presente trabalho aborda a partir do Método do Ponto Material como as propriedades mecânicas do terreno e as propriedades geométricas da rocha podem influenciar no alcance e na dissipação de energia em eventos de queda de rocha.

2 MÉTODO DO PONTO MATERIAL (MPM) -

No modelo MPM, o domínio geomecânico é discretizado em subdomínios representados por pontos materiais que armazenam e transportam as propriedades de interesse do meio. Esses pontos materiais fornecem uma descrição Lagrangeana do corpo contínuo (Nguyen, 2014). Tais pontos se movimentam livremente em uma malha computacional Euleriana fixa que cobre todo o domínio do problema, bem como a região onde se espera que o corpo se mova. As equações de movimento são resolvidas na malha fixa. A Figura 1 apresenta uma ilustração gráfica da discretização do MPM, onde as linhas pontilhadas denotam os domínios físicos de cada partícula.

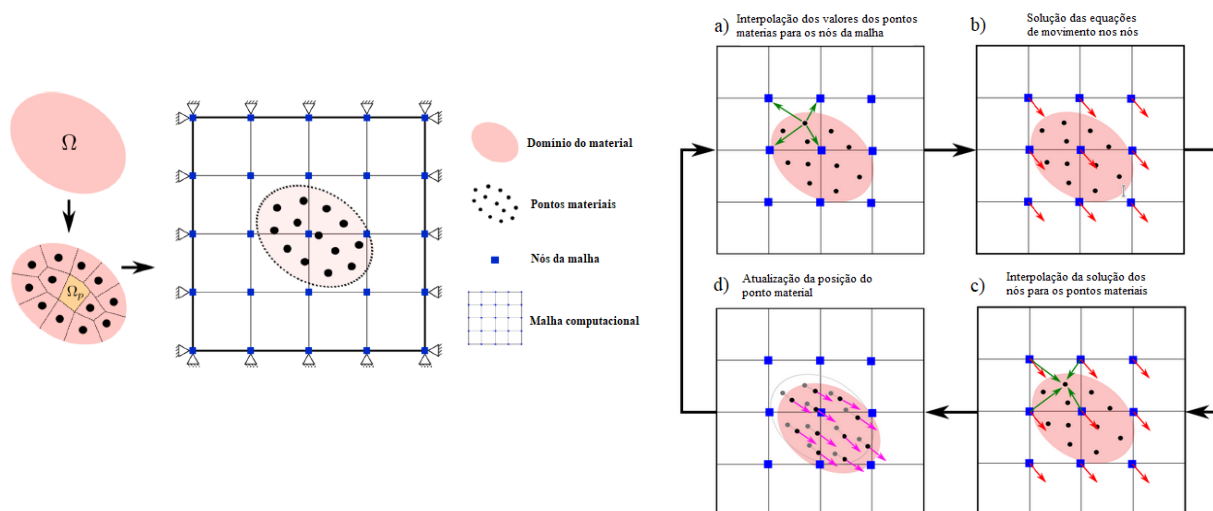


Figura 1. Discretização e ciclo computacional do MPM (Fernández, *et al* 2021).

Na Figura 1 também é representado o ciclo computacional do método do ponto material. As informações inicialmente armazenadas nas partículas são interpoladas para os nós da malha Euleriana (a). Uma vez que se tenha todas as informações nos nós da malha computacional, onde são impostas as condições de contorno, resolve-se as equações de movimento (b). Obtendo-se a solução nos nós da malha, essas informações são novamente interpoladas para os pontos materiais (c) e as partículas movimentam-se atualizando suas posições (d). As variáveis armazenadas na malha não são requeridas no passo seguinte da análise, sendo, portanto,

descartadas e as variáveis da malha são reiniciadas para a configuração original, o que torna o método livre de distorções (Fernández, 2020; Zabala e Alonso, 2011; Rojas, 2019). As simulações apresentadas neste estudo foram realizadas utilizando-se o simulador MPM-PUCRio (Fernández, 2020).

3 SIMULAÇÕES BIDIMENSIONAIS

Para as simulações bidimensionais foi estabelecido um modelo plano de talude elastoplástico homogêneo. A Figura 2 mostra a geometria do modelo. O material do talude foi definido como sendo do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. O ângulo de inclinação do talude é de $\theta = 30^\circ$. Os blocos caem de uma posição $u_{x0} = 5\text{m}$ e $u_{z0} = 8\text{m}$, com velocidade inicial de $v_i = -20\text{m/s}$. Esta velocidade elevada representa um bloco impactando o terreno após uma queda livre de aproximadamente 20m, o que são casos comuns de quedas de rochas em encostas íngremes que impactam os taludes de solo no sopé das encostas.

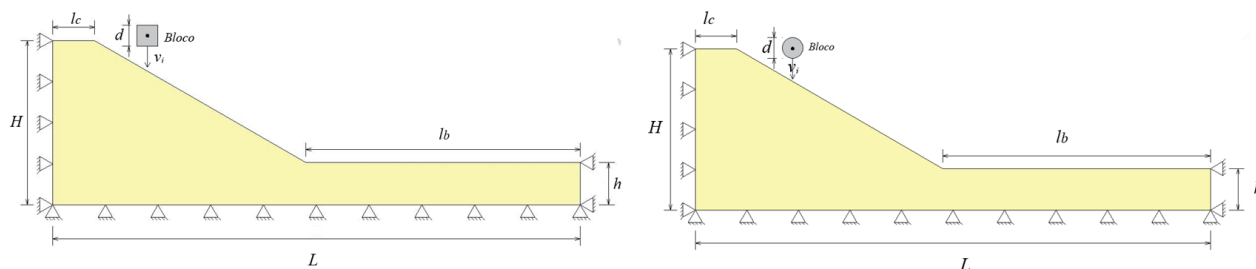


Figura 2. Geometria do modelo bidimensional

O modelo utiliza um algoritmo de contato para que a interação entre os corpos ocorra sem que haja a interpenetração dos materiais permitindo o rolamento e o deslizamento com fricção. Ao atingir o talude, a condição de contato entre o bloco e a superfície do talude permite a dissipação de energia cinética a partir de deformações plásticas e por atrito no solo.

Na Tabela 1, estão apresentados os parâmetros do material do talude e da rocha, a geometria do modelo e a dimensão da malha Euleriana. O baixo valor de Módulo de Young utilizado para a rocha foi um artifício numérico para reduzir o tempo de simulação com o MPM.

Tabela 1. Parâmetros gerais do modelo

		Parâmetros do solo			
Altura do talude	H	7.8m	Módulo de Young	E	20 MPa
Altura da base do talude	h	2m	Coefficiente de Poisson	ν	0.3
Comprimento horizontal	L	25m	Massa específica	ρ	1800 kg/m ³
Comprimento da base	lb	13m	Parâmetros da Rocha		
Comprimento da crista	lc	2m	Dimensão do bloco	D	1 m
Malha Euleriana	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	0.25m	Módulo de Young	E	1000 MPa
Inclinação do talude	θ	30°	Coefficiente de Poisson	ν	0,2
Gravidade	g	9.81 m/s ²	Massa	m	675kg
Velocidade inicial	v_i	-20m/s			

Para as simulações foram utilizados os parâmetros elásticos do solo e da rocha apresentados na Tabela 1. Considerou-se diferentes tipos de solo para cada uma das simulações, de acordo com os casos apresentados na Tabela 2 Os blocos de geometria circular e quadrada impactam o talude verticalmente com a mesma velocidade. A Figura 3 apresenta a comparação entre as deformações plásticas e o alcance horizontal para cada uma das geometrias.

Tabela 2. Parâmetros de Mohr-Coulomb do terreno nas análises 2D

Parâmetros de Mohr-Coulomb	Casos						
	A	B	C	D	E	F	G
Coesão	1kPa	5kPa	5kPa	20kPa	20kPa	50kPa	50kPa
Ângulo de Atrito	30°	25°	35°	25°	35°	20°	30°

Na configuração final dos casos apresentados na Figura 3, o sistema bloco + talude se encontra em equilíbrio. Como visto no item 2, as partículas representam um domínio e não exatamente o limite do corpo. As distâncias observadas entre o bloco e a superfície e as posições aparentemente instáveis são relacionadas ao método de contato do MPM. Ma *et al.* (2010) propõem uma correção para essa condição, calculando a distância real entre dois corpos. Esse método não foi considerado neste trabalho por uma questão de eficiência e por não influenciar significativamente nos resultados.

O talude rompe localmente de acordo com as propriedades de resistência do solo, sendo possível identificar uma zona de plastificação na região do impacto. Durante o impacto, o bloco perde energia em função dos parâmetros do talude. Quanto maior a zona rompida, menor é o alcance do bloco uma vez que menor é a energia disponível para o bloco se movimentar. Para um material pouco coesivo, como o material do caso A ($c=1\text{kPa}$; $\phi=30^\circ$), o impacto do bloco causa uma maior zona de ruptura em comparação com as demais, e as deformações plásticas se estendem por quase toda a extensão do talude, dissipando a maior parte da energia disponível para o movimento. Após o impacto, ocorre um deslizamento no material do talude, arrastando o bloco.

Comparando-se os resultados obtidos para os blocos de seção quadrada nos casos B ($c=5\text{kPa}$; $\phi=25^\circ$) e D ($c=20\text{kPa}$; $\phi=25^\circ$) verifica-se que, no caso D, o impacto causa uma cicatriz na superfície e a dissipação é tal que o bloco não dispõe de energia suficiente para transpor o material que se depositou à jusante da cicatriz. Para materiais mais coesivos, logo, mais resistentes, como o do caso B, após o impacto, as cicatrizes são menos profundas e os blocos ainda possuem energia cinética para rolar ao longo do talude, ocasionando pequenas zonas de plastificação nos locais de contato do bloco com o solo, ao passo que a energia cinética do bloco se dissipa pelo atrito entre o bloco, em rolamento, e a superfície. Ao analisar os casos C ($c=5\text{kPa}$; $\phi=35^\circ$) e E ($c=20\text{kPa}$; $\phi=35^\circ$), em relação à sensibilidade à variação da coesão, constata-se uma dissipação de energia mais efetiva no caso C, tanto para os blocos de seção quadrada quanto para as circulares, o que implica em um menor alcance horizontal do bloco.

Para a verificação da influência do ângulo de atrito no alcance e na dissipação de energia do bloco, foram comparados os casos nos quais materiais com a mesma coesão apresentam diferentes ângulos de atrito. Para solos de menor valor de coesão, como o caso B e C ($c=5\text{kPa}$), a influência do ângulo de atrito se nota no grau de penetração do bloco extensão da zona plastificada. No caso B, o bloco desliza na superfície acumulando o material rompido na extremidade da cicatriz sem ter, entretanto, energia suficiente para romper ou transpor a pequena barreira formada. Já no caso C ($\phi=35^\circ$), o bloco possui energia suficiente para romper a barreira de material acumulado e rolar sobre o talude.

Materiais com maior valor de ângulo de atrito irão apresentar menor grau de penetração do bloco na superfície. Em solos onde a parcela de resistência é dada em sua maior parte pela coesão, como nos casos F ($c=50\text{kPa}$; $\phi=20^\circ$) e G ($c=50\text{kPa}$; $\phi=30^\circ$), o ângulo de atrito pouco influencia na cicatriz de impacto do bloco, possuindo maior influência no movimento do bloco que rola pela superfície do talude causando pequenas deformações plásticas nos pontos de contato. Claro que este resultado é dependente da massa do bloco e da velocidade de impacto, pois os valores de coesão limite para influenciar no processo irão variar de acordo com a solicitação imposta (massa e velocidade).

Quando comparada a influência do formato do bloco para cada caso, os blocos de geometria circular, em geral, alcançam maiores distâncias que os blocos de geometria quadrada. Contudo, chama atenção o caso D ($c=20\text{kPa}$; $\phi=25^\circ$), no qual o bloco circular, ao atingir o talude, penetra o solo alcançando o equilíbrio. O impacto do bloco com o solo gera deformações plásticas na superfície do talude, deixando cicatrizes de dimensões variadas dependendo da energia de colisão e, também, como sugerem os experimentos numéricos até então apresentados, do formato do bloco. Mesmo com a mesma energia de colisão do bloco quadrado, o bloco circular penetra mais no solo, gerando uma maior zona de plastificação e dissipando mais energia, de modo que não consegue transpor a rampa de sobressalto.

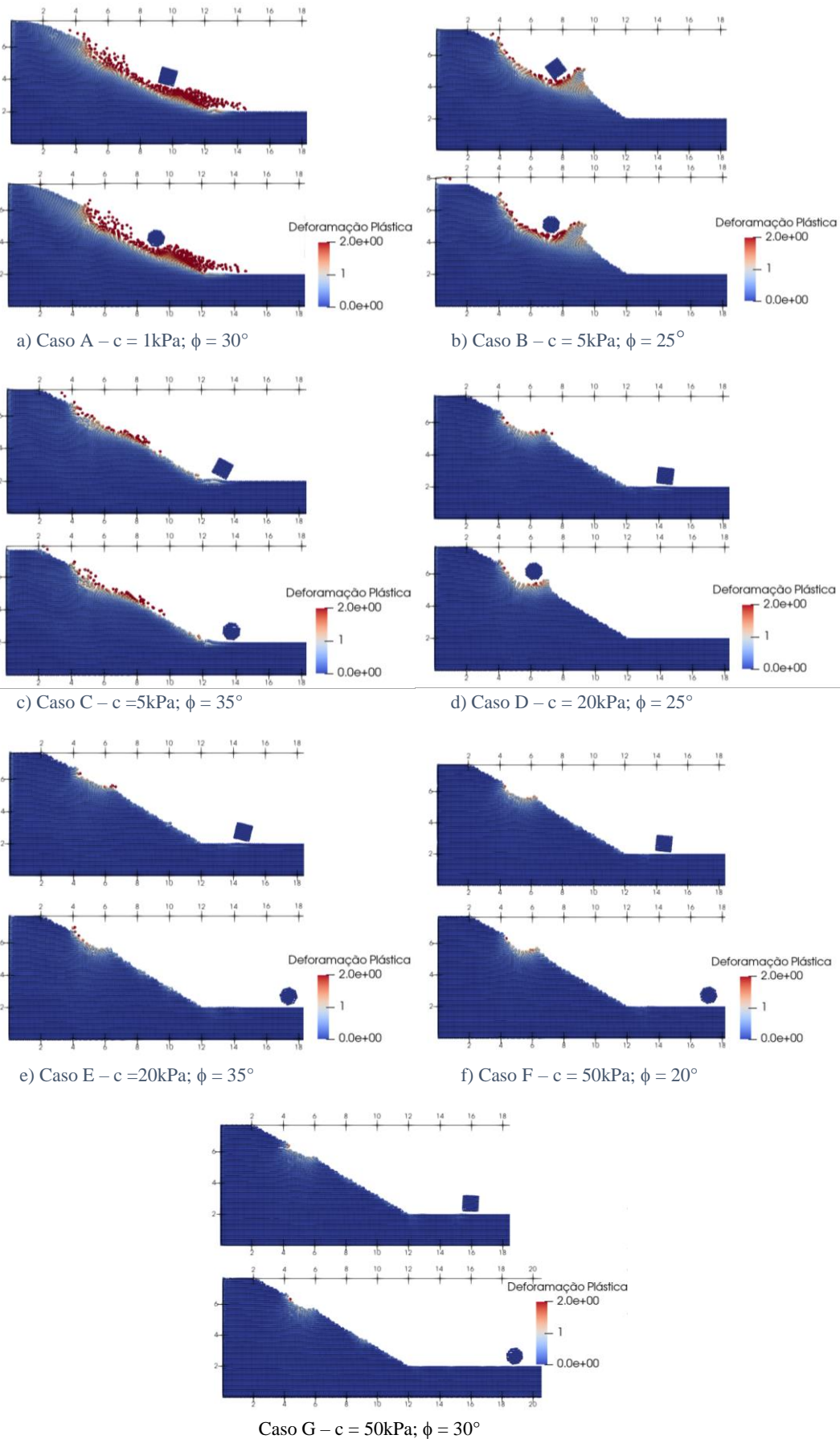


Figura 3. Deformações plásticas para blocos de geometria circular e quadrada

4 SIMULAÇÕES TRIDIMENSIONAIS

Nesta seção, serão apresentadas simulações com blocos reais, de diferentes formatos, todos com o mesmo volume ($0,6\text{m}^3$) e mesma massa específica (2700 kg/m^3), com velocidade inicial $v_i = -10\text{ m/s}$, impactando o talude em diferentes orientações. Para o talude foi mantida a mesma geometria, porém considerando-se profundidade no modelo apresentado na Figura 2. As dimensões da malha Euleriana são as mesmas apresentadas na Tabela 1. Foram definidos terrenos com parâmetros de solo residual de gnaiss e filito alterado. Os parâmetros do terreno estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de Mohr-Coulomb do terreno nas análises 3D

Material	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	Referência
Solo residual de gnaiss	1800	70	0,3	53	26,8	ABEF, 1989
Filito alterado	2000 ¹	1000 ¹	0,25 ¹	159 ²	33,7 ²	Lopes et al, 2007 ¹ ; Guerra, 2011 ²

A geometria dos blocos foi definida a partir dos vértices de rochas reais da biblioteca de blocos do software RAMMS::Rockfall (Leine *et al*, 2014). O RAMMS::Rockfall divide esses blocos irregulares em três categorias: *equant*, *flat* e *long*. Segundo Glover (2015), maciços com juntas primárias quase que igualmente espaçadas e ortogonais entre si geram blocos de formato *equant*, aproximadamente cúbico. Maciços dobrados e bem estratificados formam placas que se destacam em formatos do tipo *platy* (ou *flat*). Maciços com juntas colunares, produzem blocos alongados (*elongate* ou *long*). A partir da nuvem de pontos do RAMMS::Rockfall, gerou-se uma malha de elementos finitos para cada uma das geometrias citadas. O arquivo de malha foi carregado no simulador MPM-PUCRio e as partículas distribuídas uniformemente no centro de cada tetraedro da malha, conforme apresentado na Figura 4. Nas simulações com o MPM, para alterar a orientação de lançamento dos blocos, as coordenadas dos pontos foram permutadas entre si de modo que os blocos fossem rotacionados em relação aos seus eixos originais, definindo-se as orientações *zx*, *zy* e *zz*. Dessa forma, é possível avaliar a influência da posição de impacto na trajetória dos blocos.

A Tabela 4 apresenta a distância percorrida pelos blocos em função da orientação de queda e do material do talude. Para descrever melhor como o MPM avalia a influência da orientação de saída e dissipação de energia, é necessário analisar as curvas de energia cinética para cada bloco, considerando as três diferentes orientações utilizadas neste estudo. Os gráficos da Figuras 5 apresentam como uma simples mudança na orientação de saída dos blocos pode interferir na variação da energia cinética durante o processo de queda.

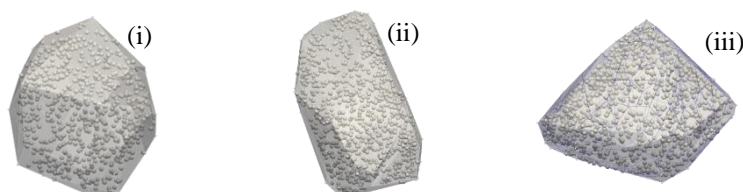


Figura 4. Geometria dos blocos: (i) *equant*, (ii) *long* e (iii) *flat*

Tabela 4. Distância percorrida – em metros – pelos blocos

Bloco	Solo residual de gnaiss			Filito alterado		
	<i>zx</i>	<i>zy</i>	<i>zz</i>	<i>zx</i>	<i>zy</i>	<i>zz</i>
<i>Equant</i>	28,3	25,8	22,5	25,3	18,7	21,6
<i>Long</i>	17,1	9,5	15,5	21,7	18,8	19,9
<i>Flat</i>	18,4	22,4	12,6	23,0	24,7	19,7

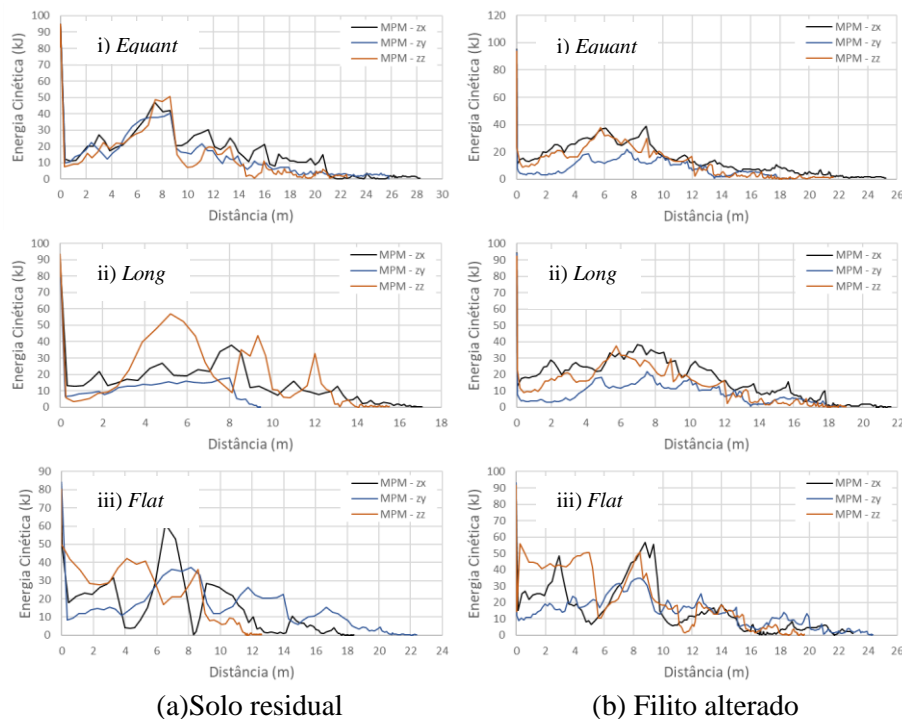


Figura 5. Distância percorrida e variação da energia cinética para os blocos *equant*, *long* e *flat*

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, é possível verificar as alterações geradas na trajetória, de acordo com a orientação de liberação do bloco. Os blocos *flat* e *long* apresentam maiores dispersões nos valores de distância percorrida durante a queda, enquanto a dispersão para o bloco *equant* é menor para o solo residual. Esta baixa dispersão para blocos *equant* era esperada, uma vez que esse formato se aproxima de uma geometria regular. Curiosamente, esse comportamento não é verificado no filito alterado, onde trajetórias para o bloco *equant* apresentam uma maior variação no alcance que as demais geometrias. Esse comportamento inesperado pode ser explicado pelo fato de que, por se tratar de uma superfície mais rígida, ao impactar o solo, as rugosidades da superfície do bloco as fazem saltar em diferentes direções.

A mudança na orientação de saída do bloco não apresenta diferenças muito significativas para os blocos *equant*. Entretanto, em blocos com formato *flat* e *long* pode representar uma variação de energia, em um mesmo trecho, até 5 vezes maior, conforme o verificado para em blocos *flat*, para o filito alterado, nos primeiros metros percorridos. A mudança na orientação também implica no movimento desenvolvido pela rocha durante a trajetória de queda, o que influencia fortemente como se dá a dissipação de energia e, conseqüentemente, o alcance do bloco. Esse comportamento pode ser visto no exemplo do bloco com formato tipo *long*, quando comparados os resultados das orientações *zy* e *zz*. Enquanto na orientação *zy* o bloco desliza por quase todo o seu percurso, na *zz* ele desenvolve movimento de rolamento ao longo da superfície.

Dos três tipos de blocos utilizados nas simulações tridimensionais com o MPM, aqueles com formato *equant* são mais móveis no solo residual, enquanto as com formato *flat* são mais móveis no filito alterado. Esse fato pode ser explicado pela velocidade angular desse bloco durante a queda, que está relacionada ao eixo inercial em torno do qual a rocha gira. Como as orientações de saída foram definidas com base nos eixos principais dos blocos, a menor dissipação de energia nas interações rocha-solo proporciona bloco rolar em torno do eixo de maior inércia, que favoreceu uma maior mobilidade para o formato *flat*.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a influência dos principais parâmetros associados a processos de queda de blocos de rocha mediante análises numéricas com grandes deformações utilizando o MPM. Em particular as análises se focaram na influência do material do terreno, o formato do bloco e sua orientação.

Em relação ao material do terreno de impacto, os resultados mostraram que para uma baixa resistência o talude sofre uma ruptura global e o bloco se move junto com a massa rompida. Também foram observados

casos em que o bloco em queda atinge o talude de maneiras menos favoráveis em relação à orientação produzindo uma dissipação de energia significativa, mesmo para solos menos competentes.

Os resultados mostraram que o formato dos blocos tem efeito significativo nas trajetórias, tanto nos modelos bidimensionais como nos tridimensionais. Os blocos circulares ou esféricos mostram uma tendência a alcançar maiores distâncias em suas trajetórias. Por outro lado, o formato do bloco também pode afetar a penetração no talude, diminuindo sua energia cinética até o ponto de atingir o repouso logo após o impacto.

A forma da rocha e a variação de sua orientação de saída possuem forte influência no alcance, na dinâmica, e na trajetória dos blocos de rocha. A simulação realista deste tipo de eventos requer a determinação adequada dos parâmetros utilizados nas simulações para representar satisfatoriamente os processos envolvidos na queda de blocos de rocha.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, à PUC-Rio, à Geobrugg e ao WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEF (1989). *ABEF Research on Foundation Engineering*. XII ICSMF, p 9-45.
- Caviezel, A. *et al* (2021). The relevance of rock shape over mass – implications for rockfall hazard assessments. *Nature Communications*, v. 12.
- Fernández, F. (2020) *Modelagem numérica de problemas geotécnicos de grandes deformações mediante o método do ponto material*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, 168 p. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.52771>
- Fernández, F. *et al* (2021) Three-dimensional face stability analysis of shallow tunnels using numerical limit analysis and material point method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 112. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103904>
- Glover, J (2015) *Rock-shape and its role in rockfall dynamics*. Thesis (PhD in Geography), Durham University, 266 p.
- Guerra, G. (2011) *Caracterização geomecânica de maciços rochosos intemperizados*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília/ UNB, 186 p.
- Leine, R. *et al* Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody System Dynamics*, 32, p. 241–271.
- Lopes, M. *et al* (2007) Comportamento geotécnico de rochas brandas na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG). *R. Esc. Minas*, 60(3), p. 471-476.
- Llano-Serna, M. A. (2012) *Aplicações do Método do Ponto Material (MPM) a problemas geotécnicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília/ UNB, 145 p.
- Ma, Z. *et al* (2010) An object-oriented MPM framework for simulation of large deformation and contact of numerous grains. *Computer Modeling in Engineering & Sciences* 55(1), p. 61–87.
- Nguyen, V.P. (2014) *Material point method: basics and applications*. Cardiff University. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/262415477_Material_point_method_basics_and_applications_Content> Acesso em: 16 mar. 2024.
- Rojas, D. T. (2019) *Avaliação da influência das propriedades do material na evolução dos movimentos de massa utilizando o método do ponto material..* Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília/ UNB, 140 p
- Yan, P.*et al* (2020) Numerical simulation of rockfall trajectory with consideration of arbitrary shapes of falling rocks and terrain. *Computers Geotech*, v. 122.
- Zabala, F., Alonso, E. (2011) Progressive failure of aznalcóllar dam using the material point method. *Géotechnique*, 61(9), p. 795–808.