



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Samara Cristina Cordeiro dos Santos


Influência da rugosidade da encosta no estudo de queda de blocos utilizando-se a Teoria do Caos

Rio de Janeiro

2023

Samara Cristina Cordeiro dos Santos

Influência da rugosidade da encosta no estudo de queda de blocos utilizando-se a Teoria do Caos



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof. Dr. Armando Prestes De Menezes Filho
Prof^a. Dr. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237 Santos, Samara Cristina Cordeiro dos.
Influência da rugosidade da encosta no estudo de queda de blocos utilizando-se a Teoria do Caos / Samara Cristina Cordeiro dos Santos. – 2023.
131 f.

Orientadores: Armando Prestes de Menezes Filho, Ana Cristina Castro Fontenla Sieira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Taludes (Mecânica do solo) - Teses. 3. Deslizamentos (Geologia) - Teses. 4. Aspereza de superfície - Teses. 5. Comportamento caótico nos sistemas - Teses. I. Menezes Filho, Armando Prestes de. II. Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.131.53

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Samara Cristina Cordeiro dos Santos

Influência da rugosidade da encosta no estudo de queda de blocos utilizando-se a Teoria do Caos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof^a. Dr. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Bruno Teixeira Lima
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Antônio Claudio Soares
Faculdade de Engenharia – UFF

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

Primeiramente, a Deus, por permitir esta conquista em minha vida. Aos meus queridos pais Maria Helena e Carlos Gomes, e queridos irmãos Suelen Santos e Carlos Eduardo, que sempre me apoiaram e me incentivaram, além de toda paciência, carinho e atenção ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre escutando as minhas preces, me abençoando e me dando força para superar todos os obstáculos da vida.

À minha família, principalmente, meus pais e irmãos (Maria Helena, Carlos Gomes, Carlos Eduardo e Suelen Santos), por estarem sempre presentes em todos os momentos de minha vida, sempre me apoiando, ensinando, orientando, sendo pacientes comigo, e me dando força para realizar todos os meus sonhos. Tudo que conquistei até hoje devo a vocês, por acreditarem em mim, e me proporcionarem uma educação de qualidade e sabedoria. Obrigada por tudo.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho e Prof^a. Dr^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira, que tenho tanto carinho e admiração. Obrigada por toda dedicação, preocupação, paciência, ótimas orientações, pelo ensinamento, pela amizade, por me motivar a enfrentar os desafios da área acadêmica e sempre acreditar no meu potencial. Estou realizando mais um sonho graças ao apoio e atenção que vocês tiveram por mim.

A todo corpo docente do PGECIV, por compartilhar o vasto conhecimento e experiência profissional. Essa vivência ao longo deste período acadêmico só fez aumentar o meu apreço e interesse pela geotecnia.

A todos os colegas de mestrado pelo carinho e companheirismo durante o curso, em especial a Laís Regina Santos, Nathália Sodr e e  rica Guedes, que tornaram os meus dias mais alegres e tranquilos. Obrigada pela amizade.

A Fernanda Ignácio, Alana Ribeiro e Leidiane Araújo por fornecerem informa es de suas pesquisas, pela paciência e disponibilidade para esclarecer todas as minhas d vidas.

  FAPERJ pelo apoio financeiro durante a elabora o desta pesquisa.

E a todos aqueles, de forma direta ou indireta, que me ajudaram ao longo desta caminhada.

Sem sonhos, a vida não tem brilho. Sem metas, os sonhos não têm alicerces. Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais. Sonhe, trace metas, estabeleça prioridades e corra riscos para executar seus sonhos. Melhor é errar por tentar do que errar por se omitir.

Augusto Cury

RESUMO

SANTOS, Samara Cristina Cordeiro dos. *Influência da rugosidade da encosta no estudo de queda de blocos utilizando-se a Teoria do Caos*. 2023. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O movimento de massa do tipo queda de blocos em encostas rochosas tem se tornado um fenômeno bastante complexo e pouco estudado, envolvendo elevada velocidade e energia cinética. Geralmente, ocorre de forma repentina e sem indícios de movimentação. Devido a diferentes parâmetros que podem influenciar no resultado final, tais como a geometria dos blocos e da encosta, rugosidade da superfície, velocidade angular dos blocos durante o lançamento, e os coeficientes de restituição dos materiais envolvidos no processo, é extremamente difícil analisar este fenômeno, além de prever as trajetórias e alcances dos blocos ao longo da encosta. Dessa forma, este projeto de pesquisa tem como objetivo, compreender cada vez mais os fatores condicionantes e a susceptibilidade de ocorrência desse fenômeno. Para isso, serão estudados dois casos de perfis da encosta, convexa e côncava, analisando as influências da rugosidade através da distribuição probabilística da localização final dos blocos rochosos neste tipo de movimento de massa. Assim sendo, será aplicada a teoria do caos, a partir de simulações numéricas utilizando o software RocFall 8.018. Esta teoria, estudada e executada por Ignacio (2019), Ribeiro (2020) e Araujo (2021), trata de sistemas não lineares, em que uma pequena mudança nas condições iniciais de um evento, pode trazer consequências enormes e imprevisíveis na prática a longo prazo, o que ocorre de fato em eventos de queda de blocos. Os resultados mostraram que a teoria do caos pode ser aplicada para a análise do fenômeno de queda de blocos, destacando que os diferentes tipos de rugosidades das superfícies das encostas influenciam, significativamente, no comportamento fracamente ou fortemente caótico. Os estudos indicam, tanto para o perfil convexo quanto para o côncavo, que quanto maior o valor da rugosidade, maior a dissipação de energia do sistema bloco – encosta, sugerindo, portanto, um comportamento fracamente caótico (complexo) ao sistema. Portanto, pode-se confirmar a importância deste parâmetro para a compreensão do fenômeno de queda de blocos, podendo adequar eventuais projetos de mitigação de risco para este tipo de cenário.

Palavras-chave: Queda de blocos; Rugosidade; Teoria do Caos.

ABSTRACT

SANTOS, Samara Cristina Cordeiro dos. *Influence of slope roughness in the study of rockfalls using Chaos Theory*. 2023. 131 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Mass movement such as falling blocks on rocky slopes has become a very complex and poorly studied phenomenon, involving high velocity and kinetic energy. It usually occurs suddenly and without signs of movement. Due to different parameters that can influence the final result, such as the geometry of the blocks and the slope, surface roughness, angular velocity of the blocks during launching, and the coefficients of restitution of the materials involved in the process, it is extremely difficult to analyze this phenomenon, in addition to predicting the trajectories and ranges of the blocks along the slope. Thus, this research project aims to increasingly understand the conditioning factors and the susceptibility of occurrence of this phenomenon. For this, two cases of slope profiles, convex and concave, will be studied, analyzing the influences of roughness through the probabilistic distribution of the final location of the rock blocks in this type of mass movement. Therefore, chaos theory will be applied, based on numerical simulations using the RocFall 8.018 software. This theory, studied and implemented by Ignacio (2019), Ribeiro (2020) and Araujo (2021), deals with non-linear systems, in which a small change in the initial conditions of an event can bring enormous and unpredictable consequences in long-term practice. term, which actually occurs in block fall events. The results showed that chaos theory can be applied for the analysis of the phenomenon of falling blocks, highlighting that the different types of roughness of the surfaces of the slopes significantly influence the behavior weakly or strongly chaotic. The studies indicate, for both the convex and the concave profiles, that the higher the roughness value, the greater the energy dissipation of the block - slope system, suggesting, therefore, a weakly chaotic (complex) behavior to the system. Therefore, it can be confirmed the importance of this parameter for the understanding of the phenomenon of falling blocks, and may adapt any risk mitigation projects for this type of scenario.

Keywords: Rockfalls; Roughness; Chaos Theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais tipos de movimentos de massa: (A) Quedas, (B) Tombamento, (C) Escorregamento Rotacional, (D) Escorregamento Translacional, (E) Espalhamento Lateral e (F) Corridas (adaptado de Highland e Bobrowsky, 2008).	25
Figura 2 – Movimento de massa do tipo rastejo (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).	27
Figura 3 – Movimento do bloco rochoso em função da inclinação da encosta (Adaptado de Gálvez, 2012).	30
Figura 4 – Três zonas típicas de uma encosta onde a queda de blocos rochosos é ativa (modificado de Dorren et al., 2011).	31
Figura 5 – Exemplo de Queda de Blocos no maciço rochoso gnáissico, localizado na Rodovia Dr. Rogério Moura Estevão, RJ-130, Km 18,5, Bairro Venda Nova – RJ, que atingiu um dos sentidos da rodovia (Fotografia: Samara Santos, tirada em abril de 2023).	32
Figura 6 – Componentes da colisão de uma partícula em um plano inclinado (modificado de Giani et al., 2004).	34
Figura 7 – Tipos de colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica (Dias & Barroso, 2006).	35
Figura 8 – Colisão Parcialmente Inelástica (Ribeiro, 2013).	35
Figura 9 – Mecanismos de ruptura em taludes rochosos (modificado de Hoek e Londe, 1974).	38
Figura 10 – Ruptura Circular em maciço de ardósia muito alterado (Nunes, 2008 apud Villela, 2011).	38
Figura 11 – Ruptura Planar (Dutra e Parizzi, 2022).	39
Figura 12 – Ruptura em Cunha (modificado de Nunes, 2008 apud Villela, 2011).	39
Figura 13 – Ruptura por Tombamento (G1, 2022).	40
Figura 14 – Características geométricas de uma descontinuidade (adaptado de ISRM, 1981).	42
Figura 15 – Diagrama ilustrando o efeito de escala (adaptado de Hoek, 2002).	43
Figura 16 – Variação da escala das rugosidades de descontinuidades medidas por diferentes ensaios (adaptado de ISRM, 2007).	43
Figura 17 – Classificação da rugosidade através de perfis típicos de rugosidade	

(adaptado de ISRM, 2007).....	44
Figura 18 – Valores de JRC em função da amplitude das asperidades e do comprimento do perfil de rugosidade (Barton, 1982).	46
Figura 19 – Perfil típico de alteração para A – Rochas Metamórficas; B – Rochas Ígneas (Deere e Patton, 1971 apud Castanheira Neto, 2019).....	50
Figura 20 – Processo mecânico de fragmentação de blocos rochosos (GEO-RIO, 1999 apud Freitas, 2013).....	54
Figura 21 – Sistema de drenagem profunda associada a canaleta (Deflor Bioengenharia, 2019 apud Ribeiro, 2020).	55
Figura 22 – Aplicação do concreto projetado (Rocha, 2009).....	56
Figura 23 – Grelhas ancoradas em encosta rochosa na rodovia BR-040 em Petrópolis-RJ (Freitas, 2013).....	57
Figura 24 – Estabilização por telas metálicas e chumbadores (Geobrugg, 2012 apud Gálvez, 2012).	58
Figura 25 – Área de retenção de blocos (Gálvez, 2012).	59
Figura 26 – Falso túnel empregado na rodovia BR-277 junto a área susceptível a queda de blocos (GEO-RIO, 2014).....	59
Figura 27 – (a) Barreira de impacto rígida de concreto para amortecimento da energia (Cruz et al., 2004 apud GEO-RIO, 2014). (b) Barreira flexível (Geobrugg, 2009 apud Rocha, 2009).	60
Figura 28 – Esquema do método de análise da rugosidade usando dados de digitalização por uma malha triangular da fratura, e plotando o pólo para cada triângulo em uma projeção estereográfica (US Federal Highway Administration, 2008 apud Ulusay, 2015).....	64
Figura 29 – Método de análise da rugosidade através de perfis topográficos da fratura em diferentes direções, e processando os perfis de rugosidade para extrair os dados de rugosidade, como o JRC (US Federal Highway Administration, 2008 apud Ulusay, 2015).	64
Figura 30 – Registro da trajetória do bloco em diferentes intervalos durante o ensaio de campo (Giani et al., 2004).....	65
Figura 31 – Fahrböschung (F) e Minimum Shadow Angle (MSA) da encosta com depósito de tálus (modificado de Meissl, 1998 apud Ignacio, 2019).....	67
Figura 32 – Estrutura Fractal de Von Koch (De la Sota, 2004).....	72
Figura 33 – Atrator de Lorenz projetada nos planos xz e xy (De Oliveira & Mendes,	

2006).	73
Figura 34 – RocFall versão 8.018: página inicial do programa.	80
Figura 35 – Método de Probabilidade utilizado no RocFall 8.018.	83
Figura 36 – Método de Análise utilizado no RocFall 8.018.	84
Figura 37 – Alerta destacado no RocFall 8.018 após o resultado ser computado.	85
Figura 38 – Grapher versão 16.2.354: página inicial do programa.	86
Figura 39 – Resultado dos ajustes das distribuições de probabilidade: (a) Gaussiana e (b) Q-Exponencial Estendida.	87
Figura 40 – Layout do Grapher com o resultado em um gráfico $P(x)$ versus x .	87
Figura 41 – Condições de mecanismo – configuração padrão.	91
Figura 42 – Perfil transversal convexo com o local de lançamento do bloco.	92
Figura 43 – Propriedades dos blocos.	92
Figura 44 – Geometria do bloco utilizada para a simulação – BIM (Bloco Irregular Médio).	93
Figura 45 – Materiais constituintes da encosta com um exemplo de análise da rugosidade.	93
Figura 46 – Lançamento dos blocos computados.	94
Figura 47 – Exemplo de visualização dos resultados: Histograma de localização final dos blocos.	94
Figura 48 – Estudo de caso em perfil transversal convexo (sem escala).	96
Figura 49 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.	97
Figura 50 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.	97
Figura 51 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.	98
Figura 52 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.	98
Figura 53 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.	99
Figura 54 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.	99
Figura 55 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.	102

Figura 56 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.....	102
Figura 57 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.....	103
Figura 58 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.....	103
Figura 59 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.....	104
Figura 60 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.50 m.....	104
Figura 61 – Estudo de caso em perfil transversal côncavo (sem escala).	106
Figura 62 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.....	107
Figura 63 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.....	107
Figura 64 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.....	108
Figura 65 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.....	108
Figura 66 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.....	109
Figura 67 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.....	109
Figura 68 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.....	112
Figura 69 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.....	112
Figura 70 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.....	113
Figura 71 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.....	113
Figura 72 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.50 m.....	114
Figura 73 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para	

Rugosidade 0.50 m..... 114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos movimentos de massa (adaptado de Varnes, 1978).....	25
Tabela 2 – Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992). ..	26
Tabela 3 – Classificação dos fatores causadores dos movimentos de massa (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).....	48
Tabela 4 – Técnicas de estabilização de taludes rochosos ou blocos soltos (GEO-RIO, 2014). ..	53
Tabela 5 – Parâmetros para a modelagem geotécnica da encosta.....	90
Tabela 6 – Distribuições de Probabilidade Gaussiana individual – Perfil Convexo. ..	100
Tabela 7 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida individual - Perfil Convexo.....	100
Tabela 8 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida + Gaussiana (combinação linear) - Perfil Convexo.....	105
Tabela 9 – Distribuições de Probabilidade Gaussiana individual – Perfil Côncavo. ..	110
Tabela 10 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida individual - Perfil Côncavo.....	110
Tabela 11 – Distribuições de Probabilidade Q-exponencial estendida + Gaussiana agrupado - Perfil Côncavo.	115
Tabela 12 – Compilação dos resultados obtidos por meio do estudo de casos.	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Escala de velocidade de deslizamentos (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).	28
Quadro 2 – Determinação das características geométricas de uma descontinuidade (adaptada de Marques & Vargas Jr, 2022).	41
Quadro 3 – Parâmetros a serem investigados para o reconhecimento do grau de alteração intempérica da matriz (adaptado de Barroso, 1993).	51
Quadro 4 – Programas computacionais para análise de queda de blocos (Rocha, 2009).	69
Quadro 5 – Principais características dos programas computacionais de simulação de queda de blocos (Rocha, 2009).	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
BIG	Bloco Irregular Grande
BIM	Bloco Irregular Médio
BIP	Bloco Irregular Pequeno
F	<i>Fahrböschung</i>
GEO-RIO	Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
MCR	Método do Corpo Rígido
MDT	Modelo Digital do Terreno
MEL	<i>Maximum Energy Level</i>
MSA	<i>Minimum Shadow Angle</i>
NBR	Norma Brasileira
PGECIV	Programa de pós-graduação em Engenharia Civil
R	Coeficiente de Correlação
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Variável aleatória a da distribuição de probabilidade Gaussiana e q -Exponencial Estendida
b	Variável aleatória b da distribuição de probabilidade Gaussiana e q -Exponencial Estendida
c	Variável aleatória b da distribuição de probabilidade Gaussiana e q -Exponencial Estendida
CR_n	Coefficiente normal de restituição
CR_t	Coefficiente tangencial de restituição
e	Número de Euler (número exponencial)
k	Constante de Boltzmann
p_i	Probabilidade do sistema encontrar-se em seu i -ésimo estado
q	Parâmetro entrópico do grau de não-aditividade
S_B	Entropia de Boltzmann
S_{BG}	Entropia de Boltzmann-Gibbs
$S_{BG} (A)$	Entropia de Boltzmann-Gibbs do subsistema (A)
$S_{BG} (A + B)$	Entropia de Boltzmann-Gibbs do sistema (A + B)
$S_{BG} (B)$	Entropia de Boltzmann-Gibbs do subsistema (B)
S_q	Entropia Generalizada de Tsallis
$S_{q,\delta}$	Generalização da entropia generalizada de Tsallis
$V_{pos,n}$	Velocidade de saída (normal à superfície)

$V_{\text{pos,t}}$	Velocidade de saída (tangencial à superfície)
$V_{\text{pre,n}}$	Velocidade de entrada (normal à superfície)
$V_{\text{pre,t}}$	Velocidade de entrada (tangencial à superfície)
x	Variável das distribuições de probabilidades y_q e $y_{q(e-e)}$
W	Número de microestados de um sistema
y	Equação da reta de ajuste
y_q	Distribuição de probabilidade gaussiana
$y_{q(e-e)}$	Distribuição de probabilidade q-exponencial estendida
o	Graus
δ	Parâmetro entrópico de ajuste

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.1 Tipos de movimentos gravitacionais de massa	24
1.1.1 Queda de blocos rochosos	29
1.2 Mecanismos de instabilização do maciço rochoso	36
1.3 Propriedades de resistência de descontinuidades dos maciços rochosos	40
1.3.1 Caracterização da Rugosidade.....	42
1.4 Mecanismos causadores de queda de blocos	47
1.5 Técnicas mitigadoras para quedas de blocos	51
1.5.1 Medidas Ativas.....	53
1.5.2 Medidas Passivas	57
2 METODOLOGIA APLICADA	61
2.1 Métodos de análise para queda de blocos	61
2.1.1 Métodos experimentais e empíricos	62
2.1.2 Métodos numéricos.....	67
2.2 Teoria do Caos	69
2.2.1 Sistemas lineares e não lineares	70
2.2.2 Entropia de Boltzmann-Gibbs	74
2.2.3 Entropias generalizadas	76
3 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTUDO DE QUEDA DE BLOCOS	79
3.1 Programa numérico RocFall	79
3.2 Programa Grapher para distribuições probabilísticas	84
3.3 Parâmetros adotados para as análises	88
3.4 Estudo de Cenário	95
3.4.1 Perfil Convexo.....	96
3.4.2 Perfil Côncavo.....	105
3.4.3 Resumo das análises dos resultados	115
4. CONCLUSÕES	119
4.1 Sugestões de Trabalhos Futuros	120
REFERÊNCIAS	122

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano desordenado, em muitas cidades brasileiras, tem levado a ocupação irregular das encostas, com moradias precariamente construídas em áreas de risco, suscetíveis a acidentes relacionados a diversos tipos de movimento gravitacional de massa, o que têm gerado significativos prejuízos econômicos, sociais e ao meio ambiente. Tais movimentos de massa têm sido agravados pela ação antrópica, podendo ser observados, principalmente, em períodos de chuva, típicos de regiões de clima tropical. Uma maneira de reduzir o impacto destes fenômenos é a realização de gestão de risco, contendo uma metodologia eficiente de avaliação.

Caso típico relacionado à extrema vulnerabilidade de moradias localizadas em áreas de risco é o do município de Petrópolis – RJ. O desastre mais recente nesta região ocorreu no verão de 2022, nos dias 15 de fevereiro e 20 de março. As condições climáticas desfavoráveis, que culminaram com a deflagração de movimentos gravitacionais de massa de diversos tipos, ocasionaram um total de 241 vítimas fatais (Blaudt *et. al*, 2023).

Movimentos de massa são fenômenos que ocorrem de formas variadas, podendo ser lentos e graduais, ao longo de um período prolongado, ou, até mesmo, rápidos e catastróficos. Sua ocorrência é influenciada por diversos agentes, incluindo condições climáticas e hidrológicas, uso e ocupação do solo (ausência de vegetação intensificando os processos erosivos), comportamento geológico-geomorfológico (propriedades do solo e da rocha), declividade da encosta (topografia), parâmetros geomecânicos, solos com baixa resistência ao cisalhamento, entre outros, que geram o mecanismo de transporte de solos e rochas.

Assim sendo, enfatiza-se, neste estudo, o movimento de massa do tipo queda de blocos rochosos, apresentando velocidades e energias cinéticas elevadas, podendo instabilizar um grande volume de material, de litologia e geometrias variadas. Seu alto nível de complexidade, ocorrendo de forma repentina e sem o indicativo de movimentação inicial, confere a este fenômeno uma grande dificuldade de previsão, sendo ainda muito pouco compreendidos.

De acordo com Gerscovich (2016), a instabilidade no maciço rochoso pode ocorrer a partir de processos intempéricos (redução da coesão e variação nas

poropressões), reduzindo a resistência ao cisalhamento do material rochoso, além de ações antrópicas, que viabiliza a sua deflagração.

Diversos parâmetros condicionantes podem influenciar na trajetória e alcance dos blocos ao longo da encosta, especialmente os coeficientes de restituição normal e tangencial dos materiais envolvidos no processo, geometria dos blocos e da encosta, velocidade angular dos blocos durante o lançamento, ângulo de fricção e, principalmente, rugosidade da superfície.

Portanto, é de suma importância realizar estudos a respeito dos movimentos de massa do tipo queda de blocos, de modo a compreender seus fatores deflagradores e melhores métodos de análise (experimentais, empíricos e analíticos) para, a partir disso, realizar uma gestão de risco de desastres eficiente. Planejamento urbano adequado, avaliação apropriada das áreas de risco e medidas de proteção cabíveis estão, certamente, incluídas no rol de prevenção e mitigação em regiões suscetíveis a instabilidades de encostas.

Dando continuidade à linha de pesquisa de Ignácio (2019), Ribeiro (2020) e Araújo (2021), tem-se utilizado, para um melhor entendimento deste complexo fenômeno, a Teoria do Caos, na investigação de sistemas marcadamente não-lineares, tais como os encontrados no processo de queda de blocos. Desta forma, este trabalho visa compreender a influência da rugosidade da superfície de contato bloco instável – encosta rochosa, cuja influência na trajetória e alcance dos blocos instáveis passará a ser investigada. O auxílio indispensável de programas numéricos permitirá simular diversas possibilidades de movimentos de queda de blocos, envolvendo a variação da rugosidade e a análise de suas respostas.

Motivação

Tratando-se de um fenômeno extremamente complexo, faz-se necessário estudar novos métodos que auxiliem na compreensão da influência de fatores geológicos, geomorfológicos e geomecânicos, na investigação de eventuais comportamentos regulares, visando a sua previsibilidade. Neste sentido, análises

probabilísticas constituem-se numa ferramenta matemática indispensável, no intuito de sistematizar e interpretar os resultados experimentais, sob a ótica da Teoria do Caos.

Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa de dissertação é realizar uma análise do processo de queda de blocos utilizando a metodologia da Teoria do Caos, compreendendo a influência da rugosidade da encosta na complexa dinâmica deste tipo de movimento de massa. Este estudo foi aplicado em dois perfis geotécnicos hipotéticos de encostas rochosas, um de geometria côncava, e o outro, convexa. Desta forma, foram realizadas simulações de quedas de blocos, variando os valores da rugosidade da encosta, segundo o espaçamento e amplitude, visando interpretar o comportamento deste processo de instabilização segundo sua trajetória e alcance dos blocos rochosos, e verificar as características destes sistemas não lineares.

Portanto, a fim de atingir o objetivo desta dissertação, foram desenvolvidos seis tópicos específicos:

1. Estudar o movimento de massa do tipo queda de blocos e investigar a influência da rugosidade da encosta;
2. Obter as distribuições probabilísticas da localização final de blocos rochosos encosta abaixo, para diferentes valores de rugosidade, empregando dois perfis de encostas, uma côncava, e a outra, convexa. As simulações numéricas foram realizadas no programa RocFall versão 8.018, e os perfis aplicados foram baseados em estudos preliminares de Ignacio (2019);
3. Adequar os resultados obtidos das distribuições probabilísticas da localização final de blocos com as fórmulas das distribuições probabilísticas gaussiana e q -exponencial estendida relacionadas a Teoria do Caos, a fim de obter gráficos que melhor representem os ajustes estatísticos, além dos resultados adequados dos parâmetros de ajustes e coeficiente de correlação;
4. Aplicabilidade da Teoria do Caos aos resultados experimentais citados anteriormente, e identificar, segundo os parâmetros de ajustes (q e δ) e

coeficiente de correlação (R), o tipo de comportamento caótico que ocorre em cada situação;

5. Interpretar os resultados obtidos e compará-los com os resultados apresentados por Ignacio (2019);
6. Averiguar se com os resultados obtidos nesta pesquisa utilizando a metodologia da Teoria do Caos, podem ser utilizados em diversas análises do comportamento de queda de blocos em um sistema não linear.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi estruturada em quatro capítulos, contendo também a introdução e referências bibliográficas. No capítulo inicial é feita uma breve introdução sobre o tema de dissertação, relatando também a motivação e os objetivos que norteiam esta pesquisa.

O capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre conceitos e classificação de movimentos de massa, dando destaque para a queda de blocos rochosos. Serão destacados os processos de instabilidade do maciço rochoso; as propriedades de resistência de descontinuidades, com o foco principal no parâmetro da rugosidade; mecanismos causadores de queda de blocos; e, por fim, as técnicas mitigadoras para este tipo de fenômeno em destaque.

No capítulo 2 serão descritos os tipos de metodologias aplicadas para diferentes estudos de movimento de massa do tipo queda de blocos, sendo eles métodos experimentais e métodos numéricos. A relevância maior deste capítulo será dada na aplicabilidade da metodologia da Teoria do Caos e suas principais características de sistemas não lineares caóticos.

O capítulo 3 apresenta os resultados obtidos no estudo de quedas de blocos, com o auxílio dos programas RocFall versão 8.018 e Grapher versão 16.2.354. Mais especificamente, as distribuições probabilísticas da localização final dos blocos rochosos irregulares no pé dos taludes, gaussiana e q-exponencial estendida, serão utilizadas no ajuste aos dados experimentais, em um cenário de dois perfis de encostas com superfícies côncavas e convexas, como já se observou. Diferentes rugosidades da

encosta serão estudadas a fim de compreender o comportamento caótico dos blocos ao longo da encosta durante a sua colisão com a superfície, considerando sua trajetória e alcance final. Os resultados serão analisados e comparados com os da pesquisa de Ignacio (2019).

No capítulo 4 serão abordadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Concluindo a dissertação, serão destacadas as referências bibliográficas que fundamentaram esta pesquisa.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados movimentos de massa tipo queda de blocos rochosos, destacando os conceitos e classificações destes eventos, os processos de instabilidade e seus mecanismos causadores, as propriedades geomecânicas das rochas e suas descontinuidades, e as medidas de mitigação do risco, dispendo-se de uma melhor compreensão sobre o tema.

1.1 Tipos de movimentos gravitacionais de massa

Os movimentos gravitacionais de massa são classificados na literatura de diversas formas, em razão da complexidade dos processos envolvidos (geológicos, geomorfológico, hidrogeológicos, mecânicos e químicos) e a diversidade de ambientes de ocorrência. São considerados como processos de transporte de materiais como rochas, sedimentos e solos ao longo de uma encosta (taludes naturais), induzidos pela força gravitacional e por ação concomitante ou isolada de fatores naturais e ações antrópicas (Dias & Barroso, 2006).

Estes movimentos podem se manifestar lenta a moderadamente, como no caso de deslizamentos/escorregamentos rotacionais, podendo atingir altas velocidades, como no caso do fluxo de detritos/corridas. Além disso, podem se manifestar como mecanismos híbridos, comuns a dois ou mais tipos de movimento, tornando-os mais complexos.

A Tabela 1 mostra a classificação dos movimentos de massa estabelecida por Varnes (1978), assinalando os seus principais tipos e materiais envolvidos, de forma simples e mais utilizada, exemplificados na Figura 1. No âmbito nacional, a classificação mais utilizada é a estabelecida por Augusto Filho (1992), visando a geologia regional (Tabela 2), destacando-se as dinâmicas dos processos, geometrias dos planos de ruptura e os materiais envolvidos, bem como sua diferenciação mútua.

Tabela 1 – Classificação dos movimentos de massa (adaptado de Varnes, 1978).

Tipo de movimento		Tipo de Material		
		Rocha	Solo	
			Grosseiro	Fino
Quedas		Blocos de rocha	Detritos	Terra
Tombamentos		Blocos de rocha	Detritos	Terra
Escorregamentos	Rotacional (circular)	Desmoronamento de Blocos de rocha	Desmoronamento de detritos	Desmoronamento de terra
	Translacional (planar)	Deslizamento de Blocos de rocha	Deslizamento de detritos	Deslizamento de terra
Espalhamentos Laterais		Blocos de rocha	Detritos	Terra
Corridas / Escoamentos		Blocos de rocha (Rastejo profundo)	Detritos (Rastejo de solo)	Terra (Rastejo de solo)
Complexos: Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos				

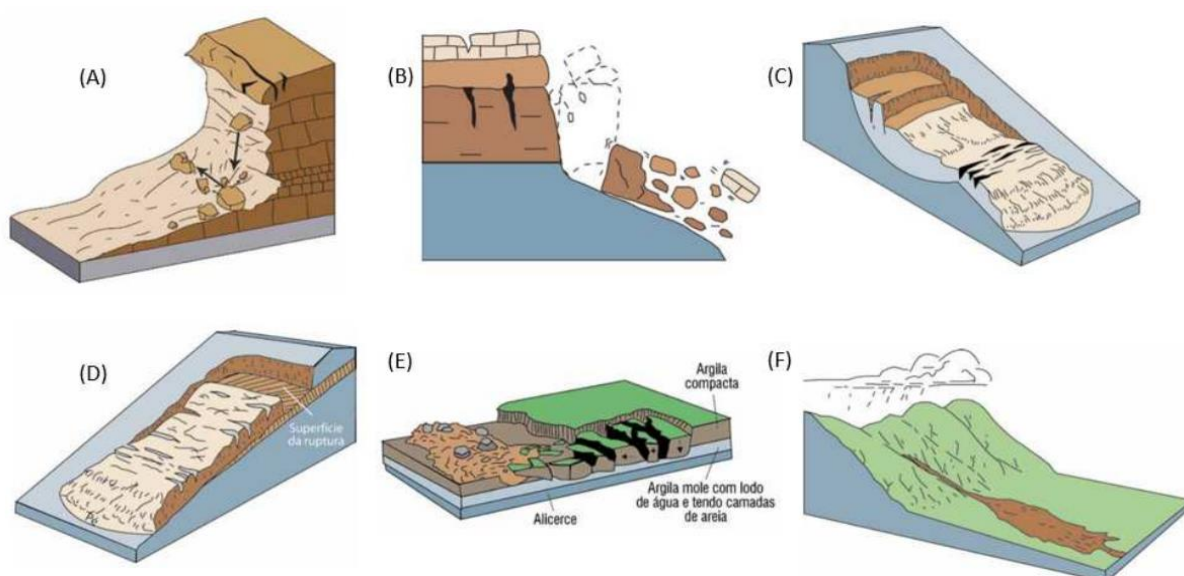


Figura 1 – Principais tipos de movimentos de massa: **(A)** Quedas, **(B)** Tombamento, **(C)** Escorregamento Rotacional, **(D)** Escorregamento Translacional, **(E)** Espalhamento Lateral e **(F)** Corridas (adaptado de Highland e Bobrowsky, 2008).

Tabela 2 – Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992).

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo	<p>Vários planos de deslocamento (internos); Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; Material: solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; Geometria: indefinida; Com o aumento da velocidade pode se transformar em um escorregamento.</p>
Escorregamento	<p>Poucos planos de deslocamento (externos); Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); Pequenos a grandes volumes de material; Geometria e materiais variáveis: 1) <u>Planares ou Translacional</u>: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; 2) <u>Circulares ou Rotacionais</u>: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; 3) <u>Em Cunha</u>: solos e rochas com dois planos de fraqueza.</p>
Queda de Blocos	<p>Sem planos de deslocamento; Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; Velocidades muito altas (vários m/s); Material: rochoso; Pequenos a médios volumes; Geometria variável: lascas, placas, bloco, etc.; Rolamento de matacão; Tombamento.</p>
Corridas	<p>Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; Desenvolvimento ao longo das drenagens; Velocidades médias a altas; Mobilização de solo, rocha, detritos e água; Grandes volumes de material; Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas; Outros termos utilizados conforme a viscosidade e o tipo de material mobilizado: fluxos de terra, fluxos de lama e fluxo de detritos.</p>

Assim, a Figura 2 exemplifica o movimento de massa do tipo rastejo, cuja visualização pode ser notada pela inclinação de árvores, cercas ou postes.

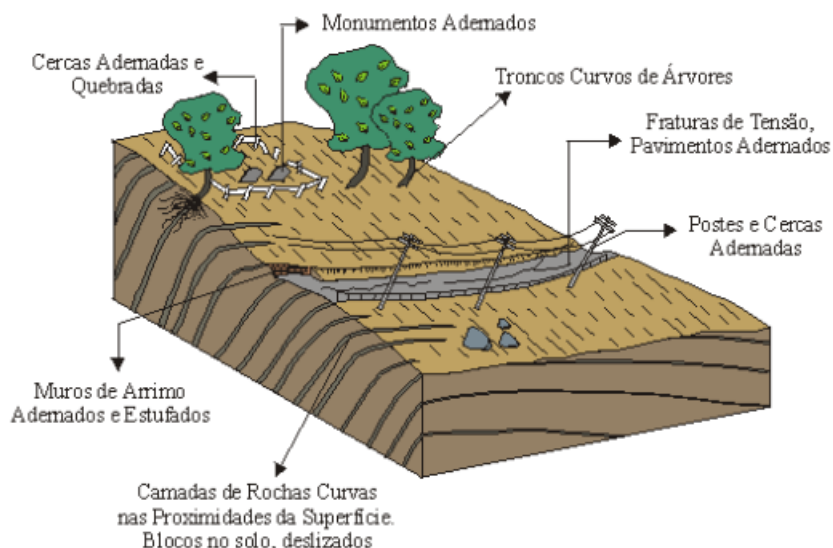


Figura 2 – Movimento de massa do tipo rastejo (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).

De acordo com Cruden e Varnes (1996), há situações reais em que uma maior quantidade de informações sobre as condições do movimento de massa pode ser necessária, de modo a diferenciá-los. Termos referidos a atividade e características do movimento, tais como: estado, distribuição, estilo, velocidade, condição de umidade, material e o seu tipo, contribuem para auxiliar na definição mais específica do mecanismo analisado. Estas condições de movimento podem ser observadas a seguir, baseada na proposta de Varnes (1978):

- i. **estado:** refere-se ao comportamento do deslizamento em relação a diferentes tempos de análise (ativo, reativo, suspenso e inativo);
- ii. **distribuição:** tenta explicar as possíveis direções da massa em movimento (em avanço, retrogressivo, com alargamento, com ampliação, confinado, com diminuição e em movimento);
- iii. **estilo:** indica de que maneira os diferentes movimentos contribuem no deslizamento (complexo, composto, múltiplo, sucessivo e simples);

- iv. **velocidade:** constitui-se em um dos principais fatores ao se associar os tipos de danos que os movimentos de massa possam causar. Também permite estabelecer se o processo comportará ou não certos tipos de intervenções ou se, pelo menos, a evacuação poderá ser feita. Essas informações podem ser representadas no Quadro 1, destacando a escala de velocidades do movimento e os prováveis danos associados;
- v. **teor de umidade:** orientação de tipo qualitativa, e estimativa da quantidade de água contida na massa deslocada. Poderá ajudar na definição de fenômenos que envolvam principalmente solos (seco, úmido, encharcado e muito encharcado);
- vi. **material:** para o caso de rochas, este termo indica o estado do material no início do movimento de massa. Em solos, permite definir um pouco melhor o material predominante da massa deslocada (rocha e solo: terra ou detritos);
- vii. **tipo:** um dos elementos básicos para a classificação do movimento de massa junto ao tipo de material. Isto representa a forma como o movimento é distribuído ao longo da massa deslocada (queda de blocos, tombamento, deslizamento, escoamento e fluxo/corrida).

Quadro 1 – Escala de velocidade de deslizamentos (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).

Classe	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade típica	Prováveis danos associados
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/s	Catastrófico. Construções destruídas pelo impacto, muitas mortes, mínima possibilidade de fuga.
6	Muito rápido	5×10^1	3 m/min	Algumas mortes. Devido à alta velocidade não é possível a fuga de todas as pessoas.
5	Rápido	5×10^{-1}	1,8 m/h	Evacuação possível. Destruição de estruturas, bens e equipamentos.
4	Moderado	5×10^{-3}	1,3 m/mês	Algumas estruturas temporárias podem ser temporariamente mantidas.
3	Lento	5×10^{-5}	1,6 m/ano	Obras de remediação podem ser executadas durante o movimento. Estruturas não sensíveis com manutenção frequente.
2	Muito lento	5×10^{-7}	16 mm/ano	Algumas estruturas permanentes não são danificadas.
1	Extremamente lento			Imperceptível sem instrumentação. Construções são possíveis se tomadas algumas precauções.

Portanto, é de extrema importância se ter um entendimento preciso dos mecanismos de movimentação de massa, conhecimento geográfico amplo das áreas de atingimento e propensas a novos deslizamentos, assim como uma percepção da frequência em que estes eventos ocorrem, a fim de aprimorar as intervenções necessárias e mitigar o risco em questão.

1.1.1 Queda de blocos rochosos

Destaca-se nesta seção terciária, a importância de se entender o comportamento deste tipo de movimento de massa, tendo em vista o alto nível de prejuízos e fatalidades causadas pelo evento, tanto em rodovias, quanto em áreas urbanas.

A queda de blocos é o movimento gravitacional de massa no qual um ou mais blocos de rocha (ou matacões), lascas, placas, de variados volumes e litologias, se desprendem do maciço rochoso e deslocam-se ao longo de uma superfície por meio de queda livre, saltação ou rolamento (Figura 3). As características da superfície topográfica, principalmente a declividade e a rugosidade, assim como o tamanho e a geometria do bloco, e o material da superfície, exercem um importante papel na definição do processo envolvendo a trajetória e alcance do bloco rochoso (Ribeiro, 2008). Sua ocorrência pode ser de forma abrupta em encostas, conferindo grande dificuldade na previsão de seu início ou deflagração, e com condições de alta velocidade e energia cinética, podendo ser altamente destrutivo. Pode-se compreender também que o bloco que já foi mobilizado e transportado, tem potencial de ser remobilizado, tal como em depósito de tálus, por exemplo (CPRM, 2018).

Como destacado por Santos (2019), é possível observar três zonas importantes que envolvem o deslocamento de blocos, podendo interpretar as trajetórias dos mesmos e, assim, identificar uma distância segura para ocupação na proximidade de encostas (Figura 4). A primeira zona, ou zona de desprendimento, é a de liberação do material inicial, na qual se encontra o afloramento do maciço rochoso. Em seguida, a zona de transição, é a de mobilização do material rochoso, ao longo da qual o bloco rochoso se choca com a sua superfície e apresenta maior número de impactos. Por fim,

encontra-se a zona de deposição, região em que os blocos são depositados, com energia cinética nula.

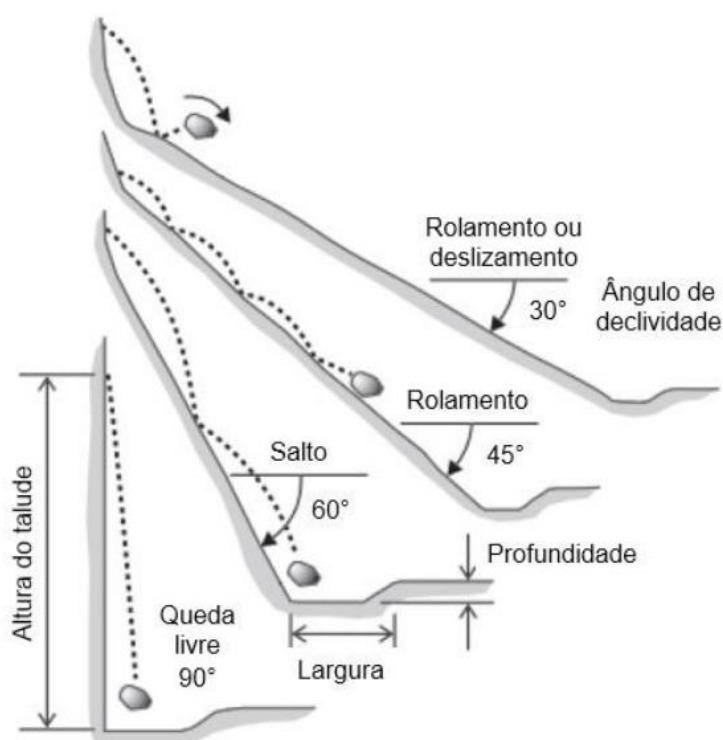


Figura 3 – Movimento do bloco rochoso em função da inclinação da encosta (Adaptado de Gálvez, 2012).

O movimento predominante é o de queda livre, no qual o bloco rochoso pode desenvolver movimentos de translação e rotação, que influenciam em sua trajetória, pois podem atingir as superfícies com rugosidades distintas e, assim, alterar o sentido esperado em relação ao seu movimento prévio (Azzoni *et al.*, 1995).

Neste sentido, a declividade do maciço rochoso também é um importante fator para o movimento, pois, com a sua diminuição, o bloco, ao se chocar com a superfície rugosa do maciço rochoso, pode dar origem ao movimento do tipo salto, tendendo a se fragmentar e perder energia cinética a cada novo impacto (Bozzolo e Pamini, 1986 *apud* Ignacio, 2019).

Com a diminuição gradual da declividade, o bloco altera o seu movimento para rolamento, ficando a maior parte do tempo em contato com a superfície no decorrer da sua trajetória.

Por fim, caso a declividade da superfície do maciço rochoso não varie, o bloco irá continuar com seu movimento de rolamento até cessar, devido à perda de energia por fricção com a superfície. No entanto, se houver o aumento da declividade na encosta ao longo de sua trajetória, o movimento poderá mudar novamente para saltação ou queda livre (Rocha, 2009).

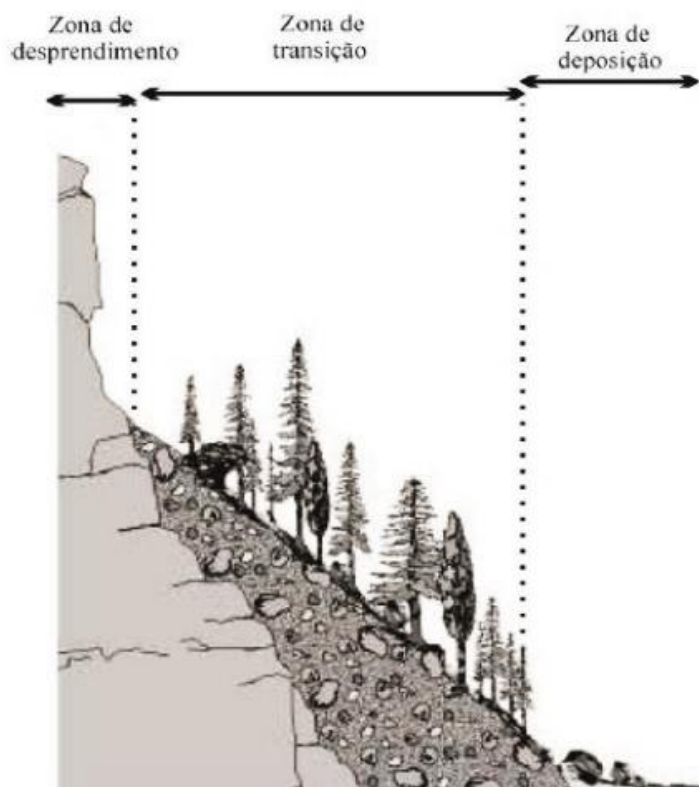


Figura 4 – Três zonas típicas de uma encosta onde a queda de blocos rochosos é ativa (modificado de Dorren *et al.*, 2011).

Como observado por Giani (1992) *apud* Ignacio (2019), a queda de blocos ocorre devido a presença de descontinuidades no maciço rochoso, tendo influência de processos intempéricos físicos e químicos, os quais alteram as forças atuantes e, principalmente, a sua resistência. Assim sendo, blocos ou lascas de tamanhos variados

são mobilizados das encostas rochosas, tendendo a desenvolver não somente um, mas dois ou mais tipos de movimentos, dependendo da declividade da encosta, como constatado anteriormente e destacado na Figura 5.



Figura 5 – Exemplo de Queda de Blocos no maciço rochoso gnáissico, localizado na Rodovia Dr. Rogério Moura Estevão, RJ-130, Km 18,5, Bairro Venda Nova – RJ, que atingiu um dos sentidos da rodovia (Fotografia: Samara Santos, tirada em abril de 2023).

Naturalmente, os blocos menores apresentam energia cinética menor com relação aos blocos de maiores dimensões, percorrendo menores distâncias (Ignacio, 2019), como podem ser observados anteriormente nas zonas de deslocamento do bloco.

Segundo Rocha (2009), com relação aos materiais da superfície da encosta, as superfícies que contêm vegetação de grande porte apresentam maior capacidade de absorção de energia cinética dos blocos instáveis, pois este tipo de vegetação é considerado como uma barreira natural, facilitando a interrupção do movimento dos

blocos. No entanto, nos casos em que não há solo ou vegetação na superfície da encosta, ou mesmo em pedreiras desativadas, os blocos, ao se chocarem com a encosta, não perdem energia e continuam em movimento, podendo atingir grandes distâncias.

Portanto, caso não haja barreiras naturais (vegetação) ou artificiais (construídas), o movimento ao longo da encosta pode eventualmente vir a atingir áreas urbanas ou equipamentos de infraestrutura urbana, podendo ocasionar riscos e/ou prejuízos humanos e econômicos.

Ashayer (2007) assinala que o coeficiente de restituição é um parâmetro responsável pela dissipação da energia do bloco, quando da colisão com a superfície rugosa da encosta (Figura 6), sendo, no entanto, crítico e de difícil obtenção.

Para choques oblíquos às encostas, os valores dos coeficientes são obtidos por meio das seguintes relações:

- Coeficiente de Restituição Normal – razão entre a velocidade normal de saída ($V_{pos,n}$) e a velocidade normal de entrada ($V_{pre,n}$) (equação (1));
- Coeficiente de Restituição Tangencial – razão entre a velocidade tangencial de saída ($V_{pos,t}$) e a velocidade tangencial de entrada ($V_{pre,t}$) (equação (2)).

De acordo com Rocha (2009), estes coeficientes adimensionais variam em função do material que compõe a superfície da encosta, podendo seus valores serem obtidos a partir de retroanálise de movimentos, medidas experimentais de lançamentos de blocos *in situ*, testes em laboratórios ou correlações com algumas propriedades dos materiais envolvidos. Sabe-se também que o coeficiente de restituição tangencial geralmente é igual ou maior do que o coeficiente de restituição normal.

$$CR_n = \frac{V_{pos,n}}{V_{pre,n}} \quad (1)$$

$$CR_t = \frac{V_{pos,t}}{V_{pre,t}} \quad (2)$$

Ademais, o coeficiente de restituição pode tomar valores entre zero e um, na dependência do tipo de colisão realizada (Figuras 7 e 8):

1. **Colisão Perfeitamente Elástica** - o bloco ao se chocar com a superfície não perde energia cinética e, portanto, seu coeficiente é igual a 1;
2. **Colisão Perfeitamente Inelástica** - o bloco ao se chocar com a superfície perde totalmente a energia cinética e, portanto, seu coeficiente é igual a 0;
3. **Colisão Parcialmente Inelástica** - a energia cinética é perdida gradualmente durante sucessivos choques do bloco com a superfície e, portanto, seu coeficiente varia de 0 a 1. Esse é o caso típico de blocos rochosos.

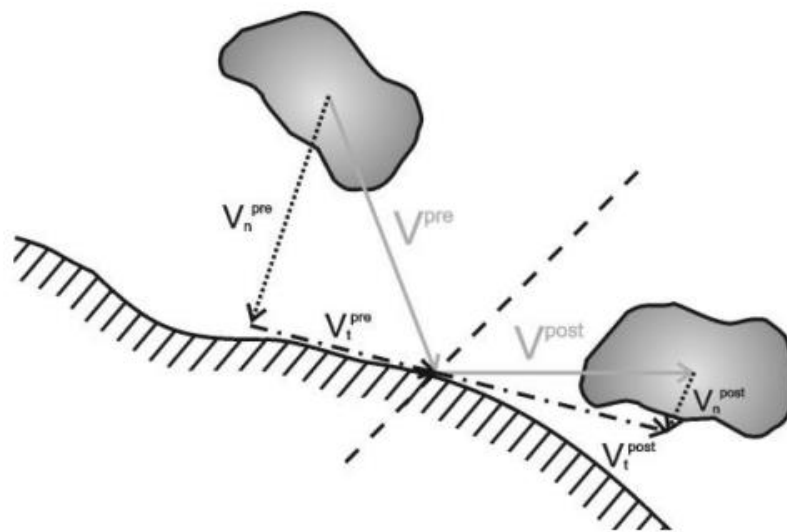


Figura 6 – Componentes da colisão de uma partícula em um plano inclinado (modificado de Giani *et al.*, 2004).

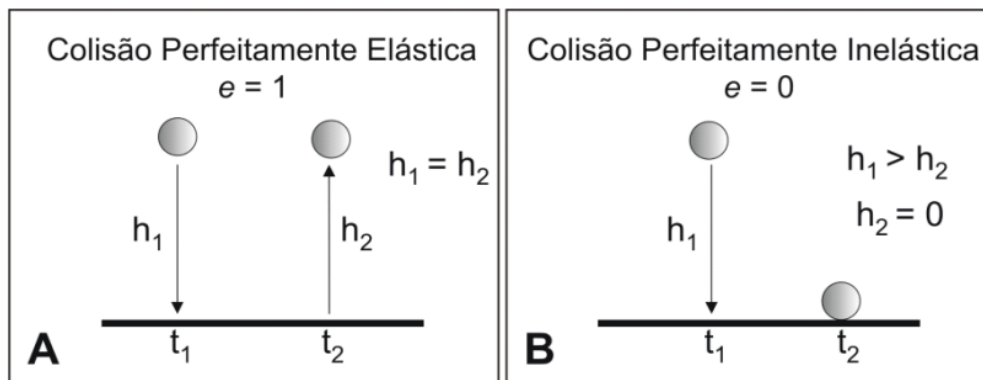


Figura 7 – Tipos de colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica (Dias & Barroso, 2006).

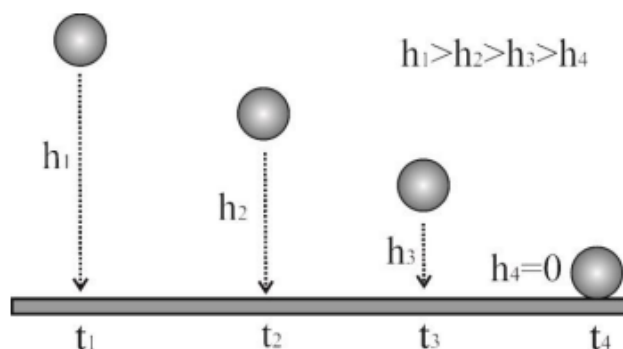


Figura 8 – Colisão Parcialmente Inelástica (Ribeiro, 2013).

Os blocos rochosos ao longo da trajetória apresentam uma altura cada vez menor, após cada colisão com a superfície, havendo a dissipação total de energia cinética, podendo chegar ao valor 0, como pode ser observado em uma colisão parcialmente inelástica. Logo, quanto maior a energia cinética dissipada, menor será o coeficiente de restituição (Araujo, 2021).

Assim, a presença de discontinuidades no maciço rochoso (que influencia no tamanho dos blocos), o material da superfície da encosta e a velocidade de impacto são fatores preponderantes para a fragmentação dos blocos, sendo capaz de modificar o volume, tamanho e peso original dos mesmos (Giacomini *et al.*, 2008 *apud* Ignacio, 2019).

Ainda segundo Ignacio (2019), é imprescindível o conhecimento acerca do problema em análise e a adoção dos parâmetros mais realísticos, aprimorando os

estudos da trajetória e energia cinética, pois pequenas variações das propriedades do movimento de queda de blocos podem remodelar o comportamento do evento estudado. Portanto, é extremamente necessário ter total confiabilidade nos resultados em questão, a fim de planejar soluções eficientes para mitigação dos danos causados.

1.2 Mecanismos de instabilização do maciço rochoso

Os mecanismos de instabilização dos maciços rochosos são condicionados pela resistência da rocha intacta, bem como pelas propriedades de suas descontinuidades, sua orientação e distribuição com relação a encosta (Silveira, 2017). Freitas (2013) ressalta que em maciços rochosos resistentes, as descontinuidades condicionam os mecanismos de ruptura. Portanto, as descontinuidades influenciam nas propriedades geotécnicas relevantes dos maciços rochosos, tais como resistência, deformabilidade e a permeabilidade, influenciando significativamente na estabilidade da encosta (Marques & Vargas Jr, 2022).

A instabilidade dos maciços rochosos pode ocorrer não somente pelas propriedades geotécnicas dos materiais constituintes, caracterizadas pelas famílias de descontinuidades, mas também por ação da força da gravidade, a forma da encosta, peso específico da rocha, as tensões internas, coesão, abalos sísmicos e outros movimentos dinâmicos (Guimarães, 2016).

Desta forma, serão abordados, a seguir, os principais tipos de rupturas em maciços rochosos, tais como: planar, circular, em cunha e em tombamento, podendo-se também considerar uma combinação de um ou mais tipos de mecanismos de ruptura (Figura 9). Neste sentido, a queda de blocos é um dos tipos de rupturas evidenciado neste trabalho, cuja discussão foi realizada na subseção 1.1.1, devido a sua extrema importância na problemática de movimento gravitacional de massa.

A descrição destes mecanismos de rupturas é apresentada por Hoek e Londe (1974), Norrish e Wyllie (1996) e Cruden e Varnes (1996).

- a) **Rupturas Circulares:** ocorrem em maciços rochosos compostos de rocha branda (baixa resistência) ou em rocha muito alterada (ou com alto grau de

fraturas), cujo comportamento é semelhante aos de solos isotrópicos, no qual os planos de descontinuidade não controlam o comportamento mecânico. Sua superfície de ruptura tem um formato conchoidal (Figura 10);

- b) **Rupturas Planares:** ocorrem quando uma família de descontinuidades se encontra na mesma direção que intercepta a face do talude, sendo o ângulo de mergulho deste maior do que o ângulo da superfície de descontinuidade. Sua superfície de ruptura pode ser uma falha, estratificação do maciço rochoso ou uma junta de alívio, ocorrendo sob a ação da gravidade (Figura 11);
- c) **Rupturas em Cunha:** ocorrem em maciços rochosos com duas ou mais famílias de descontinuidades, cuja interseção mergulha em direção ao talude, mantendo o formato de uma cunha. As duas descontinuidades precisam aflorar na face do talude para que a ruptura intercorra, correspondendo às mesmas condições existentes para a ruptura planar (Figura 12);
- d) **Rupturas por Tombamentos:** ocorrem quando o maciço rochoso apresenta descontinuidades com mergulho vertical ou subvertical, estando paralelas ao talude. Consiste basicamente em uma rotação ou basculamento que se dá para frente e para fora do talude, em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. A velocidade deste tipo de movimento pode ocorrer de forma extremamente lenta a extremamente rápida (Figura 13).

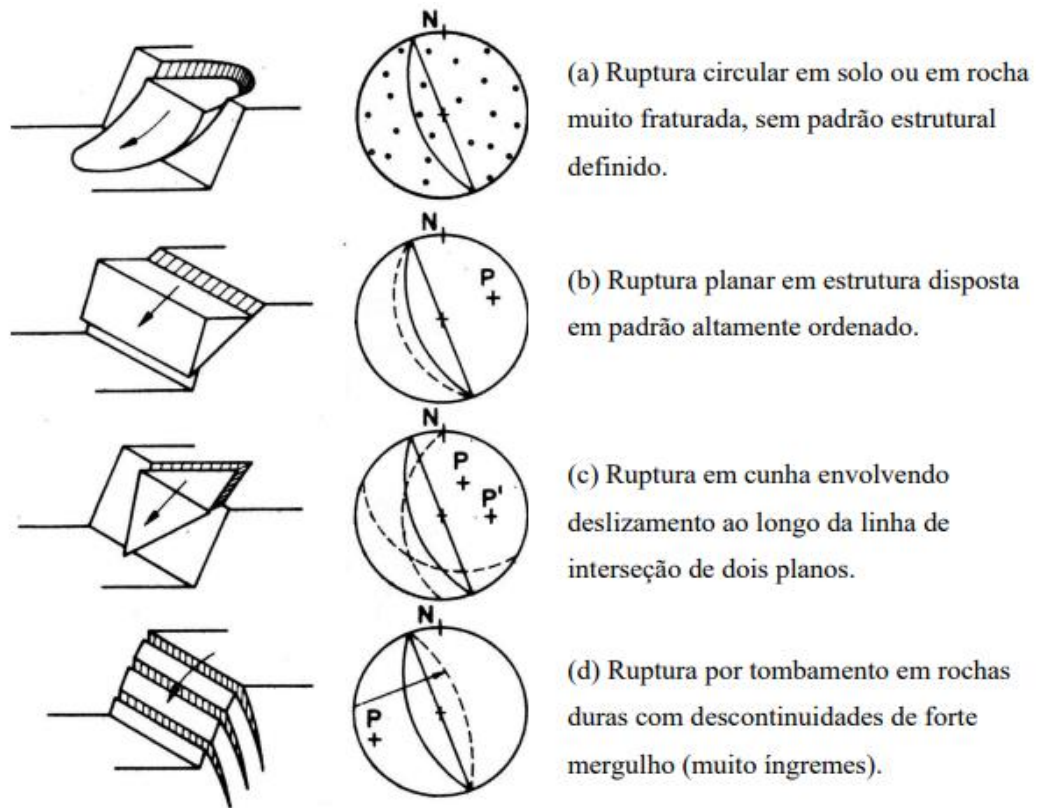


Figura 9 – Mecanismos de ruptura em taludes rochosos (modificado de Hoek e Londe, 1974).



Figura 10 – Ruptura Circular em maciço de ardósia muito alterado (Nunes, 2008 *apud* Villela, 2011).



Figura 11 – Ruptura Planar (Dutra e Parizzi, 2022).



Figura 12 – Ruptura em Cunha (modificado de Nunes, 2008 *apud* Villela, 2011).



Figura 13 – Ruptura por Tombamento (G1, 2022).

1.3 Propriedades de resistência de descontinuidades dos maciços rochosos

A estabilidade do maciço rochoso é governada pela complexa combinação relacionada às propriedades da rocha (coesão interna, deformabilidade, permeabilidade e resistência à tração), das descontinuidades e das condições na qual a encosta rochosa aflora, sendo influenciada pela ação do intemperismo (Nunes, 2008 *apud* Villela, 2011).

Para a mecânica das rochas, compreender o comportamento da rocha frente aos campos de tensão-deformação-deslocamento do ambiente físico ao qual ele se submete, é de suma importância para enfrentar os problemas causados pela instabilidade das encostas. Assim sendo, no aspecto estrutural da rocha, são considerados significativos a seleção geológica do terreno, o controle das propriedades dos materiais, as medidas de tensões iniciais e a análise do maciço rochoso por meio de gráficos e métodos dos variados modos de ruptura (Marques & Vargas Jr, 2022).

Ademais, pode-se definir uma rocha como material sólido consolidado, formado naturalmente por agregados de minerais e outros componentes (vidro vulcânico, gás, carvão, por exemplo) que se desenvolvem em grandes massas ou fragmentos (Marques & Vargas Jr, 2022). As rochas, também chamadas de matriz rochosa, podem ser classificadas como ígnea, metamórfica e sedimentar, sendo cada uma originada por características únicas, mas que são transformadas ao longo do tempo geológico pelo ciclo das rochas, podendo ser alteradas ou destruídas, de acordo com as condições físicas existentes no ambiente.

No aspecto estrutural da rocha, descreve-se o maciço rochoso como um meio descontínuo (anisotrópico), formado pelo material rochoso e pelas discontinuidades que o atravessam. Os blocos de rocha intacta (ou sã) são delimitados por vários tipos de superfície, tais como: fissuras, juntas, falhas, foliações, planos de acamamento.

Segundo a ISRM (1981), as discontinuidades são os planos de fraqueza em maciços rochosos, interrompendo a continuidade da rocha e possuindo resistência nula à tração ou muito baixa. Elas geralmente ocorrem em famílias, podendo ter forma bastante regular ou não, ou seja, são conjuntos de superfícies aproximadamente paralelas entre si. As principais características geométricas de uma discontinuidade são representadas no Quadro 2 e ilustrados na Figura 14.

Quadro 2 – Determinação das características geométricas de uma discontinuidade (adaptada de Marques & Vargas Jr, 2022).

Característica geométrica	Técnica de medida
Orientação (direção e mergulho)	Bússola geológica
Espaçamento	Fita graduada (métrica)
Persistência	Fita graduada (métrica)
Rugosidade	Ábacos de referência
Resistência da parede	Martelo de Schmidt
Abertura	Escala
Material de preenchimento	Observação tátil-visual
Condições de fluxo (Percolação)	Observações no tempo
Números de famílias	Projeção estereográfica
Tamanho do bloco	Frequência de abertura 3D

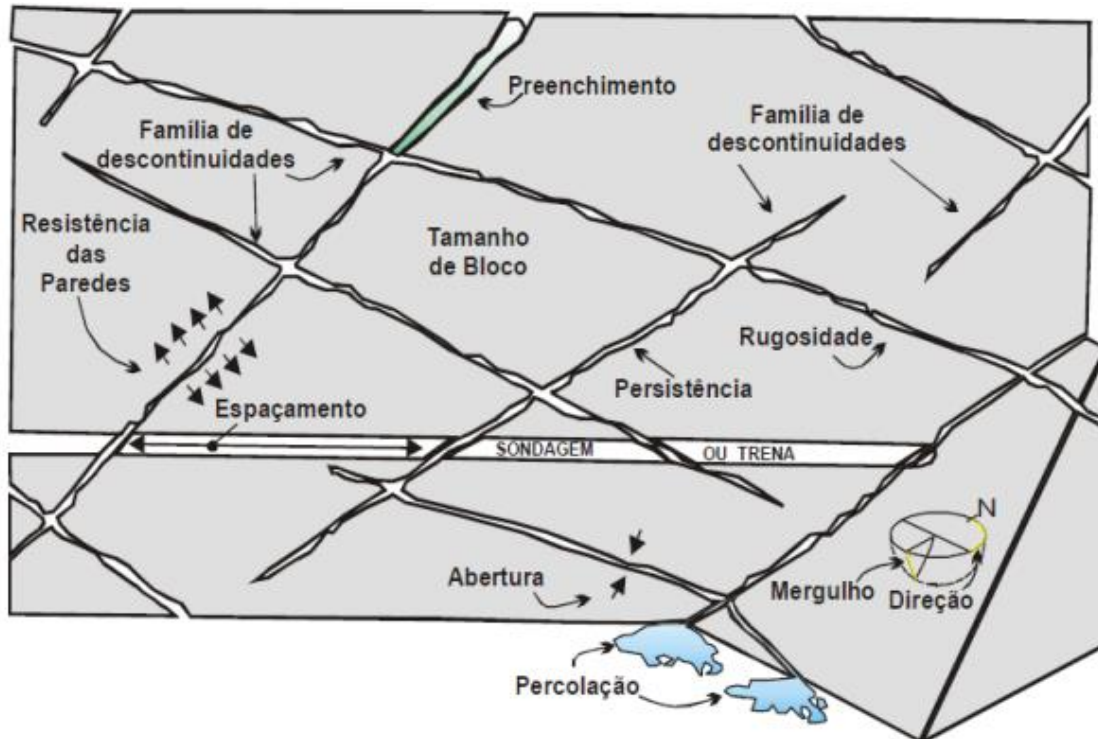


Figura 14 – Características geométricas de uma descontinuidade (adaptado de ISRM, 1981).

Por serem planos de fraqueza, as descontinuidades são estruturas muito importantes, por serem condicionantes principais de alguns tipos de rupturas em encostas. Elas podem se apresentar nas mais diversas escalas, centimétricas ou dezenas de metros. A Figura 15 mostra esse efeito de escala, indicando como o tamanho do bloco ou da área afetada pela instabilidade influenciam no seu desempenho.

1.3.1 Caracterização da Rugosidade

A rugosidade das superfícies das encostas é uma característica relevante no comportamento da resistência ao cisalhamento. A ISRM (2007) distingue duas escalas de rugosidade nas paredes das descontinuidades, sendo elas:

1. Ondulações: podem atingir até dezenas de metros.
2. Irregularidade de superfície: pequena escala - afetam comprimentos menores.

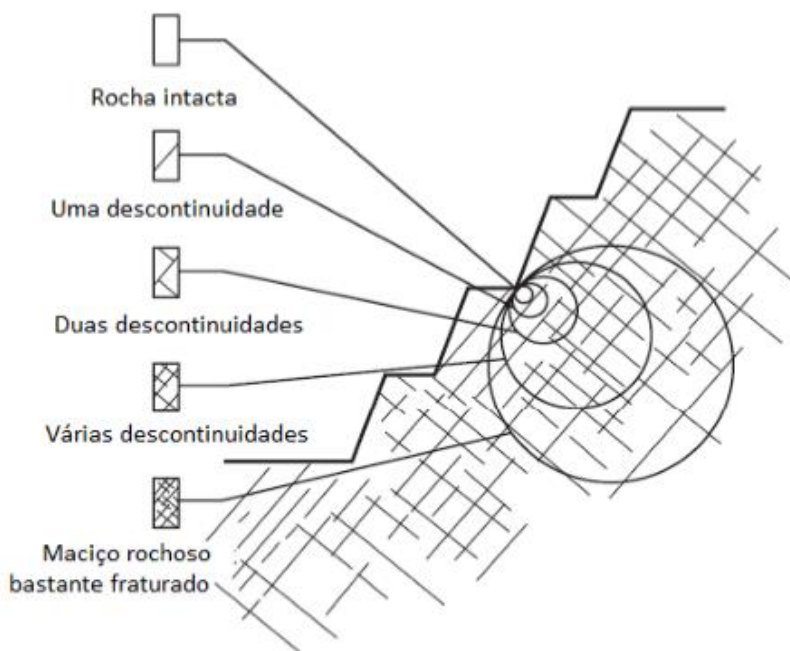


Figura 15 – Diagrama ilustrando o efeito de escala (adaptado de Hoek, 2002).

Há diferentes métodos para a determinação da rugosidade, sendo os mais sofisticados pouco vantajosos para este tipo de avaliação (Figura 16).

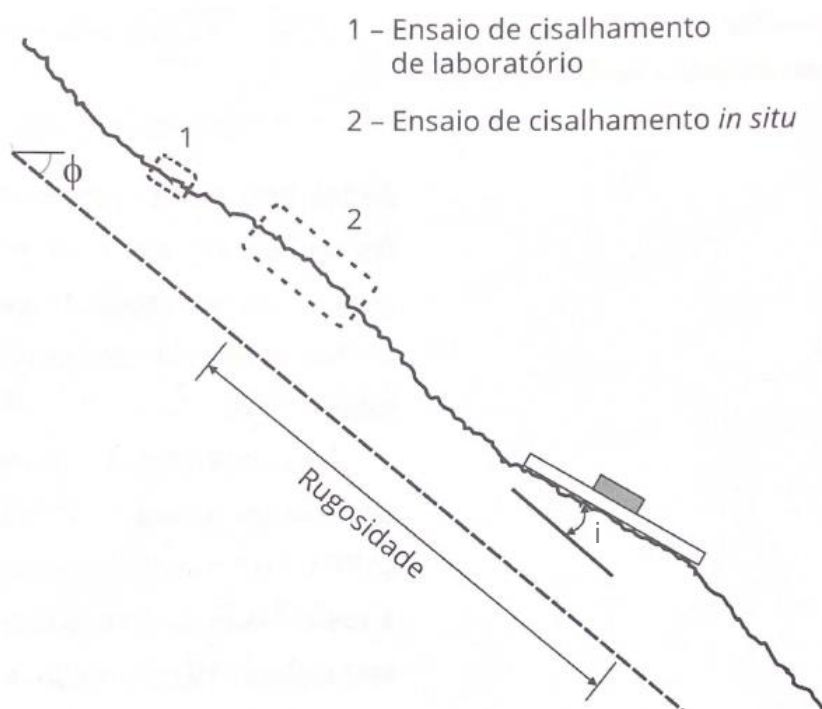


Figura 16 – Variação da escala das rugosidades de descontinuidades medidas por diferentes ensaios (adaptado de ISRM, 2007).

A descrição qualitativa é realizada baseada na classificação proposta pela ISRM (2007). Nela, o termo *slickensided* é empregado quando houver evidências de deslizamento cisalhante prévio ao longo da descontinuidade (estriamentos) (Figura 17).

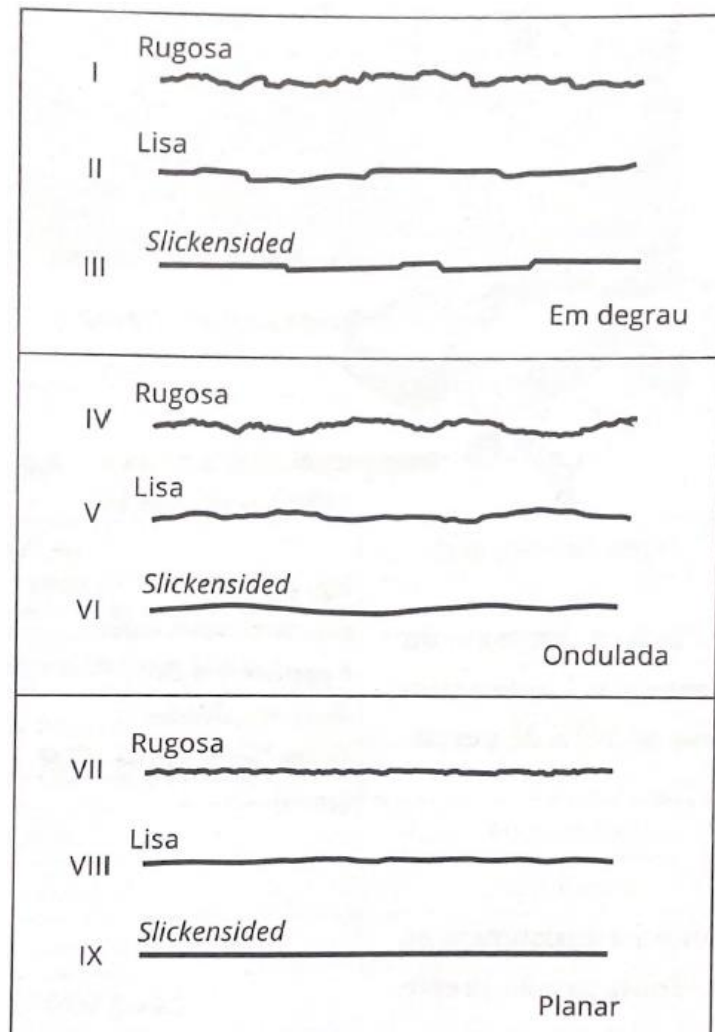


Figura 17 – Classificação da rugosidade através de perfis típicos de rugosidade (adaptado de ISRM, 2007).

Marques & Vargas Jr. (2022) comentam que os ângulos de rugosidade efetivos (i), contribuem para resistência ao cisalhamento, obedecendo a seguinte escala:

- I > II > III;
- IV > V > VI;
- VII > VIII > IX

considerando que o recobrimento mineral da superfície da descontinuidade não existe ou existe muito pouco.

Diversos estudos já foram realizados para descrever a resistência ao cisalhamento de descontinuidades artificiais e naturais, com base em dados experimentais. A partir de ensaios, foram observadas evidências físicas da influência das propriedades da superfície das juntas (resistência à compressão – JCS e rugosidade - JRC) em seu comportamento mecânico.

Barton e Choubey (1977) desenvolveram métodos para quantificar estas propriedades e apresentaram uma lei empírica, chegando-se a uma equação empírica para a resistência ao cisalhamento de pico das juntas, conhecida como Critério de Barton-Bandis. Neste critério, os valores da resistência ao cisalhamento de pico dependem do valor da tensão normal e da rugosidade (i). Já os valores do ângulo de atrito residual dependem do grau de alteração das paredes das descontinuidades e do tipo de rocha.

Em 1982, Barton propôs correlações do parâmetro JRC com a amplitude das asperidades e comprimento do perfil de rugosidade, assumindo valores superiores a 0,10 m (Figura 18).

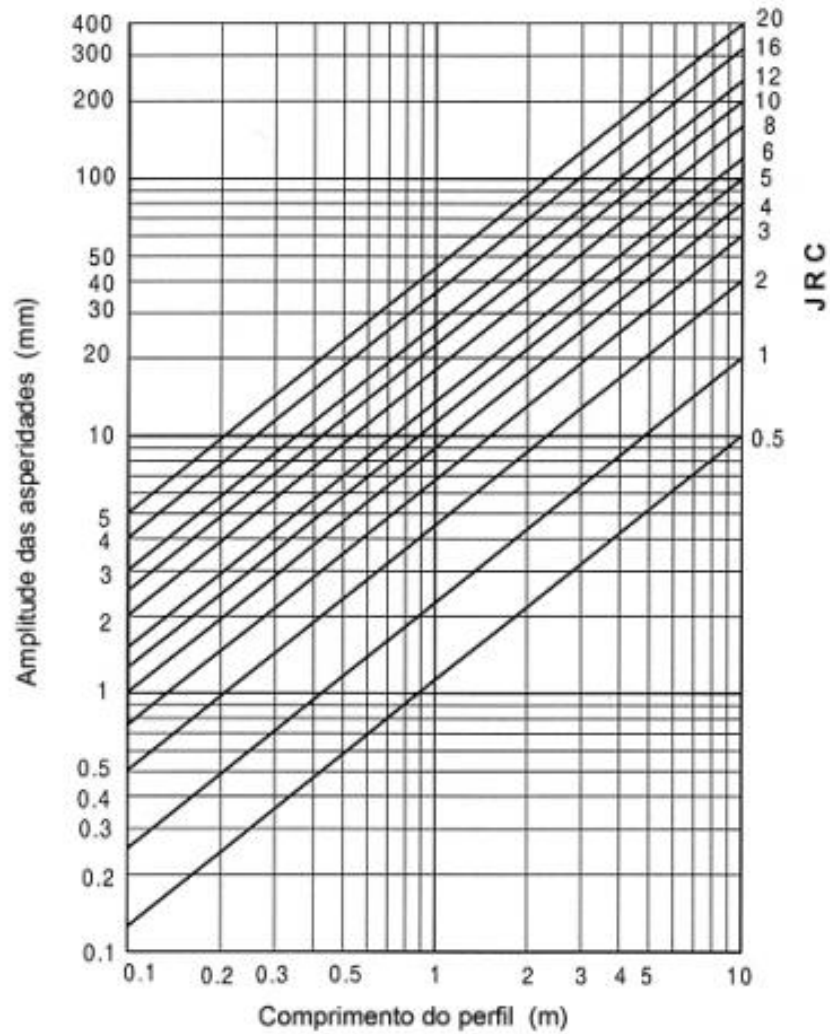
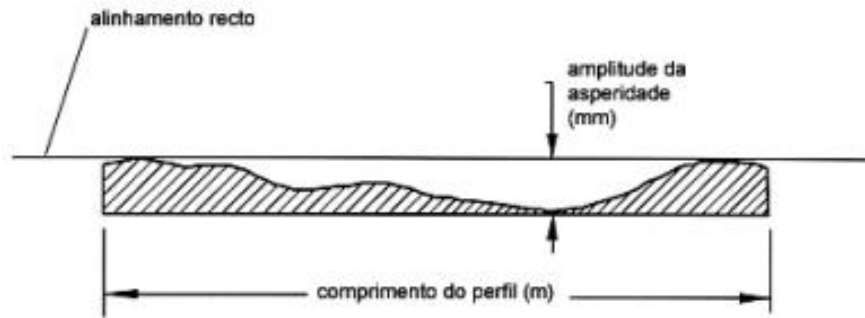


Figura 18 – Valores de JRC em função da amplitude das asperezas e do comprimento do perfil de rugosidade (Barton, 1982).

1.4 Mecanismos causadores de queda de blocos

Há diversos fatores condicionantes capazes de causar a instabilização da encosta e deflagrar o movimento gravitacional de massa. Eles estão relacionados à estrutura geológica, à geomorfologia, pluviosidade, cobertura vegetal, processo de intemperismo e, até mesmo, ação antrópica (Oliveira, 2019).

Para o movimento de massa do tipo queda de blocos é muito difícil apontar a causa exata da instabilidade do maciço rochoso, tendo em vista os agentes condicionantes: geologia do local e o clima. Ribeiro (2013) destaca que as encostas diferem uma das outras quanto a ocorrência deste fenômeno, devido a geomorfologia, vegetação, litologia e a geometria, orientação e densidade das descontinuidades.

De acordo com Caputo (2016), as causas do movimento de massa podem ser divididas nas encostas internas e externas. As internas se dão pelo aumento da pressão na água intersticial e o decréscimo da coesão, bem como a ação do intemperismo, provocando a diminuição da resistência ao cisalhamento e causando a deflagração do movimento sem alterar as condições geométricas da encosta.

As causas externas ocorrem pela alteração do estado de tensões atuantes sobre o maciço rochoso, provocada por ações externas (efeitos sísmicos, deposição de material na crista da encosta, peso da vegetação e construção de estruturas, alteração da inclinação do talude, entre outros), causando a instabilidade do maciço e sua ruptura. Assim sendo, para aquele autor, a causa mais comum de movimento de massa é a escavação (ação antrópica) próxima ao sopé do talude, para a execução de alguma obra.

A importância das classificações dos movimentos de massa envolvendo os seus agentes deflagradores confere a possibilidade de associar cada tipo de instabilidade a um conjunto de suas características condicionantes, o que facilita o entendimento visando a aplicação de metodologias de atuação, além de medidas preventivas e corretivas para a mitigação do risco (Varnes, 1978 *apud* França Lima, 2002). No entanto, observa-se que, na maioria dos casos, a movimentação de massa não é atribuída somente a uma única causa, mas, sim, causas em conjunto, o que dificulta a identificação da causa principal que provocou a deflagração do material.

Cruden e Varnes (1996) relacionam as causas dos movimentos de massa, separando-as em geológicas, morfológicas, físicas e humanas, como pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos fatores causadores dos movimentos de massa (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).

Classificação das causas dos movimentos de massa			
CAUSAS GEOLÓGICAS	CAUSAS MORFOLÓGICAS	CAUSAS FÍSICAS	CAUSAS HUMANAS
Materiais fracos	Levantamento tectônico ou vulcânico	Chuvas intensas	Escavações de taludes
Materiais sensíveis	Alívio por degelo	Derretimento rápido de neve	Sobrecarga no talude ou na crista
Materiais intemperizados	Erosão fluvial no pé do talude	Precipitações excepcionalmente prolongadas	Rebaixamento (reservatórios)
Materiais fissurados ou fraturados	Erosão glacial no pé do talude	Terremotos	Irrigação
Orientação desfavorável de descontinuidades (acamamento, xistosidade, etc.)	Erosão nas margens laterais	Erupções vulcânicas	Mineração
Orientação desfavorável de descontinuidades estruturais (falhas, contatos, inconformidades, etc.)	Erosão subterrânea (solução e <i>piping</i>)	Descongelamento	Vibrações artificial
Contraste de permeabilidade	Deposição de cargas no talude ou na crista	Intemperismo por congelamento e descongelamento	Vazamento de água
Contraste de rigidez (materiais densos, rígidos sobre materiais plásticos)	Remoção da vegetação (fogo, seca)	Intemperismo por expansão e retração	-

No caso de queda de blocos, a distinção entre as causas imediatas (abalo sísmico, chuvas intensas, ventos, erosão) e as causas menos imediatas (avanço das descontinuidades por fadiga térmica ao longo do maciço rochoso, ou seja, a ação do intemperismo), ocorre devido ao fato de que a primeira provoca o desprendimento do bloco em um pequeno intervalo de tempo.

Por outro lado, a segunda se processa de forma imperceptível, ocorrendo em um longo intervalo de tempo e resultando numa diminuição gradativa da resistência ao cisalhamento, com o consequente desprendimento do bloco rochoso (Vargas et al., 2004 *apud* Ribeiro, 2013).

De acordo com Ribeiro (2013), são considerados agentes de preparação as causas de médio a longo intervalo de tempo - propagação das descontinuidades através do maciço rochoso, pluviosidade, variação da temperatura e as atividades de origem antrópica.

Há também os agentes desencadeantes - de curto prazo -, caracterizando eventos envolvendo uma única ocorrência de queda de blocos.

Vale ressaltar, contudo, que há uma transição entre os fatores de preparação e os desencadeantes, resultando em movimentos de massa diversas causas e diferentes prazos.

Por fim, há agentes de predisposição, que não estão relacionados com o tempo necessário para a ação do desprendimento do bloco, circunscritos apenas às características naturais do local - complexos geológico, morfológico, climático-hidrológicos e tipo de vegetação original.

Uma dessas causas que mais se destaca em casos menos imediatos é a ação do intemperismo, que influencia gradativamente na alteração do maciço rochoso. Assim sendo, entende-se como processos físicos, químicos e biológicos (não será o foco principal deste estudo para a queda de blocos) os responsáveis pela fragmentação das rochas, conhecido como intemperismo. Os fatores que controlam o intemperismo são: tipos de rocha e estruturas, inclinação da encosta, clima e tempo de ação do processo.

Azevedo e Marques (2002) apontam que o intemperismo físico atua exclusivamente na fragmentação da rocha (formação de novas descontinuidades), devido a variações no nível de pressões que levam a instabilidade e ruptura do material. As ações provenientes destas variações são: alívio de tensões no maciço rochoso,

ação da variação de temperatura, ciclos de umedecimento e secagem, ação erosiva da água e do vento, ação de escavações mecânicas.

No processo de intemperismo químico, a reação química é o fator principal (dissolução, oxidação, troca de íons, hidratação, lixiviação e carbonatação), o que resulta na decomposição de minerais em outros minerais (gera a descoloração da parede de rocha), sendo muito importante em regiões de clima tropical úmido. Neste segundo processo, a presença de água nas discontinuidades acelera as alterações e se reflete na resistência do maciço rochoso.

As rochas desenvolvem perfis de intemperismo típicos, dependendo, portanto, de fatores internos da rocha (litologia, textura, estruturas, mineralogia) e de fatores externos da rocha (clima, drenagem). Ao longo do perfil de intemperismo (Figura 19), as rochas podem apresentar variações em suas propriedades geomecânicas, bem como: reduções na resistência e aumento da deformabilidade e do conteúdo de água, com elevação do intemperismo (Marques, 1998 *apud* Azevedo e Marques, 2002). Os parâmetros a serem investigados para o reconhecimento do grau de alteração intempélica pode ser observado no Quadro 3.

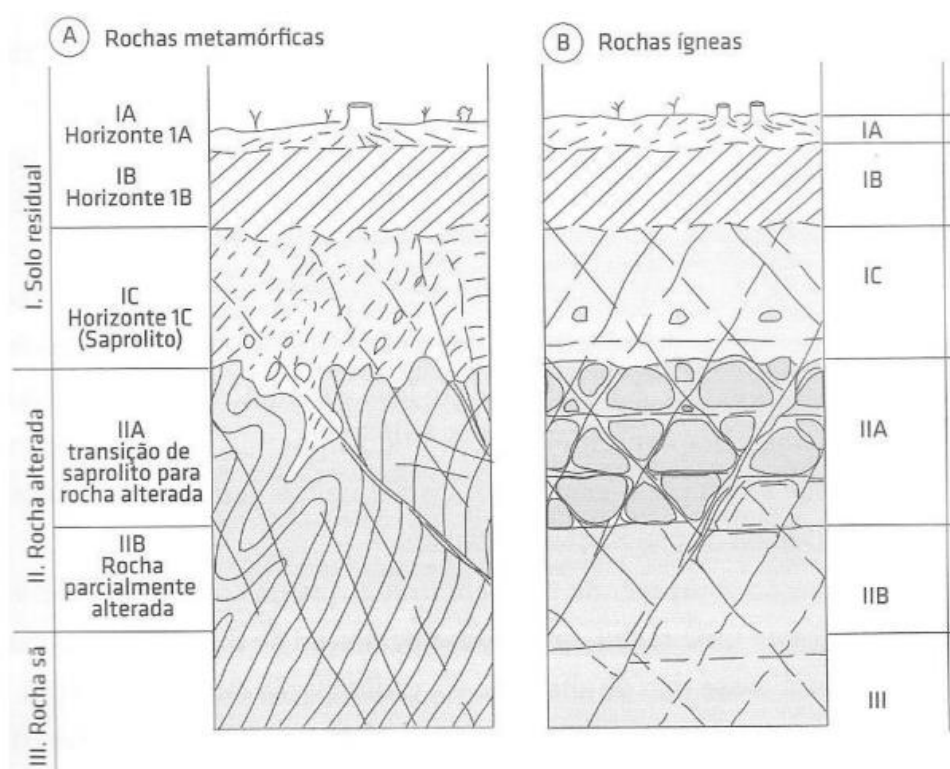


Figura 19 – Perfil típico de alteração para A – Rochas Metamórficas; B – Rochas Ígneas (Deere e Patton, 1971 *apud* Castanheira Neto, 2019).

Quadro 3 – Parâmetros a serem investigados para o reconhecimento do grau de alteração intempérica da matriz (adaptado de Barroso, 1993).

Tipo de observação	Parâmetros
Visual e de reconhecimento geológico	Mineralogia/granulometria.
	Textura.
	Grau de descoloração.
	Decomposição mineralógica.
Testes de reconhecimento mecânico (qualitativos)	Presença de estrutura original da matriz.
	Resistência ao golpe do martelo geológico.
	Escavação manual.
	Risco por canivete ou unha.
	Facilidade do grão em ser arrancado do arcabouço da rocha.
	Quebra de testemunhos NX.
	Desagregação.

1.5 Técnicas mitigadoras para quedas de blocos

Em regiões que apresentam encostas rochosas com evidências de instabilização, é imprescindível a execução de medidas estabilizadoras para a mitigação do risco e prevenção contra possíveis danos suscetíveis de ocorrer, principalmente no caso de queda de blocos, fenômeno com potencial destrutivo em um certo período de tempo. Da mesma forma, o risco aqui destacado é a relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado fenômeno, e a magnitude de danos sociais ou econômicos sobre a população. Logo, quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco (CPRM, 2018).

Tavares (2015) e a ABNT (2009), destacam que para a implementação satisfatória das medidas de estabilização, é necessário antes de sua execução, estudar o local com o objetivo de conhecer as propriedades e características geológicas e geotécnicas mais predominantes (litologia, descontinuidades, grau de intemperismo,

condicionantes hidrológicas e geomorfológicas, por exemplo), assim como compreender as questões construtivas do projeto e a problemática geoambiental da região.

Para isso, são necessários registros de informações relevantes para a elaboração de um modelo de projeto sucinto, tais como fotos do local, mapas ou perfis esquemáticos ou croquis (características geológico-geotécnicas e dimensionamento), e investigações geotécnicas de campo e laboratório (Ignacio, 2019). Portanto, para a execução definitiva das medidas mitigadoras, será preciso ter conhecimento da tipologia, magnitude e velocidade dos movimentos, voltado ao fenômeno de queda de blocos, pois estes parâmetros influenciam na aplicação das medidas a serem adotadas, podendo ser realizadas antes do evento ocorrer (encosta totalmente instável), ou depois da ocorrência do movimento de massa (Tavares, 2015).

As principais técnicas de convivência e mitigação para queda de blocos são representadas por medidas ativas ou passivas. As medidas ativas consistem na estabilização do maciço rochoso instável ou potencialmente instável, cuja principal característica é a minimização da descompressão e desprendimento dos blocos rochosos que podem ocorrer.

As medidas passivas, por outro lado, consistem nas barreiras ou proteções projetadas a fim de minimizar o perigo da queda de blocos, permitindo que o desprendimento ocorra, mas evitando possíveis danos que possam vir a causar (Tavares, 2015; Ignacio, 2019).

Segundo a GEO-RIO (2014), a realização de um projeto de estabilidade de encosta envolve as seguintes fases:

- 1) Vistoria da encosta instável e diagnóstico (caracterização do perfil geológico-geotécnico);
- 2) Análise de estabilidade e escolha da solução;
 - a. Medidas ativas: eliminação e estabilização.
 - b. Medidas passivas: convivência.
- 3) Detalhamento do projeto;
- 4) Implantação da obra;
- 5) Monitoramento e manutenção.

Na maioria dos casos, existe mais de um tipo de opção de solução, no entanto, os aspectos econômicos e ambiental, o prazo, a segurança, as interferências e aspectos construtivos são fatores importantes para a escolha mais eficiente (GEO-RIO, 2014). A etapa pós execução da obra, o monitoramento e a manutenção, são de extrema importância para o projeto de mitigação do maciço rochoso, pois possibilitam a durabilidade da obra e na continuidade da estabilidade da encosta.

A seguir, a Tabela 4 apresenta as principais soluções mitigadoras para queda de blocos, dentre as inúmeras existentes.

Tabela 4 – Técnicas de estabilização de taludes rochosos ou blocos soltos (GEO-RIO, 2014).

Taludes rochosos ou blocos soltos	Drenagem superficial e profunda.	
	Remoção	Remoção de bloco de rocha. Desmonte total ou parcial de bloco de rocha. Reconformação do talude rochoso.
	Contenção	Ancoragens. Chumbadores. Contrafortes. Contrafortes ancorados. Entelamento ancorado.
	Proteção	Entelamento (telas metálicas). Barreiras de impacto. Trincheira para retenção de blocos. Falso túnel.

1.5.1 Medidas Ativas

As medidas ativas contemplam a eliminação do problema existente e as técnicas de estabilização (remoção e contenção).

Rocha (2009), assinala que a eliminação do problema existente está associada, principalmente, ao tamanho, alcance estimado e condições de apoio do bloco rochoso, podendo ser a opção mais viável, por vias econômicas ou técnicas. Logo, a melhor maneira de eliminar esse material instável é a remoção manual, para situações com blocos de pequena dimensão. Em casos de matacões, é necessário o desmonte prévio

total ou parcial do bloco rochoso para, em seguida, removê-lo do local. Esse desmonte pode ser efetuado por processo mecânico, explosivos (deve ser bem estudado para não acarretar a instabilidade total do maciço) ou polímero expansivo (Figura 20).

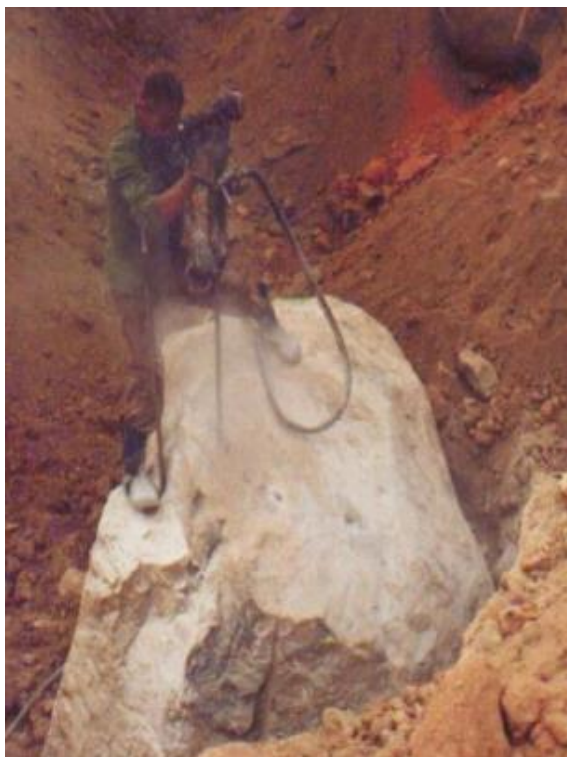


Figura 20 – Processo mecânico de fragmentação de blocos rochosos (GEO-RIO, 1999 apud Freitas, 2013).

Para o caso de estabilização do maciço rochoso, existem diversas técnicas cabíveis, sendo destacados aqui os principais: drenagem, proteção superficial e estruturas de contenção.

O objetivo da medida ativa é conter qualquer mobilização de blocos em encostas instáveis ou potencialmente instáveis, estabilizando-os através de meios físicos ou mecânicos, fazendo com que as deformações no maciço cheguem ao patamar nulo ou diminua os processos de intemperismo (Ignacio, 2019).

A seguir, serão descritas, resumidamente, essas técnicas (Gálvez, 2012; Freitas, 2013; Rocha, 2009; GEO-RIO, 2014; Ribeiro, 2020).

- a) **Drenagem:** esta medida de estabilização compreende as drenagens superficial e profunda. A drenagem superficial é utilizada para reduzir a infiltração da água de chuva no terreno e evitar os fenômenos de erosão na superfície da encosta, por meio de sarjetas ou valetas e canaletas. Já a drenagem profunda consiste em alterar a direção do fluxo subterrâneo e reduzir as poropressões atuantes no solo, utilizando-se de drenos sub-horizontais profundos, trincheiras, galerias e barbacãs (Figura 21). Deste modo, a drenagem deve ser incluída em todas as obras executadas, pois a água é o principal agente de instabilização da encosta, além de proporcionar uma boa relação custo/benefício.



Figura 21 – Sistema de drenagem profunda associada a canaleta (Deflor Bioengenharia, 2019 apud Ribeiro, 2020).

- b) **Proteção superficial:** técnica simples e eficiente, cujo objetivo principal é a aplicação de concreto manualmente ou por meios de máquinas de projeção (Figura 22), visando reduzir a instabilidade do maciço rochoso alterado e/ou fraturado, reduzindo a infiltração de água. Sua execução ineficiente pode acarretar em fissuração generalizada da camada de concreto, razão pela qual é reforçada com tela metálica ou fibra, chumbadores, drenos e dosagem adequada de argamassa de cimento e areia ou concreto.



Figura 22 – Aplicação do concreto projetado (Rocha, 2009).

- c) **Contenção:** tem por finalidade conter blocos e lascas instáveis em sua posição original no maciço rochoso, por meio de sistemas de ancoragem, grampos ou chumbadores atrelados, ou não, a elementos estruturais de concreto armado. Esta associação de estruturas forma um conjunto de grelhas ancoradas e contrafortes. As grelhas ancoradas são formadas por um conjunto de vigas verticais e horizontais de concreto armado, nos quais as ancoragens são posicionadas na interseção das vigas. Já os contrafortes, são estruturas de concreto armado destinadas ao apoio de blocos rochosos instáveis. Podem funcionar à compressão, podendo ou não apresentar ancoragens (trabalham à tração), além de serem adaptadas às irregularidades da face da encosta, assim como as grelhas (Figura 23).



Figura 23 – Grelhas ancoradas em encosta rochosa na rodovia BR-040 em Petrópolis-RJ (Freitas, 2013).

1.5.2 Medidas Passivas

As medidas passivas contemplam as soluções de convivência com as instabilidades (proteção), estando relacionadas à capacidade de absorver a energia proveniente dos blocos rochosos, paralisando ou desviando-os ao longo de sua trajetória (Ribeiro, 2020).

Esta técnica é mais utilizada em maciços rochosos muito fraturados, os quais apresentam lascas ou blocos instáveis, o que torna a técnica de medida ativa inviável. Neste caso, é preciso conviver com o problema, visando controlar a trajetória e alcance dos blocos para que não ocorra danos socioeconômicas e ambiental.

A seguir, alguns exemplos de técnicas de estabilização passiva serão resumidos (GEO-RIO, 2014; Tavares, 2015; Freitas, 2013; Rocha, 2009; Ignacio, 2019).

- a) **Telas metálicas:** são compostas por uma malha de arame, podendo apresentar ou não cabos de aço de alta resistência. São utilizadas junto à face da encosta, sendo ancoradas com tirantes no topo do talude e fixados com chumbadores ao longo de sua extensão, podendo exibir comportamento ativo ou passivo. Este

tipo de técnica é mais indicado para a estabilização de encostas muito fraturadas com blocos de pequenas dimensões, mas não inferior a abertura da malha. As principais características que este sistema estrutural deve exibir são: resistência, proteção anticorrosiva, durabilidade e desempenho adequado (Figura 24).



Figura 24 – Estabilização por telas metálicas e chumbadores (Geobruigg, 2012 apud Gálvez, 2012).

- b) **Trincheira para retenção de blocos:** as trincheiras são implantadas no sopé da encosta para receber o impacto dos blocos em queda, sendo utilizados métodos gráficos e/ou numéricos para estimar sua largura e profundidade, levando-se em conta as dimensões, trajetória e energia cinética dos blocos rochosos. São estruturas simples, apresentando ótimo desempenho na proteção contra queda de blocos, exigindo, contudo, manutenção periódica para garantir sua eficiência (Figura 25).



Figura 25 – Área de retenção de blocos (Gálvez, 2012).

- c) **Falso túnel:** são estruturas metálicas ou de concreto armado utilizados como cobertura para trechos de rodovias ou ferrovias, tendo como objetivo receber o impacto e/ou desviar blocos rochosos ou fluxo de detritos. São utilizados métodos numéricos para simular a energia e trajetória dos movimentos gravitacionais de massa e dimensionar o túnel. A estabilidade estrutural do túnel durante o impacto do material deve ser prioridade para sua eficiência (Figura 26).



Figura 26 – Falso túnel empregado na rodovia BR-277 junto a área susceptível a queda de blocos (GEO-RIO, 2014).

- d) **Barreiras de impacto:** são estruturas com objetivo de conter ou desacelerar os movimentos de massa (queda de blocos ou fluxo de detritos), podendo ser rígidas ou semirrígidas, e barreiras flexíveis (Figura 27). A barreira rígida é uma estrutura de concreto armado ou metálica projetada para o amortecimento de energia do material mobilizado na base do talude. Já a barreira flexível ou dinâmica é uma estrutura relativamente leve e com melhor desempenho para conter materiais de alta energia. É composta por postes metálicos que mantem em posição vertical uma tela também metálica, que absorve a energia de impacto dos blocos rochosos mediante deformações elásticas e plásticas das malhas metálicas e outros elementos constituintes. Neste tipo de solução de impacto, a ruptura ocorre, mas pode ser controlada, reduzindo-se o risco. Para que esta técnica mitigadora seja eficiente, deve-se levar em conta o volume de detritos e a granulometria do material em movimento, o ângulo de deposição, a trajetória do material mobilizado (levando-se em conta também o alcance, altura do salto e velocidade) e a energia cinética de impacto. Métodos numéricos são utilizados para simular a energia de impacto e a trajetória do movimento de massa e, assim, poder dimensionar a barreira e a área de deposição e/ou amortecimento do material. Esta estrutura de impacto exige um serviço de manutenção permanente, e o motivo para a sua utilização pode estar relacionado à dificuldade de acesso para a execução de uma obra de contenção convencional.

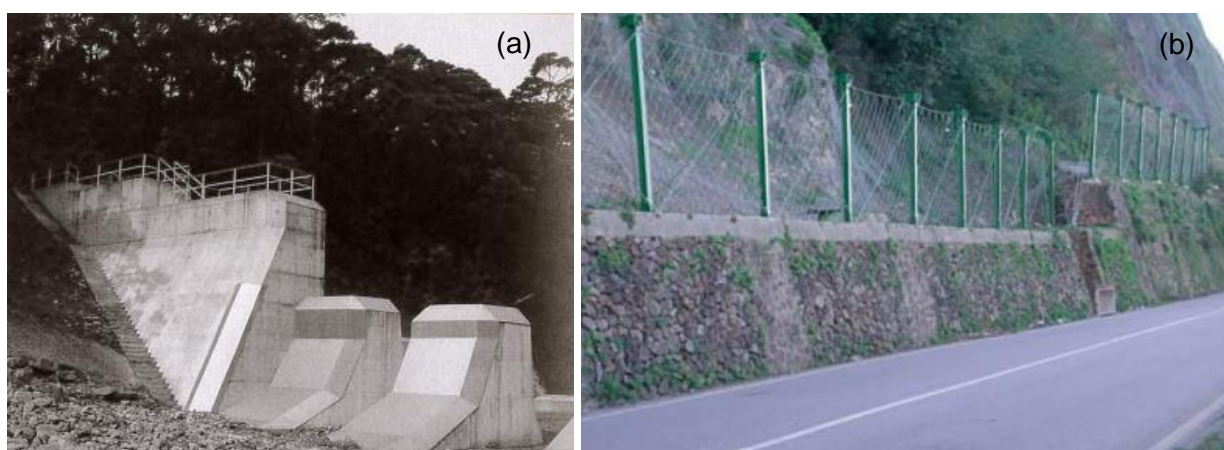


Figura 27 – (a) Barreira de impacto rígida de concreto para amortecimento da energia (Cruz et al., 2004 apud GEO-RIO, 2014). (b) Barreira flexível (Geobruigg, 2009 apud Rocha, 2009).

2 METODOLOGIA APLICADA

Neste capítulo serão abordadas metodologias aplicadas ao movimento de queda de blocos, tais como métodos experimentais, empíricos e numéricos. O destaque principal será dado ao estudo da Teoria do Caos, para o entendimento deste fenômeno complexo e de difícil análise, envolvendo propriedades do maciço rochoso, dos materiais da encosta e das condições iniciais do movimento.

2.1 Métodos de análise para queda de blocos

Ao longo dos anos foram realizados diversos estudos para compreender as trajetórias e alcance dos blocos rochosos, ao se desprenderem das encostas. No entanto, várias dificuldades foram encontradas durante a sua modelagem, dentre as quais os dados relativos aos parâmetros mais adequados, mas, principalmente, a geometria e a área de risco suscetível de desprendimento dos blocos, devido à interferência antrópica nas encostas.

Segundo Villela (2011), levantamentos topográficos detalhados e mapeamentos dos blocos mobilizados em uma determinada região são frequentemente inviáveis, resultados que interferem nas análises comumente realizadas em seções definidas como naturais das encostas. Ademais, sabe-se que as trajetórias dos blocos são vulneráveis a pequenas mudanças na geometria e na geomorfologia, o que torna complexa a adoção de seções representativas para a análise das encostas.

Sendo assim, é de extrema importância a adoção de métodos experimentais, empíricos e numéricos no estudo deste tipo de movimento de massa, visando interpretar melhor a influência e a sensibilidade dos parâmetros usados na resposta do fenômeno analisado. Ignacio (2019) esclarece que os métodos experimentais e empíricos permitem estimar os principais parâmetros das quedas de blocos. Já os métodos analíticos, utilizando programas numéricos, permitem simular diversas possibilidades de resposta deste fenômeno, bem como representar as condições

geométricas dos blocos, topografia das encostas locais e propriedades particulares das quedas de blocos.

2.1.1 Métodos experimentais e empíricos

Os métodos experimentais podem ser realizados em laboratório ou em campo. No âmbito laboratorial, o parâmetro mais estudado nas análises de queda de blocos é o coeficiente de restituição, por ser um dos mais importantes e difíceis de se obter. Um exemplo é o estudo de Dias & Barroso (2006), que determina o coeficiente de restituição normal de rochas por meio de registros sonoros dos sucessivos impactos de uma esfera de rocha solta contra uma superfície plana rochosa. No caso da rugosidade, foco deste estudo, não são encontrados muitos experimentos dedicados à determinação deste parâmetro, cuja importância na resistência ao cisalhamento de superfícies em encostas rochosas é inquestionável. No entanto, os ensaios mais tradicionais para a sua determinação são os tilt tests, ensaio de cisalhamento direto em juntas, comparação do perfil da junta com perfis de rugosidades típicas, além da bússola e clinômetro de disco (método de Feckers e Rengers).

O método proposto por Dias & Barroso (2006) para obter o coeficiente de restituição consiste na preparação de uma esfera rochosa de gnaiss de composição granítica. Ademais, em laboratório, a esfera rochosa é solta a uma certa altura sobre uma superfície plana, também constituída de rocha, em que os sons produzidos durante os impactos são captados por um microfone, sendo registrados pelo computador dotado de uma placa de som e software Spectrogram de registro sonoro. Com a obtenção dos intervalos de tempo obtidos a partir dos impactos da esfera com a superfície, o coeficiente de restituição é calculado pelo método proposto por Cavalcante *et al.* (2002), utilizando-se um desenvolvimento matemático por meio do coeficiente angular da reta em um gráfico de tempo antes versus depois do impacto.

Apesar deste experimento em laboratório ser eficiente para interpretar a trajetória dos blocos e os mecanismos envolvidos no sistema para várias tipologias, tal método apresenta escassa aplicabilidade, por se tratar de um experimento em escala reduzida

e não apresentar um comportamento real dos blocos, quando comparado ao evento natural.

Assim, nota-se que, com o avanço das tecnologias, novos métodos estão sendo desenvolvidos para a obtenção de parâmetros relevantes voltados a movimentos gravitacionais de massa, em escala real. Segundo Ulusay (2015), vários grupos de pesquisadores têm testado a utilização de técnicas de processamento de imagens para medição automática de geometria de fraturas em superfícies rochosas. Tal método baseia-se em dados de digitalização em uma malha triangular da fratura, plotando-se o pólo de cada triângulo em uma projeção estereográfica. Este método automático fundamenta-se em algumas abordagens de segmentação para o processamento de nuvens de pontos de digitalização e, em seguida, o melhor plano de ajuste das superfícies da fratura pode ser calculado automaticamente, para que a orientação da fratura possa ser determinada (Slob *et al.*, 2005).

Ulusay (2015) reforça que a rugosidade é caracterizada, principalmente, no laboratório, em pequenas amostras da superfície de descontinuidade natural. Nos experimentos em campo, a determinação da rugosidade em larga escala é importante pelo seu efeito de escala, influenciando na deformação do maciço rochoso e no comportamento hidromecânico de rochas fraturadas. Portanto, a utilização da digitalização a laser da rugosidade pode ser descrita quantitativamente de diversas maneiras diferentes, mostrando muitas vantagens, tais como fornecer a orientação em uma direção conhecida quando a área de digitalização é registrada em um sistema de coordenadas conhecido.

Por conseguinte, os novos métodos em destaque são:

1. **Malha triangular gerada por nuvens de pontos de digitalização** (Figura 28): se a orientação de cada triângulo é plotada na projeção estereográfica, então a dispersão em torno da orientação média da fratura fornece informações sobre o ângulo de dilatação (rugosidade), que é definido nos Critério de Patton (1966) e Barton (1982);
2. **Perfil de seção transversal com direção** (Figura 29): corresponde ao levantamento de seções transversais através da fratura em diferentes ângulos.

Um exemplo relevante para efeitos da estabilidade de encostas seria a seção transversal na direção do vetor de mergulho.

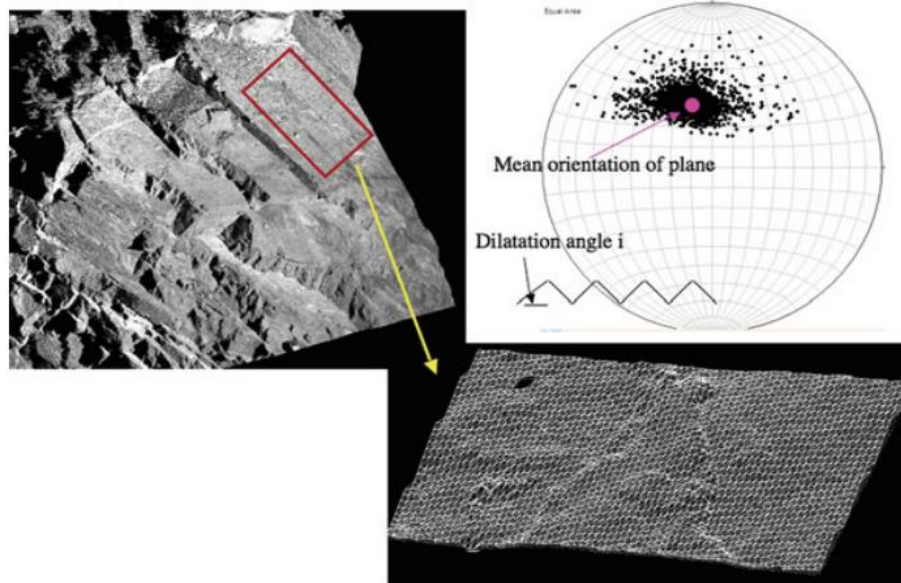


Figura 28 – Esquema do método de análise da rugosidade usando dados de digitalização por uma malha triangular da fratura, e plotando o pólo para cada triângulo em uma projeção estereográfica (US Federal Highway Administration, 2008 *apud* Ulusay, 2015).

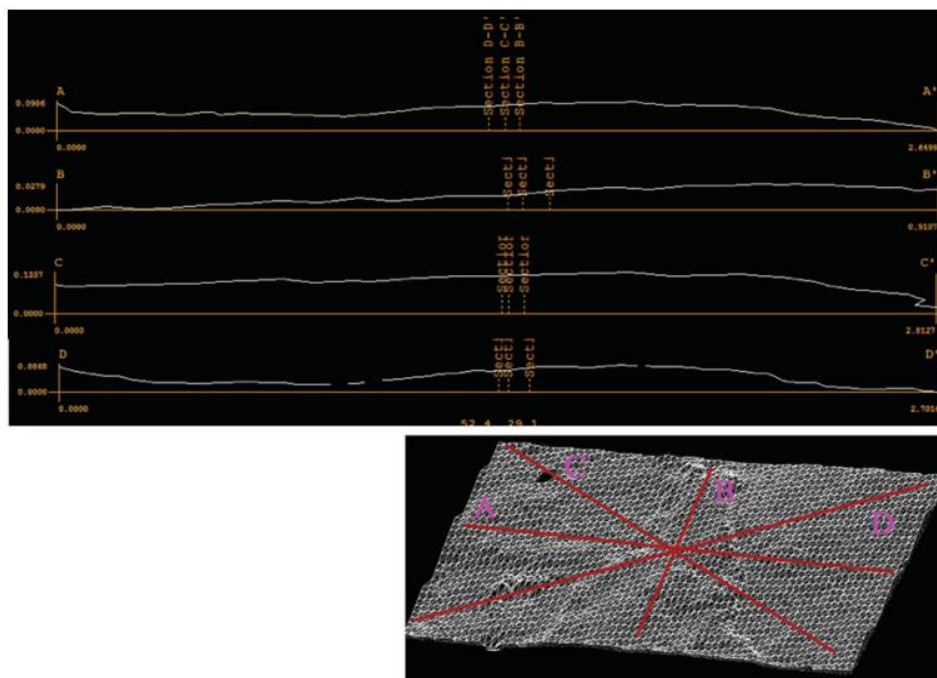


Figura 29 – Método de análise da rugosidade através de perfis topográficos da fratura em diferentes direções, e processando os perfis de rugosidade para extrair os dados de rugosidade, como o JRC (US Federal Highway Administration, 2008 *apud* Ulusay, 2015).

No âmbito dos experimentos de campo, ensaios *in situ* são de grande importância para a compreensão do movimento de massa do tipo queda de blocos, possibilitando a obtenção de parâmetros fundamentais para a calibração dos programas numéricos de simulação, além de poder avaliar o comportamento de contenções mitigadoras de risco. Freitas (2013) esclarece que o ensaio de campo é fundamental para analisar o comportamento dos blocos ao longo de sua trajetória, do início até o fim de seu deslocamento na encosta. Como este tipo de movimento é complexo, o local para a realização deste ensaio deve ser rigorosamente escolhido, para que não ocorra nenhum tipo de acidente.

As áreas dos experimentos podem ser construídas por vias antrópicas (rampa de lançamento) ou realizadas em encostas naturais, necessitando previamente de um levantamento topográfico preciso destinado a uma caracterização geológico-geomorfológica aceitável para a mobilização do bloco. Ademais, os ensaios contam com presença de câmeras de filmagem e fotográficas de alta velocidade (Figura 30), colocadas ao longo da encosta, para registrar a trajetória dos blocos com eficiência e, assim, poder determinar os coeficientes de restituição normal e tangencial, por exemplo, através dos dados obtidos nos experimentos (Freitas, 2013).

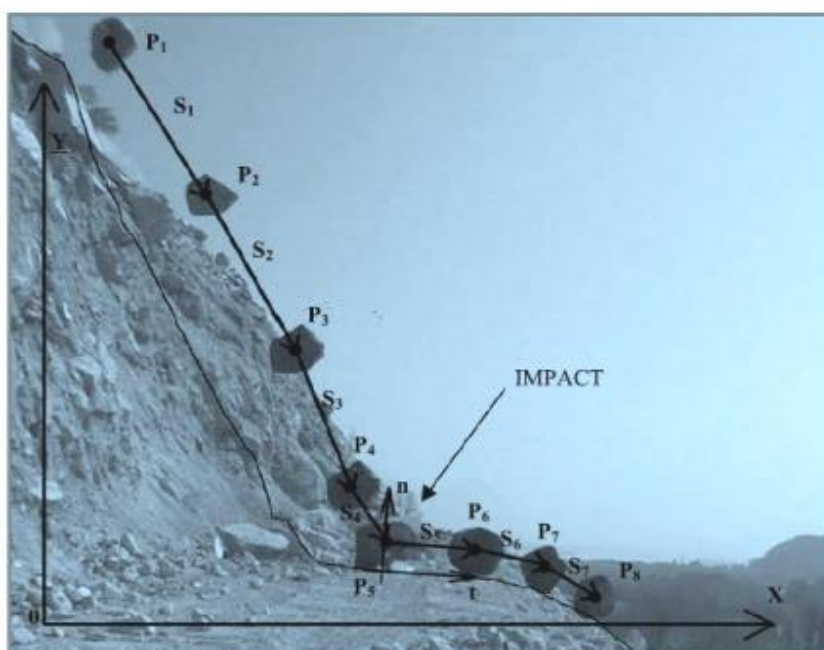


Figura 30 – Registro da trajetória do bloco em diferentes intervalos durante o ensaio de campo (Giani *et al.*, 2004).

Com os dados obtidos no ensaio de campo, outros parâmetros podem ser determinados, tais como velocidade, alcance e ângulo de rotação do bloco. Para isso, as imagens da mobilização do bloco são trabalhadas em um programa de computador específico (Freitas, 2013), com o propósito de georreferenciar todo o movimento do bloco e o seu centroide.

Em uma outra perspectiva de método experimental, pode-se citar como exemplo, os casos de retroanálises dos eventos que já ocorreram em escala real. Logo, consiste em analisar os traços de impactos deixados no terreno, árvores ou até identificar blocos pretéritos, com interesse de obter informações importantes como o alcance e dimensão dos blocos, altura de saltação em encostas com mais de 60° de inclinação, energia e velocidade dos blocos durante a queda, entre outros. Ignacio (2019) destaca que esse método é relevante em casos onde o local do evento real retrata característica semelhante ao local do experimento, mesmo sendo limitado em obter diversos dados do evento. Ademais, há possibilidade de efetuar calibrações dos modelos de estudo em programas numéricos.

Os métodos empíricos são baseados em correlacionar dados topográficos e a posição da zona de deposição dos blocos já mobilizados. Esse método só permite a previsão de zonas atingíveis por eventos de queda de blocos e análises de risco (Dorren, 2003; Vilella, 2011). Assim sendo, tem-se a facilidade de realizar uma análise rápida e preliminar dos eventos de queda de blocos, estimando a localização dos possíveis blocos que venham a se deslocar, e a área suscetível de depósito de tálus.

A previsão de zonas atingíveis pode ser representada pelo princípio de *Fahrböschung* (F), que é o ângulo de uma linha reta entre o ponto superior da zona de desprendimento de blocos e a localização final dos blocos de todos os eventos. Além disso, também pode ser representada pelo princípio do *Minimum Shadow Angle* (MSA), que é o ângulo de uma linha reta entre o ponto superior do depósito de tálus e o ponto mais afastado do bloco no depósito de tálus em todos os eventos de queda (Evans e Hungr, 1993 *apud* Rocha, 2009). A Figura 31 ilustra os ângulos F e MSA.

A partir dos resultados de diversos estudos, o valor recomendado para o *Minimum Shadow Angle* (MSA) está entre 22° e 30°. Logo, muitos pesquisadores preferem o princípio de *Minimum Shadow Angle* do que o *Fahrböschung*. Portanto, destaca-se que os dois princípios só devem ser usados na primeira aproximação da posição da zona de deposição dos blocos (Evans e Hungr, 1993 *apud* Rocha, 2009).

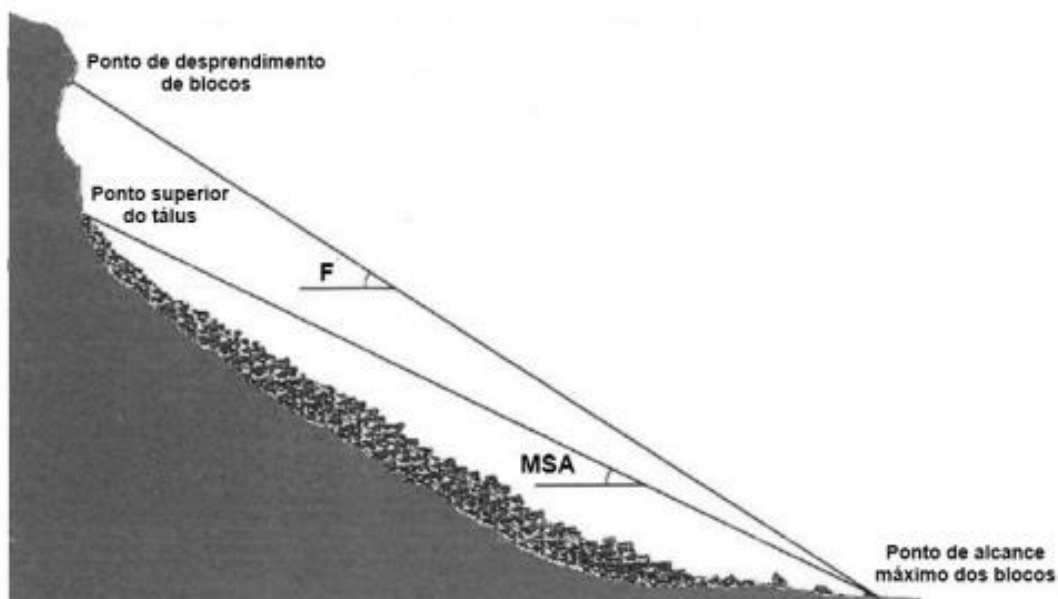


Figura 31 – Fahrböschung (F) e Minimum Shadow Angle (MSA) da encosta com depósito de tálus (modificado de Meissl, 1998 *apud* Ignacio, 2019).

2.1.2 Métodos numéricos

Os métodos numéricos são baseados em análises probabilísticas realizadas em programas computacionais, que vem crescendo muito nos últimos anos. Nestes programas podemos obter dados importantes para a compreensão dos eventos de quedas de blocos, tais como velocidade, alcance máximo e trajetória do bloco, energia cinética, entre outros. Os parâmetros mais utilizados nas modelagens são a rugosidade, coeficiente de restituição normal e tangencial, geometria do bloco e da encosta, coeficiente de atrito e velocidade rotacional.

De acordo com Giani *et al.* (2004) e Freitas (2013), é preciso uma avaliação quantitativa e qualitativa do fenômeno para a realização de uma análise de risco eficiente e, assim, a concretização de obras qualificadas para ações mitigadoras de risco. Dessa forma, são necessárias as avaliações dos dados obtidos nos programas computacionais a partir de modelos de cálculos, sendo capazes de simularem os movimentos dos blocos em função da inclinação da encosta, e usarem as formulações analíticas simplificadas. Por fim, a confiabilidade nos resultados obtidos nesses modelos depende da veracidade dos parâmetros de entrada atribuídos.

Freitas (2013) destaca que o conhecimento dos parâmetros físico-geométricos que regem a mobilização do bloco durante toda a sua trajetória são fundamentais, com o objetivo de escolher o modelo computacional mais confiável para a análise de risco. Ademais, estes modelos são extremamente sensíveis à variação dos parâmetros, requerendo, portanto, bastante cautela.

Giani *et al.* (2004) ainda abordam que, durante o movimento de queda de blocos em um modelo computacional, as características cinemáticas principais do movimento após o impacto são determinadas pelos coeficientes de restituição. Em cada impacto, é assumida uma variação aleatória do ângulo de inclinação da encosta, estando relacionada ao intervalo definido pelo parâmetro da rugosidade da superfície da encosta.

Os modelos analíticos podem realizar simulações computacionais aplicadas a sistemas 2D e 3D, assim como considerar métodos de massa concentrada e rigoroso. O método de massa concentrada (adimensional) considera a massa do bloco concentrada em um ponto e desconsideram o formato, dimensões e volume dos blocos. Este método não considera o movimento de rotação do bloco, tendo que realizar ajustes nos coeficientes de restituição, caso este movimento seja calculado.

Por outro lado, o método rigoroso leva em conta a massa, volume, forma e dimensões do bloco. Este método considera os mais diversos tipos de movimento de queda de blocos e apresenta maior nível de precisão, requerendo, no entanto, maior quantidade de dados. Sendo assim, os programas mais utilizados na prática são os que consideram o bloco de rocha adimensional, mas cabe ao profissional avaliar o potencial de cada programa em realizar simulações de um caso real da forma mais adequada possível (Ignacio, 2019; Rocha, 2009; Freitas, 2013).

Os principais programas de simulação 2D e 3D utilizados em queda de blocos e suas características mais relevantes são assinalados nos Quadros 4 e 5. Vale destacar que o programa computacional utilizado na presente pesquisa é o RocFall versão 8.018.

O usuário que emprega tais programas numéricos necessita ter uma visão crítica e detalhada dos resultados de saída, assim como da definição dos parâmetros de entrada, pois podem ser gerados resultados contraditórios (Ignacio, 2019). Logo, é importante ressaltar o valor prático e útil destes métodos para a percepção mais realista do fenômeno.

Quadro 4 – Programas computacionais para análise de queda de blocos (Rocha, 2009).

Referência	Programa	Análise
Pfeiffer & Bowen (1989, 91)	CRSP	2D
Spang (1979)	Rockfall	2D
Azzoni <i>et al.</i> (1991, 95)	CADMA	2D
GeoStru (2002)	Georock	2D e 3D
Scioldo (1991)	Rotomap	3D
Evans and Hungr (1993)	CONEFALL	3D
Stevens (1998)	Rocfall	2D
Jones <i>et al.</i> (2000)	CRSP 4.0	2D
Guzzetti <i>et al.</i> (2002)	STONE	3D

Quadro 5 – Principais características dos programas computacionais de simulação de queda de blocos (Rocha, 2009).

Características	RocFall	CRSP	Georock	STONE	Rotomap
Autores	Stevens (1998)	Pfeiffer & Bowen (1989)	GeoStru (2002)	Guzzetti <i>et al.</i> (2002)	Scioldo (1991)
Análise	2-D	2-D	2-D / 3-D	3-D	3-D
Superfície de análise	Perfil transversal	Perfil transversal	Perfil transversal e DTM	DTM (Modelo digital do terreno)	DTM (Modelo digital do terreno)
Movimento tipo queda livre e/ou salto	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Movimento tipo rolamento	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Movimento tipo deslizamento	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Forma do bloco	Ponto (adimensional)	Esfera, cilindro, disco	Esfera, cilindro, disco	Ponto (adimensional)	Ponto (adimensional)
Número de blocos	Ilimitado	Ilimitado	1.000	Ilimitado	Ilimitado
Barreiras	Altura e inclinação	-	Altura e inclinação	-	Altura

2.2 Teoria do Caos

Esta teoria tem como finalidade analisar o comportamento de sistemas não lineares, tais como os caracterizados pelos movimentos de massa do tipo queda de

blocos. Sua aplicação integra várias áreas multidisciplinares – geotecnia, inclusive -, tendo como objetivo compreender aspectos imprevisíveis da realidade, devido à vulnerabilidade e às condições iniciais de um sistema. Tais características são visíveis no fenômeno de queda de blocos, tornando sua utilização imprescindível no entendimento de tais fenômenos e ações destinadas à mitigação do risco.

Assim sendo, esta pesquisa visa dar continuidade aos estudos realizados por Ignacio (2019), Ribeiro (2020) e Araujo (2021). Mais exatamente, investiga-se, à luz da Teoria do Caos, a influência da rugosidade da superfície da encosta no fenômeno da queda de blocos.

2.2.1 Sistemas lineares e não lineares

Os sistemas ditos lineares apresentam diferentes características, prestando-se a metodologias de análise reducionistas. Especificamente, o comportamento de um dado fenômeno linear pode ser estudado dividindo-o em partes menores e investigando-as separadamente, o comportamento do todo em nada diferindo do das partes. Assim, o comportamento total de um sistema físico é a superposição dos efeitos de cada uma de suas partes constituintes, e o estudo de suas partes menores é satisfatório para a avaliação do sistema global (Menezes Filho, 2003).

Marietto *et al.* (2006) elucidam uma outra característica importante dos sistemas lineares, qual seja a mudança em uma determinada variável de controle importante do sistema, irá resultar, em uma outra variável igualmente importante, uma alteração proporcional, o que torna a resposta do sistema previsível.

Todavia, há casos em que no comportamento global do sistema, as propriedades do mesmo só podem ser identificadas por meio do comportamento coletivo, não havendo, diferentemente dos sistemas lineares, como estudá-las em separado. Ademais a mudança em uma determinada variável irá resultar na modificação de uma outra variável, de forma não proporcional (Marietto *et al.*, 2006).

Tais sistemas não lineares são chamados de fortemente e fracamente caóticos (ou complexos).

Gleick (1991) esclarece, portanto, que a Teoria do Caos estuda sistemas não-lineares, governados por leis razoavelmente simples, que podem gerar padrões altamente complicados. Tais sistemas também apresentam sensibilidade às condições iniciais, em que uma mínima alteração em suas condições de partida pode acarretar mudanças significativas na trajetória ou comportamento global do sistema, cujo resultado se traduz por uma imprevisibilidade do comportamento futuro do sistema.

Tendo em vista o avanço nas investigações e aplicação desta teoria, sua aplicação nas ciências naturais só se popularizou com o desenvolvimento dos computadores, sendo possível realizar modelagens numéricas e servindo de ferramenta para a simulação e o estudo de sistemas. Deste modo, vale destacar que a Teoria do Caos não apresenta soluções para o problema da previsão, mas mostra os limites de seus ajustes (Gleick, 1991).

Muitos pesquisadores têm fornecido características fundamentais para a compreensão dos diferentes comportamentos dos sistemas. As características principais dos sistemas não lineares fracamente caóticos serão destacadas a seguir (Nussenzveig, 2008 *apud* Menezes Filho, 2003).

- 1) São sistemas não lineares em evolução permanente, compostos por grande número de unidades interagindo entre si e com o meio ambiente, mas não guardam uma relação de proporcionalidade mútua;
- 2) Cada unidade integrante do sistema pode apresentar o fenômeno de frustração, em que as informações recebidas pelos vizinhos podem ser contraditórias, não satisfazendo a todas ao mesmo tempo;
- 3) O sistema é adaptativo, logo, o processo de evolução permanente apresenta correlações de longo alcance temporal (memória) e espacial (estruturas fractais). A estrutura fractal é uma característica importante no sistema fracamente caótico, pois é um parâmetro que quantifica a capacidade da unidade de ocupar o espaço, independentemente da estrutura geométrica do mesmo. O fractal se estende pelo espaço com dimensão menor, repetindo o mesmo esquema indefinidamente (Figura 32);

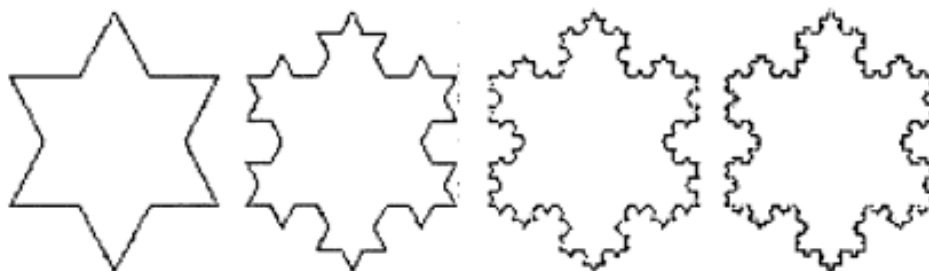


Figura 32 – Estrutura Fractal de Von Koch (De la Sota, 2004).

- 4) Tendo em vista o comportamento sistêmico de interação entre si e com o meio ambiente, é possível aparecer propriedades coletivas, qualitativamente novas, e que não podem ser identificadas em nenhuma de suas unidades constituintes. Estas propriedades surgem pelo processo de disputa e colaboração, de forma repetitiva e imitativa;
- 5) O sistema se organiza espontaneamente na chamada criticalidade auto-organizada, estado desprovido de qualquer escala característica (fractal) e sendo sensível a qualquer perturbação, cujas estatísticas de seus principais parâmetros são em lei de potência. Assim sendo, seu estado é considerado intermediário, entre ordem e caos, e caracteriza-se por apresentar seu maior expoente de *Lyapunov* nulo ou muito próximo de zero. Este expoente avalia se determinado sistema possui um comportamento fortemente ou fracamente caótico;
- 6) O sistema normalmente apresenta superfícies de energia com múltiplos atratores, o que leva ao desenvolvimento de histerese (espaço-temporal dependente de toda a história anterior), podendo permanecer encalhado em um mínimo local. Logo, qualquer perturbação diminuta que o sistema venha a sofrer, poderá deslocá-lo para outro estado de equilíbrio temporário, com características completamente diferentes das de seu estado original.
 O meteorologista Lorenz, ao estudar a variação do clima a longo prazo, descobriu que pequenas variações em um estado original do sistema podem causar imensas perturbações a longo prazo (metáfora do efeito borboleta). Portanto, trajetórias de sistemas não caóticos podem convergir, para um tempo

muito longo, para um ponto (atratores pontuais) ou para um círculo limite (atratores limites).

Por outro lado, sistemas fortemente caóticos apresentam atratores estranhos, caóticos, tal como observado na Figura 33 (Valerio, 2014).

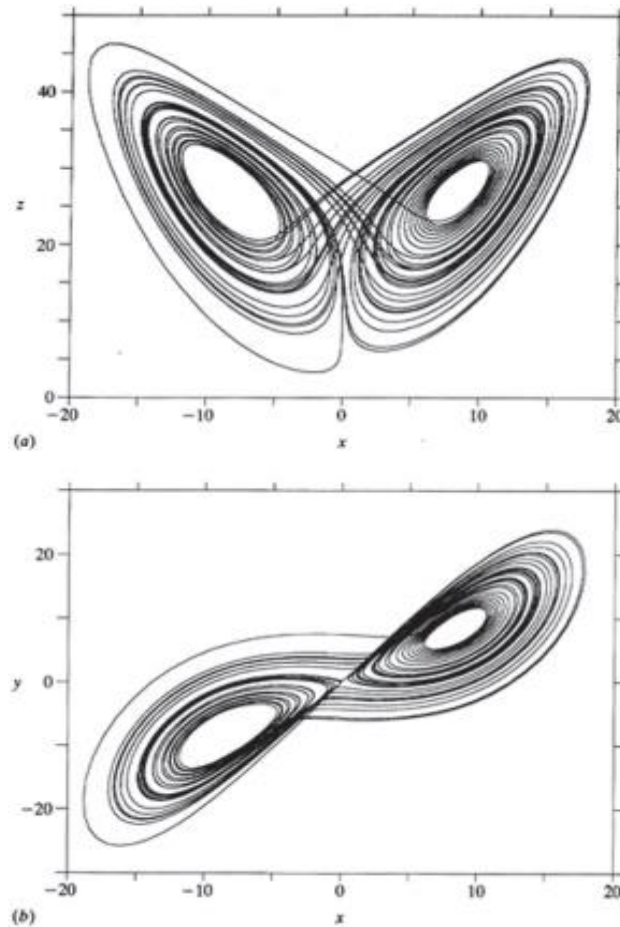


Figura 33 – Atrator de Lorenz projetada nos planos xz e xy (De Oliveira & Mendes, 2006).

- 7) Outra característica importante é o chamado ruído $1/f$ (ruído bruxuleante), caracterizado pela superposição de sinais de todas as escalas de tamanho e duração possíveis.

Vale destacar que algumas características dos sistemas fracamente caóticos são distintas das características observadas em sistemas fortemente caóticos.

Assim, Tsallis (2017) identificou as principais características dos sistemas fortemente caóticos:

- Correlações espaço-temporais de curto alcance;
- Processos markovianos (memória curta);
- Máximo expoente de Lyapunov positivo;
- Sistemas ergódicos;
- Descritos pelas geometrias Riemaniana;
- Estatísticas gaussianas;
- Descritos pelas entropias aditivas de Boltzmann-Gibbs;
- Funções exponenciais na caracterização de tais sistemas.

Portanto, estes últimos apresentam correlações de curto alcance temporal e espacial – ou pode não as apresentar, simplesmente –, estatísticas gaussianas e expoentes de Lyapunov fortemente positivos, caracterizando uma divergência exponencial entre trajetórias inicialmente muito próximas. (Menezes Filho, 2003).

2.2.2 Entropia de Boltzmann-Gibbs

A mecânica estatística é uma das disciplinas importantes da física teórica contemporânea, tendo como relevância o conceito de entropia, cuja aplicação tem se mostrado válida para as análises de sistemas com comportamento caótico. Segundo Durão (2015), a entropia apresenta, dentre outras, as seguintes características: não aparece em nenhuma equação de movimento fundamental; relaciona aspectos macroscópicos e microscópicos da matéria em equilíbrio térmico; e sua natureza é probabilística.

O conceito de entropia é interpretado como a mudança de um estado mais ordenado para um estado menos ordenado, sendo responsável pela irreversibilidade do comportamento de sistemas não lineares caóticos. Esta desordem é a medida do número de formas que um determinado arranjo microscópico pode realizar um dado estado macroscópico (Duração, 2015).

Durão (2015) descreve que, de acordo com o físico Boltzmann, a entropia está associada com o número de estados microscópicos acessíveis ao sistema. Desta forma, quanto maior for o número W de estados microscópicos acessíveis, maior será a entropia S_B . Ainda assim, a entropia de Boltzmann (S_B) cresce logaritmicamente, conforme a equação (3) – em que k é a constante de Boltzmann –, e não linearmente com o número de estados microscópicos.

$$S_B = k \ln W \quad (3)$$

De acordo com Menezes Filho (2003), a equação (3) é um caso particular de um mais geral, onde a probabilidade do sistema não é igual para todos os estados microscópicos que realizam um dado estado macroscópico. Deste modo, a expressão acima se transformasse na entropia de Boltzmann-Gibbs (S_{BG}), conforme a equação (4) (Callen, 1985):

$$S_{BG} = -k \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i \quad (4)$$

onde p_i é a probabilidade de o sistema encontrar-se no seu i -ésimo estado ($\sum_i p_i = 1$), e o somatório é realizado sobre todos os seus estados microscópicos possíveis (W) em que o sistema pode ser encontrado.

A expressão (4) apresenta a propriedade aditiva, dada pelo logaritmo em sua definição. Portanto, a entropia de Boltzmann-Gibbs de um sistema composto é igual à soma das entropias dos sistemas A e B, probabilisticamente independentes, como pode ser observado na equação (5) (Menezes Filho, 2003). Caso contrário, a entropia é dita não aditiva.

$$S_{BG} (A + B) = S_{BG} (A) + S_{BG} (B) \quad (5)$$

Ignacio (2019) salienta que a distribuição probabilística que maximiza a entropia de Boltzmann-Gibbs é a distribuição gaussiana, dada pela equação (6).

$$y_g = a \left[e^{\left[-\left(\frac{x-c}{b} \right)^2 \right]} \right] \quad (6)$$

onde a, b e c são parâmetros de ajuste da distribuição gaussiana.

Ainda de acordo com Menezes Filho (2003), a entropia de Boltzmann-Gibbs é satisfatória para sistemas que apresentam as seguintes características:

- 1) Sistemas sem interação ou com interações espaciais de curto alcance entre seus estados;
- 2) Sistemas com memória temporal de curto alcance;
- 3) Sistemas cuja evolução no espaço de fase não é multifractal.

Assim sendo, para sistemas fracamente caóticos ou complexos, tal forma entrópica não pode ser aplicada, uma vez que estes sistemas apresentam, como já se aludiu anteriormente, características totalmente distintas dos sistemas fortemente caóticos, razão pela qual outras formas entrópicas, que generalizam a entropia de Boltzmann-Gibbs, se fazem necessárias.

2.2.3 Entropias generalizadas

Como abordado anteriormente, os sistemas fracamente caóticos apresentam uma série de características, dentre as quais destacam-se as seguintes (Menezes Filho, 2003):

- 1) Sistemas com interações espaciais de longo alcance entre seus estados;
- 2) Sistemas com memória temporal de longo alcance;
- 3) Sistemas cuja evolução no espaço de fase é multifractal;
- 4) A existência de algum tipo de dissipação dentro do sistema.

Tsallis (1988) propôs uma generalização da entropia de Boltzmann-Gibbs, por meio de uma forma entrópica paramétrica S_q com um parâmetro de ajuste q , como

mostra a equação (7), que restitui entropia clássica aditiva de Boltzmann-Gibbs para $q \rightarrow 1$.

$$S_q = k \sum_{i=1}^W p_i \ln_q \left(\frac{1}{p_i} \right) = k \frac{1 - \sum_{i=1}^W p_i^q}{q-1} \quad (7)$$

onde q é adimensional, k é uma constante positiva, e que a soma acontece sobre todos os estados microscópicos acessíveis ao sistema (W).

Ademais, $\sum_{i=1}^W p_i = 1$ é uma condição de normalização e

$$\ln_q x = \frac{(x^{(1-q)} - 1)}{(1 - q)} \quad (q \in \mathbb{R})$$

e

$$e_q^x \cong [1 - (1 - q)x]^{\frac{1}{1-q}} \quad (q \in \mathbb{R})$$

são as funções logaritmo e exponencial generalizadas.

Menezes Filho (2003) destaca que, em tal forma entrópica generalizada, a entropia de um sistema composto pode ser maior (superaditivo) ou menor (subaditivo) que a soma das entropias dos sistemas constituintes. Assim, o parâmetro entrópico q é, na verdade, responsável pela não aditividade do sistema (para $q \neq 1$), simbolizando sua dinâmica microscópica.

A otimização da forma entrópica generalizada de Tsallis fornece a distribuição q -gaussiana, mostrada abaixo (equação (8)):

$$y_q(x) = [1 - (1 - q)x^2]^{\frac{1}{(1-q)}} \quad (8)$$

Tsallis propôs ainda a generalização de sua própria forma entrópica generalizada, pois percebeu que existiam casos que não poderiam ser descritos, nem por S_{BG} , nem por S_q . Desta forma, foi considerada a entropia $S_{q,\delta}$, que restitui a entropia

S_q quando $\delta = 1$, sendo δ o parâmetro entrópico de ajuste, além de manter o parâmetro q , a constante positiva k e somatório para todos os estados microscópicos acessíveis ao sistema (W). Essa nova entropia é descrita pela equação (9).

$$S_{q,\delta} = k \sum_{i=1}^W p_i \left[\ln_q \left(\frac{1}{p_i} \right)^{\frac{1}{\delta}} \right] \quad (9)$$

que, maximizada, fornece a distribuição de probabilidade q -exponencial estendida, conforme a equação (10).

$$y_{q\text{-exp}} = a' \left[1 - (1 - q) \left(\left(\frac{x-c'}{b'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{\delta}} \right]^{\frac{1}{1-q}} \quad (10)$$

Nela, q e δ são parâmetros entrópicos, e a' , b' e c' são parâmetros de ajuste da distribuição q -exponencial estendida, estando diretamente relacionados à variação do tamanho, desvio padrão e média da distribuição, respectivamente. À vista disso, percebe-se seu valor satisfatório para sistemas não lineares fracamente caóticos.

Menezes Filho (2003), Ignacio (2019), Ribeiro (2020) e Araújo (2021) propõem a aplicação da Teoria do Caos na engenharia geotécnica, particularmente na investigação de fenômenos relacionados à queda de blocos rochosos, com resultados iniciais bastante promissores. Neste sentido, este trabalho se insere na referida linha de pesquisa, procurando contribuir para a análise e compreensão deste intrincado e complexo fenômeno de instabilização.

3 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTUDO DE QUEDA DE BLOCOS

Este capítulo apresenta o estudo da queda de blocos rochosos em dois perfis transversais de geometrias distintas, um côncavo e o outro convexo, tal como em Ignácio (2019). Mais detalhadamente, utilizou-se o programa RocFall versão 8.018, mantendo-se as mesmas características dos materiais envolvidos e variando-se unicamente a rugosidade das superfícies das encostas. Com base nos resultados experimentais, aplicou-se a Teoria do Caos, procedendo-se ao ajuste de distribuições probabilísticas gaussiana e/ou q-exponencial estendida, com o auxílio do programa Grapher versão 16.2.354.

Por fim, são apresentadas análises e interpretações dos resultados e sua comparação com os resultados de Ignácio (2019).

3.1 Programa numérico RocFall

RocFall (Rocscience Inc.) é um programa computacional bi ou tridimensional de simulação de queda de blocos rochosos, vinculado a análises estatísticas e probabilísticas da localização final dos blocos (Figura 34). É uma importante ferramenta para a elaboração de projetos de intervenção de engenharia e para a análise de risco deste fenômeno de instabilização. Rocha (2009) salienta que as análises do software são realizadas por meio de conceitos balísticos, que utilizam as relações de força gravitacional, impulso inicial após cada impacto, velocidade e inclinação de seu vetor em relação à horizontal. Sendo assim, o modelo numérico verifica a ocorrência ou não do impacto e os possíveis cenários de continuação do movimento do bloco.

O software permite alterar as propriedades dos materiais da encosta, tais como coeficientes de restituição normal e tangencial, coeficiente de resistência ao rolamento, ângulo de fricção e rugosidade dos diferentes materiais da encosta. Além disso, fornece informações sobre barreiras protetoras, como sua altura, inclinação e rigidez, podendo o usuário escolher a mais apropriada para as suas necessidades.

Ademais, as simulações podem abranger um único tipo de geometria da encosta e bloco, ou mesmo situações mais complexas (Rocscience, 2004).

O programa modela ainda blocos rochosos segundo características estabelecidas de antemão, tais como massa e densidade adequadas, sua geometria regular ou irregular, assim como diferentes condições iniciais, dadas por velocidades horizontal e vertical, velocidade rotacional e rotação inicial.

Seus resultados permitem também análises estatísticas e probabilísticas da localização final dos blocos encosta abaixo (Figura 34). Neste sentido, Silveira (2017) descreve os efeitos de geometrias regulares e irregulares das encostas, destacando que, nas primeiras, a trajetória dos blocos resulta em uma maior precisão em seu alcance final.

Por outro lado, superfícies de geometria irregular promovem um maior alcance final dos blocos, podendo não apresentar uma precisão tão boa, em razão das velocidades dos blocos apresentarem uma componente horizontal, que modifica sua trajetória.

Portanto, os resultados das simulações numéricas da queda de blocos são bastante sensíveis a pequenas variações dos parâmetros em jogo, necessitando-se cautela na atribuição dos dados de entrada e de eventuais simplificações geométricas adotadas na encosta.



Figura 34 – RocFall versão 8.018: página inicial do programa.

A sequência de trabalho no RocFall pode ser representada por dois modos, o de projeto e o de resultado, tal como indicados a seguir.

1. Modo Projeto:

1. Método probabilísticos e de análise.
2. Condições de mecanismo.
3. Geometria da encosta.
4. Adicionar o local de lançamento do bloco (*add point seeder*). Em seguida:
 - i. Definição das propriedades dos blocos:
 - Número de blocos.
 - Condições iniciais.
 - Geometria do bloco (polígono do tipo de rocha).
5. Definição dos materiais da encosta e seus parâmetros:
 - i. Coeficiente de restituição normal e tangencial.
 - ii. Atrito dinâmico e de rolamento.
 - iii. Rugosidade da superfície da encosta.
6. Adicionar Berma e/ou Barreira.

2. Modo Resultado:

1. Computar e visualizar os resultados (*results*).
2. Definição das ferramentas gráficas para visualizar os resultados da análise (*graphs*):
 - i. Localização final dos blocos.
 - ii. Dados sobre a encosta:
 - Velocidade rotacional e translacional.
 - Energia cinética total, translacional e rotacional.
 - Altura de salto.
 - iii. Distribuição.
 - iv. Entre outros.
3. Exportar os resultados dos gráficos para a planilha Excel ou área de trabalho (transferidos para programas de processamento de texto ou planilhas).

A eficácia do software RocFall está relacionada à sua simplicidade em obter os resultados e à possibilidade de variação de parâmetros ao longo da encosta, como já se observou. Ademais, destaca-se a facilidade deste programa de interagir com o software Excel (Microsoft Office), permitindo importar os dados e gráficos diretamente para a sua interface (Tavares, 2015).

Conforme foi enfatizado anteriormente, os programas numéricos utilizam-se de métodos de amostragens estatísticos e probabilísticos, para determinar as distribuições estatísticas em simulações da queda de blocos. Os métodos probabilísticos destacados no RocFall 8.018 são: método de Monte Carlo e método Hipercubo Latino.

O método de Monte Carlo é um procedimento numérico que utiliza números aleatórios de qualquer distribuição de probabilidade relacionados às variáveis de entrada, assim como a relação entre elas, podendo-se repetir este procedimento inúmeras vezes (Ribeiro, 2020). A vantagem deste método reside na possibilidade de utilizar vários computadores operando paralelamente, com a expectativa de gerar modelos com vários números aleatórios muito próximos aos reais, pois a resolução do problema fica vinculada a vários processadores, aumentando a capacidade de processamento e facilita a obtenção de um resultado final otimizado (Burban, 2008).

Por outro lado, o método Hipercubo Latino seleciona vários números aleatoriamente e os distribui segundo uma distribuição probabilística pré-definida. A vantagem deste método está relacionada à possibilidade de reduzir consideravelmente o número de simulações, de modo a alcançar o mesmo nível de precisão (Penna, 2009).

Ressalta-se que o método de Monte Carlo exige elevado número de simulações para se obter uma boa distribuição com valores probabilísticos mais precisos, sendo aplicado, tanto em sistemas lineares, quanto em sistemas não lineares.

Esta pesquisa fez uso do Método de Monte Carlo (Figura 35) de modo a obter-se uma maior confiabilidade nos resultados.

Além disso, o programa efetua as simulações numéricas dos blocos rochosos segundo dois métodos distintos: o método da Massa Concentrada e o método do Corpo Rígido (rigoroso), já apresentados na subseção 2.1.2, este último possibilitando resolver problemas com mais eficiência e realismo.

Assim, o método da Massa Concentrada contém certas desvantagens, devido a inviabilidade de simular a energia cinética rotacional do bloco, o que impede o rolamento de ocorrer de forma realista, além de omitir a influência que a forma, o

tamanho e o momento angular do bloco exercem ao longo de sua trajetória (Tavares, 2015).

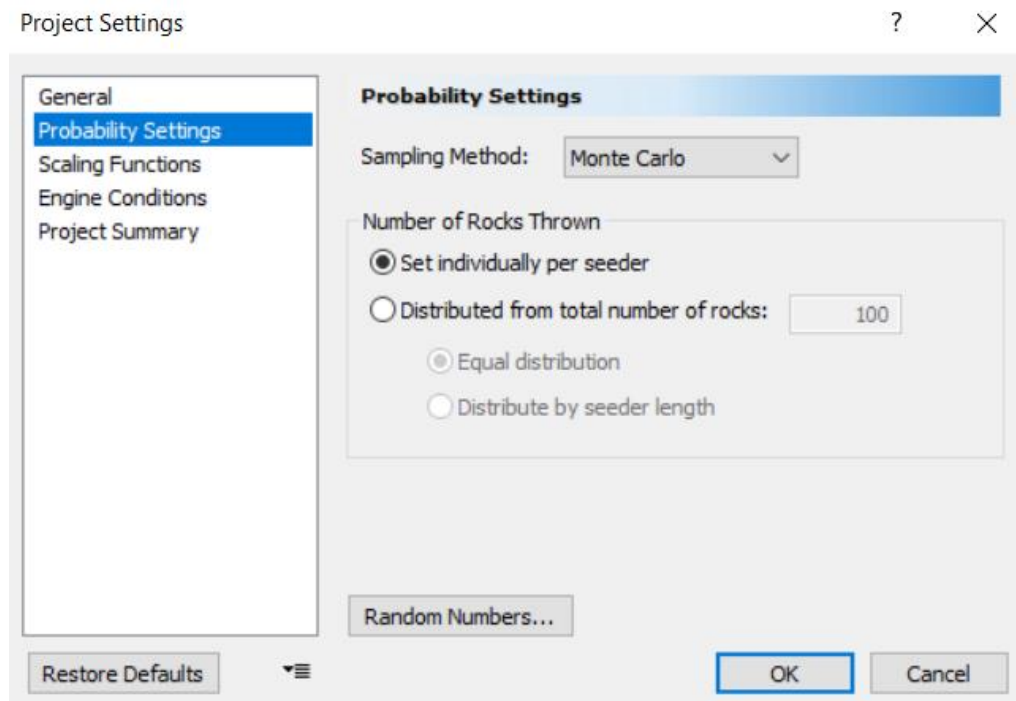


Figura 35 – Método de Probabilidade utilizado no RocFall 8.018.

Já o Método do Corpo Rígido se destaca por levar em conta a reação do impulso do bloco durante o impacto com a encosta, determinando, assim, os próximos movimentos do bloco, como deslizamento e rolamento (Ribeiro, 2020).

Portanto, os parâmetros utilizados por cada abordagem, considerando os procedimentos diferentes de cálculo, para a computação dos dados, são:

- Método de Massa Concentrada – ângulo de atrito, coeficientes de restituição normal e tangencial, e rugosidade da superfície da encosta;
- Método de Corpo Rígido - ângulo de atrito, coeficientes de restituição normal e tangencial, rugosidade da superfície da encosta, atrito dinâmico, e resistência ao rolamento.

Isto posto, o Método do Corpo Rígido é o que se utilizou nesta pesquisa (Figura 36), pois promove simulações mais realistas, possibilitando adotar diferentes geometrias e tamanhos de blocos, eventualmente alterando sua trajetória, salto e alcance final.

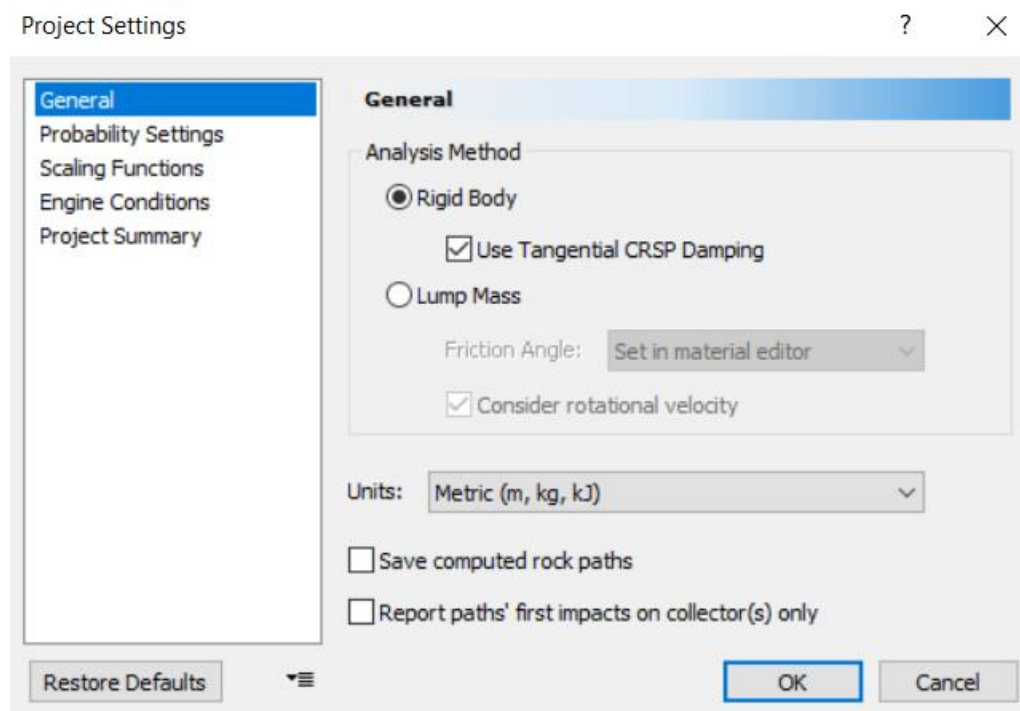


Figura 36 – Método de Análise utilizado no RocFall 8.018.

3.2 Programa Grapher para distribuições probabilísticas

Subsequentemente aos resultados computados no software RocFall, é gerado um histograma de distribuição com a localização final dos blocos rochosos, sendo seus dados exportados para uma planilha Excel e, assim, analisados para serem importados para o software Grapher. Vale ressaltar que o número de blocos lançados durante as simulações não corresponde à mesma quantidade de blocos obtida no resultado final. Ou seja, há inúmeros lançamentos que, simplesmente, não são computados, resultando em perdas de dados que são identificadas, devido ao número excessivo de dados a serem manipulados, e à característica geométrica da encosta (Figura 37).

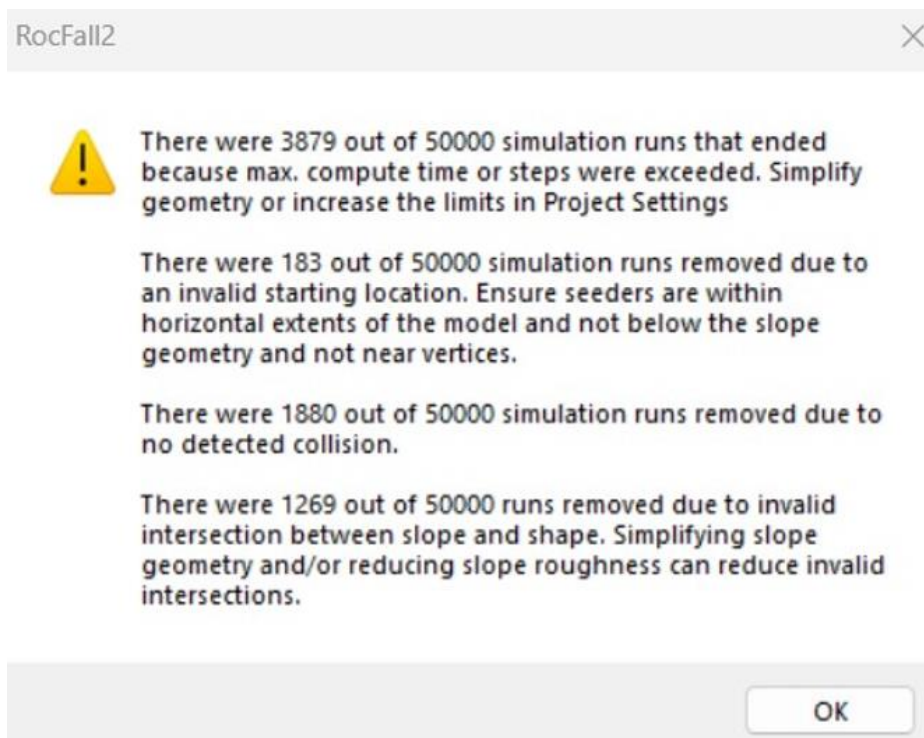


Figura 37 – Alerta destacado no RocFall 8.018 após o resultado ser computado.

O programa Grapher versão 16.2.354 (Golden Software, LLC) (Figura 38) é um programa sofisticado que transforma os dados de entrada, a partir de equações dadas internamente ou estipuladas pelo usuário, com a melhor qualidade de publicação disponível. Este software cria mais de 70 tipos de gráficos diferentes em formato 2D e 3D, incluindo os de linha, dispersão, histograma, barras, Q-Q, de pizza, entre outros. É possível adicionar curvas de ajustes, intervalos de confiança, e até exibir informações estatísticas dos valores. Ao gerar os gráficos, é permitido personalizá-los de forma rápida e fácil, assim como criar um modelo contendo as configurações personalizadas do usuário, a fim de realizar várias aplicações. Por fim, após a conclusão do gráfico, o usuário pode exportá-lo em vários formatos.

Para esta pesquisa, foi importada a planilha do Excel gerada no programa Rocfall, contendo: a localização final de cada bloco, identificada como “a”; a quantidade de blocos por localização após a simulação, identificada como “b”; e a relação entre a quantidade de blocos por localização e a quantidade de blocos totais após a simulação, identificada como “c”.



Figura 38 – Grapher versão 16.2.354: página inicial do programa.

Em seguida, foram utilizadas as equações das distribuições de probabilidade Gaussiana e q-Exponencial Estendida (expressões (6) e (10), respectivamente), já mencionadas anteriormente, para a inserção no Grapher.

Após a inserção de cada curva no Grapher, o programa apresenta os valores das variáveis de ajuste da distribuição de probabilidade e do coeficiente de correlação (R). Para a distribuição Gaussiana, as variáveis de ajuste são identificadas como a, b e c, sendo a curva de distribuição de probabilidade representada pela cor azul.

Já para a distribuição q-Exponencial Estendida, as variáveis são identificadas como a, b, c, q e δ , sendo a curva de distribuição de probabilidade representada pela cor vermelha.

A Figura 39 apresenta as variáveis de ajuste das distribuições, os respectivos coeficientes de correlação (R) e as equações utilizadas para a distribuição gaussiana e q-exponencial estendida, gerados no programa Grapher. Salienta-se que a combinação linear desses ajustes é representada pelo somatório das duas equações (gaussiana + q-exponencial estendida).

A Figura 40 ilustra as distribuições de probabilidade Gaussiana e q-Exponencial Estendida, ajustadas aos dados experimentais fornecidos pelas análises numéricas do programa RocFall, em uma encosta de superfície rugosa, onde o eixo das ordenadas

é representado pela frequência relativa do número de blocos (probabilidade $P(x)$), e o das abscissas, pela sua localização (x).

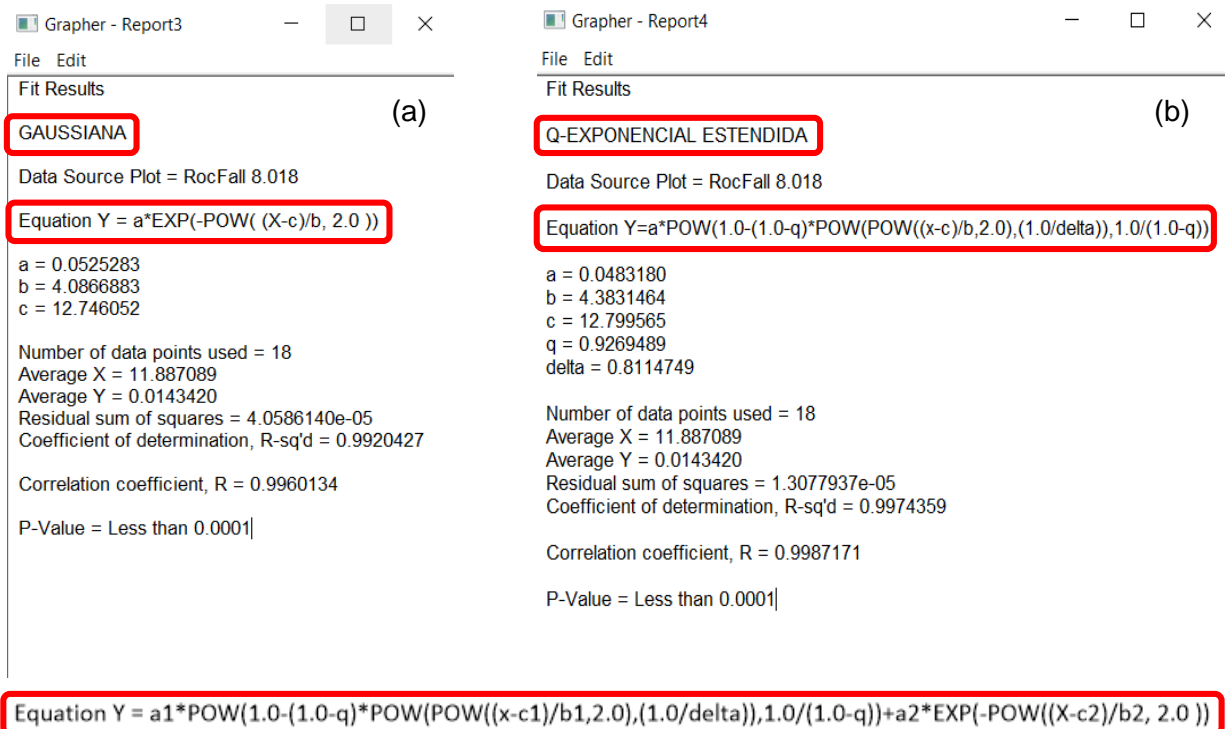


Figura 39 – Resultado dos ajustes das distribuições de probabilidade: (a) Gaussiana e (b) q-Exponencial Estendida.

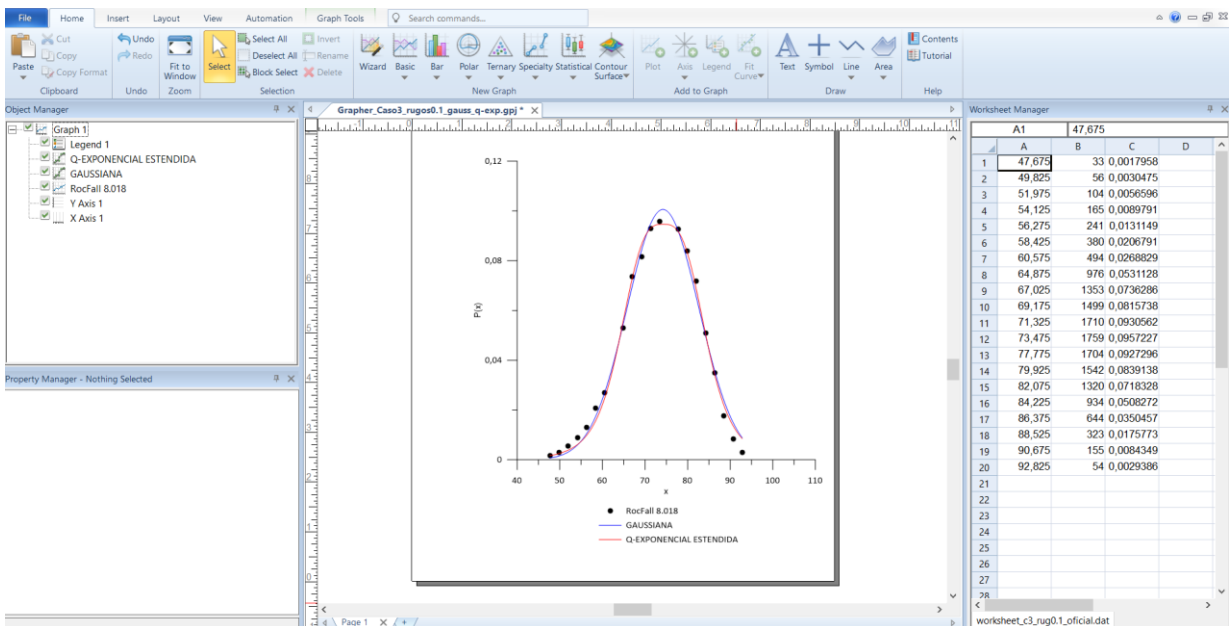


Figura 40 – Layout do Grapher com o resultado em um gráfico $P(x)$ versus x .

3.3 Parâmetros adotados para as análises

Esta pesquisa visa dar continuidade aos estudos do comportamento de queda de blocos rochosos já realizados por Ignacio (2019), Ribeiro (2020) e Araujo (2021).

Ignácio (2019) estudou perfis de encostas com 4 (quatro) geometrias distintas, sendo dois perfis côncavos e dois convexos, além de um caso real em uma das seções mapeada pela GEO-RIO, no Morro do Cantagalo, na zona sul da cidade do Rio de Janeiro. O material da encosta utilizado foi composto por gnaisse facoidal, uma rocha metamórfica de granulometria grossa, constituída por minerais principais como quartzo, feldspato, biotita e opacos, sendo este tipo de rocha predominante na cidade do Rio de Janeiro.

Ademais, a geometria das seções das encostas possui a base alongada, de modo a acomodar as trajetórias dos blocos durante a queda e seus respectivos alcances finais, com o ponto de lançamento dos blocos fixado no ponto mais alto das seções.

Os blocos rochosos, também de gnaisse facoidal, apresentaram formato irregular e diferentes tamanhos. Para cada seção transversal da encosta, Ignácio (2019) analisou a influência dos tamanhos de blocos: BIP – Bloco Irregular Pequeno, BIM – Bloco Irregular Médio, BIG – Bloco Irregular Grande.

Outras características relevantes solicitadas pelo programa RocFall para a modelagem geotécnica foram:

- Método de análise: método do Corpo Rígido.
- Método probabilístico: método de Monte Carlo.
- Número de blocos utilizados para cada simulação: 100.000 blocos.
- Geometria dos blocos:
 - ✓ BIP - tamanho aproximado: 0,50 m; massa: 337,50 kg; peso específico: 27,00 kN/m³.
 - ✓ BIM - tamanho aproximado: 1,00 m; massa: 2.700,00 kg; peso específico: 27,00 kN/m³.
 - ✓ BIG - tamanho aproximado: 1,40 m; massa: 7.408,80 kg; peso específico: 27,00 kN/m³.

- Parâmetros do material gnáissico da encosta:
 - ✓ Coeficiente de Restituição Normal: 0,35.
 - ✓ Coeficiente de Restituição Tangencial: 0,85.
 - ✓ Atrito dinâmico:0,5.
 - ✓ Atrito de rolamento: 0,15.
 - ✓ Rugosidade da superfície da encosta: não foi considerado.

Ignácio (2019) reforça que os parâmetros geotécnicos das encostas e dos blocos rochosos, constituídos por gnaiss facoidal, foram selecionados a partir de pesquisas realizadas por Menezes Filho (2003), Nunes *et al.* (2008), Rocha (2009) e Pelizoni (2014). Além disso, em sua pesquisa, decidiu-se investigar o comportamento das distribuições de probabilidade na região de sua cauda, razão pela qual, além dos gráficos $P(x)$ vs x , outros foram apresentados em seu trabalho, possuindo eixo vertical em escala logarítmica.

As pesquisas de Ribeiro (2020) e Araújo (2021), que deram continuidade à metodologia da Teoria do Caos abordada por Ignácio (2019), também mantiveram as mesmas características das modelagens numéricas e parâmetros geotécnicos citados anteriormente.

Assim, Ribeiro (2020) analisou o formato dos blocos instáveis, de geometria regular, quadrangulares e hexagonais, com bordas arredondadas e vivas, lançados sobre os mesmos perfis de encostas utilizados por Ignácio (2019). Os resultados mostraram que a geometria dos blocos influenciou consideravelmente nas distribuições finais no pé dos taludes. No entanto, encostas de formato convexo continuaram a produzir, majoritariamente, distribuições gaussianas, ao passo que as de formato côncavo forneceram, em sua maioria, distribuições q-exponenciais estendidas.

Araújo (2021) estudou a influência dos coeficientes de restituição normal e tangencial, mantendo-se a geometria das encostas rochosas e o tipo irregular de bloco, tal como em Ignácio (2019). Os resultados sugeriram que aqueles coeficientes desempenham um papel primordial na resposta do fenômeno físico. Especificamente, valores menores dos coeficientes de restituição – e, portanto, conduzindo a uma maior dissipação de energia - forneceram resultados condizentes com a distribuição q-exponencial estendida, independentemente da geometria dos perfis, convexa ou

côncava. Portanto, este trabalho confirmou a influência capital da dissipação de energia na resposta dos sistemas complexos.

Particularmente, de forma similar ao adotado por Ignácio (2019), optou-se, nesta pesquisa, por manter as mesmas geometrias das encostas, dos blocos e parâmetros geotécnicos, exceto pela presença da rugosidade nas encostas, o que será detalhado adiante. Além disso, optou-se neste trabalho por utilizar blocos irregulares de tamanho médio (BIM), uma vez que, de acordo com Ignácio (2019), o seu tamanho não tem influência nas distribuições de probabilidade das posições dos blocos no pé dos taludes.

Em cada perfil foi fixado o ponto inicial de lançamento dos blocos na parte mais alta da seção, as condições iniciais dadas somente pela velocidade horizontal, adotada igual a 1 m/s, com distribuição normal e desvio padrão 0. Além disso, buscou-se utilizar o maior número de blocos em cada simulação, com a finalidade de obter estatísticas mais robustas e distribuições probabilísticas mais confiáveis, ficando delimitado os lançamentos em 100.000 blocos.

Por fim, como já assinalado, considerou-se as rugosidades das superfícies das encostas (elucidado no item 1.3.1), a fim de avaliar a sua influência nas distribuições probabilísticas dos blocos localizados no pé dos taludes.

Desta forma, foram adotados três valores de rugosidade, definidos segundo distribuições estatísticas normais de espaçamento e amplitude, tal como sugerido no tutorial do programa RocFall (Rocscience, 2004). Estes dados podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros para a modelagem geotécnica da encosta.

Rugosidade		Número de Blocos	Perfil transversal
Espaçamento (m)	Amplitude (m)		
0.10	0.10	20.000	Côncavo e Convexo
0.30	0.30	50.000	
0.50	0.50	80.000	

Observando-se a Tabela 5, nota-se que as simulações se limitaram a valores inferiores a 100.000 blocos. A razão de ser de tal limitação está em que, ao executar as simulações com o número máximo de blocos rochosos, o software apresentava erro no momento de computar os resultados, interrompendo os cálculos e travando o computador. Assim, foi preciso, além de reduzir o número de blocos lançados, executar as simulações em computadores com as seguintes especificações:

- Processador: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5 – 1135G7.
- Memória RAM: 16,0 GB.
- Sistema operacional de 64 bits.

A sequência de trabalho no RocFall, bem como suas respectivas características e parâmetros geotécnicos, utilizados para as simulações desta pesquisa, são dados a seguir:

1. Condições de mecanismo: determina quando o cálculo de um certo bloco será interrompido (Figura 41).

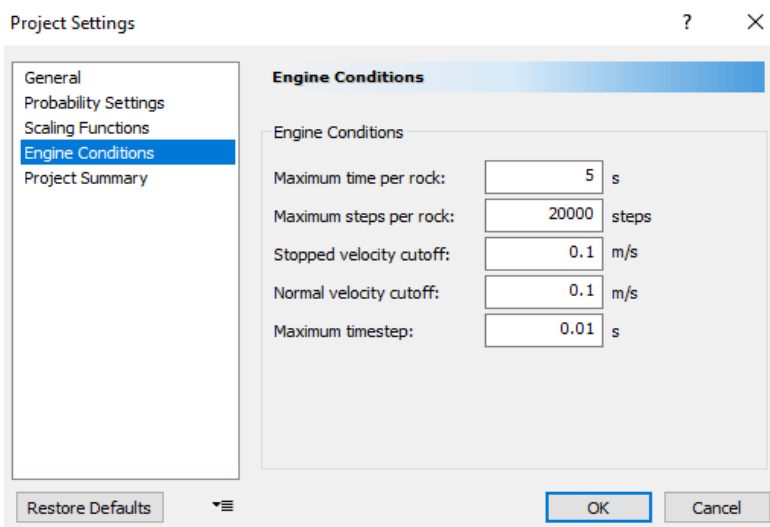


Figura 41 – Condições de mecanismo – configuração padrão.

2. Geometria da encosta: material da encosta constituída por gnaiss facoidal (Figura 42). A geometria pode ser inserida por coordenadas (x, y) ou importação de perfis topográficos.

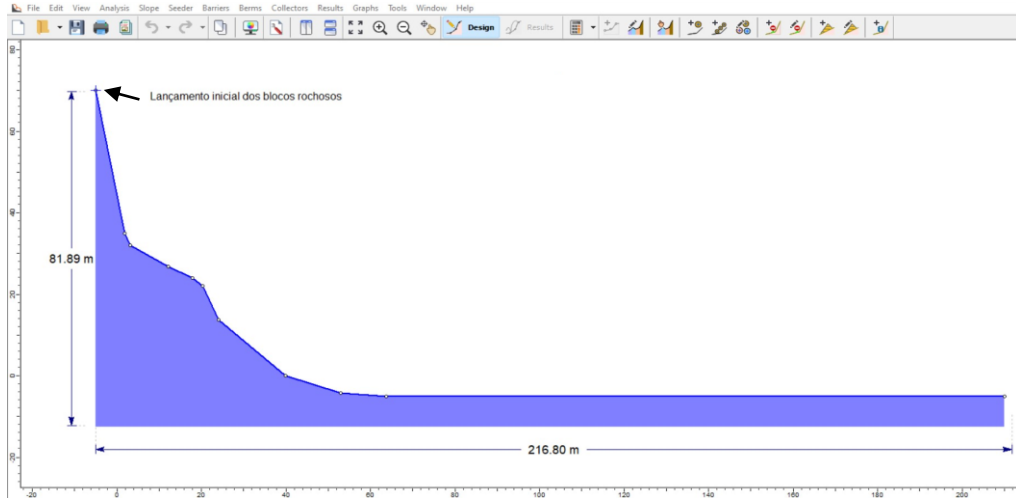


Figura 42 – Perfil transversal convexo com o local de lançamento do bloco.

- Propriedades dos blocos: dados de condição inicial dos blocos (valores das velocidades horizontal, vertical e rotacional, e da rotação inicial do bloco no instante que começa seu movimento) e a quantidade total de blocos lançados na simulação (Figura 43).

Seeder Properties ? X

Seeder Name:

Rocks to Throw

Number of Rocks: Overall

Rock Types: [Create New](#) [Edit](#)

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	smooth shapes
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	polygons
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bloco Rochoso
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Group 1

Initial Conditions

Horizontal Velocity (m/s):

Vertical Velocity (m/s):

Rotational Velocity (°/s):

Initial Rotation (°):

Figura 43 – Propriedades dos blocos.

4. Geometria do bloco: definida a partir de sua massa e densidade, com o método do corpo rígido, sendo também modelada sua geometria (Figura 44).

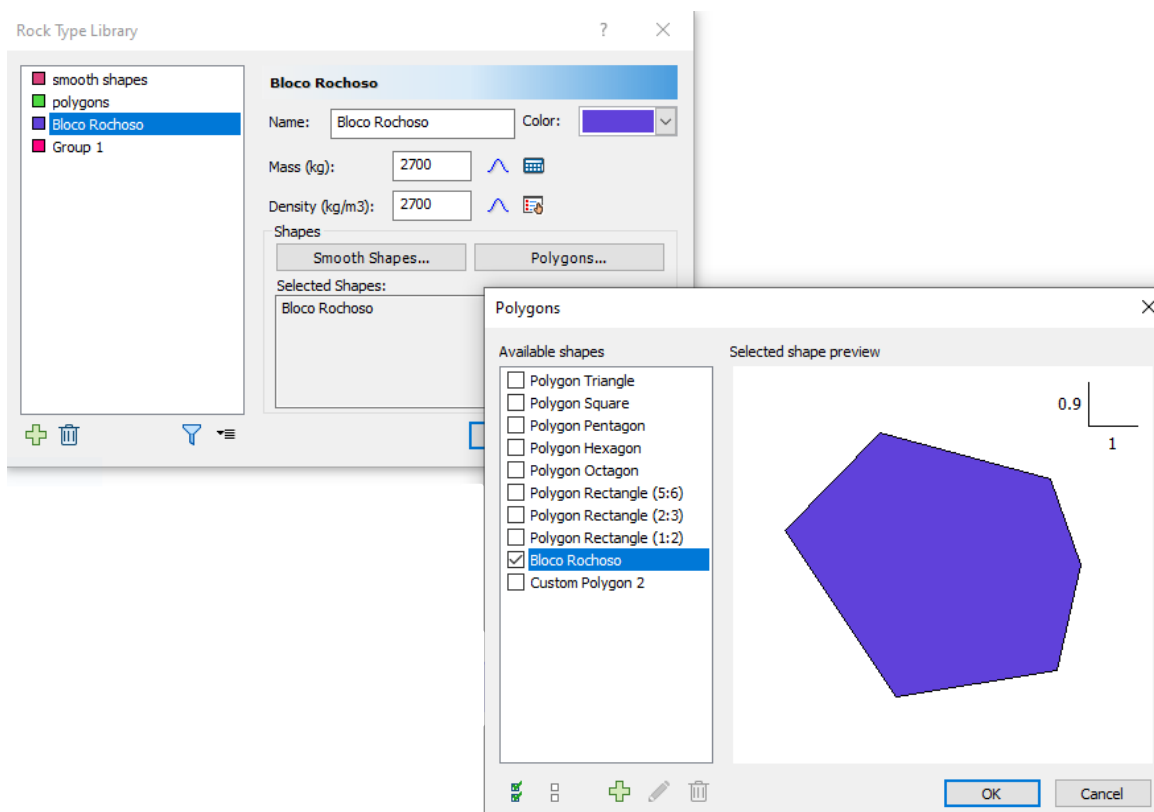


Figura 44 – Geometria do bloco utilizada para a simulação – BIM (Bloco Irregular Médio).

5. Definição dos materiais da encosta: coeficientes de restituição normal e tangencial, ângulo de atrito e de rolamento, e rugosidade. O programa permite que sejam atribuídos distintos tipos de materiais ao longo do perfil da encosta (Figura 45).

Slope

Material: Afloramento rochoso de gnaiss

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.35	Normal	0	0	0
Tangential Restitution	0.85	Normal	0	0	0
Dynamic Friction	0.5	Normal	0.04	0.12	0.12
Rolling Friction	0.15	Normal	0.02	0.06	0.06
Slope Roughness Spacing	0.5	Normal	0	0	0
Slope Roughness Amplitude	0.5	Normal	0	0	0

Figura 45 – Materiais constituintes da encosta com um exemplo de análise da rugosidade.

6. Cômputo e visualização dos resultados (*results*): observam-se as trajetórias e alcances finais desenvolvidos pelos blocos ao longo da encosta (Figura 46).

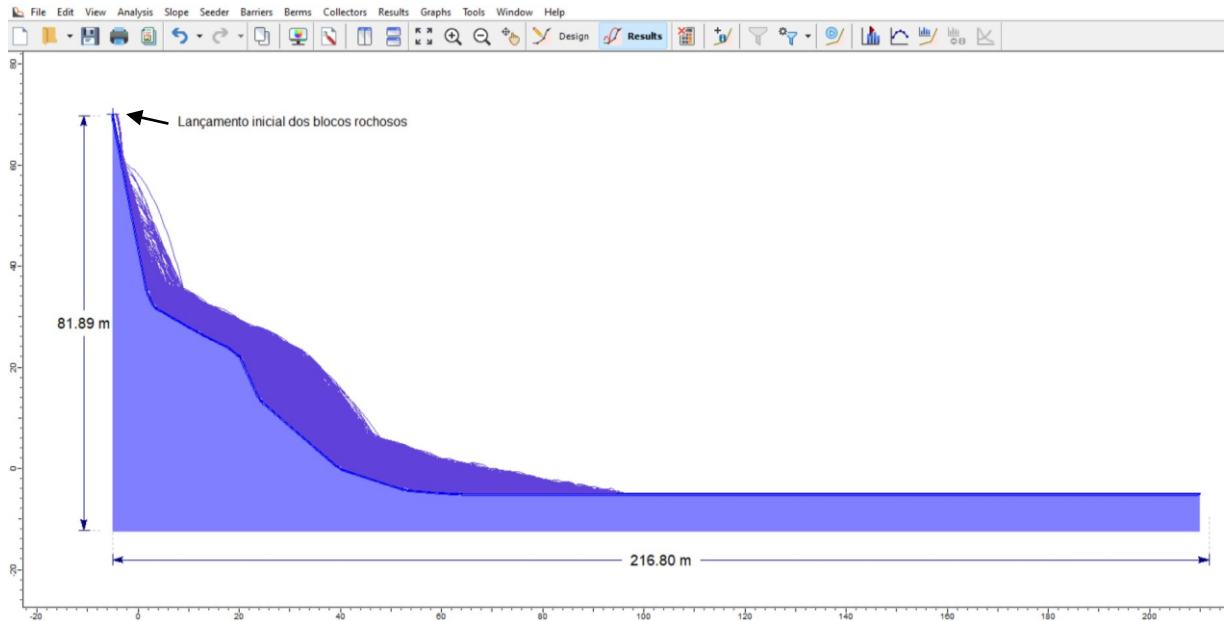


Figura 46 – Lançamento dos blocos computados.

7. Definição das ferramentas gráficas para visualizar os resultados da análise (*graphs*): existem vários gráficos para análise dos resultados, optando-se pelos referentes à localização final dos blocos (Figura 47). Todos os gráficos podem ser exportados do programa RocFall por meio de extensão em Excel.

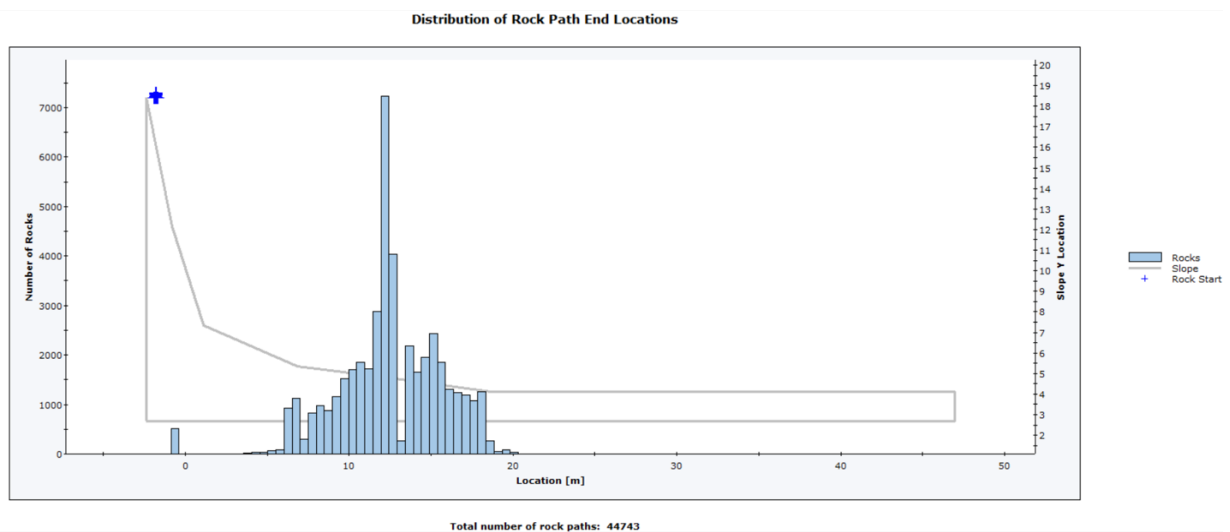


Figura 47 – Exemplo de visualização dos resultados: Histograma de localização final dos blocos.

Nos próximos dois itens (3.4.1 e 3.4.2) serão apresentados os resultados dos movimentos de massa oriundos das simulações numéricas no RocFall, em conjunto com as distribuições de probabilidades gaussiana e q-exponencial estendida, ajustadas estatisticamente no programa Grapher.

3.4 Estudo de Cenário

Para o estudo de caso em perfis convexo e côncavo, foram executadas três simulações em cada perfil, uma para cada tipo de rugosidade da superfície da encosta adotada.

As distribuições probabilísticas gaussiana e q-exponencial estendida, derivadas da otimização das entropias de Boltzmann-Gibbs e Tsallis generalizada, foram ajustadas aos resultados experimentais relativos à localização final dos blocos, no pé dos taludes estudados. Neste sentido, como já se observou, as primeiras distribuições descrevem sistemas caóticos fortes, ao passo que aquelas últimas, sistemas caóticos fracos (sistemas complexos).

A importância de uma caracterização precisa daquelas distribuições reside em que são importantes em eventuais projetos de mitigação de risco.

Os resultados dos ajustes das distribuições probabilísticas são apresentados em dois tipos de gráficos:

- 1) Gráficos com eixos em escala linear;
- 2) Gráficos mais detalhados, mostrando o comportamento das distribuições na região da cauda, estando seu eixo vertical em escala logarítmica e seu eixo horizontal em escala linear.

Como se verá adiante, em função do caráter levemente assimétrico sugerido pelas distribuições individuais aplicadas aos dados experimentais, optou-se por realizar as análises probabilísticas combinando-se duas distribuições: gaussiana com q-exponencial estendida, assinaladas nos gráficos experimentais por uma única curva roxa.

Além disso, estas análises permitiram investigar mais detalhadamente a influência das rugosidades nas encostas, em comparação com as análises individuais, e como isto pode eventualmente se refletir no comportamento caótico final do fenômeno.

3.4.1 Perfil Convexo

Este estudo de caso é composto em uma encosta rochosa de gnaiss facoidal, com uma superfície acentuadamente convexa, mas apresentando uma transição suave entre o perfil da encosta e o nível da base alongada. Como ilustrado na Figura 48, este perfil possui 81,89 metros de altura e 216,80 metros de comprimento.

As simulações numéricas permitiram observar que os movimentos dos blocos BIM (blocos irregulares de tamanho médio) ao longo de sua trajetória foram queda livre, rolamento e salto.

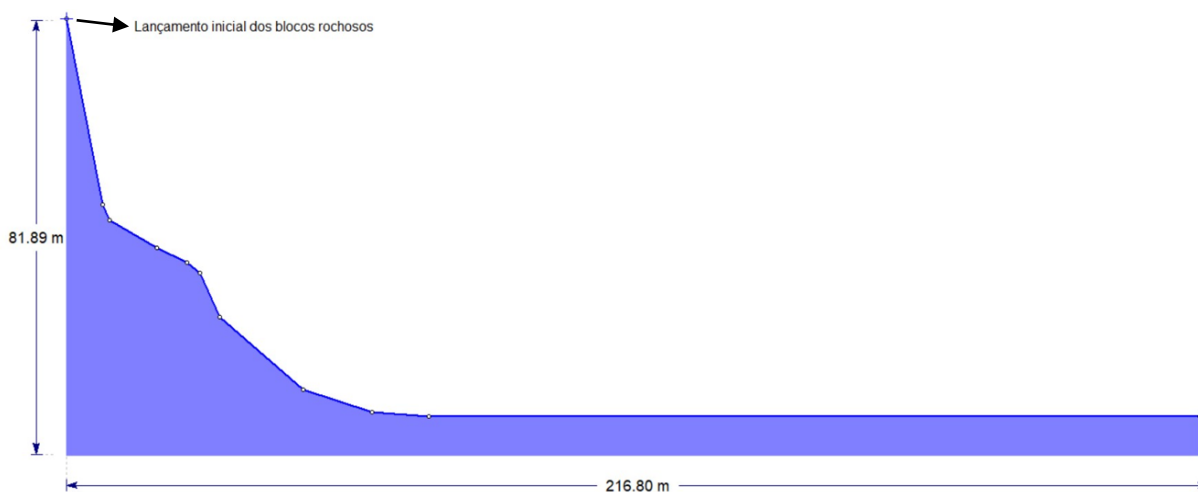


Figura 48 – Estudo de caso em perfil transversal convexo (sem escala).

Os resultados experimentais e os correspondentes ajustes das distribuições probabilísticas gaussiana (curvas azuis) e q-exponencial estendida (curvas vermelhas) estão apresentados nas Figuras 49 a 54. Como assinalado anteriormente, os resultados estão referidos à localização final dos blocos irregulares médios, para as rugosidades de espaçamento e amplitude 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m.

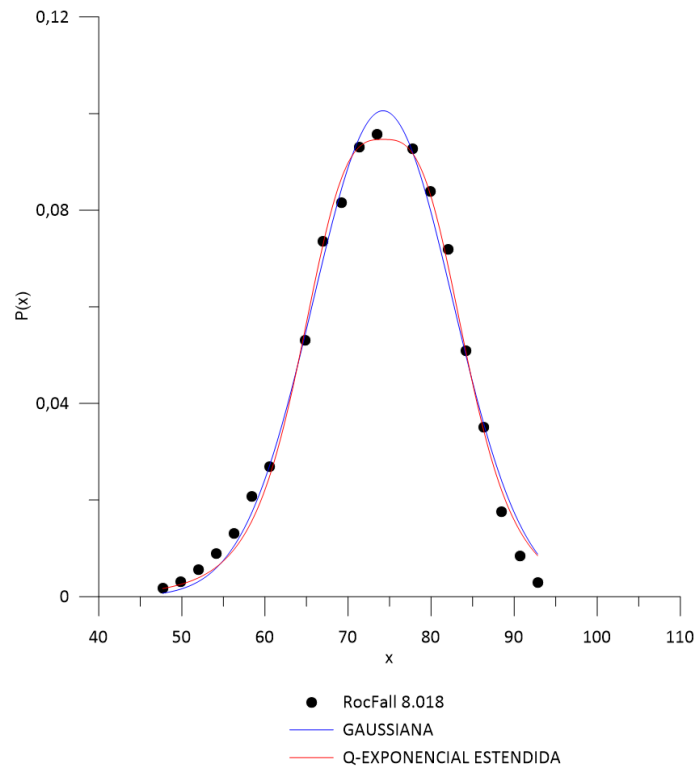


Figura 49 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.

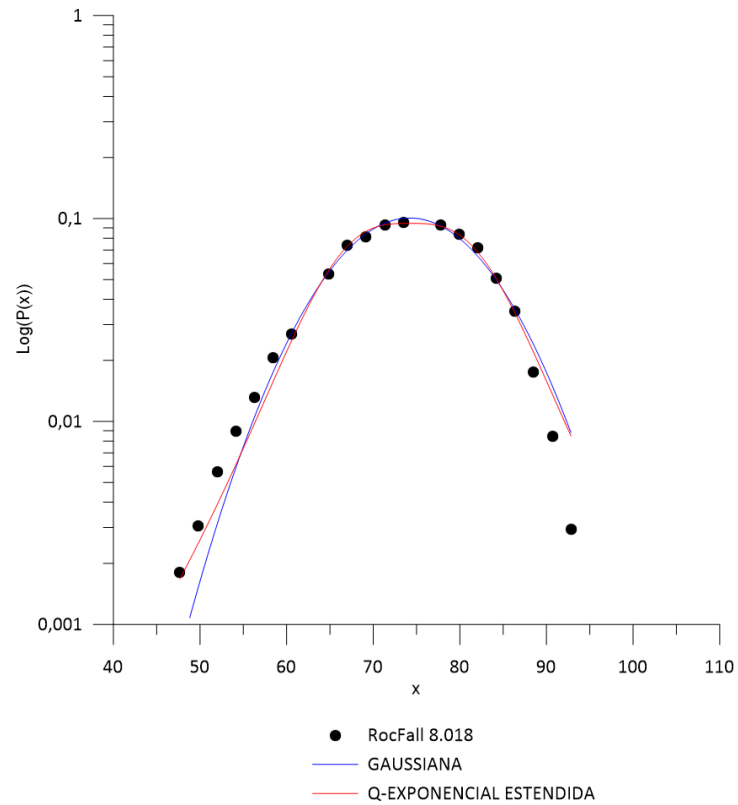


Figura 50 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.

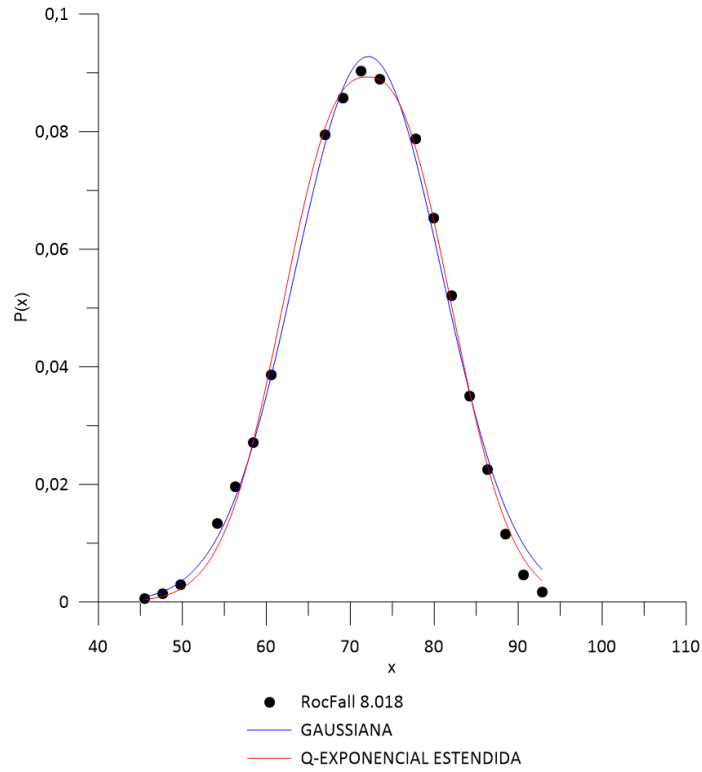


Figura 51 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.

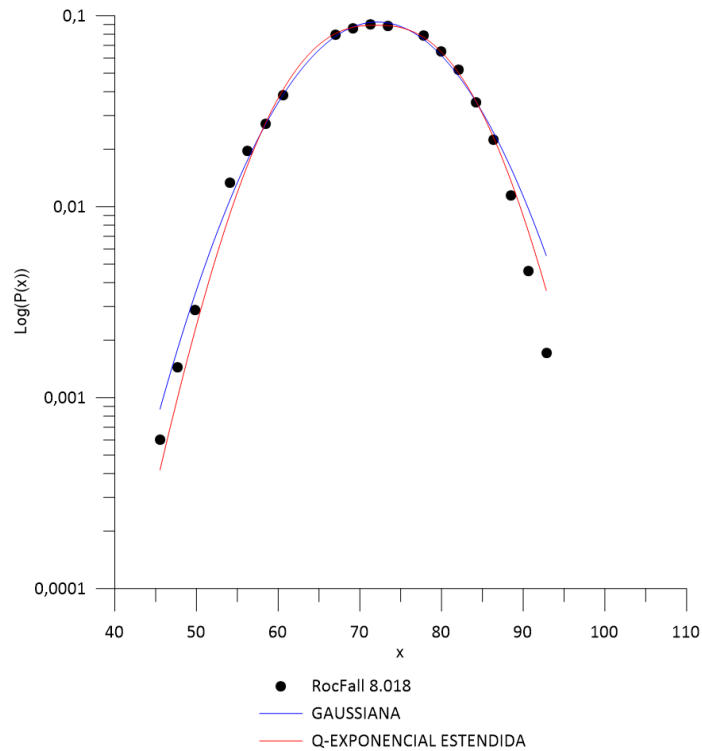


Figura 52 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.

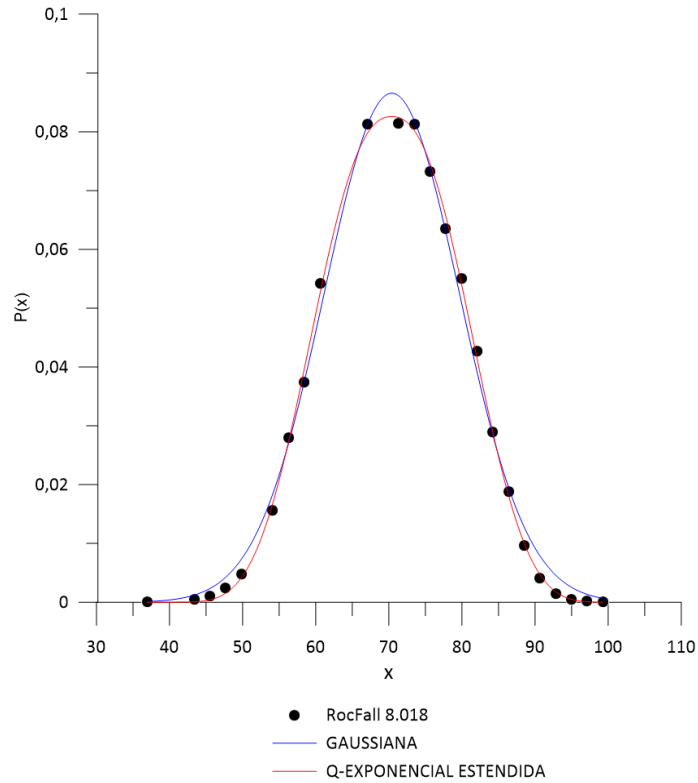


Figura 53 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.

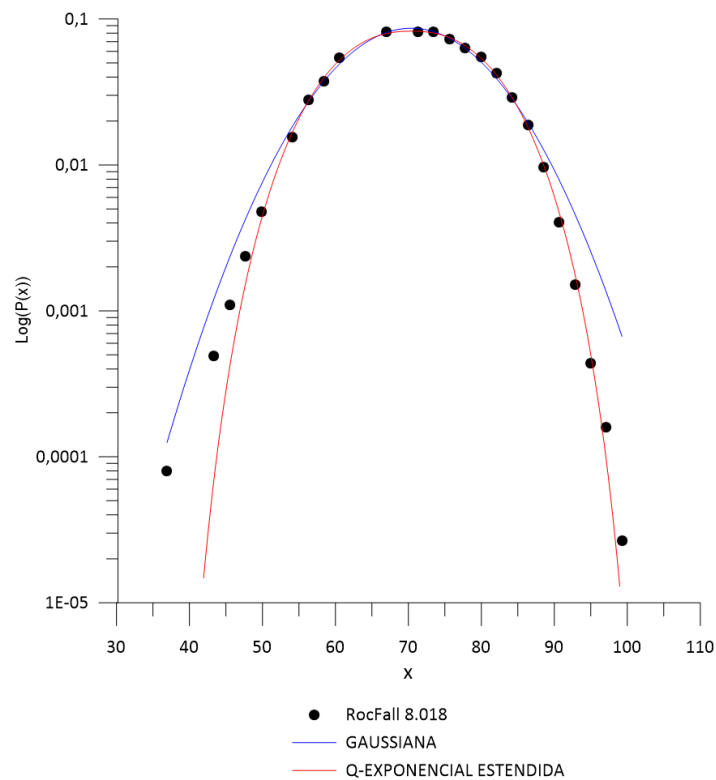


Figura 54 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.

As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados dos ajustes estatísticos das distribuições gaussianas e q-exponencial estendida, em um perfil de encosta convexo, para cada valor de rugosidade.

Tabela 6 – Distribuições de Probabilidade Gaussiana individual – Perfil Convexo.

GAUSSIANA	Estudo de caso em Perfil Convexo				
	Rugosidade (m)	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
		a	b	c	R
	0.10	0.1005	11.9275	74.2111	0.9945
0.30	0.0927	12.3190	72.1443	0.9969	
0.50	0.0865	13.0915	70.4023	0.9967	

Tabela 7 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida individual - Perfil Convexo.

q-EXPONENCIAL ESTENDIDA	Estudo de caso em Perfil Convexo						
	Rugosidade (m)	Variáveis da distribuição de probabilidade					Coefficiente de correlação
		q	δ	a	b	c	R
	0.10	1.5593	0.6503	0.0946	10.9434	74.2317	0.9963
0.30	1.0751	0.7981	0.0892	12.4634	72.0055	0.9985	
0.50	0.8804	0.8507	0.0825	13.9089	70.3967	0.9993	

Nota-se que os diferentes tipos de rugosidade das superfícies das encostas rochosas influenciaram, de forma significativa, os resultados das distribuições de probabilidade em um perfil convexo. Mais pormenorizadamente, as rugosidades de 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m forneceram valores de q gradualmente decrescentes (1.55, 1.07 e 0.88), este último bem inferior a 1, ao passo que os de δ indicam uma tendência à unidade, com o aumento da rugosidade.

Assim, a diminuição dos valores do parâmetro q com valores de rugosidade elevada (0.50 - Figuras 53 e 54) indica uma maior dissipação de energia do sistema bloco – encosta, no que se traduz pelo comportamento fracamente caótico do fenômeno estudado e um melhor ajuste dos dados experimentais pela distribuição q -exponencial estendida.

Por outro lado, para valores de rugosidade menores (0.10 e 0.30 - Figuras 49 a 52), a distribuição gaussiana fornece resultados muito bons, comparáveis aos da q -exponencial estendida.

Portanto, diferentemente de Ignacio (2019), que encontrou, em perfis convexos lisos, um comportamento em caos forte e distribuições gaussianas ajustadas aos resultados experimentais, desta feita, por influência das rugosidades mais acentuadas das encostas rochosas, que promovem uma forte dissipação da energia do sistema, os resultados sugerem um comportamento em caos fraco (complexo) para o fenômeno investigado.

As observações acima levam a crer que talvez possa existir, no fenômeno estudado, uma competição entre 2 (dois) efeitos contrários: o perfil convexo liso (e as estatísticas gaussianas a ele associadas) e as rugosidades, especialmente as de maior valor (e estatísticas em lei de potência), em decorrência do incremento das dissipações de energia do sistema bloco – encosta por elas proporcionado.

Por conseguinte, optou-se por analisar os casos anteriores fazendo-se uso de uma distribuição estatística, resultante da combinação linear entre as duas distribuições utilizadas anteriormente, ou seja, somatório das equações de distribuição probabilística gaussiana e q -exponencial estendida, tornando possível, deste modo, uma maior compreensão do mecanismo de competição e transição atuando concomitantemente, e que parece reger o fenômeno da queda de blocos neste perfil convexo rugoso

Assim, as Figuras 55 a 60, bem como a Tabela 8, apresentam os resultados das análises estatísticas utilizando-se uma combinação linear entre as distribuições gaussiana e q -exponencial estendida, para valores de rugosidade de espaçamento e amplitude 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m.

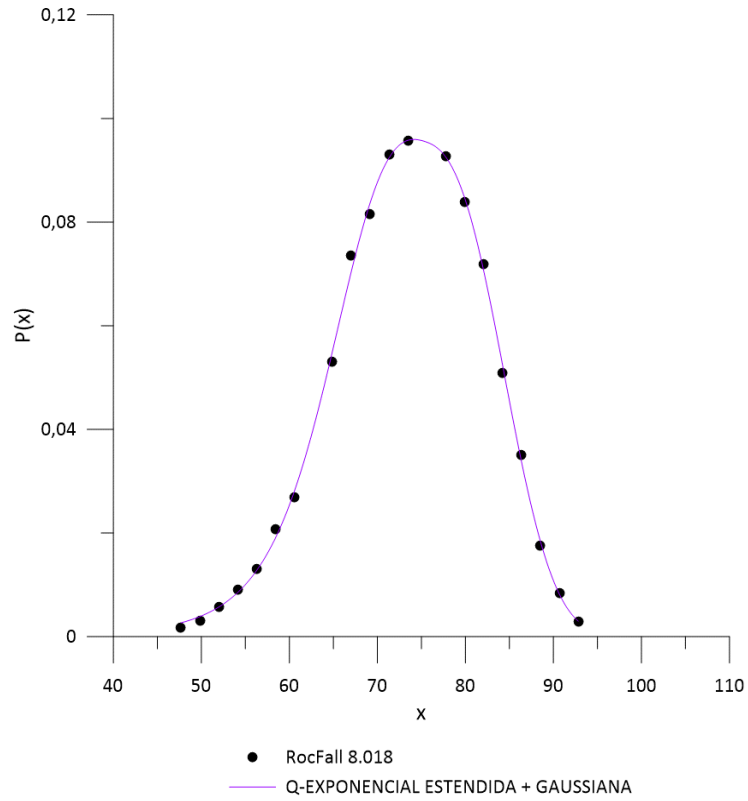


Figura 55 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.

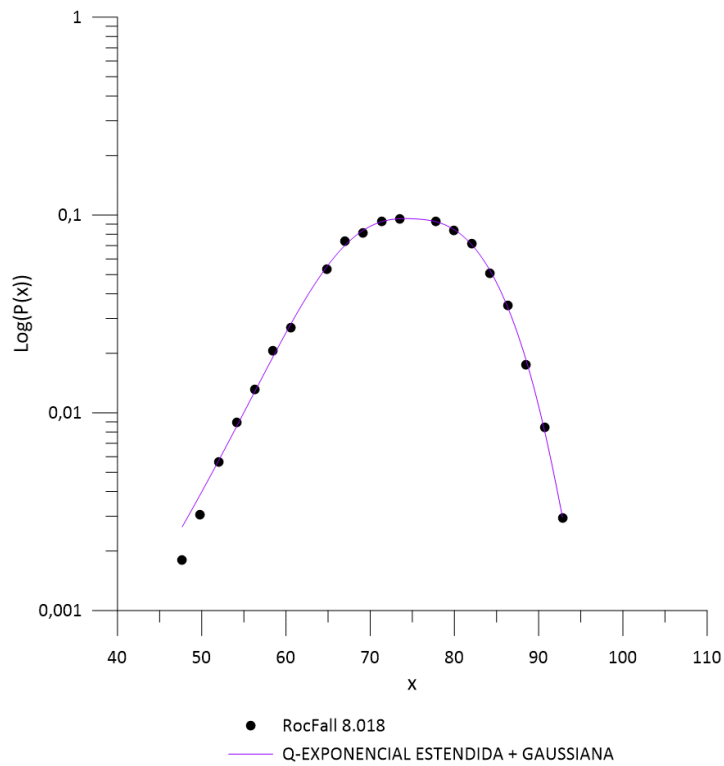


Figura 56 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.

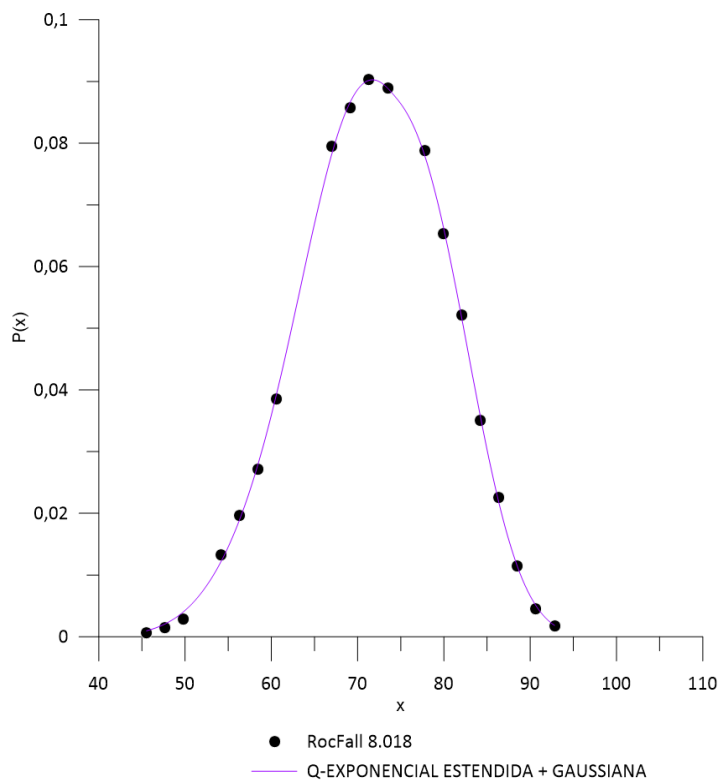


Figura 57 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.

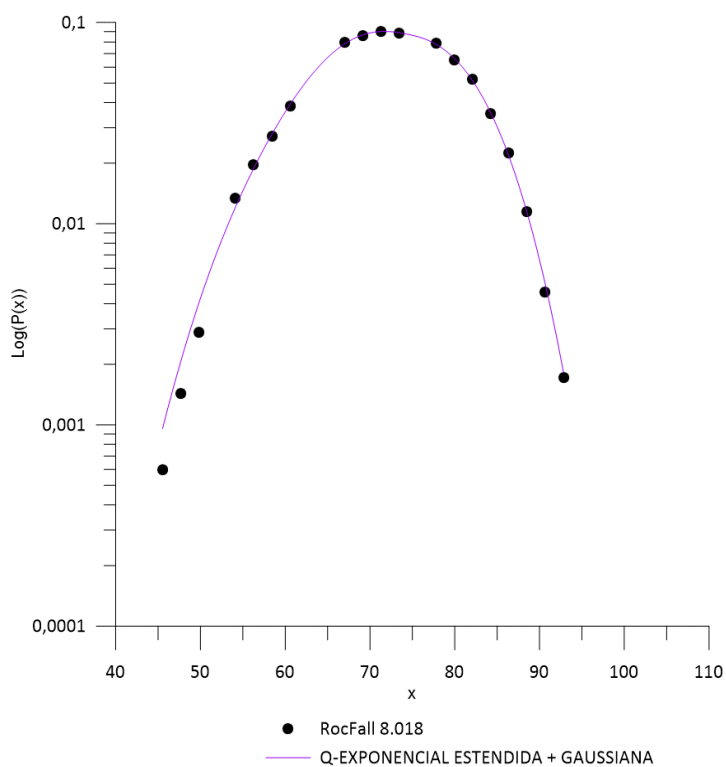


Figura 58 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.

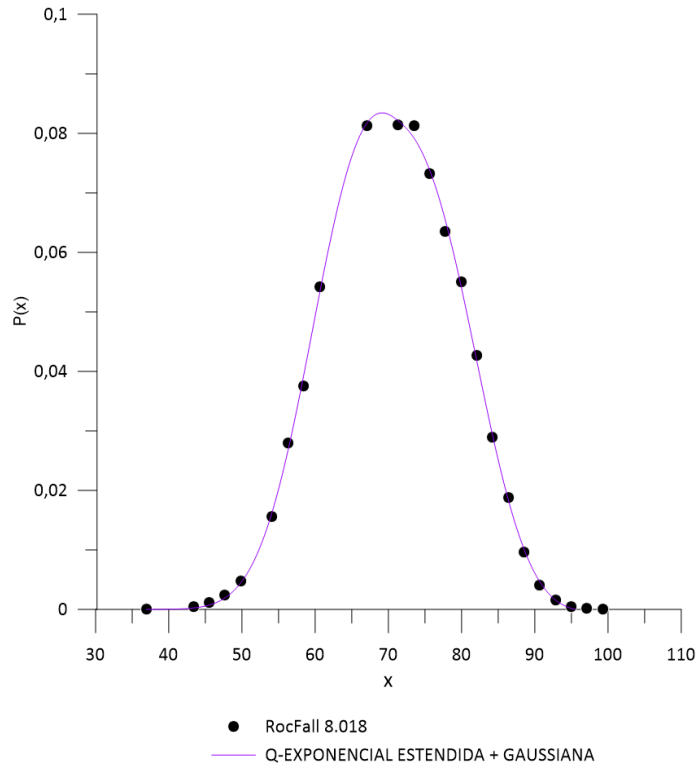


Figura 59 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.

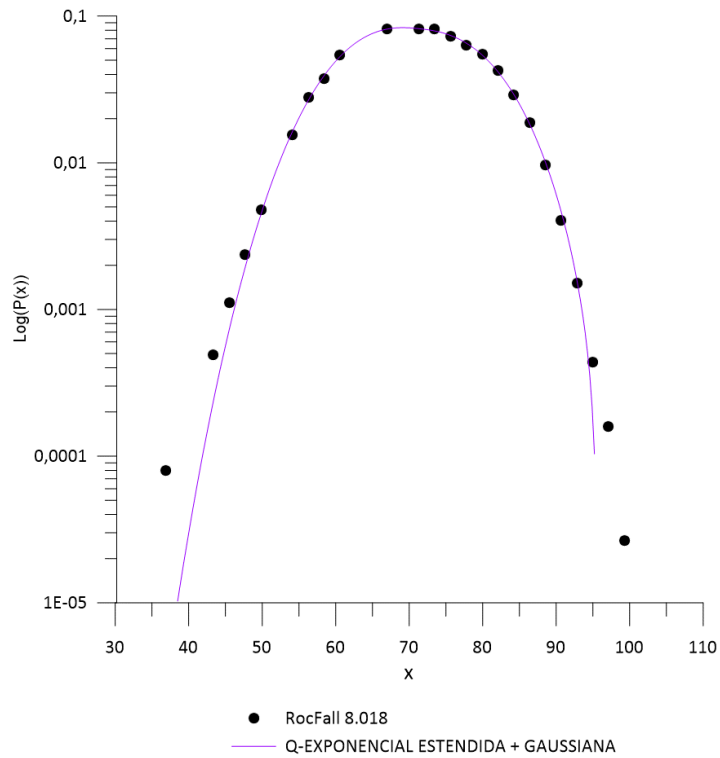


Figura 60 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.50 m.

Tabela 8 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida + Gaussiana (combinação linear) - Perfil Convexo.

q-EXPONENCIAL ESTENDIDA + GAUSSIANA	Estudo de caso em Perfil Convexo									
	Rugosi- dade (m)	Variáveis da distribuição de probabilidade								Coeficiente de correlação
		q	δ	a1	b1	c1	a2	b2	c2	R
	0.10	1.4732	0.7276	0.0969	12.1791	75.2959	-0.0178	8.3118	88.6709	0.9993
0.30	0.9619	0.8413	0.0810	10.9591	74.1809	0.0263	9.5864	62.9795	0.9997	
0.50	0.9848	0.8014	0.0918	13.9286	71.3141	-0.0138	11.6126	78.2600	0.9995	

Observa-se que os coeficientes de correlação (R), proporcionados pela combinação linear das 2 (duas) distribuições, são muito bons, superiores aos fornecidos pelas 2 (duas) distribuições em separado, verificados nas Tabelas 6 e 7.

Apesar disso, os valores de q e δ analisados na Tabela 8, não permitem identificar uma tendência clara de suas variações, muito embora a expectativa de queda nos valores do parâmetro entrópico q , para aumentos da rugosidade, reafirmando o papel das estatísticas complexas (fracamente caóticas), seja bastante razoável.

Ainda se destaca, que os resultados foram sensíveis o suficiente para captar as pequenas assimetrias nos histogramas dos dados experimentais, observados na análise de distribuição individual, além de poderem comprovar a hipótese, acima aventada, da competição e transição entre as distribuições gaussiana e q-exponencial estendida, para valores crescentes das rugosidades estudadas.

3.4.2 Perfil Côncavo

Este estudo de caso é composto em uma encosta rochosa de gnaiss facoidal, com uma superfície acentuadamente côncava, de geometria simples, mas apresentando uma transição suave entre o perfil da encosta e o nível da base alongada. Como ilustrado na Figura 61, este perfil possui 15,72 metros de altura e 49,16 metros de comprimento.

As simulações numéricas permitiram observar que os movimentos dos blocos BIM (blocos irregulares de tamanho médio) ao longo de sua trajetória foram queda livre, rolamento e salto.

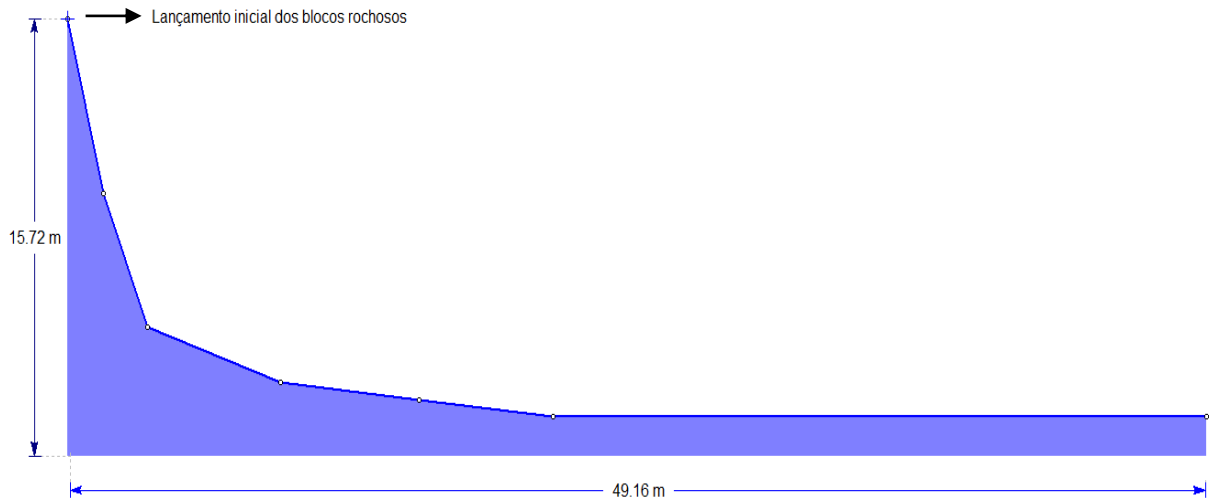


Figura 61 – Estudo de caso em perfil transversal côncavo (sem escala).

Os resultados experimentais e os correspondentes ajustes das distribuições probabilísticas gaussiana (curvas azuis) e q-exponencial estendida (curvas vermelhas) estão apresentados nas Figuras 62 a 67.

Como assinalado anteriormente, os resultados estão referidos à localização final dos blocos irregulares médios, para as rugosidades de espaçamento e amplitude 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m.

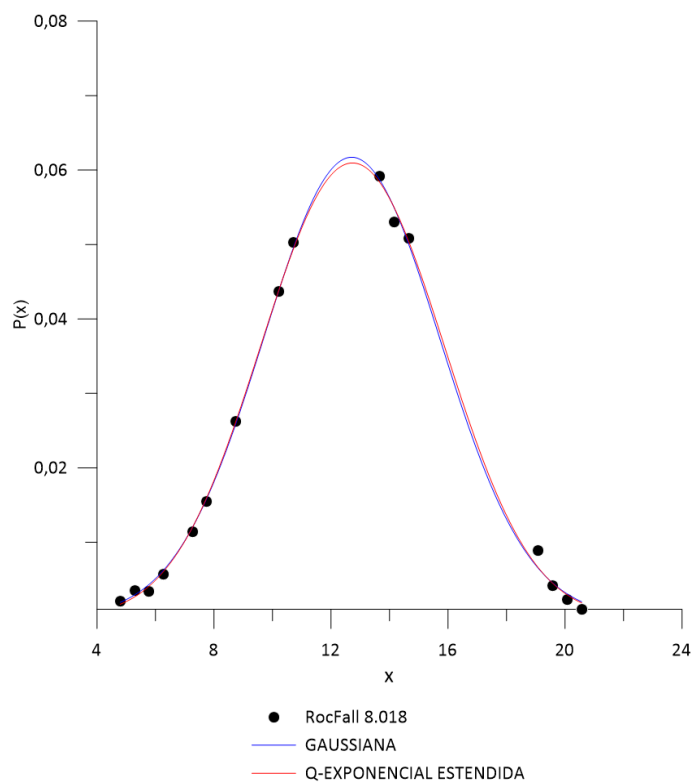


Figura 62 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.

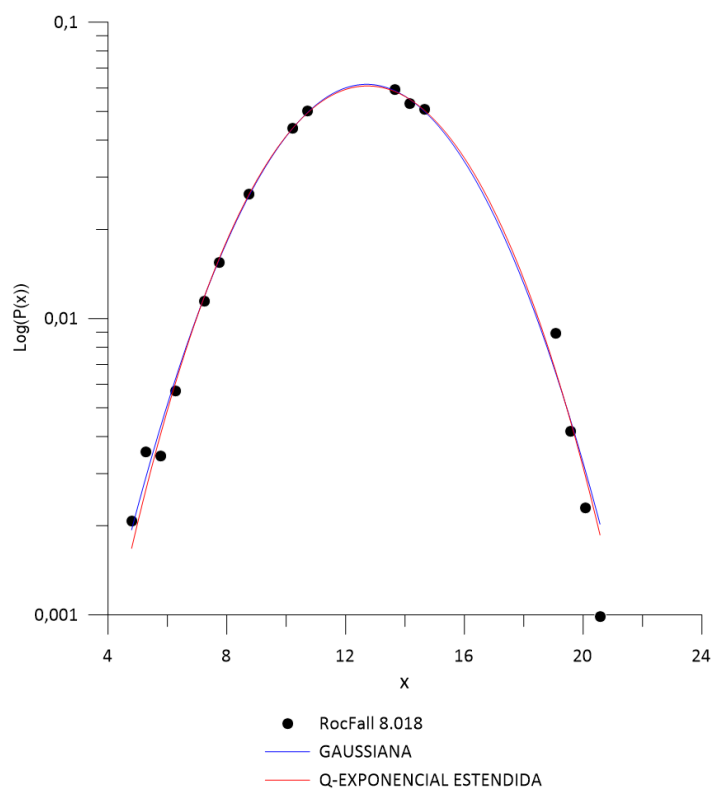


Figura 63 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.10 m.

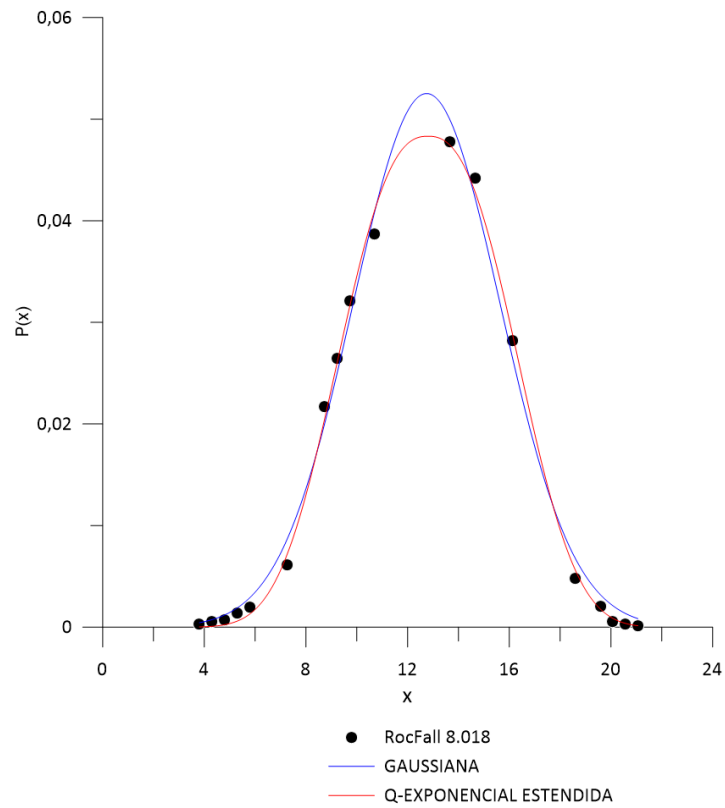


Figura 64 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.

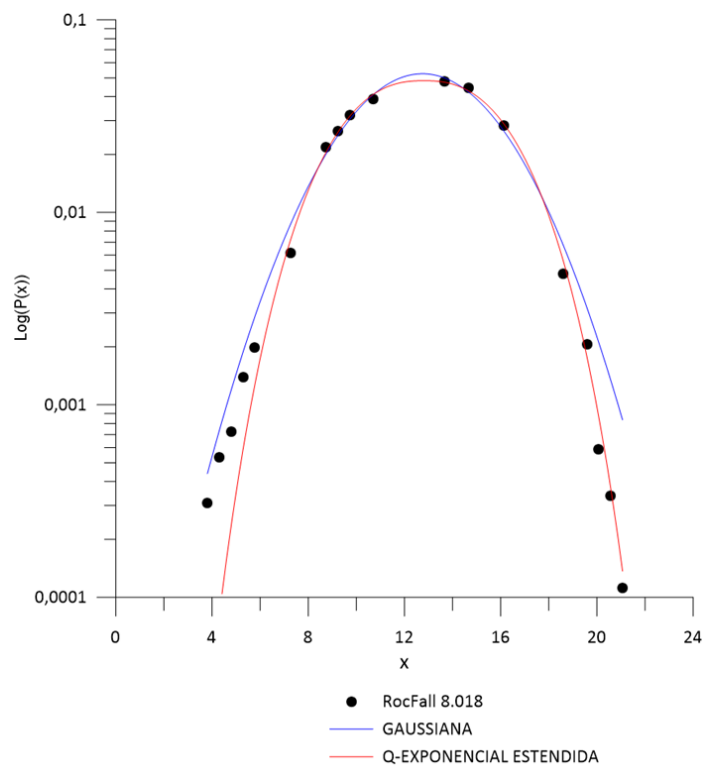


Figura 65 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.30 m.

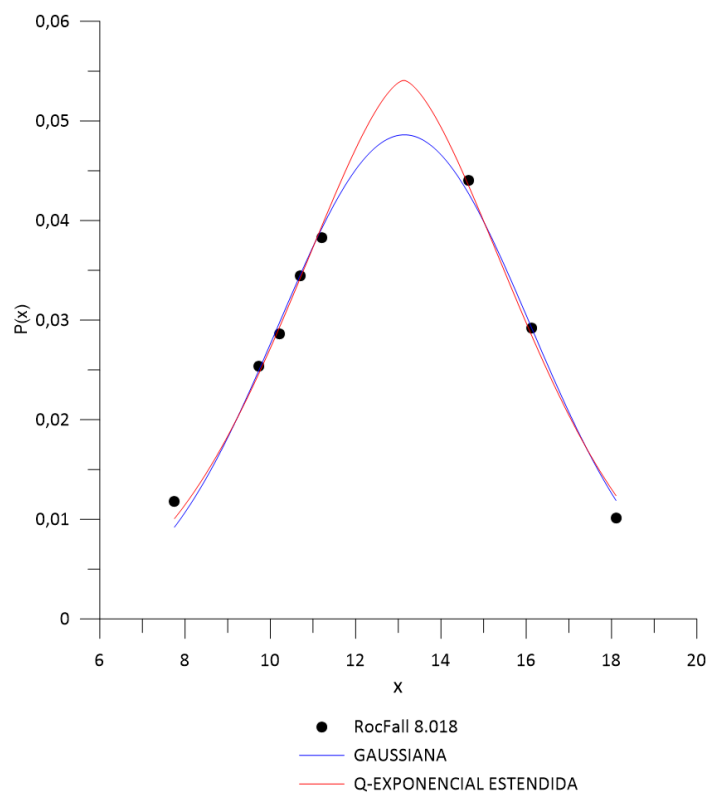


Figura 66 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.

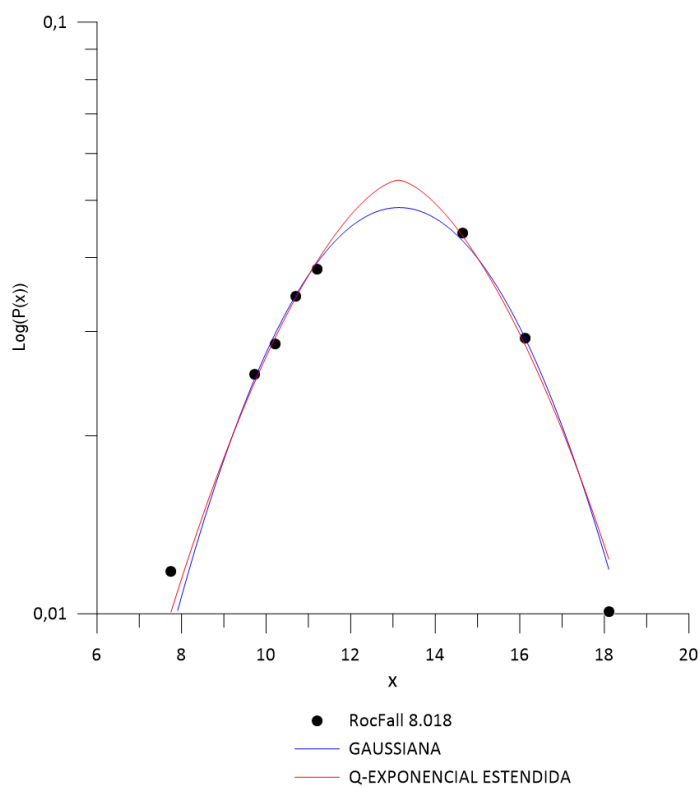


Figura 67 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição individual para Rugosidade 0.50 m.

As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados dos ajustes estatísticos das distribuições gaussiana e q-exponencial estendida, em um perfil de encosta côncavo, para cada valor de rugosidade.

Tabela 9 – Distribuições de Probabilidade Gaussiana individual – Perfil Côncavo.

GAUSSIANA	Estudo de caso em Perfil Côncavo				
	Rugosidade (m)	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
		a	b	c	R
	0.10	0.0617	4.2530	12.7062	0.9989
0.30	0.0525	4.0866	12.7460	0.9960	
0.50	0.0486	4.1809	13.1435	0.9928	

Tabela 10 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida individual - Perfil Côncavo.

q-EXPONENCIAL ESTENDIDA	Estudo de caso em Perfil Côncavo						
	Rugosidade (m)	Variáveis da distribuição de probabilidade					Coefficiente de correlação
		q	δ	a	b	c	R
	0.10	0.9588	0.9884	0.0609	4.3757	12.7341	0.9990
0.30	0.9269	0.8114	0.0483	4.3831	12.7995	0.9987	
0.50	0.8992	1.2822	0.0540	4.0658	13.1281	0.9941	

De forma semelhante ao ocorrido nos perfis convexos estudados anteriormente, observa-se que os diferentes valores de rugosidade das superfícies das encostas rochosas influenciaram, significativamente, os resultados das distribuições de probabilidade em um perfil côncavo. Mais detalhadamente, as rugosidades de 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m forneceram valores de q gradualmente decrescentes (0.95, 0.92 e

0.89), este último bem inferior a 1.00, ao passo que os valores do expoente δ não indicam uma tendência clara de variação, com o aumento da rugosidade.

Assim, a diminuição dos valores do parâmetro q com o aumento da rugosidade aponta para uma maior dissipação de energia do sistema bloco – encosta, levando a um comportamento fracamente caótico do fenômeno estudado, e um melhor ajuste dos dados experimentais pela distribuição q -exponencial estendida.

De forma semelhante ao encontrado por Ignácio (2019) em suas análises de perfis côncavos lisos, por influência das rugosidades das encostas rochosas, que promovem uma forte dissipação da energia do sistema, os resultados sugerem um comportamento complexo para o fenômeno investigado.

No entanto, e diferentemente do encontrado por Ignácio (2019), uma observação mais acurada dos resultados experimentais permite observar os ajustes muito bons das distribuições gaussianas, com coeficientes de correlação próximos aos fornecidos pelas distribuições q -exponencial estendida, especialmente para valores reduzidos de rugosidade (0.10, por exemplo).

A razão de ser da marcada presença de estatísticas gaussianas no perfil côncavo parece estar relacionada à própria construção geométrica deste perfil, constituído por retas que se sucedem encosta abaixo, sem nenhuma correlação geoestatística entre elas.

Por conseguinte, e de forma semelhante ao adotado no perfil convexo investigado anteriormente, decidiu-se analisar, nesta pesquisa, o desempenho de uma distribuição estatística, resultante da combinação linear entre as distribuições gaussiana e q -exponencial estendida, tornando possível, deste modo, uma maior compreensão do mecanismo de competição e transição atuando concomitantemente, estabelecido entre o perfil côncavo liso (e suas estatísticas em lei de potência) e a geometria não correlacionada de seu perfil (estatística gaussiana), que parece influenciar o fenômeno da queda de blocos neste perfil côncavo rugoso.

As Figuras 68 a 73, bem como a Tabela 11, apresentam os resultados experimentais e os correspondentes ajustes proporcionados pela distribuição resultante da combinação linear entre a distribuição gaussiana e a q -exponencial estendida, para rugosidades de espaçamento e amplitude 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m.

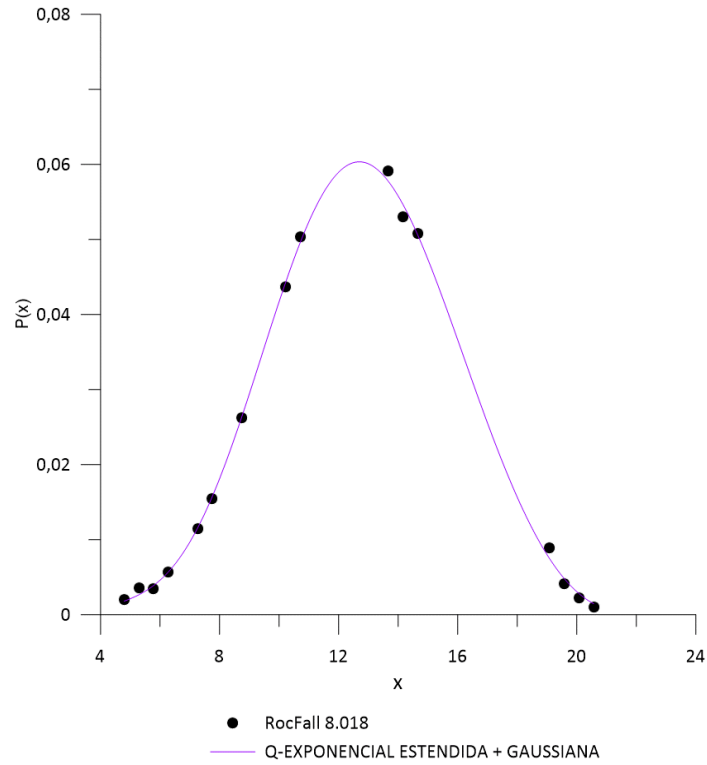


Figura 68 – Gráfico $P(x)$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.

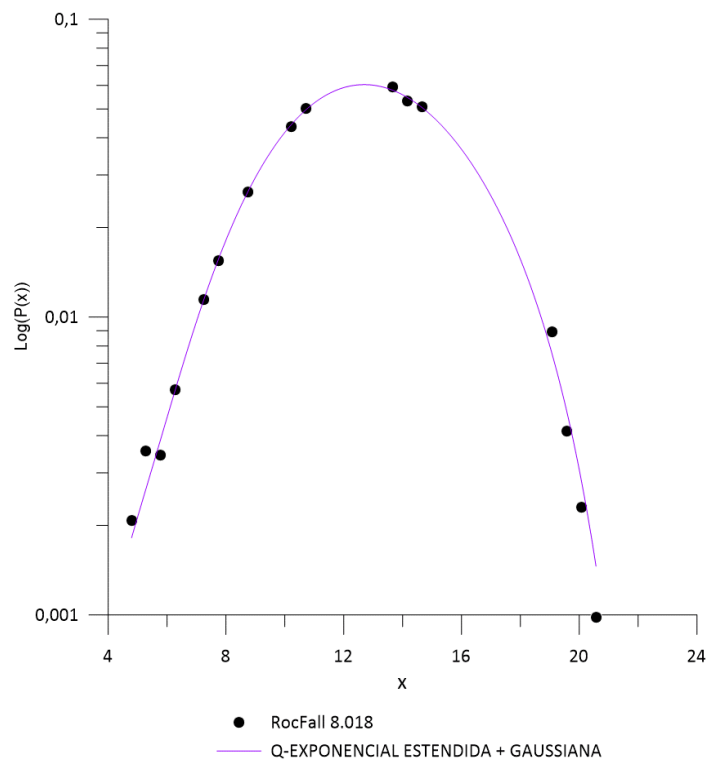


Figura 69 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus x : análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.10 m.

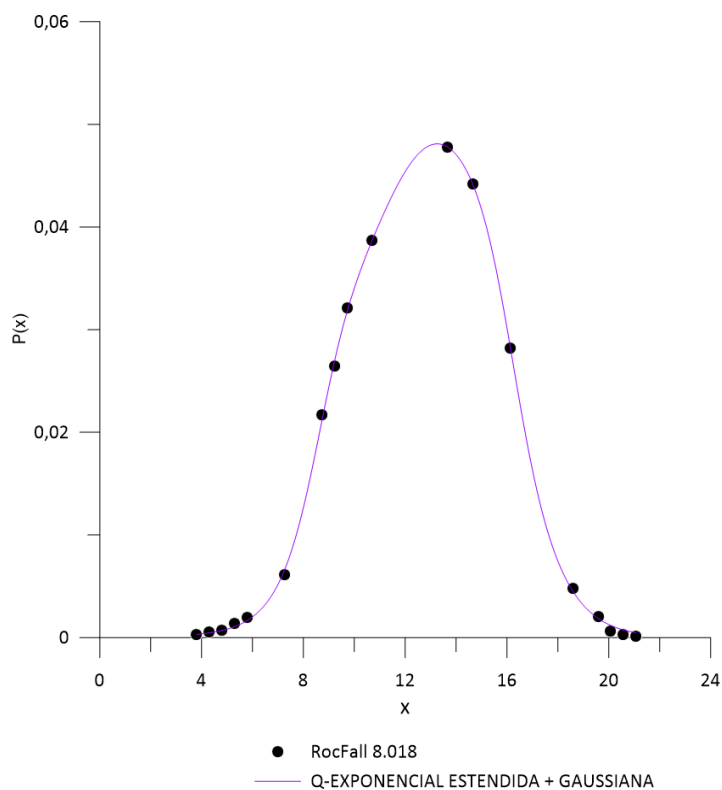


Figura 70 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.

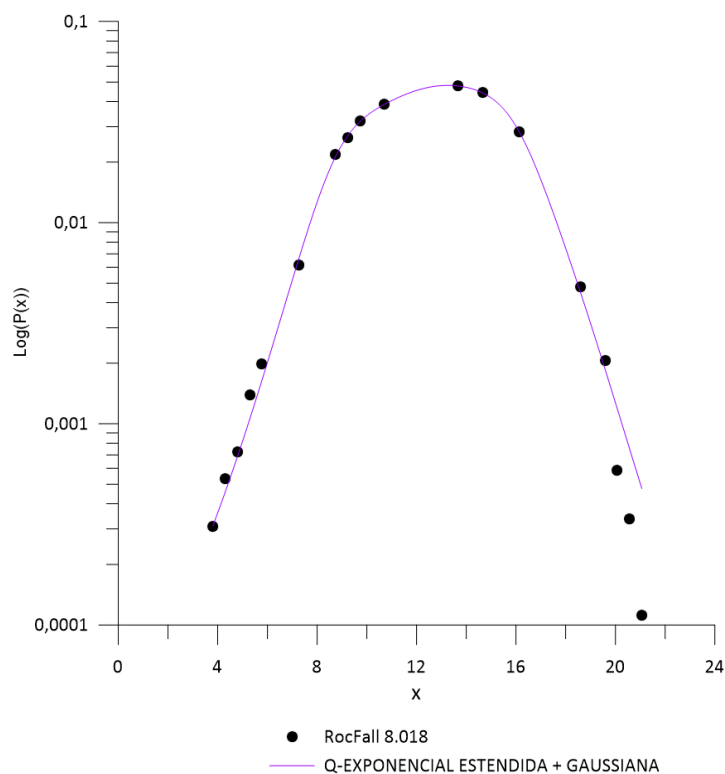


Figura 71 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.30 m.

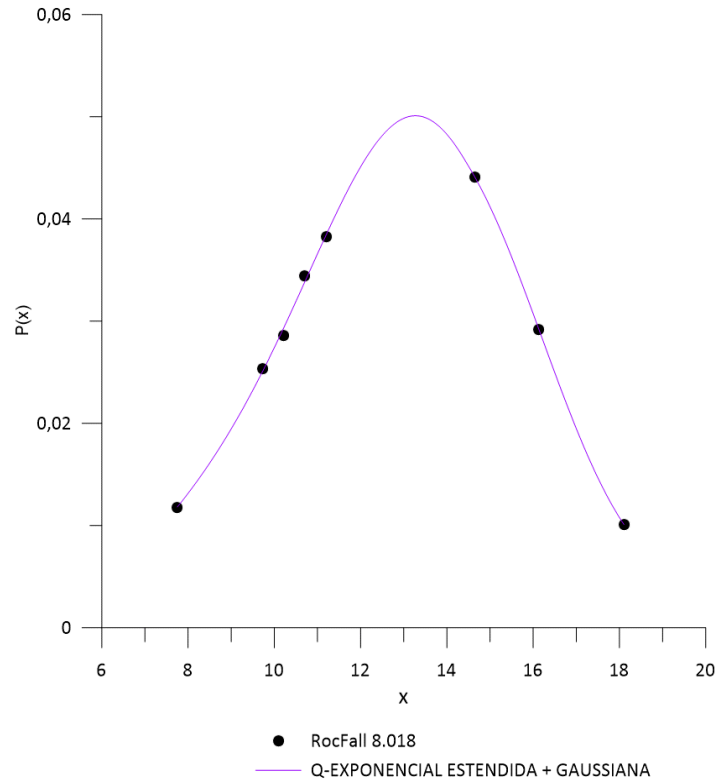


Figura 72 – Gráfico P(x) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.50 m.

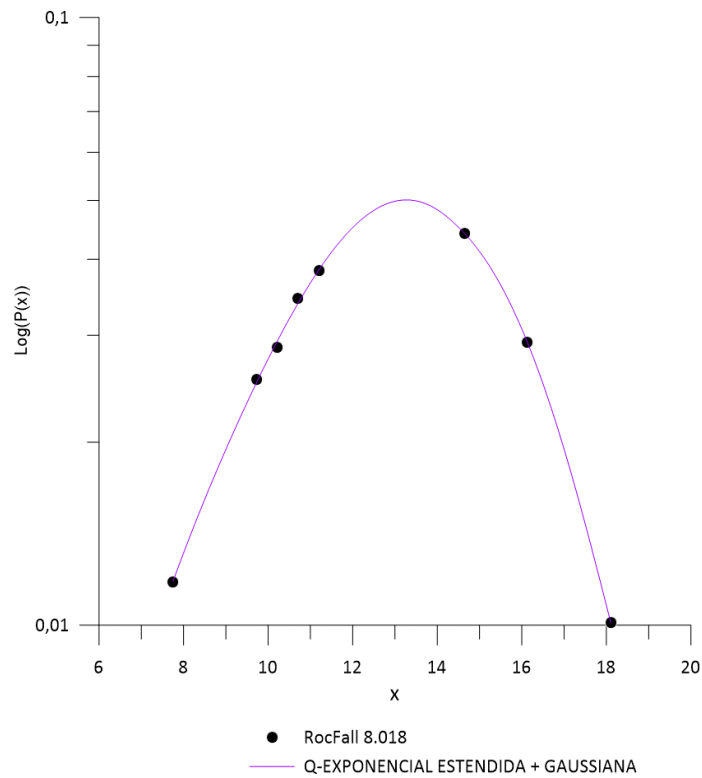


Figura 73 – Gráfico Log (P(x)) versus x: análise de distribuição agrupado para Rugosidade 0.50 m.

Tabela 11 – Distribuições de Probabilidade q-exponencial estendida + Gaussiana agrupado - Perfil Côncavo.

q-EXPONENCIAL ESTENDIDA + GAUSSIANA	Estudo de caso em Perfil Côncavo									
	Rugosi- dade (m)	Variáveis da distribuição de probabilidade								Coeficiente de correlação
		q	δ	a1	b1	c1	a2	b2	c2	R
	0.10	0.7205	0.9980	0.0334	4.6739	13.6164	0.0294	4.2188	11.8326	0.9993
0.30	1.9560	0.3420	0.0250	4.1301	12.4090	0.0230	3.5722	13.2623	0.9998	
0.50	0.9064	1.0185	-0.2793	4.3662	14.4674	0.3254	4.2795	14.2688	0.9994	

Os resultados permitem constatar que os coeficientes de correlação (R), proporcionados pela combinação linear das distribuições, são muito bons, superiores aos fornecidos pelas distribuições gaussiana e q-exponencial estendida em separado, verificados nas Tabelas 9 e 10.

Ademais, os valores de q e δ analisados na Tabela 11, não permitem identificar uma tendência clara de suas variações, muito embora a expectativa de queda nos valores do parâmetro entrópico q , para aumentos da rugosidade, reafirmando o papel das estatísticas complexas (fracamente caóticas), seja bastante razoável.

Cabe assinalar, ainda, que, de forma semelhante ao ocorrido no perfil convexo, os resultados foram sensíveis o suficiente para captar as pequenas assimetrias nos histogramas dos dados experimentais, além de possibilitarem a comprovação da hipótese, acima aventada, da competição entre o perfil côncavo liso (e sua estatística q-exponencial estendida) e a geometria não correlacionada, aleatória, da composição de seu perfil (estatística gaussiana), que parece influenciar o fenômeno da queda de blocos neste perfil côncavo rugoso.

3.4.3 Resumo das análises dos resultados

Os resultados obtidos indicam que tanto para o perfil convexo quanto para o perfil côncavo, assim como na distribuição individual quanto na distribuição de

combinação linear (foco em analisar mais detalhado o comportamento caótico visto a leve assimetria observada na distribuição individual e a geometria não correlacionada do perfil), ocorre a predominância da distribuição de probabilidade q -exponencial estendida, apresentando um comportamento fracamente caótico, principalmente com o aumento da rugosidade, sendo destacado menores valores da entropia q , principalmente, na rugosidade 0.50 m. Ademais, para diferentes tipos de rugosidades das superfícies das encostas há influência, expressiva, nos resultados das distribuições de probabilidade.

Foram observados nos casos de distribuições individuais e nas distribuições de combinação linear, que os valores de entropia q decresce com o aumento da rugosidade, sendo justificado pelo aumento da dissipação de energia do sistema bloco – encosta, e diminuição da energia cinética dos blocos, o que provoca seu comportamento complexo (caos fraco) e o melhor ajuste dos dados experimentais.

Ressalta-se, que para o perfil convexo de distribuição de probabilidade individual, nas rugosidades 0.10 m e 0.30 m, há uma competição entre a distribuição gaussiana e q -exponencial estendida, porém, o melhor ajuste é evidenciado na distribuição gaussiana, mas está muito próximo da q -exponencial estendida. Neste perfil, o sistema fortemente caótico indica um grau de previsibilidade muito difícil, equivalente ao choque entre o bloco e a encosta convexa como elástico, dispersando a trajetória dos blocos.

Da mesma forma para o perfil côncavo de distribuição de probabilidade individual, na rugosidade 0.10 m, há uma competição entre a distribuição gaussiana e q -exponencial estendida, observada nas análises do coeficiente de correlação (R) e nas variáveis da distribuição de probabilidade (q e δ). No entanto, o melhor ajuste é evidenciado na distribuição gaussiana, mas está muito próximo da q -exponencial estendida. Ao mesmo modo, destaca-se neste perfil, em maiores valores de rugosidade, a concentração de trajetória dos blocos, indicando a maior dissipação de energia no sistema bloco – encosta e tendo um grau de previsibilidade mais fácil no perfil côncavo do que no convexo.

Para os dois perfis analisados em distribuição de combinação linear, nota-se que os valores de q e δ não permitem identificar uma tendência clara de suas variações, mas é evidenciado a diminuição de seus valores para a rugosidade mais acentuada da encosta, confirmando o papel mais coerente para o caos fraco.

Ignacio (2019) destaca em sua pesquisa, que em perfis convexos lisos, ocorre o comportamento fortemente caótico e distribuições gaussianas melhores ajustadas, o que difere do resultado deste trabalho, devido a influência das rugosidades mais realçadas nas encostas, provocando uma forte dissipação de energia do sistema e, desta forma, sugerindo um comportamento fracamente caótico.

Em contrapartida, os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam o que foi concluído por Ignacio (2019) em perfis côncavos lisos, sendo influenciado pelas crescentes rugosidades das encostas e decrescentes valores do parâmetro q , promovendo a forte dissipação de energia e conferindo o fenômeno a um comportamento fracamente caótico (complexo). A presença da distribuição de probabilidade gaussiana na seção côncava pode estar relacionada a própria construção da geométrica da encosta, que não é suave ao longo do perfil.

A Tabela 12 mostra a compilação dos resultados obtidos com o estudo de caso para os dois perfis, e as suas respectivas interpretações gráficas de distribuição individual e combinação linear.

Tabela 12 – Compilação dos resultados obtidos por meio do estudo de casos.

Perfil da encosta	Interpretação gráfica da distribuição	Rugosidade (m)	Distribuição de probabilidade de melhor ajuste	Comportamento caótico
Convexo	Individual	0.10	Gaussiana	Forte
		0.30	Gaussiana	Forte
		0.50	q-Exponencial Estendida	Fraco
	Combinação Linear	0.10	Guassiana	Forte
		0.30	Competição e transição entre as distribuições gaussianas e q-exponencial estendida	Transição do Forte para o Fraco
		0.50		
Côncavo	Individual	0.10	Guassiana	Forte
		0.30	q-Exponencial Estendida	Fraco
		0.50	q-Exponencial Estendida	Fraco

	Combinação Linear	0.10	Competição e transição entre as distribuições gaussiana e q-exponencial estendida	Transição do Forte para o Fraco
		0.30	q-Exponencial Estendida	Fraco
		0.50	Competição e transição entre as distribuições gaussiana e q-exponencial estendida	Transição do Forte para o Fraco

4. CONCLUSÕES

Os movimentos de massa do tipo queda de blocos são extremamente complexos e de ocorrência constante, podendo ser deflagrados de forma abrupta em encostas rochosas, com condições de alta velocidade e energia cinética, além de ser altamente destrutivo e de difícil previsão. Portanto, faz-se necessário manter o foco cada vez mais em pesquisas voltadas para quedas de blocos, a fim de compreender melhor seu mecanismo e, assim, conseguir realizar ações preventivas cabíveis, já que este fenômeno tem gerado significativos prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

À vista disto, a presente dissertação contribuiu para o estudo deste fenômeno abordando a teoria do caos em um sistema não linear de correlação temporal e espacial. Esta teoria analisa as distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida – entropias estatísticas de Boltzman-Gibbs e Tsallis generalizadas - segundo os perfis de encostas de gnaisse facoidal convexa e côncava.

O objetivo da aplicabilidade da teoria do caos foi descrever o comportamento fracamente ou fortemente caótico do sistema, variando as rugosidades nas superfícies das encostas rochosas e comparando este estudo com o de Ignacio (2019). Para isso, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software Rocfall 8.018, assim como desenvolvidas as distribuições de probabilidade no programa Grapher 16.2.354.

Os resultados apontaram tanto para o perfil convexo como para o côncavo, que quanto maior os valores de rugosidade, principalmente, de 0.50 m, tendem a conceder ao sistema uma maior dissipação de energia, acentuando os sucessivos choques de blocos rochosos com a superfície mais próximo de uma colisão inelástica. Desta forma, as estatísticas q-exponenciais estendidas se ajustam mais apropriadamente aos dados experimentais, conferindo ao fenômeno um comportamento fracamente caótico (complexo). Quanto menor os valores de rugosidade, as variáveis de distribuição q e δ se aproximam do ajuste com o valor 1, indicando um comportamento fortemente caótico. Com isto, destaca-se que a rugosidade influencia, significativamente, nos resultados das distribuições de probabilidade, sendo determinante para classificar o comportamento das quedas de blocos.

Portanto, nos dois perfis transversais, com a variação da rugosidade 0.10 m, 0.30 m e 0.50 m, pode-se observar a eficácia da aplicação da teoria do caos para o

comportamento caótico em um sistema não linear, frente ao fenômeno de quedas de blocos. Logo, é confiável os ajustes estatísticos da localização final dos blocos irregulares de tamanho médio (BIM) realizados a partir dos resultados das simulações, em função das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida que regem as entropias estatísticas de Boltzmann-Gibbs e a generalizada.

Ressalta-se, deste modo, que o parâmetro fundamental neste estudo é a dissipação de energia, no qual afeta o comportamento do sistema como o todo, podendo ser a rugosidade, o choque elástico ou inelástico.

Independentemente do programa RocFall ser de fácil manuseio e entrada de dados, foi demonstrado limitações a respeito do número máximo de lançamentos de blocos nas simulações, sendo uma quantidade bem menor para rugosidade 0.10 m em comparação com a maior rugosidade. No entanto, os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, apesar das limitações. Vale a pena destacar, que a empresa Rocscience salienta que o programa RocFall tem um número de blocos ilimitados para seus lançamentos nas simulações, além de realçar que quanto maior o número de blocos para as simulações, melhor serão os seus resultados estatísticos, tornando-se um estudo mais realista possível.

Os resultados das análises realizadas pelo RocFall são muito sensíveis aos parâmetros envolvidos, de tal forma que uma boa configuração dos parâmetros do projeto conduz a resultados mais confiáveis.

Conclui-se que esta pesquisa poderá contribuir para uma melhor previsibilidade deste fenômeno a respeito da teoria do caos, colaborando para uma modelagem numérica mais realista e ajudando na mitigação do risco que envolvam quedas de blocos rochosos.

4.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Com relação aos resultados obtidos frente a aplicabilidade da teoria do caos no fenômeno de queda de blocos, são apresentadas, a seguir, algumas sugestões para futuras pesquisas que possam colaborar com mais esclarecimentos a respeito do tema.

1. Determinar a rugosidade da superfície da encosta, a partir de ensaios de laboratório, de um caso real de queda de blocos utilizando os mesmos parâmetros e materiais de campo para os ensaios, por se tratar de um parâmetro escasso na literatura.
2. Através destes valores de rugosidade obtidos em ensaios de laboratórios, realizar um novo estudo similar ao apresentado nesta pesquisa, a fim de comparação.
3. Fazer um levantamento dos casos reais de encostas instáveis no Brasil, para ter um controle realístico da geometria e material da encosta rugosa, podendo controlar melhor sua altura e declividade, assim como aplicar outros tipos de rochas em novas pesquisas.
4. Elaborar novo estudo numérico aplicando a rugosidade e utilizando os mesmos dados desta pesquisa, mas variando o tamanho e a geometria do bloco.
5. Determinar e aplicar a velocidade rotacional dos blocos rochosos, por se tratar de um parâmetro que influencia na trajetória e alcance dos blocos, além de ter dados escassos na literatura.
6. Elaborar uma pesquisa com base na influência da fragmentação dos blocos rochosos no fenômeno de queda de blocos, aplicando a teoria do caos.
7. Realizar estudos tridimensionais no programa RocFall para o fenômeno de queda de blocos sob a perspectiva da teoria do caos.
8. Produzir nova pesquisa para outros tipos de movimentos de massa, como exemplo o fluxo de detritos (solo e rocha), sob a ótica da teoria do caos.

REFERÊNCIAS

ABNT. Estabilidade de Encostas. NBR 11682. Rio de Janeiro, 2009.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: Uma proposta metodológica. 1º Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, COBRAE 1992, Rio de Janeiro, 1992.

ARAUJO, L. D. de. Estudo da variação do coeficiente de restituição na resposta das encostas às quedas de blocos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 155p., 2021.

ASHAYER, P. Application of rigid body impact mechanics and discrete element modeling to rockfall simulation. Department of Civil Engineering. University of Toronto, 2007.

AZEVEDO, I. C. D & MARQUES, E. A. G. Introdução à mecânica das rochas. Viçosa: UFV, 363p., 2002.

AZZONI, A.; LA BARBERA, G.; ZANINETTI, A. Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, England, No. 32, 15p., 1995.

BARROSO, E. V. Estudo das características geológicas e do comportamento geotécnico de um perfil de intemperismo em leptinito no Rio de Janeiro. 251f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

BARTON, N. & CHOUBEY, V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. Rock Mechanics and Rock Engineering, v.10, n. 1-2, p. 1-54, 1977.

BARTON, N. Shear strength investigations for surface mining. In: C.O. Brawner (ed.), Stability in surface mining, Proceedings of 3rd International Conference, Vancouver, British Columbia, p. 171-196. Society of Mining Engineers. AIME, New York, 1982.

BLAUDT, Larissa Mozer; ALVARENGA, Thomas Wunsch; GARIN, Yuri. DESASTRE OCORRIDO EM PETRÓPOLIS NO VERÃO DE 2022: ASPECTOS GERAIS E DADOS DA DEFESA CIVIL. Geosciences= Geociências, v. 42, n. 01, p. 59-71, 2023.

BOZZOLO, D.; PAMINI, R. Simulation of Rockfalls Down a Valley Side. Acta Mechanica, No. 63, 17p., 1986.

BURBAN, P. A. C. Apreçamento de opções exóticas: uma abordagem pela simulação de Monte-Carlo. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 18 abr. 2008.

CALLEN, H. B. Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics. 2nd. Edition, John Wiley & Sons, 512p., 1985.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 7 ed. Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, vol. 1,2,3, 2016.

CASTANHEIRA NETO, P. P. Análise de evento de queda de bloco seguido de explosão da rocha no distrito de Banquete, Bom Jardim – RJ. Dissertação de Mestrado – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 154f., 2019.

CAVALCANTE, M.A.; SILVA, E.; PRADO, R. & HAGG, R. O Estudo de Colisões Através do Som. Revista Brasileira de Ensino de Física, 24(2): 150-157, 2002.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. MANUAL de Mapeamento de Perigo e Riscos a Movimentos Gravitacionais de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais - Projeto GIDES. Rio de Janeiro: CPRM. ISBN: 978-85-7499-448-2, 2018.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board – National Research Council. Washington, USA, 39p., 1996.

DE LA SOTA, C. H. Control Inteligente de Sistemas Dinámicos Caóticos. Tesis Doctoral en Informática. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España, 256p., 2004.

DE OLIVEIRA, L. C. B., & MENDES, E. A. Estudo da teoria do caos e dos fractais, e dos sistemas complexos e suas possíveis aplicações em Matemática. *Exacta*, 4(Esp), 99-101, 2006.

DEERE, D. U. & PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. /proc. 4th In: PAN AMERICAN CONF. ON SOIL MECH. AND FOUND. ENG., 4., San Juan, P. R. Proceedings. v.1, p.87-111, 1971.

DEFLOR BIOENGENHARIA. Material publicitário de drenagem. 2019. Disponível em: <http://deflor.com.br/drenagem/>. Acesso em 02 de setembro de 2023.

DIAS, G.P. & BARROSO, E.V. Determinação experimental do coeficiente de restituição normal de rochas: Aplicação na previsão do alcance de blocos em encostas. In: ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS– UFRJ, 29 (2): 149-167, 2006.

DORREN, L.K.A. A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approches. Progressin Physical Geography, 27. USA, 2003.

DURÃO, L. M. M. Entropia Estatística de Sistemas Abertos. Dissertação de Mestrado em Física, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 99 p., 2015.

DORREN, L.K.A.; DOMAAS, U.; KRONHOLM, K.; LABIOUSE, V. Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. In: S. Lambert & F. Nicot (editores). Rockfall engineering. ISTE Ltd. / John Wiley & Sons Inc.: p. 143 – 173, 2011.

DUTRA, A. C. O. M. & PARIZZI, M. G. Análise de Estabilidade de Taludes Rochosos no Condomínio Vale do Sereno, Nova Lima, MG. In: 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, anais, 1-9p, 2022.

EVANS, S. G. & HUNGR, O. The Assessment of Rockfall Hazards at the Base of Talus Slopes. Canadian Geotechnical Journal, 30/4, pp. 620-636, 1993.

FÁBIO AUGUSTO GOMES VIEIRA REIS. Geodinâmica Externa. Movimentos de massa. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09.html>. Acesso em 29 de agosto de 2023.

FRANÇA LIMA, A. Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da formação barreiras na área urbana da cidade do Recife. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

FREITAS, A. S. Análises Numéricas de Casos de Quedas de Blocos Rochosos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 111p., 2013.

G1. 2022. Fotos mostram como era local do paredão que caiu sobre lanchas em Capitólio. Centro-Oeste. 08 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2022/01/08/fotos-mostram-como-era-local-do-paredao-que-caiu-sobre-lanchas-em-capitolio.ghtml>. Acesso em 30 de agosto de 2023.

GÁLVEZ, J. H. F. Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da rodovia RS471/BR153, Lote 2. 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 164p., 2012.

GEOBRUGG. Rockfall deflector protection Avers-Reno di Lei / Switzerland. Deflector protection / Photo documentation / March 2009, 4p., 2009.

GEOBRUGG. Catálogos de produtos. Romanshorn, Suíça. 2012. Disponível em: <http://www.geobrugg.com>. Acesso em 02 de setembro de 2023.

GEO-RIO. Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1ª edição, 1999.

GEO-RIO. Manual Técnico de Encostas, Volume I. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 520p., 2014.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes / Denise M. S. Gerscovich. -- 2. ed. - São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GIACOMINI, A.; BUZZI, O.; RENARD, B.; GIANI, G. P. Experimental Studies on Fragmentation of Rock Falls on Impact with Rock Surfaces. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, England, No. 46, 8p., 2008.

GIANI, G. P. Rock Slope stability analysis. Rotterdam: Balkema, 345 p, 1992.

GIANI, G. P.; GIACOMINI, A.; MIGLIAZZA, M. & SEGALINI, A. Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. 2º Rock Mechanics and Rock Engineering, 37, pp. 369-389, 2004.

GLEICK, J. Caos: A Criação de uma Nova Ciência. (Tradução de Waltensir Dutra). 4ª Ed., Editora Campus, Rio de Janeiro, 309p., 1991.

GUERRA, U. G. Retroanálise de Rupturas de Taludes em Nova Friburgo - RJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 81 p., 2015.

GUIMARÃES, F. E. B. P. Análise de um escorregamento ocorrido em um talude na RJ-116. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 183f., 2016.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. Reston, Virginia, US Geological Survey Circular - USGS, v. 1325, 2008.

HOEK, E. and LONDE, P. The design of rock slopes and foundations. General Report on Theme III. Proc. Third Congress Intl. Soc. Rock Mech., Denver. 1(A), 613-752, 1974.

HOEK, E. Rock Mass Properties for Underground Mines. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). Littleton, Colorado. 21 p., 2002.

IGNACIO, F. V. Aplicação da Teoria do Caos no Estudo da Queda de Blocos Rochosos no Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 128p., 2019.

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 9, p.131-152, 1998.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. Rock Characterization Testing and Monitoring. E.T.Brown, 211 p., 1981.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing & monitoring: 1974-2006. (Ed. R. Ulusay; J. A. Hudson). Ankara, Turkey: Kozan Ofset Matbaacilik San. ve Tic. Ti., 628p., 2007.

MARIETTO, M.; MEIRELES, M.; SANCHES, C.; SILVA, O. R. Teoria do Caos: Uma Contribuição para a Formação de Estratégias. 30° EnANPAD - Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração. Salvador, Bahia, 15 p., 2006.

MARQUES, E. A. G. Caracterização geomecânica de um perfil de intemperismo em Kinzigito. Rio de Janeiro: IGEO/UFRJ, Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 271f., 1998.

MARQUES, E. A. G. & VARGAS JR, E. A. Mecânica das rochas -- 1. ed. -- São Paulo: Oficina de Textos. ISBN: 978-85-7975-347-3, 2022.

MEISSL, G. Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28. Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Austria, 249p, 1998.

MENEZES FILHO, A. P. Não-Extensividade Termodinâmica, Invariância Discreta de Escala e Elasto-Plasticidade: Estudo Numérico de um Modelo Geomecânico Auto-Organizado Criticamente. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 189p., 2003.

NORRISH, N. I. and WYLLIE, D. C. Rock Slope Stability Analysis. Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board – National Academy of Sciences. Washington, USA, pp. 391-425, 1996.

NUNES, A. L. L. S. Estabilidades de Taludes Rochosos em Estradas. Anais do 6º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Geosul 2008. Florianópolis, 11p., 2008.

NUNES, A. L. L. S.; RIOS FILHO, M.; MUNIZ, L. F.; SPADA, J. Instabilidade por Queda de Blocos no Morro do Escalavrado, RJ. 14º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG 2008, Búzios, Rio de Janeiro, 8p. 2008.

NUSSENZVEIG, H. M. Complexidade e Caos. 3ª Ed. Editora UFRJ/COPEA, Rio de Janeiro, 280p., 2008.

OLIVEIRA, Roberta Duarte de. Estudo e análise da estabilidade de um talude no município de Joinville/SC. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil - Pedra Branca, Universidade do Sul de Santa Catarina, 2019.

PATTON, F. D. Multiple modes of shear failure in rocks. In: CONG. ISRM, 1., 1966, Lisbon. Proceedings... [S.l.: s.n.], v.1, p.509-513, 1966.

PELIZONI, A. B. Análise de Fluxos de Detritos na Região Serrana Fluminense. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 141 p., 2014.

PENNA, D. D. J. Definição da Árvore de Cenários de Afluências para o Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

RIBEIRO, A. C. M. A. Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda de blocos – uma aplicação da teoria do Caos. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

RIBEIRO, R.S. Análise comparativa do alcance de blocos rochosos utilizando os softwares RocFall e PFC-2D. Departamento de Geologia. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso_ Bacharelado em Geologia. 54p, 2008.

RIBEIRO, R.S. 2013. Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos. Tese (Doutorado em Ciências (Geologia)) – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 265f.

ROCHA, J. S. A. Estudos Numéricos sobre Trajetórias de Queda de Blocos Rochosos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 140p., 2009.

ROCSCIENCE, RocFall V.4: A Statistical Analysis Program Designed to Assist with a Risk Assessment of Slopes at Risk of Rockfalls, Rocscience, Ontario, Canada, 2004.

SANTOS, S. C. C. dos. Avaliação da eficiência preditiva do alcance de blocos de rocha em encostas instáveis segundo método de perigo do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), 96p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVEIRA, L. R. C. Avaliação do Perigo de Queda de Blocos em Taludes Urbanos e Ferroviários e Simulação de sua Trajetória. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 156p., 2017.

SLOB, S.; HACK, HRGK; VAN KNAPEN, B.; TURNER, K. & KEMENY, J. A method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, pp 187–194, 2005.

TAVARES, L. M. M. S. C. Análise Paramétrica no Estudo da Queda de Blocos em Encostas Rochosas. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 110 p., 2015.

TSALLIS, C. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. Journal of Statistical Physics, No. 52, 8p., 1988.

TSALLIS, C. As Distribuições de Lévy. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, n° 2, p. 156-162, jun. 2000.

TSALLIS, C. Generalization of the possible algebraic basis of q-triplets. Eur. Phys. J. Spec. Top., 226, 455-466, 2017.

ULUSAY, R. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. New York: Springer, 2015.

U.S. Federal Highway Administration. Report: Ground-Based LIDAR, Rock Slope Mapping and Assessment, 2008.

VALERIO, L. R. Dinâmica Não-Linear e Caos: O Circuito de Chua. Trabalho de Conclusão de Curso em Física, Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 31 p., 2014.

VARGAS Jr, E.A.; CASTRO, J.T.; AMARAL, C.; FIGUEIREDO, R.P. On Mechanics for Failures of Some Rock Slopes in Rio de Janeiro, Brasil: Thermal Fatigue? In: 9th International Symposium on Landslides: Evaluation and Stabilization. Rio de Janeiro, v.2, p. 1007-1012. 2004.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board – National Research Council. Washington, USA, 22p., 1978.

VILLELA, R. J. Uso de Barreiras Flexíveis para o Controle de Quedas de Blocos de Rocha. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 105p., 2011.