**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/1**

# A analogia do evento de queda de blocos em Banquete/RJ em 2018 com os EER´s Extremely Energetic Rockfalls

Paulo Pinheiro Castanheira Neto

Professor Assistente, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, paulo.castanheira@eng.uerj.br

Armando Prestes De Menezes Filho

Professor Adjunto, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, armando.prestes.filho@uerj.br

RESUMO: Este trabalho analisa a relação entre a modelagem de uma Queda de Blocos classificada como Intermediária e os efeitos físicos típicos de uma Queda de Blocos Extremamente Energética (Extremely Energetic Rockfall - EER), a partir do evento ocorrido em 2018 em Banquete/RJ. A metodologia baseia-se na reavaliação da modelagem de Castanheira Neto (2019) e na realização de múltiplas simulações numéricas no software Rocfall 2, buscando atingir os valores energéticos mínimos propostos para EER's. Os resultados indicam que o evento apresentou energia total de centenas de MJ, aproximadamente 200 vezes inferior às energias de referência usualmente associadas a EER's, dezenas de GJ. Ainda assim, os efeitos observados em campo, como fragmentação violenta do bloco, projeção de fragmentos a grandes distâncias e danos no entorno, mostraram-se compatíveis com EER's. Tentativas adicionais de modelagem visando alcançar os limiares energéticos clássicos não obtiveram sucesso. Conclui-se que eventos com energia significativamente inferior à proposta clássica podem gerar efeitos equivalentes aos de EER's, evidenciando limitações nos critérios energéticos adotados em análises de risco geológico.

PALAVRAS-CHAVE: Queda de blocos; Queda de blocos intermediária; Extremely Energetic Rockfalls; Modelagem numérica; Análise de risco.

ABSTRACT: This work analyzes the relationship between the modeling of an Extremely Energetic Rockfall (EER) and the typical physical effects of an Extremely Energetic Rockfall (EER), from the event that occurred in 2018 in Banquete/RJ. The methodology is based on the reassessment of Castanheira Neto's (2019) modeling and on the performance of multiple numerical simulations in the Rocfall 2 software, seeking to achieve the minimum energy values proposed for EER's. The results indicate that the event presented a total energy of hundreds of MJ, approximately 200 times lower than the reference energies usually associated with EER's, tens of GJ. Even so, the effects observed in the field, such as violent fragmentation of the block, projection of fragments at great distances and damage to the surroundings, were compatible with EER's. Additional modeling attempts to reach the classical energy thresholds were unsuccessful. It is concluded that events with energy significantly lower than the classical proposal can generate effects equivalent to those of EER's, evidencing limitations in the energy criteria adopted in geological risk analyses.

KEY WORDS: Rockfall; Intermediate rockfall; Extremely Energetic Rockfalls; Numerical modeling; Risk analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

A intensificação da ocupação urbana em encostas rochosas e áreas de relevo acidentado tem ampliado significativamente os riscos associados aos movimentos gravitacionais de massa, com destaque para as quedas de blocos rochosos. Esses processos representam uma das principais ameaças naturais em ambientes montanhosos, devido à elevada energia cinética envolvida, à dificuldade de previsão precisa e à curta janela temporal entre a instabilização e o impacto.

As quedas de blocos caracterizam-se pela separação de fragmentos rochosos de um maciço, seguida de deslocamento predominantemente balístico, envolvendo fases de queda livre, rolamento, quique e deslizamento. A severidade dos danos associados a esses eventos está tradicionalmente relacionada à energia total do bloco, à sua massa, à altura de queda e à geometria do terreno.

No âmbito da literatura internacional, eventos classificados como Quedas de Blocos Extremamente Energéticas (Extremely Energetic Rockfalls – EER's) são considerados raros, porém de altíssimo potencial destrutivo. Esses fenômenos têm sido associados a energias da ordem de dezenas de GJ, sendo frequentemente comparados, em termos de efeitos, a processos explosivos naturais (De Blasio et al., 2018).

Entretanto, a análise de eventos recentes tem indicado que essa classificação estritamente energética pode não ser suficiente para explicar determinados cenários de dano. O evento ocorrido em abril de 2018 no distrito de Banquete, município de Bom Jardim/RJ, representa um caso emblemático, no qual um evento classificado energeticamente como intermediário produziu efeitos físicos e danos compatíveis com aqueles descritos para EER's. Um marco claríssimo deste evento foi uma pedra de peso aproximado 2Kg ter sido projetada a partir do ponto de impacto e atingido uma residência a 430m de distância. A Figura 1 a seguir, caracterizam bem a ocorrência em Banquete/RJ.




Figura 1 – Região da queda de bloco em Banquete / RJ (Castanheira Neto, 2019)

A Figura 2, a seguir, registra o provável ponto de desprendimento do bloco, evidenciação das fraturas e lascas, resultando em ponto recente de exposição após desprendimento do mesmo.




*Figura 2 – Localização do ponto de desprendimento do bloco, com formação de lascas pelo intemperismo.* (Castanheira Neto, 2019)

A Figura 3, abaixo, retrata a área de devastação após impacto e explosão.



*Figura 3 – Área de devastação do pós impacto e explosão* (Castanheira Neto, 2019)

Os círculos vermelhos destacam ao profissionais realizando a análise exploratória do evento. Serve para comparação e referência com o tamanho dos matacões resultantes.

O circulo laranja é onde se acredita que ocorreu o impacto, sobre o matacão existente, que foi deslocado para frente, no sentido da seta verde.

O raio azul limita os maiores blocos, além da ocorrência da fragmentação, blocos maiores, mais próximos deste limite radial podem ter sofrido acomodação e rolado.

Nesse contexto, este trabalho busca aprofundar a discussão sobre as limitações dos critérios energéticos clássicos e contribuir para o aprimoramento das metodologias de análise de risco geológico, especialmente em regiões tropicais caracterizadas por intenso intemperismo físico, químico e biológico e elevada densidade populacional.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A classificação e a análise de quedas de blocos rochosos têm sido discutidas na literatura geotécnica e geológica, com diferentes abordagens metodológicas ao longo das últimas décadas. Estudos pioneiros estabeleceram relações entre energia cinética, volume dos blocos e extensão da área afetada, fornecendo bases para a avaliação de perigo e risco.

Autores como De Blasio et al. (2018) definem as Quedas de Blocos Extremamente Energéticas como eventos associados a energias excepcionalmente elevadas, tipicamente superiores a vários GJ, capazes de produzir fragmentação intensa, crateras de impacto e extensa área de danos, utilizando a energia liberada no impacto como critério central de classificação, conforme apresentado na Figura 4.

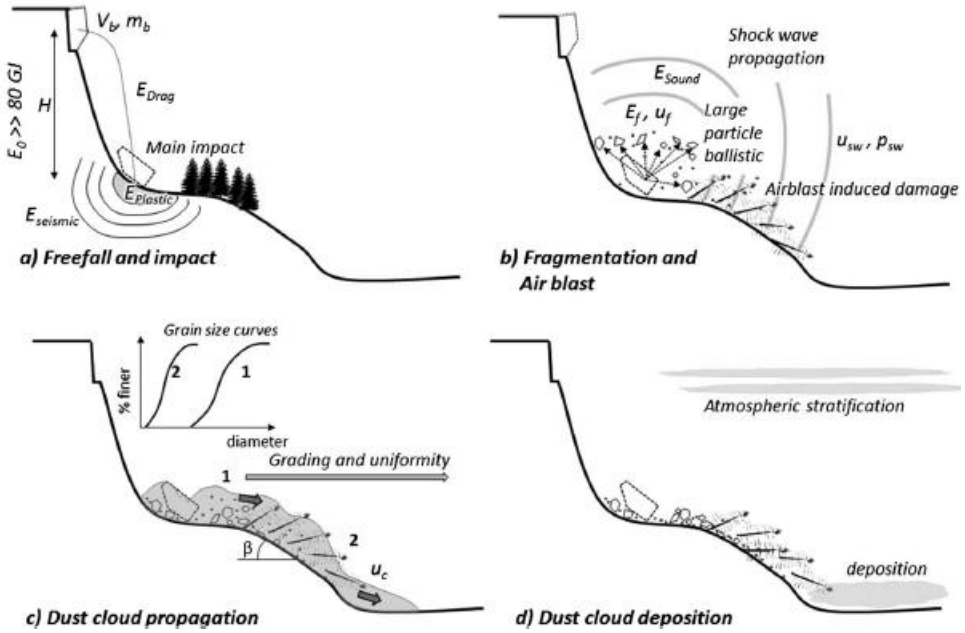



*Figura 4 – Descrição de um EER. (De Blasio et al., 2018).*

O fenômeno de um EER, ilustrado conceitualmente na Figura 4 acima, desdobra-se em quatro fases críticas interconectadas:

1. **Queda livre e impacto (*Freefall and impact*):** O bloco desprende-se com velocidades translacional e rotacional, sofrendo arrasto aerodinâmico. No impacto principal, a energia total gera deformação elastoplástica no substrato, dissipada em ondas sísmicas e deformação permanente.

2. **Fragmentação e onda de choque (Fragmentation and Air Blast)**: Sob alta taxa de deformação, a energia restante supera a tenacidade da rocha, gerando fragmentação catastrófica. O colapso dissipa energia em fraturamento e calor, projetando fragmentos em trajetórias balísticas. O deslocamento abrupto de ar induz uma onda de choque de alta pressão (*air blast*), causando danos severos no entorno.

3. **Propagação da nuvem de poeira (*Dust cloud propagation*)**: A cominuição extrema suspende finos na atmosfera. A nuvem atua como uma corrente de densidade turbulenta com segregação granulométrica (*grading*), expandindo o raio de impacto do evento.

4. **Deposição da nuvem de poeira (*Dust cloud deposition*)**: Sob perda de velocidade e estratificação atmosférica, as partículas finas decantam progressivamente, recobrindo a vegetação e consolidando o depósito turbulento.

Outros estudos enfatizam que a fragmentação no impacto pode amplificar significativamente os efeitos de um evento, independentemente da energia total inicialmente disponível, uma vez que a dissipação da energia depende da geometria do bloco, das propriedades mecânicas da rocha e das condições de impacto (Shen et al., 2017). A geração de múltiplos fragmentos com trajetórias independentes aumenta a área potencialmente atingida, elevando substancialmente o risco em áreas urbanizadas.

Carpinteri e Pugno (2002) discutem os mecanismos de fragmentação e dissipação de energia, destacando a importância da geometria do bloco e das propriedades mecânicas da rocha. A Figura 5, a seguir, registra os instantes durante e imediatamente após o impacto. (De Blasio et al., 2018).

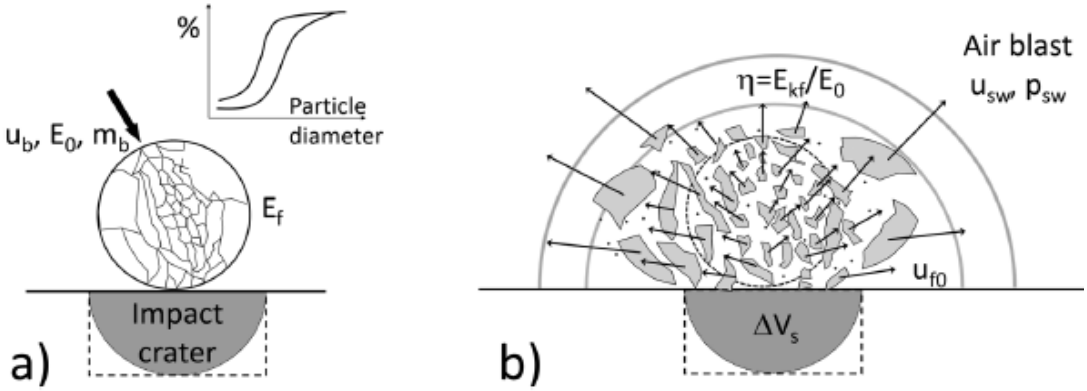



*Figura 5 – Modelo dos fragmentos e crateras de impacto na fragmentação (De Blasio, 2018)*

No contexto da literatura aplicada, estudos recentes têm destacado a necessidade de integrar modelagens numéricas detalhadas, observações de campo e análises pós-evento, de modo a refinar os critérios de classificação e aprimorar a avaliação do risco associado às quedas de blocos.

## 3 METODOLOGIA

A metodologia baseia-se na reavaliação da modelagem numérica de Castanheira Neto (2019) para o evento em Banquete/RJ. Inicialmente, analisou-se o contexto geológico e geomorfológico, focando na litologia granítica, fraturamento e intemperismo. Consideraram-se a geometria do talude (inclinação, altura e descontinuidades), a forma tridimensional estimada do bloco e a cinemática

inicial (velocidades translacionais e rotacionais). Esses dados advêm de sobrevoo com drone pós-evento, registro de imagens e nuvem de pontos, refinados nos programas MeshLab e AutoCAD para preservar as características do maciço.

A modelagem computacional foi conduzida no software RocFall 2. Diferentes cenários foram simulados variando sistematicamente os coeficientes de restituição (normal e tangencial), a rugosidade do talude e as condições de impacto. Foram realizadas centenas de milhares de simulações para explorar o envelope máximo de energia real. Adicionalmente, buscou-se reproduzir os efeitos de fragmentação e a eficiência da dissipação energética, tomando como referência os limiares clássicos internacionais para EER's.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir da modelagem numérica indicaram que o evento de Banquete apresentou energia total máxima da ordem de 385 MJ para um bloco hipotético de 300.000,00 Kg, valor aproximadamente 200 vezes inferior às energias de referência usualmente associadas a Quedas de Blocos Extremamente Energéticas na literatura internacional. Mesmo após extensivas tentativas de ajuste dos parâmetros de modelagem, não foi possível atingir os limiares energéticos clássicos propostos por autores como De Blasio et al. (2018), que consideram 2.000 J/Kg. A simulação de Castanheira Neto (2019) resultou em 1.280 J/Kg.

A Figura 6 a seguir apresenta o gráfico de Energia Total obtido com um lançamento de 800.000 amostras através do programa RocFall 2, com eixos e curvas reajustados para assegurar a leitura nítida das trajetórias críticas e dos envelopes estatísticos.

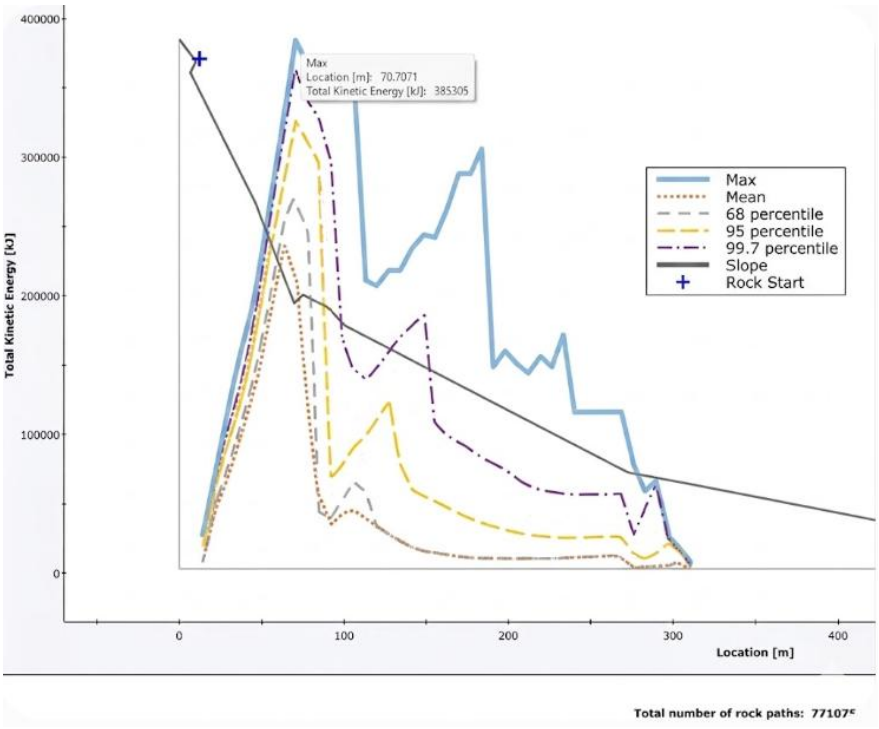



*Figura 6 – Modelagem do evento de Banquete, Energia Total, 800 mil amostras (Castanheira Neto, 2026)*

Essa impossibilidade de replicar numericamente os limiares energéticos dos EER's clássicos, contrastando com os severos danos observados em campo, evidencia limitações intrínsecas da modelagem computacional adotada no software RocFall 2. Por se tratar de uma ferramenta bidimensional baseada em abordagens de corpo rígido o programa apresenta as seguintes restrições analíticas:

1. **Ausência de Fragmentação Dinâmica:** O modelo assume que o bloco preserva sua integridade de massa e geometria invariáveis ao longo de todo o perfil do talude. Na realidade de Banquete/RJ, a fragmentação instantânea no primeiro choque atua como um sumidouro de energia mecânica, mas altera drasticamente as condições cinemáticas subsequentes, dividindo a massa original em fragmentos menores que adquirem velocidades de ejeção balística não computáveis em modelos de massa constante.
2. **Restrição Bidimensional (2D):** A análise assume uma seção transversal planar simétrica. Fenômenos tridimensionais, como o espalhamento lateral dos fragmentos ricocheteados, colisões inter-partículas no pós-impacto e desvios de rotação induzidos pela rugosidade espacial da encosta são omitidos, tendendo a superestimar ou restringir os vetores de energia.
3. **Simplificação dos Coeficientes de Restituição:** O RocFall 2 trata os quiques através de coeficientes globalizados que tentam embutir a deformação do terreno e a rugosidade de forma puramente empírica. No evento real, o impacto sobre um matacão preexistente funcionou como uma "plataforma rígida de ampliação de “quique”, gerando uma altíssima taxa de restituição instantânea e um acoplamento severo entre velocidade translacional e rotacional que desafia a linearidade matemática dos coeficientes normais e tangenciais padronizados.

O gráfico do RocFall 2 apresentado na *Figura 6* mostra a Energia Total Máxima, a Média e os percentis 99,7%, 95% e 68%, calculados direto das trajetórias sem assumir distribuição normal. Este trabalho adotou as energias máximas por se tratar de um evento de pico. Os principais saltos energéticos ligam-se a efeitos rotacionais, visíveis acima do percentil 68% e marcantes no de 95% e no máximo. Enquanto a média reflete o comportamento típico e o percentil 95% engloba o risco real sem extremos, o valor máximo mapeia trajetórias raras.

O confronto numérico com as hipóteses de De Blasio et al. (2018) confirmou que as energias e velocidades de Banquete qualificam-no apenas como um evento intermediário. Contudo, os danos em campo foram incompatíveis com essa classificação. Fatores como queda livre de 60 m, impacto sobre matacão preexistente (que ampliou a restituição) e baixa tenacidade por intemperismo mitigaram a dissipação inicial. Isso converteu a energia cinética em fragmentação intensa e ejeção balística a grandes distâncias. Logo, a mera quantificação energética é insuficiente; análises de risco geológico devem incorporar parâmetros cinemáticos, estruturais e geomorfológicos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a classificação de quedas de blocos baseada exclusivamente em critérios energéticos apresenta limitações importantes para a adequada avaliação do risco geológico. O estudo do evento ocorrido no distrito de Banquete/RJ evidenciou que uma queda de blocos energeticamente classificada como intermediária, com energia total da ordem de 385 MJ, foi capaz de produzir efeitos físicos tipicamente associados a Quedas de

Blocos Extremamente Energéticas (EER's), como fragmentação violenta, devastação considerável do entorno resultante da explosão, ampla dispersão de fragmentos, atingindo residência posicionada em "área segura" pelos critérios de queda de blocos convencional, ou seja, por deslizamentos.

As análises realizadas indicam que fatores como o elevado grau de intemperismo do maciço rochoso, a geometria irregular do bloco, a altura de queda e as condições de impacto exerceram papel determinante na forma como a energia foi dissipada. Esses elementos favoreceram a conversão eficiente da energia cinética em fragmentação e projeção de fragmentos, ampliando substancialmente o alcance e o potencial destrutivo do evento, mesmo na ausência dos elevados limiares energéticos tradicionalmente descritos na literatura internacional.

Do ponto de vista prático, os resultados reforçam a necessidade de cautela na aplicação direta de limiares energéticos clássicos em análises de risco, especialmente em áreas urbanizadas situadas em ambientes tropicais. Metodologias que desconsideram aspectos geomorfológicos, estruturais e cinemáticos podem subestimar o perigo associado a eventos de menor energia total, mas com elevado potencial de dano

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professores da UERJ, Rogério Feijó pela apresentação do tema que deu origem a este trabalho e Bruno Lima, pela disponibilização da infraestrutura computacional do Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ, essencial para a realização das simulações numéricas em condições extremas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTANHEIRA NETO, P. P. Queda de blocos no distrito de Banquete, Bom Jardim/RJ: análise e modelagem numérica. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.

CARPINTERI, A.; PUGNO, N. A. One-dimensional scaling laws for fragmentation phenomena. International Journal of Fracture, v. 118, p.373–388, 2002.

DE BLASIO, F. V.; ELVERHØI, A.; ENGELAND, J.; HARBITZ, C. Extremely energetic rockfalls: mechanics, classification and implications. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 18, p.2487–2504, 2018.

SHEN, W.; ZHANG, L.; LI, H.; LIU, J. Fragmentation and energy dissipation of rockfalls during impact. Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 50, p.3045–3061, 2017.