

Simulação Tridimensional de Queda de Blocos

Erika Santos Brito
Engenheira Civil, Leopoldina-MG, Brasil, erika.s.brito@hotmail.com

Tatiana Barreto dos Santos
Professora doutora, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, tatiana.santos@ufop.edu.br

Thiago Bomjardim Porto
Professor Doutor, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, thiagoportoeng@gmail.com

Isabela Veiga de Souza
Graduanda em Engenharia Urbana, Escola de Minas - UFOP, Ouro Preto, Brasil, isabelaveigaiv@gmail.com

RESUMO: A Pedreira Prado Lopes é um dos bairros mais antigos de Belo Horizonte (MG), originado pelos operários que trabalharam nas obras da cidade e, posteriormente, ficaram desempregados. Eles se instalaram de maneira desordenada próximo a pedreira. As atividades da pedreira resultaram em talude rochoso muito íngreme, com cerca de 25 metros de altura, onde ocorrem queda de blocos que colocam em risco a população que vive no local. Diante desse cenário, o presente estudo teve por objetivo realizar a retroanálise de quedas de bloco que ocorreram no local, por meio de simulações utilizando o Trajec3D, um software de simulações tridimensionais, que é capaz de realizar o cálculo das trajetórias de queda dos blocos. A calibração dos modelos foi realizada com base em dados de uma queda de blocos ocorrida em 2014, levando em consideração o método de Corpo Rígido e levantamentos topográficos realizados em 2015. Utilizando as medidas do bloco que sofreu queda foi realizada a modelagem tridimensional do mesmo para calcular o seu volume. O software utilizado, embora complexo na triangulação de malhas, permite visualizações realistas quando calibrados adequadamente, fornecendo informações sobre velocidades, energias e coordenadas das trajetórias dos blocos, sendo considerado uma ferramenta interessante para a prever os locais de impacto dos blocos.

PALAVRAS-CHAVE: Queda de Blocos; Impacto Urbano; Talude Rochoso; Simulação Tridimensional; Trajec3D

ABSTRACT: The Pedreira Prado Lopes is one of Belo Horizonte's oldest neighborhoods, originally settled by workers involved in the city's construction who later found themselves unemployed. They settled near the quarry in an unplanned manner. The quarry operations resulted in a steep rocky slope, approximately 25 meters high, prone to block falls that pose risks to human lives in the surrounding area. This study aims to retrospectively analyze block falls that occurred on-site using Trajec3D, a software for three-dimensional simulations, to calculate block trajectories. Calibration of the simulation models was based on data from a 2014 incident and topographic surveys conducted in 2015, utilizing the Rigid Body method. A three-dimensional model of the blocks was created to accurately calculate their volumes. Despite the complexity of mesh triangulation in the software, it offers realistic visualizations when properly calibrated. It provides valuable data such as block trajectories, speeds, energies, and coordinates, and allows for exporting data in various formats. Thus, Trajec3D is deemed a crucial tool for predicting the locations of block impacts.

KEYWORDS: Rock Fall; Urban Impact; Rock Slope; Three-Dimensional Simulation; Trajec3D

1 INTRODUÇÃO

A discussão em torno das vantagens das simulações tridimensionais tem sido ampla. No entanto, em muitos casos, as simulações bidimensionais se mostram satisfatórias e atendem às necessidades específicas. Portanto, explorar ambos os tipos de simulação possibilita uma análise mais precisa da sua aplicabilidade e da necessidade de escolher entre um modelo ou outro conforme o problema em questão. O estudo conduzido por Chen *et al.* (2013) fornece resultados que sugerem que as simulações tridimensionais para análise de

deformação descontínua são mais adequadas para encostas íngremes, especialmente quando há presença de árvores, proporcionando uma distribuição espacial detalhada. Esses achados podem orientar na seleção do método de simulação mais apropriado para analisar quedas de blocos rochosos.

O talude, localizado no Bairro Pedreira Prado Lopes na cidade de Belo Horizonte, (conforme representado na Figura 1), escolhido como objeto de estudo neste trabalho, apresenta diversas condições de instabilidade, como geometria com grandes declividades, alto índice de fraturamento e surgimento de água em múltiplos pontos do maciço. Situado em uma área habitada, é uma preocupação potencial devido ao histórico de quedas de blocos. Por isso, este estudo assume uma relevância considerável nos âmbitos acadêmico, de engenharia e social. A face do talude proveniente de atividade de mineração a céu aberto, é composta por gnaisses bandados, de cor cinza, granulometria fina a grossa, com bandamento composicional definido por alternâncias de bandas de cor clara. Uma descrição geológico-geotécnica detalhada do talude pode ser encontrada em Brito (2022). O objetivo deste trabalho consistiu em discutir os métodos de retroanálise para calibração de modelos tridimensionais de queda de blocos, bem como compreender os mecanismos de queda de blocos, trajetória e alcance através de análises tridimensionais.

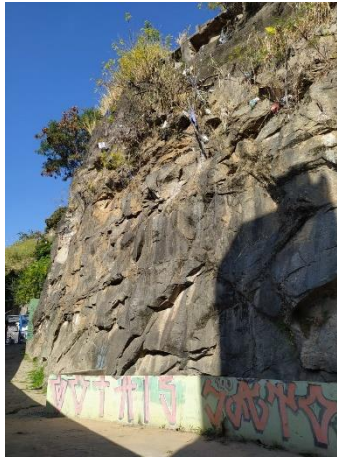


Figura 1. Vista do talude.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Definição dos parâmetros iniciais

Para a realização deste estudo, a empresa CONSMARA ENGENHARIA, forneceu um levantamento topográfico completo do talude da pedreira, realizado no ano de 2015. Esse levantamento abrangeu toda a extensão do talude, incluindo a área de corte da estrada, a rua Pedro Lessa, as estruturas da escola e do campo de areia, bem como o beco que dá acesso à área.

A densidade da rocha que compõe o talude é um parâmetro crucial para as simulações, pois, ao conhecer o volume do bloco, torna-se possível determinar sua massa, tanto para blocos que tenham sofrido queda, quanto para blocos simulados. Para isso, foram selecionados pontos estratégicos para a coleta de seis amostras de rocha, designadas de A-01 a A-06, como ilustrado na Figura 2.

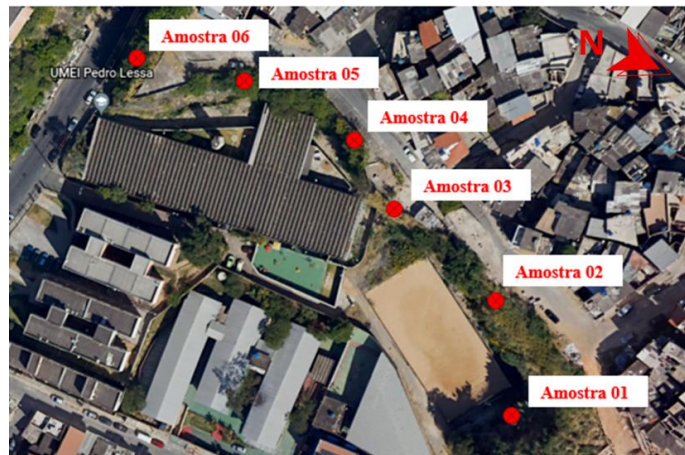


Figura 2. Localização dos pontos de coleta das amostras.

Através de ensaios de laboratório conduzidos conforme as diretrizes da Norma Regulamentadora NBR 6458 (ABNT, 2016), foram obtidas as densidades das amostras individuais, bem como a densidade média dessas amostras. Os resultados desses ensaios são sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de determinação da densidade da rocha.

	A - 01	A - 02	A - 03	A - 04	A - 05	A - 06
M1 (g)	385,7	178,41	257,39	732,2	379,85	197,32
M2 (g)	2845,34	1559,47	2785,81	3085,09	2806,61	1564,3
M3 (g)	2614,7	1457,40	2614,7	2614,7	2614,7	1457,40
ρ amostra (g/cm ³)	2,480	2,330	2,974	2,788	2,015	2,175

Como o bloco foi retirado do local, não seria possível aferir suas medidas diretamente, então, objetos que aparecem nas fotografias de 2015 e que ainda se encontram no local foram utilizados como referência de escala para fazer a estimativa do volume do bloco.

Foram utilizadas duas imagens para retirar as dimensões aproximadas do bloco, utilizando como referência de escala a mureta e os postes de iluminação que estão presentes nas imagens (Figura 3).

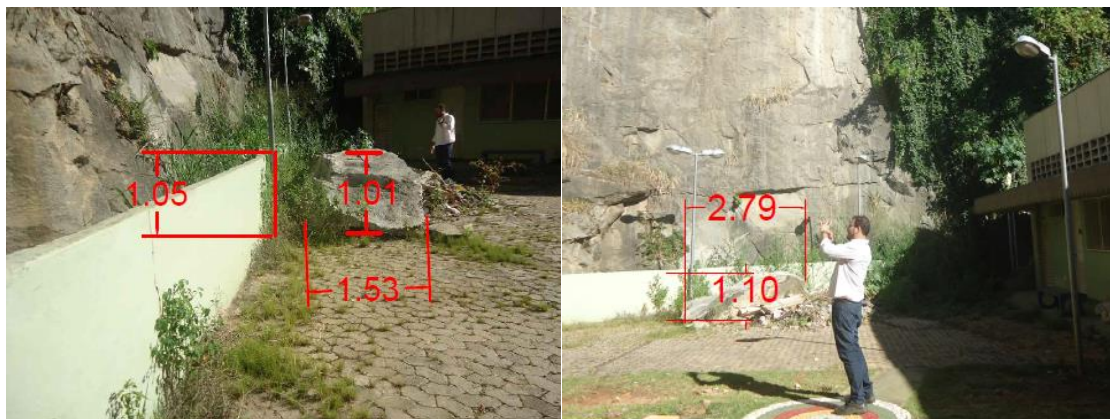


Figura 3. Bloco 2014 lateral e frente.

De acordo com as medidas e fotos dos blocos, o formato do bloco pôde ser definido como alongado. Utilizando as medidas do bloco que sofreu queda em 2014, foi realizada a modelagem tridimensional estimada do mesmo com o auxílio do *AutoCad Modeling 3D*, da Autodesk Inc 2020, ver Figura 4. Além disso, foi calculado o volume e o peso do bloco. Para isso, foi utilizado o peso específico médio da rocha gnáissica ensaiada em laboratório (2,46 g/cm³), ver Tabela 2.

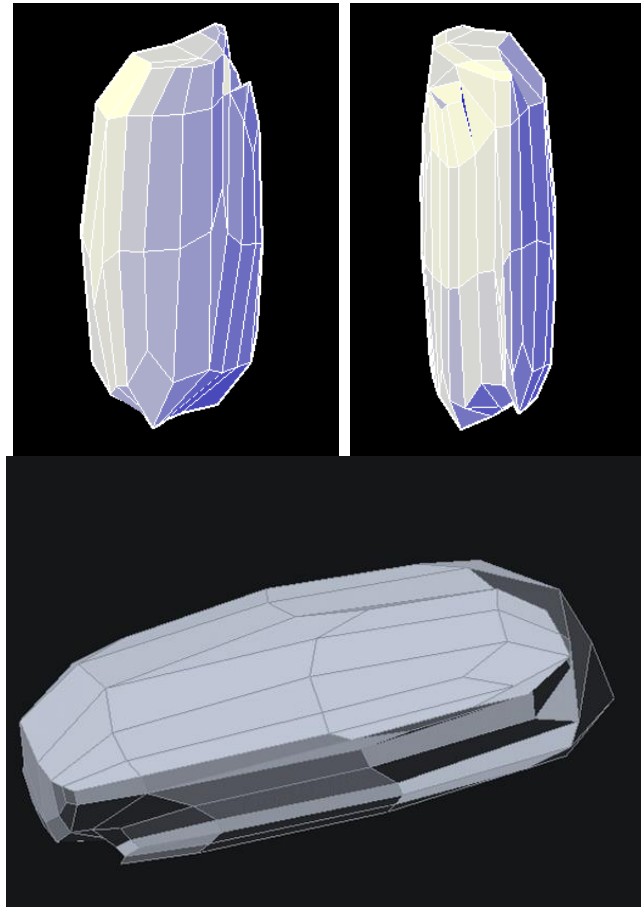


Figura 4. Simulação tridimensional do bloco.

Tabela 2. Volume e peso estimados do bloco.

Medidas (m)	1,53	1,05	2,79
Volume médio (m³)	2,633		
Peso (kN)	64,78		

2.2 Calibração do modelo

A entrada de dados no Trajec3d se inicia com a inclusão da topografia do terreno, encosta ou maciço alvo de simulação de queda de blocos, conforme mostrado na Figura 5. É possível fazer a entrada da topografia com um arquivo, com superfície em triangulações, em formato DXF, formato utilizado, normalmente, nos softwares de simulação tridimensional.

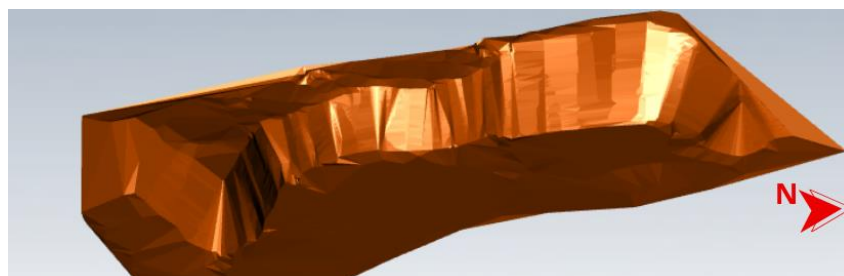


Figura 5. Entrada no Trajec3D.

Para iniciar a simulação é necessário a inserção dos parâmetros referentes aos materiais envolvidos na interação. No Trajec3D, já existem alguns materiais definidos e também existe a possibilidade de criar um novo material com os parâmetros escolhidos através de ensaios, correlações e etc.

O coeficiente de restituição, que representa a razão entre a velocidade antes e depois do impacto, foi definido como 0,10, pois neste caso a velocidade tende a diminuir significativamente após o impacto. Durante as simulações houve a necessidade de redefinir o coeficiente de restituição para adequar as distâncias de *runout*, uma vez que quanto maior o seu valor maior a distância percorrida pelo bloco.

O ângulo de atrito estático é relevante somente em situações de interação entre um bloco em movimento e outro que já cessou o movimento. Logo, o ângulo de atrito dinâmico está associado ao bloco em movimento e pode divergir do ângulo de atrito da rocha intacta, geralmente sendo maior devido à presença de arestas na superfície do bloco que se desprende do talude.

Na Tabela 3, encontram-se os valores utilizados para um material duro de baixo coeficiente de atrito, com coeficiente de restituição de 0,01, e com ângulos de atrito estático e dinâmico de 45° e 45°, respectivamente. Esses valores foram determinados por meio de uma análise de sensibilidade, levando em consideração a distância entre o bloco e o talude ao final da trajetória.

Tabela 3. Descrição dos materiais de interação.

DESCRIÇÃO DO MATERIAL	Coeficiente de restituição	Ângulo de Atrito	
		Estático	Dinâmico
Gnaisse	0,01	45°	45°

Na Tabela 4, são apresentados os valores empregados para o segundo material de interação, que, neste caso, é o concreto, uma vez que todo o ambiente da escola é construído com esse material, incluindo o piso. O ângulo de diferenciação é utilizado para definir o segundo material de interação, sendo determinado pela diferença em relação ao ângulo do talude. Qualquer polígono com um ângulo de inclinação menor que o ângulo de diferenciação é considerado como pertencente ao segundo material. Para este material, também são especificados valores para coeficiente de restituição e ângulos de atrito. O coeficiente de restituição adotado é igual a 0,01, enquanto os ângulos de atrito estático e dinâmico são de 65° e 60°, respectivamente, conforme indicação da biblioteca do programa.

Tabela 4. Determinação do segundo material de interação.

ÂNGULO DE DIFERENCIAÇÃO	Coeficiente de restituição	Ângulo de Atrito	
		Estático	Dinâmico
2°	0,01	65°	60°

No Trajec3D, após a inserção do arquivo de topografia, que inclui a estrutura da escola, os materiais de interação e o arquivo com o formato do bloco (Figura 5), a simulação foi configurada conforme as Tabelas 5 e 6. Destaca-se a densidade (2,46 g/cm³) e o peso estimado (64,73 kN) para o bloco cuja queda foi registrada em 2014.

Tabela 5. Configuração do Trajec3D para o ambiente da simulação.

Ambiente									
Gravidade (m/s ²)	Densidade de Rocha (g/cm ³)	Rotação do Bloco		Interação do bloco		Colisões		Trajectoria vertical	
-9,81	2,46	Valor definido		X	Habilitada	X	Habilitada	X	Habilitada
		X	Valores aleatórios		Inabilitada		Inabilitada		Inabilitada

No programa Trajec3D, a gravidade é convencionada como negativa para o movimento vertical descendente, uma vez que se trata de queda livre. O valor padrão da gravidade, geralmente de $9,81 \text{ m/s}^2$, é utilizado para esse fim. Além disso, as opções de interação do bloco e colisões estão habilitadas. Essas configurações garantem que seja levado em consideração o fato de que um bloco em movimento pode colidir com outro bloco já caído. Essas variáveis são consideradas nos cálculos de trajetória, energia e velocidade, e também indicam o possível acúmulo de blocos em casos específicos.

Tabela 6. Configuração do Trajec3D para a simulação.

Simulação						
Peso (ton)	Intervalo entre as interações		Trajectoria	Distância (m)	Escala	
7,46	0,04 s	Tempo Real	X Definida	1	1	
	25 /s	Tempo de parada	Indefinida			

O valor do peso do bloco deve ser inserido, pois combinado com a densidade definida na configuração do ambiente, determinará o tamanho e, conseqüentemente, o volume dos blocos na simulação.

O intervalo entre as iterações indica quantas vezes os cálculos foram realizados durante um segundo de tempo. Quando a opção de tempo real é ativada, a taxa de cálculo é ajustada de acordo com o tempo de cada simulação. No entanto, de acordo com Basson (2015), quando o tempo real está ativado, a precisão dos cálculos pode ser comprometida, uma vez que o intervalo entre os cálculos pode variar.

A distância se refere ao intervalo de registro dos resultados. Quanto menor a distância, maior será a quantidade de resultados registrados para uma simulação. A escala está relacionada com a proporção do bloco em relação ao ambiente. Uma escala maior que 1 deve ser utilizada para tornar mais evidentes trajetórias muito pequenas que não seriam facilmente detectadas na escala normal (Escala 1:1).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta o resultado de uma das simulações tridimensionais da queda de bloco conforme os parâmetros e configuração apresentados anteriormente.

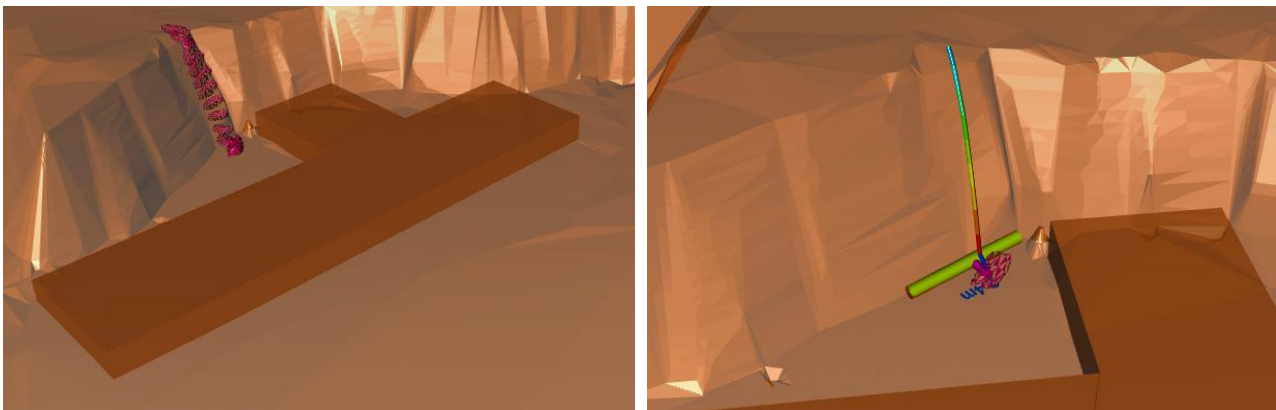


Figura 6. Trajetória e distância de runout.

As simulações foram repetidas várias vezes com o objetivo de alcançar a distância do pé do talude dentro da faixa de aproximação do bloco de 2014. A distância entre o bloco de 2014 e o pé do talude foi estimada com base nas imagens, com um valor variando entre 2,50 metros e 3,00 metros. Durante as simulações, foram

registrados valores de até 3,50 metros, com uma média desses valores igual a 2,70 metros. Esses resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados das simulações

Simulação	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17
RunOut (m)	2,8	2,9	2,6	2,5	2,9	1,6	2,6	3,4	3,4	1,6	3,1	1,7	3,5	2	3,2	3,1	2,3
Média	2,7																

4 CONCLUSÕES

A correta calibração do modelo resulta em simulações mais próximas da realidade, permitindo a análise de diversas situações possíveis para a queda de blocos no talude em estudo. Isso inclui cenários com diferentes faces e blocos de tamanhos variados em comparação com o bloco utilizado na calibração. É fundamental destacar que uma calibração eficaz depende de dados confiáveis, histórico da estrutura e caracterização precisa dos materiais envolvidos, inclusive por meio de ensaios.

O programa utilizado nas simulações possui uma configuração padrão e permite a definição de parâmetros para três materiais diferentes. No entanto, a identificação desses materiais é bastante genérica, e a diferenciação entre eles apenas pela variação do ângulo de inclinação é restritiva. Uma trajetória resultante pode ser realista, fornecendo previsões mais abrangentes de pontos finais e facilitando a seleção do método de contenção e a quantidade necessária. Em geral, os resultados podem ser considerados confiáveis quando uma boa calibração do modelo é realizada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por meio do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO/UFOP), por todo o apoio técnico, conhecimento e aprendizado fornecido para o desenvolvimento deste trabalho. Expressamos também nossa gratidão à CONSMARA ENGENHARIA LTDA pelo apoio técnico concedido durante a pesquisa, especialmente pela disponibilização dos dados das investigações geológico-geotécnicas da área de estudo. Além disso, gostaríamos de estender nossos agradecimentos à Sra. Gesia Laranjeira Santos, Diretora da Escola Municipal de Educação Infantil Pedro Lessa, pelo apoio operacional local durante as visitas técnicas realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água Rio de Janeiro, 2016.
- Autodesk Inc. AutoCAD Modeling 3D. Versão 2020. San Rafael: Autodesk Inc., 2020.
- Basson F.R.P., 2015. Trajec3D Manual, April 2015.
- Brito, E.S., 2022. Comparação entre simulação bidimensional e tridimensional de queda de blocos. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- CONSMARA ENGENHARIA. Laudo Técnico Geológico-Geotécnico Taludes da Pedreira Prado Lopes, Belo Horizonte, 2015.
- CHEN, G., ZHENG, L., ZHANG, Y. et al. Numerical Simulation in Rockfall Analysis: A Close Comparison of 2-D and 3-D DDA. Rock Mech Rock Eng 46, 527–541 (2013)