



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

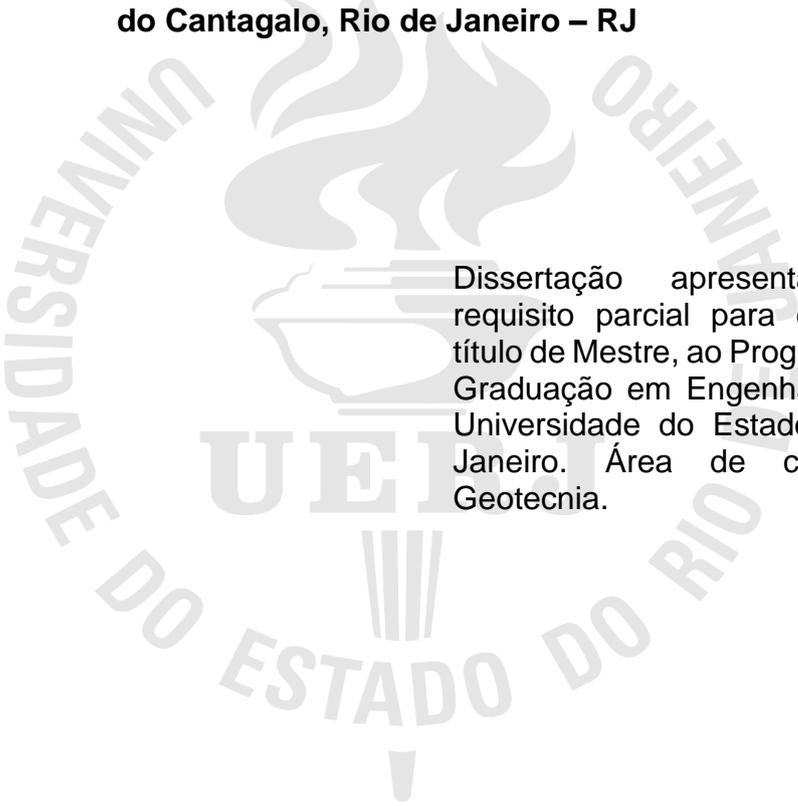
Fernanda Valinho Ignacio

**Aplicação da Teoria do Caos no estudo da queda de blocos  
rochosos no Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ**

Rio de Janeiro  
2019

Fernanda Valinho Ignacio

**Aplicação da teoria do caos no estudo da queda de blocos rochosos no Morro  
do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ**



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<sup>ª</sup>. Dr. Ana Cristina Castro Fontenla Seira

Rio de Janeiro

2019

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

I24 Ignacio, Fernanda Valinho.  
Aplicação da teoria do caos no estudo da queda de blocos rochosos no Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro, RJ / Fernanda Valinho Ignacio. – 2019.  
127f.

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. Mecânica de rochas - Teses. 3. Comportamento caótico nos sistemas - Teses. 4. Taludes (Mecânica do solo) - 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 624.15(815.3):517.938

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

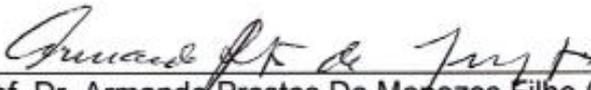
Fernanda Valinho Ignacio

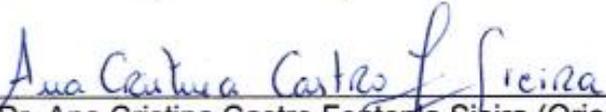
**Aplicação da teoria dos caos no estudo da queda de blocos rochosos no  
Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ**

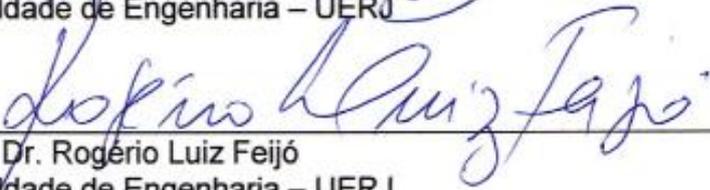
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 04 de fevereiro de 2019.

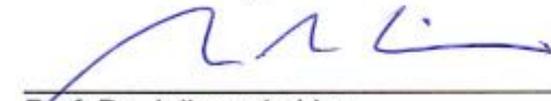
Banca Examinadora:

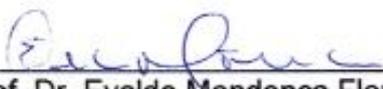
  
Prof. Dr. Armando Prestes De Menezes Filho (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

  
Prof. Dr. Ana Cristina Castro Fontemla Sieira (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

  
Prof. Dr. Rogério Luiz Feijó  
Faculdade de Engenharia – UERJ

  
Prof. PhD. Marcus Felgas Pacheco  
Faculdade de Engenharia – UERJ

  
Prof. Dr. Juliano de Lima  
Fundação Instituto de Geotécnica – GEO-RIO

  
Prof. Dr. Evaldo Mendonça Fleury Curado  
Centro de Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF

Rio de Janeiro

2019

## DEDICATÓRIA

Para minha maior incentivadora, Rosa Maria Valinho Ignacio. Mais uma vez e tantas outras.

E a todas as mulheres que se dedicam à pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, Rosa e Edson, por me ofertarem todo o tipo de incentivo e apoio em tudo que me proponho a fazer.

Ao meu companheiro de vida, João Victor. Sem seu amor, compreensão e paciência esta e muitas outras conquistas não seriam possíveis.

À minha filha de quatro patas, Lótus Maria, por encher minha vida de companheirismo, alegria e pelos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira, que tanto admiro – dentro e fora da sala de aula. Não tenho como agradecer tamanha atenção, amizade, generosidade e suporte para que eu pudesse realizar este sonho mesmo em meio a tantas adversidades.

Ao Prof. Dr. Rogério Feijó por compartilhar não só seu vasto conhecimento e experiência profissional com extrema humildade e bom humor, mas também por fornecer os dados utilizados na presente pesquisa.

Ao Prof. Dr. Juliano de Lima, por cultivar em mim o interesse pela geotecnia e pelo PGE CIV. E claro, por toda sua disponibilidade e estímulo desde a minha graduação.

Ao Prof. Dr. Evaldo Mendonça Fleury Curado por me receber no CBPF – Centro de Brasileiro de Pesquisas Físicas e se interessar genuinamente pela minha pesquisa.

Aos Professores mencionados anteriormente e ao Prof. PhD. Marcus Peigas Pacheco por gentilmente se disponibilizarem para participar da banca examinadora e contribuírem imensamente com a pesquisa desenvolvida.

A todo corpo docente do PGE CIV, pelos ensinamentos, comprometimento, entusiasmo e principalmente a receptividade ímpar.

Aos amigos especiais que fiz durante o mestrado, Bruno Vieira, Simone Albuquerque, Guilherme Pereira Pinto e Pablo Richard. Vocês tornaram o caminho até esta conquista mais divertido e me mostraram que, com amizade e bom humor, tudo pode ser superado.

A equipe da Firjan SENAI Tijuca, principalmente a Simone Dória, que se fez tão presente na reta final desta pesquisa.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro durante a elaboração desta pesquisa.

Não precisa correr tanto; o que tiver de ser seu às mãos lhe há de ir.

(Dom Casmurro)

*Machado de Assis*

## RESUMO

IGNACIO, Fernanda Valinho. *Aplicação da teoria do caos no estudo da queda de blocos rochosos no Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ*. 2019.127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Encostas rochosas apresentam grande potencial de instabilização por queda de blocos. Este tipo de movimento de massa geralmente ocorre de forma abrupta e sem indícios de movimentação prévia, envolvendo energias cinéticas e velocidades elevadas, que resultam em eventos muitas vezes catastróficos. Apesar das pesquisas existentes acerca do tema, ainda se faz necessário um nível de compreensão maior acerca das interações existentes entre os fatores condicionantes e a susceptibilidade de ocorrência destes eventos. A teoria do caos analisa fenômenos que, além de possuírem sensibilidade às condições iniciais, apresentam o comportamento global do sistema notoriamente distinto daqueles observados em Sistemas Lineares, nos quais é possível realizar a divisão do problema em partes e as investigar isoladamente. Esta dependência decorre das não-linearidades existentes no sistema, que amplificam pequenas variações nas condições iniciais, tornando imprevisível a evolução do fenômeno. A presente pesquisa visa analisar a aplicabilidade da teoria do caos para descrever o comportamento deste movimento de massa por meio de simulações de trajetórias de movimentos utilizando o programa RocFall 6.0. Inicialmente foi realizado um estudo preliminar de quatro casos distintos para a verificação da possibilidade de utilização da teoria do caos para descrever o comportamento da queda de blocos rochosos em encostas de gnaiss facoidal e com isso, viabilizar a aplicação da mesma para o estudo de caso, elaborado a partir de uma seção da escarpa do Morro do Cantagalo, com face para a Rua Professor Gastão Bahiana, Bairro de Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos durante a pesquisa sugerem que os movimentos de massa do tipo quedas de blocos rochosos podem ser descritos pela teoria do caos – tendo em vista a universalidade funcional encontrada, e que o comportamento caótico está associado principalmente com a concavidade e/ou com a convexidade apresentadas pelas superfícies das encostas, podendo apresentar um comportamento fracamente ou fortemente caótico.

Palavras-chave: Movimentos de massa; Quedas de rochas; Sistemas não-lineares; Teoria do Caos.

## ABSTRACT

IGNACIO, Fernanda Valinho. *Application of chaos theory in the study of rock falls in Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ*. 2019. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Rock slopes present high potential for rock falls instabilizations. This type of mass movement generally occurs abruptly and without signs of previous movement, involving kinetic energies and high speeds, resulting in catastrophic events. Despite the existing research about the problem, a high level of understanding about the interactions between the conditioning factors and the susceptibility of these events is still necessary. The chaos theory analyzes phenomena that, in addition to being sensitive to the initial conditions, present the overall behavior of the system that is notoriously different from those observed in Linear Systems, in which it is possible to divide the problem into parts and investigate them in isolation. This dependence arises from the nonlinearities existing in the system, which amplify small variations in the initial conditions, making the evolution of the phenomenon unpredictable. The present research aims at analyzing the applicability of chaos theory to describe the behavior of this mass movement through simulations of trajectories using the RocFall 6.0 program. Initially, a preliminary study of four distinct cases was carried out to verify the possibility of using the chaos theory to describe the behavior of the rock falls on slopes of augen gneiss and with this, to enable the application of the same into the case of study, elaborated from a section of the scarp of Morro do Cantagalo, facing Rua Professor Gastão Bahiana, Copacabana neighborhood, in the city of Rio de Janeiro. The results obtained during the research suggest that the mass movements of the rock falls type can be described by the chaos theory – in view of the functional universality found, and the chaotic behavior is associated mainly with the concavity and / or with the convexity presented by the surfaces of the slopes, being able to present a weak or strongly chaotic behavior.

Keywords: Mass movement; Rock falls; Nonlinear systems; 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 USGS, 2004).....	25
Figura 2 – Características das discontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981) .....	27
Figura 3 – Ruptura planar (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Nunes (2004)) .....	29
Figura 4 – Ruptura em cunha (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Hoek (2001))....	30
Figura 5 – Ruptura circular (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Nunes (2008)) .....	31
Figura 6 – Ruptura por tombamento (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Highland e Bobrowsky (2008)) .....	31
Figura 7 – Movimento do bloco rochoso em função da inclinação da encosta (Adaptado de Gálvez, 2012) .....	32
Figura 8 – Vetores de velocidade de impacto na colisão de blocos (Adaptado de Giani et al. 2004) .....	35
Figura 9 – Esquema representativo para o estudo de encostas com potencial instável (Adaptado de GEO-RIO, 2014) .....	37
Figura 10 – Fragmentação de rocha para construção do gasoduto Paulínia – Jacutinga (MG) (DESMONTEC, 2009) .....	38
Figura 11 – Proteção superficial com o uso de concreto projetado (Freitas, 2013)...	39
Figura 12 – Grelhas ancoradas e contrafortes (GEO-RIO (1999) <i>apud</i> Rocha (2009)) .....	40
Figura 13 – Trincheira para coleta de bloco (Nunes, 2008) .....	41
Figura 14 – Túnel falso para proteção em uma estrada na África do Sul (Volkwein et al., 2005). .....	42
Figura 15 – Berma dissipadora de energia para blocos rochosos (Rocha, 2009) .....	42
Figura 16 – Tela metálica (MACCAFERRI, 2014) .....	43
Figura 17 – Barreira rígida de impacto (Pantelidis e Kokkalin, 2011) .....	44
Figura 18 – Barreira Flexível instalada em encosta rochosa em uma estrada na África do Sul (Volkwein et al., 2005).....	45
Figura 19 – Barreira flexível de impacto, sendo a) Seção transversal b) Detalhes frontais (Adaptado de CEG, 2015) .....	45

Figura 20 – Retroanálise do impacto do bloco com a encosta e com a vegetação (Adaptado de Vijayakumar et al., 2012) .....	47
Figura 21 – Reconstrução de trajetória de queda por meio de teste de campo com filmagem de alta velocidade (Spadari et al., 2012).....	48
Figura 22 – Teste laboratorial em escala reduzida (Chau et al., 2002) .....	49
Figura 23 – Ângulos <i>Fahrböschung</i> e o <i>Minimum Shadow Angle</i> de uma encosta com presença de tálus (Adaptado de Meissl, 1998). .....	50
Figura 24 – Estrutura fractal de floco de neve de Von Koch (Adaptado de Menezes Filho, 2003) .....	56
Figura 25 – Solução do sistema de Lorenz, projetada no plano xz, “atrator de Lorenz” (Valerio, 2014).....	57
Figura 26 – Relevo da Cidade do Rio de Janeiro e seus maciços principais (SMAC, 2000) .....	65
Figura 27 – Parte Sul da Geologia da Cidade do Rio de Janeiro (Adaptado de Valeriano et al. 2007) .....	65
Figura 28 – Morro do Cantagalo (Adaptado de Andrade, 2018).....	67
Figura 29 – Localização do Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ .....	67
Figura 30 – Representação da área de estudo no mapa geológico-geotécnico da escarpa rochosa com face para a Rua Professor Gastão Bahiana, próxima a Avenida Barata Ribeiro e Túnel Prefeito Sá Freire Alvim (Adaptado de GEO-RIO, 2009).....	68
Figura 31 – Grelha atirantada na escarpa da Rua Prof. Gastão Bahiana (GEO-RIO, 2009) .....	69
Figura 32 – Contrafortes na escarpa da Rua Prof. Gastão Bahiana (Rossi, 2013) ...	69
Figura 33 – Barreiras flexíveis de impacto instaladas no Morro do Cantagalo com face para a Rua Prof. Gastão Bahiana (GEOBRUGG, 2011) .....	70
Figura 34 – RocFall versão 6.0 (Rocscience, 2018).....	73
Figura 35 – Interface do programa RocFall na fase de resultados.....	75
Figura 36 – Detalhe da descrição do movimento de queda de um único bloco rochoso e todos seus pontos de contato com a encosta (Rocscience, 2018).....	75
Figura 37 – Fluxograma da metodologia adotada para o estudo preliminar e estudo de caso.....	77
Figura 38 – Formato dos blocos na modelagem dos casos C1, C2 e C3 e Estudo de caso: (A) Blocos irregulares grandes (BIG), (B) Blocos irregulares médios (BIM) e (C) Blocos irregulares pequenos (BIP).....	78

Figura 39 – Geometria da encosta rochosa – Caso C1 (sem escala).....	80
Figura 40 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BIP .....	81
Figura 41 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BIP .....	81
Figura 42 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BIM.....	82
Figura 43 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BIM .....	82
Figura 44 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BIG .....	83
Figura 45 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BIG.....	83
Figura 46 – Gráfico $\text{Lnq}(P(x)/a')$ versus $((x-c')/b')^{(2/\delta)}$ – Caso C1 – Bloco BIG.....	85
Figura 47 – Geometria da encosta rochosa – Caso C2 (sem escala).....	86
Figura 48 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BIP .....	87
Figura 49 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BIP .....	87
Figura 50 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BIM.....	88
Figura 51 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BIM .....	88
Figura 52 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BIG .....	89
Figura 53 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BIG.....	89
Figura 54 – Gráfico $\text{Lnq}(P(x)/a')$ versus $((x-c')/b')^{(2/\delta)}$ – Caso C2 – Bloco BIP .....	91
Figura 55 – Geometria da encosta rochosa – Caso C3 (sem escala).....	92
Figura 56 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BIP .....	93
Figura 57 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BIP .....	93
Figura 58 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BIM.....	94
Figura 59 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BIM .....	94
Figura 60 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BIG .....	95
Figura 61 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BIG.....	95
Figura 62 – Gráfico $\text{Lnq}(P(x)/a')$ versus $((x-c')/b')^{(2/\delta)}$ – Caso C3 – Bloco BIM .....	97
Figura 63 – Geometria da encosta rochosa – Caso C4 (sem escala).....	98
Figura 64 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BIP .....	99
Figura 65 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BIP .....	99
Figura 66 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BIM.....	100
Figura 67 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BIM .....	100
Figura 68 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BIG.....	101
Figura 69 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BIG.....	101
Figura 70 – Gráfico $\text{Lnq}(P(x)/a')$ versus $((x-c')/b')^{(2/\delta)}$ – Caso C4 – Bloco BIP.....	103
Figura 71 – Geometria da encosta rochosa – Estudo de caso (sem escala) .....	105
Figura 72 – Área de corte entre o Morro dos Cabritos e o Morro do Cantagalo.....	106

Figura 73 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Estudo de caso – Bloco BIP.....	107
Figura 74 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Estudo de caso – Bloco BIP .....	107
Figura 75 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Estudo de caso – Bloco BIM.....	108
Figura 76 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Estudo de caso – Bloco BIM.....	108
Figura 77 – Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Estudo de caso – Bloco BIG .....	109
Figura 78 – Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Estudo de caso – Bloco BIG .....	109
Figura 79 – Gráfico $\text{Lnq}(P(x)/a')$ versus $((x-c')/b')^{(2/\delta)}$ – Caso C1 – Bloco BIM ....	111
Figura 80 – Área truncada do gráfico de dados experimentais RocFall 6.0 .....	112
Figura 81 – Gráfico de universalidade funcional (estudo preliminar e estudo de caso) .....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos movimentos de massa (Adaptado de Varnes, 1978) ..	25
Tabela 2 – Termos de atividade e características do movimento de massa (Adaptado de Cruden e Varnes, 1996) .....	26
Tabela 3 – Características dos principais programas numéricos de simulação de queda de blocos rochosos (Adaptado de GEO-RIO (2014) <i>apud</i> Rocha (2009)).....	52
Tabela 4 – Caracterização dos principais grupos de rochas presentes nas encostas do Rio de Janeiro (Adaptado de GEO-RIO, 2014) .....	66
Tabela 5 – Parâmetros para a modelagem geotécnica das encostas de gnaiss facoidal.....	78
Tabela 6 – Parâmetros para a modelagem dos blocos rochosos de gnaiss facoidal .....	78
Tabela 7 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C1 (distribuição de probabilidade gaussiana) .....	84
Tabela 8 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C1 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida) .....	84
Tabela 9 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C2 (distribuição de probabilidade gaussiana) .....	90
Tabela 10 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C2 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida) .....	90
Tabela 11 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C3 (distribuição de probabilidade gaussiana) .....	96
Tabela 12 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C3 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida) .....	96
Tabela 13 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C4 (distribuição de probabilidade gaussiana) .....	102
Tabela 14 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C4 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida) .....	102
Tabela 15 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Estudo de caso (distribuição de probabilidade gaussiana) .....	110
Tabela 16 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Estudo de caso (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida).....	110

Tabela 17 – Compilação dos resultados obtidos por meio do estudo preliminar (Casos C1, C2, C3 e C4) e do estudo de caso (Morro do Cantagalo).....	113
---	-----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
BIG	Bloco Irregular Grande
BIM	Bloco Irregular Médio
BIP	Bloco Irregular Pequeno
EOTA	<i>European Organization for Technical Approvals</i>
ETAG	<i>European Technical Approval Guideline</i>
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
SEL	<i>Service Energy Level</i>
SMAC	Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro
SUBPERD	Subsecretaria de Prevenção e Erradicação de Riscos e Desastres do Estado do Rio de Janeiro
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Variável aleatória $a$ da distribuição de probabilidade Gaussiana
$a'$	Variável aleatória $a'$ da distribuição de probabilidade $q$ -Exponencial Estendida
$b$	Variável aleatória $b$ da distribuição de probabilidade Gaussiana
$b'$	Variável aleatória $b'$ da distribuição de probabilidade $q$ -Exponencial Estendida
$c$	Variável aleatória $b$ da distribuição de probabilidade Gaussiana
$c'$	Variável aleatória $c'$ da distribuição de probabilidade $q$ -Exponencial Estendida
$CR_n$	Coeficiente normal de restituição
$CR_t$	Coeficiente 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)

$V_{pos,t}$	Velocidade de saída (tangencial à superfície)
$V_{pre,n}$	Velocidade de entrada (normal à superfície)
$V_{pre,t}$	Velocidade de entrada (tangencial à superfície)
$x$	Variável das distribuições de probabilidades $y_q$ e $y_{q(e-e)}$
$W$	Número de subestados 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
$^\circ$	Graus
$\delta$	Parâmetro entrópico de ajuste
$\pi$	Número Pi

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
<b>1.1 Considerações sobre movimentos de massa gravitacionais</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 Mecanismos de instabilização em maciços rochosos</b> .....	<b>26</b>
1.2.1 Rupturas planares .....	29
1.2.2 Rupturas em cunha .....	30
1.2.3 Rupturas circulares .....	30
1.2.4 Rupturas por tombamentos .....	31
<b>1.3 Queda de blocos rochosos</b> .....	<b>32</b>
<b>1.4 Técnicas de estabilização e mitigação em maciços rochosos</b> .....	<b>36</b>
1.4.1 Eliminação do problema de instabilidade .....	37
1.4.2 Estabilização .....	38
1.4.3 Convivência com o problema de instabilidade .....	40
<b>1.5 Métodos de análise do fenômeno de queda de blocos rochosos</b> .....	<b>46</b>
1.5.1 Métodos experimentais .....	47
1.5.2 Métodos empíricos .....	50
1.5.3 Métodos numéricos .....	51
<b>2 TEORIA DO CAOS</b> .....	<b>54</b>
<b>2.1 Considerações sobre sistemas lineares e não-lineares (caóticos)</b> .....	<b>54</b>
2.1.1 Principais características dos sistemas caóticos.....	55
<b>2.2 Entropia estatística</b> .....	<b>58</b>
2.2.1 Entropia clássica de Boltzmann-Gibbs.....	59
2.2.2 Entropias generalizadas .....	60
<b>2.3 Sistemas não-lineares (caóticos) e a engenharia geotécnica</b> .....	<b>62</b>
<b>3 ESTUDO DE CASO DO MORRO DO CANTAGALO – RJ</b> .....	<b>64</b>
<b>3.1 Aspectos geomorfológicos e geológicos da cidade do Rio de Janeiro</b> .....	<b>64</b>
<b>3.2 Localização da área de estudo e caracterização geológico-geotécnica</b> .....	<b>67</b>
<b>3.3 Programa numérico RocFall 6.0</b> .....	<b>71</b>
3.3.1 RocFall 6.0 .....	71
3.3.2 Método de Massa Concentrada e Método do Corpo Rígido.....	72
3.3.3 Tipos de movimentos disponíveis .....	73

3.3.4	Intervenções de convivência disponíveis .....	74
3.3.5	Considerações acerca do RocFall 6.0.....	74
<b>3.4</b>	<b>Metodologia de estudo .....</b>	<b>76</b>
3.4.1	Parâmetros e considerações sobre o material da encosta e dos blocos.....	77
<b>3.5</b>	<b>Teoria do caos aplicada ao estudo preliminar de queda de blocos .....</b>	<b>79</b>
3.5.1	Caso C1 .....	80
3.5.2	Caso C2 .....	86
3.5.3	Caso C3 .....	92
3.5.4	Caso C4 .....	98
3.5.5	Considerações acerca do estudo preliminar .....	104
<b>3.6</b>	<b>Teoria do caos aplicada no estudo de caso do Morro do Cantagalo .....</b>	<b>105</b>
3.6.1	Considerações acerca do estudo de caso.....	111
<b>3.7</b>	<b>Análise dos resultados e discussões.....</b>	<b>112</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>116</b>
4.1	Sugestões para pesquisas futuras .....	117
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>119</b>

## INTRODUÇÃO

A cidade do Rio de Janeiro está inserida em um ambiente de clima tropical úmido e relevo acidentado, com maciços rochosos heterogêneos e descontínuos. Sua própria geomorfologia é marcada por manifestações de diversos tipos de movimentos de massa, e quando estes fenômenos são aliados ao crescimento urbano desordenado e a ausência de planejamento ligado à infraestrutura, acabam resultando em graves consequências socioeconômicas.

Encostas rochosas são formadas basicamente pela associação de duas parcelas: uma de rocha maciça e outra formada pelas descontinuidades, como por exemplo falhas, juntas, diáclases, fraturas, microfissuras e fissuras. Nunes (2008), salienta que as propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade da rocha são resultado da combinação entre as propriedades individuais destas duas parcelas, logo, a estabilidade do talude rochoso é função desta combinação e das condições nas quais o maciço se encontra.

O movimento de massa do tipo quedas de lascas e de blocos em encostas rochosas que apresentam descontinuidades são muito comuns. Estes eventos são de difícil previsão, pois geralmente ocorrem de forma abrupta, sem indícios de movimentação prévia, atingindo elevadas velocidades e, devido às altas energias cinéticas desenvolvidas durante o movimento, possuem um imenso potencial destrutivo.

As principais técnicas de convivência e mitigação para estas instabilidades são representadas por medidas ativas ou passivas. As primeiras consistem, usualmente, em conter a lasca ou o bloco em sua posição original e as segundas, são proteções projetadas com o fim de deter o bloco após o seu desprendimento, assim como algumas técnicas de demolição.

Em função da necessidade de se prevenir este tipo de movimento, métodos experimentais, métodos empíricos e analíticos de previsão de quedas de blocos rochosos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos. Estes métodos possuem grande valor prático, tendo em vista que são baseados, muitas vezes, em observações e registros de dados de casos reais. Os métodos objetivam a determinação das principais características que regem este fenômeno, sendo capazes de subsidiar a seleção e o dimensionamento das medidas de convivência e mitigação.

Baseadas na geometria e na geomorfologia do problema, as relações empíricas e experimentais permitem estimar os principais parâmetros das quedas de blocos. Já os métodos analíticos, por meio de programas numéricos, permitem simular inúmeras possibilidades de movimentos e também, representar as condições geométricas locais e as propriedades particulares das quedas de blocos.

Atualmente, ambos os métodos possuem uma aplicação muito restrita para a análise global do movimento, delimitação de áreas potenciais a serem afetadas e estimativa de parâmetros. Isto se deve, principalmente, à não-linearidade encontrada no processo de queda de bloco e, por consequência, à dificuldade do entendimento do mecanismo do movimento e das suas particularidades.

## **Motivação**

Apesar das diversas pesquisas desenvolvidas sobre movimentos de massa, ainda se faz necessário um nível de compreensão mais aprofundado das interações existentes entre os fatores condicionantes e a susceptibilidade de ocorrência de fenômenos complexos como a queda de blocos rochosos.

## **Objetivos**

A presente dissertação tem por objetivo principal avaliar o processo de queda de blocos rochosos em um talude urbano situado no Morro do Cantagalo – com face para a Rua Professor Gastão Bahiana, no Bairro de Copacabana, Rio de Janeiro – RJ, bem como simular as possíveis trajetórias dos blocos e estimativa de seu alcance. Para tanto, faz-se uso do programa RocFall versão 6.0 – RocScience Inc., disponibilizado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – PGECIV UERJ, em conjunto com o desenvolvimento de uma metodologia de análise do problema sob a ótica da Teoria do Caos (sistemas não-lineares).

Para alcançar a finalidade desta pesquisa, quatro objetivos específicos foram determinados(as):

- i. O estudo do movimento de massa do tipo queda de blocos rochosos e os seus mecanismos de instabilidade e parâmetros típicos do fenômeno;

- ii. A investigação geológica detalhada da Região do Morro do Cantagalo, área selecionada como estudo de caso;
- iii. Obtenção das trajetórias simuladas e, conseqüentemente, o alcance dos blocos com o programa RocFall versão 6.0 para quatro seções de encostas distintas, a fim de se validar a aplicabilidade da Teoria do Caos aos dados experimentais fornecidos pelas simulações numéricas e suas implicações decorrentes no fenômeno de queda de blocos rochosos;
- iv. Aplicação da Teoria do Caos no estudo de caso, baseado nas análises realizadas anteriormente a fim de constatar uma possível universalidade funcional das distribuições de probabilidades gaussiana e q-exponencial estendida utilizadas.

### **Estrutura da dissertação**

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, apresentando-se neste capítulo inicial a introdução ao tema, motivação e os objetivos da pesquisa desenvolvida.

No capítulo 1, são apresentadas algumas considerações sobre movimentos de massa, os tipos de ruptura em maciços rochosos e as características principais das quedas de blocos rochosos e seus agentes deflagradores. São descritas também as diferentes classificações de quedas de blocos rochosos propostas na literatura, além das medidas de mitigação e convivência com este tipo de movimento de massa. O capítulo também aborda diversos métodos de análises desse fenômeno, destacando-se os métodos numéricos, geralmente probabilísticos, utilizados para a simulação das trajetórias dos blocos rochosos.

O capítulo 2 visa definir os conceitos teóricos dos sistemas não-lineares (caóticos), bem como contextualizar sua inserção no ramo da engenharia geotécnica, mais precisamente no mecanismo de queda de blocos rochosos.

No capítulo 3, apresenta-se o caso da Teoria do Caos aplicada no corte do Morro do Cantagalo – Rua Professor Gastão Bahiana, no Bairro de Copacabana, Rio de Janeiro – RJ, selecionado para estudo de caso, bem como o programa numérico RocFall versão 6.0, utilizado para a modelagem numérica do estudo de caso da presente pesquisa, e todo o estudo preliminar desenvolvido para sua viabilidade de aplicação. Também são apresentados todos os resultados obtidos e as discussões

desenvolvidas a partir das simulações obtidas com o programa numérico RocFall 6.0 e com a Teoria do Caos.

As considerações finais, conclusões e sugestões para futuras pesquisas são expostas no capítulo 4.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta as classificações e características dos movimentos de massa gravitacionais, com ênfase no mecanismo de queda de blocos rochosos, bem como as rupturas típicas em maciços rochosos. Para uma maior compreensão do fenômeno de queda de blocos rochosos, também são apresentados os diversos métodos de análise que auxiliam na concepção de medidas mitigadoras e de convivência com este tipo de movimento de massa.

### 1.1 Considerações sobre movimentos de massa gravitacionais

Movimentos de massa gravitacionais são processos de deslocamento induzidos por agentes naturais ou não, englobando materiais de granulometria variada. Essas massas, que podem ser compostas por solo, rocha e detritos, são movimentadas por meio de forças gravitacionais ou por circunstâncias extraordinárias, seguindo trajetórias que dependem de um conjunto de fatores que caracterizam a movimentação.

De acordo com Vieira et al. (1997), dentre os diversos fatores naturais que contribuem para a deflagração de movimentos de massas nas encostas, pode-se destacar a geomorfologia e a geometria do terreno, as propriedades do solo e da rocha (mineralogia, atrito interno, descontinuidades, feições estruturais da rocha, por exemplo), regime pluviométrico, sismos, cobertura vegetal e o tipo de uso e ocupação do solo. Estes fatores, somados às forças gravitacionais, ditam o tipo de movimento originado e as consequências dos danos ocasionados. Em muitos casos, os movimentos de massa são desencadeados devido à grande influência humana, principalmente pela densa ocupação de áreas inadequadas, aumentando substancialmente a suscetibilidade de ocorrências de rupturas de encostas.

Atualmente, existem diversas classificações de movimentos de massa propostas internacionalmente, sendo a de Varnes (1978), apresentada na Tabela 1 e na Figura 1, a mais utilizada. Esta classificação depende dos tipos de materiais que compõem a encosta e da superfície de ruptura da massa em movimento. Todas as classificações para os movimentos de massa são válidas, considerando-se que são movimentos que não possuem um comportamento padronizado, o que torna difícil estabelecer uma classificação unificada.

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	Desmoronamento de rocha	Desmoronamento de detritos	Desmoronamento de terra
	Translacional	Deslizamento de rocha	Deslizamento de detritos	Deslizamento de terra
Espalhamentos Laterais		Blocos de rocha	Detritos	Terra
Corridas / Escoamentos		Rocha (Rastejo profundo)	Detritos (Rastejo de solo)	Terra (Rastejo de solo)
Complexos: Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos				

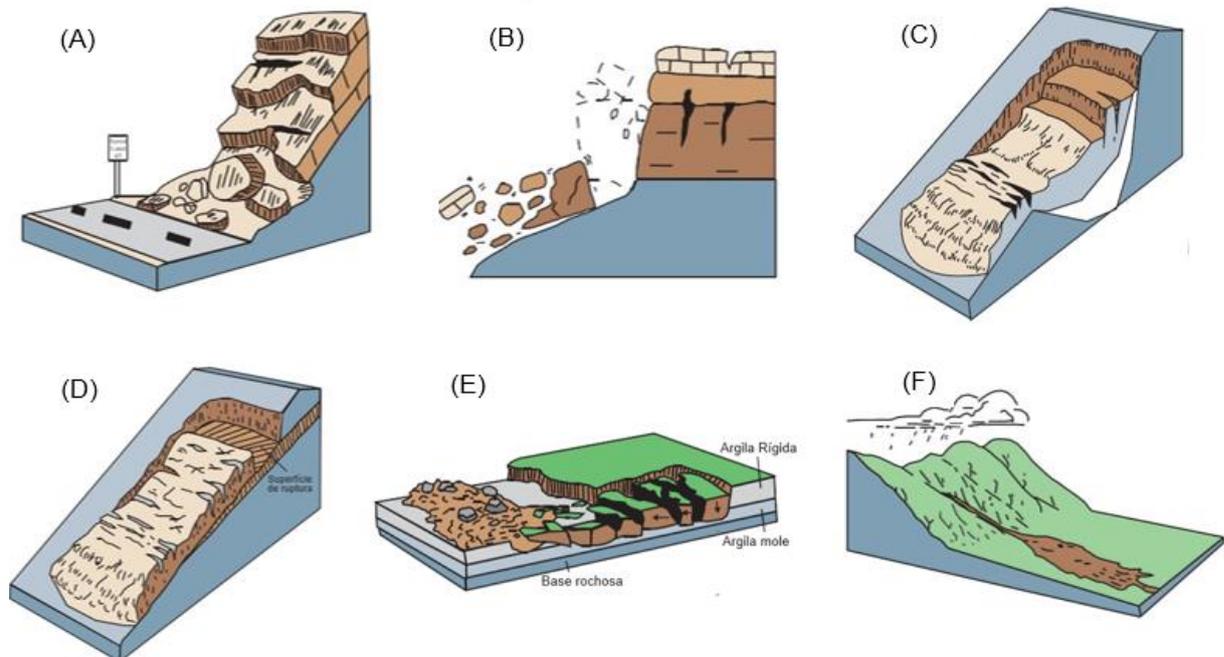


Figura 1 – Principais tipos de movimentos de massa (A) Quedas, (B) Tombamento, (C) Escorregamento rotacional, (D) Escorregamento translacional, (E) Espalhamento lateral e (F) Corridas (Adaptado de USGS, 2004)

Segundo a classificação de Varnes (1978) e sua posterior atualização em Cruden e Varnes (1996), sugere-se que, nos casos em que se tenha mais informações sobre as condições do movimento de massa, associados ao tipo de movimento e tipo de material, sejam utilizados termos que indiquem a atividade (estado e distribuição) e as características do movimento (velocidade e condição de umidade) – conforme apresentado na Tabela 2, para que descrição se torne mais completa e que transmita o maior número de informações possíveis.

Tabela 2 – Termos de atividade e características do movimento de massa (Adaptado de Cruden e Varnes, 1996)

<b>Termos de atividade e características do movimento de massa</b>	<b>Descrição</b>
Estado	Refere-se ao comportamento do movimento de massa em relação a diferentes tipos de análises.
Distribuição	Visa explicar as possíveis direções da massa em movimento.
Velocidade	Visa mensurar os tipos de danos que o movimento de massa possa causar. Também mensura se o processo permitirá ou não determinados tipos de intervenções ou se será possível a evacuação do local.
Umidade	Visa descrever o teor de umidade do material, principalmente em fenômenos que envolvam massas de solo.

A compreensão dos mecanismos dos movimentos de massa e a frequência com que ocorrem é de suma importância para que seja possível aprimorar as práticas de projetos e obras, bem como favorecer uma intervenção no maciço em tempo hábil.

## 1.2 Mecanismos de instabilização em maciços rochosos

Com exceção de maciços rochosos completamente intactos – que são pouco comuns, na maior parte dos casos, as formações rochosas podem ser consideradas como conjuntos de blocos cerceados por sistemas de descontinuidades (Norrish e

Wyllie, 1996). Segundo a ISRM (1981), as descontinuidades são zonas de fragilidade em maciços rochosos, ou seja, interrompem a continuidade da rocha e possuem resistência nula à tração. Para identificar essas descontinuidades, deve-se levar em consideração as seguintes características apresentadas na Figura 2: orientação, espaçamento, persistência, abertura, preenchimento, resistência da parede, percolação, rugosidade, família de descontinuidades e tamanho do bloco.

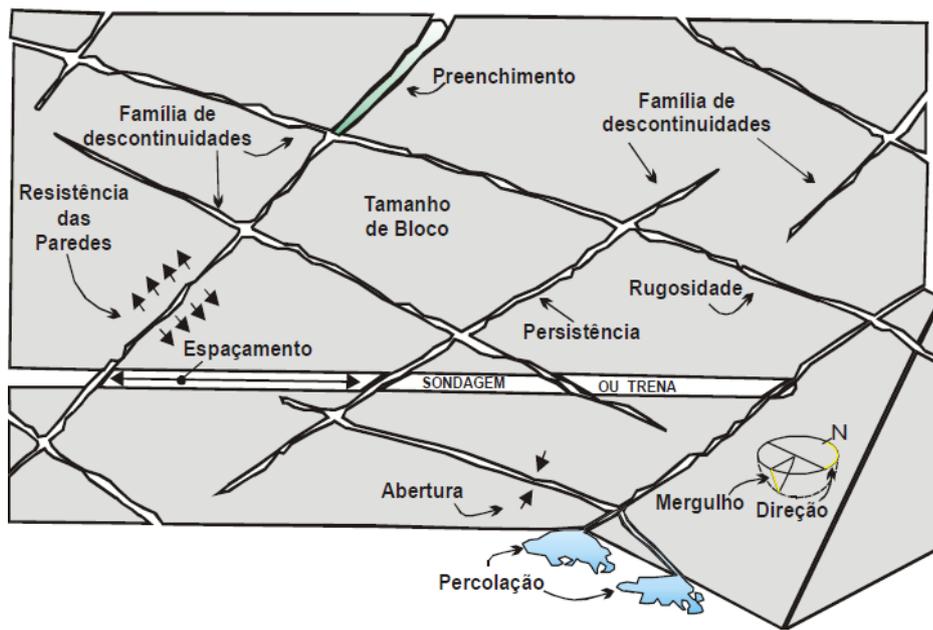


Figura 2 – Características das descontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981)

As características das descontinuidades podem ser resumidamente definidas segundo Nunes (2009) e Gálvez, (2012):

- a) Orientação: Esta característica é definida por dois parâmetros angulares, um horizontal chamado de direção do mergulho ou “*dip direction*”, que é o azimute da linha normal ao plano da descontinuidade e um chamado de mergulho ou “*dip*”, que é a inclinação vertical do plano da descontinuidade com relação ao plano horizontal. A orientação também pode ser apresentada por meio do mergulho “*dip*” e a direção ou “*strike*”, que corresponde ao azimute da linha que representa o plano em superfície;
- b) Espaçamento: Equivale à distância entre duas descontinuidades dentro do mesmo conjunto e é medida na direção normal a elas;

- c) Persistência: Corresponde à continuidade (extensão em área) da descontinuidade dentro do maciço rochoso. Ajuda a definir o volume potencial da massa de falha;
- d) Abertura: É a distância perpendicular que separa as paredes de uma descontinuidade aberta cujo interior apresenta ar ou água. A abertura das descontinuidades é bastante variável ao longo da sua extensão, o que muitas vezes dificulta, ou até mesmo impossibilita a sua medida;
- e) Preenchimento: Materiais (principalmente minerais) que ocupam o espaço entre as paredes de uma descontinuidade;
- f) Resistência da parede: É a resistência à compressão uniaxial das paredes que delimitam uma descontinuidade;
- g) Percolação: Fluxo de água presente em descontinuidades ou no maciço rochosos em geral. Além de aumentar a poropressão, também promove a alteração do material do maciço;
- h) Rugosidade: Corresponde as irregularidades, formas e ondulações inerentes a superfície da descontinuidade;
- i) Família de descontinuidades: Grupo de descontinuidades com as mesmas características que compartimentam o maciço rochoso;
- j) Tamanho do bloco: Dimensões dos blocos rochosos gerados pelo sistema de descontinuidades.

Por serem zonas de fragilidade, as descontinuidades são de suma importância quando se trata de estabilização de taludes, justamente porque os tipos de rupturas estão associados principalmente com a orientação e distribuição dessas descontinuidades em relação ao talude e pelo grau de fraturamento do maciço rochoso (Silveira, 2017).

Freitas (2013) ressalta que em maciços rochosos mais resistentes, as descontinuidades determinam as orientações dos planos de ruptura. Já em maciços de rocha branda, em geral, é a matriz rochosa que responde pelo mecanismo de

ruptura. Em planos de descontinuidades também é possível que um ou mais tipos de mecanismos de ruptura sejam combinados. A seguir são abordados os principais tipos de rupturas em maciços rochosos registrados na cidade do Rio de Janeiro por GEO-RIO (2014): ruptura planar, ruptura em cunha, ruptura circular, ruptura por tombamento e queda de bloco.

### 1.2.1 Rupturas planares

A ruptura planar (Figura 3) ocorre principalmente sob ação da gravidade e a favor de uma descontinuidade pré-existente, podendo ser uma falha, a estratificação do maciço ou uma junta por exemplo. A condição básica é a presença de uma descontinuidade principal com a mesma direção do talude, na qual o ângulo de mergulho do talude seja maior do que o ângulo da descontinuidade e que este seja maior do que o ângulo de atrito da superfície (Tavares, 2015).

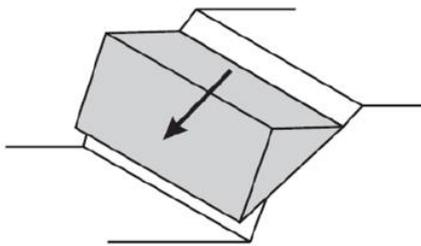


Figura 3 – Ruptura planar (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Nunes (2004))

Os diferentes tipos de rupturas planares dependem da disposição e das características das descontinuidades do talude, sendo as mais frequentes a ruptura por um plano paralelo à face do talude, provocada por erosão ou diminuição da resistência na base do talude, e a ruptura por um plano que emerge na face ou na base do talude, com ou sem trincas de tração.

### 1.2.2 Rupturas em cunha

A ruptura em cunha (Figura 4) ocorre quando dois planos de descontinuidade se interceptam e geram um bloco cuja cavidade tem o formato de uma cunha que mergulha em direção ao talude. Para que este tipo de ruptura aconteça, os dois planos devem emergir na superfície do talude e devem-se cumprir as mesmas condições para a ruptura planar (Gálvez, 2012).

Segundo Rocha (2009), este tipo de ruptura, na maior parte dos casos, acontece em maciços que apresentam dois ou mais tipos de famílias de descontinuidades, cuja orientação, espaçamento e a continuidade determinam a forma e o volume da cunha. Em algumas ocorrências, a presença de níveis de poropressão elevados ao longo dos planos de falha pode incrementar as probabilidades de rupturas em cunha.

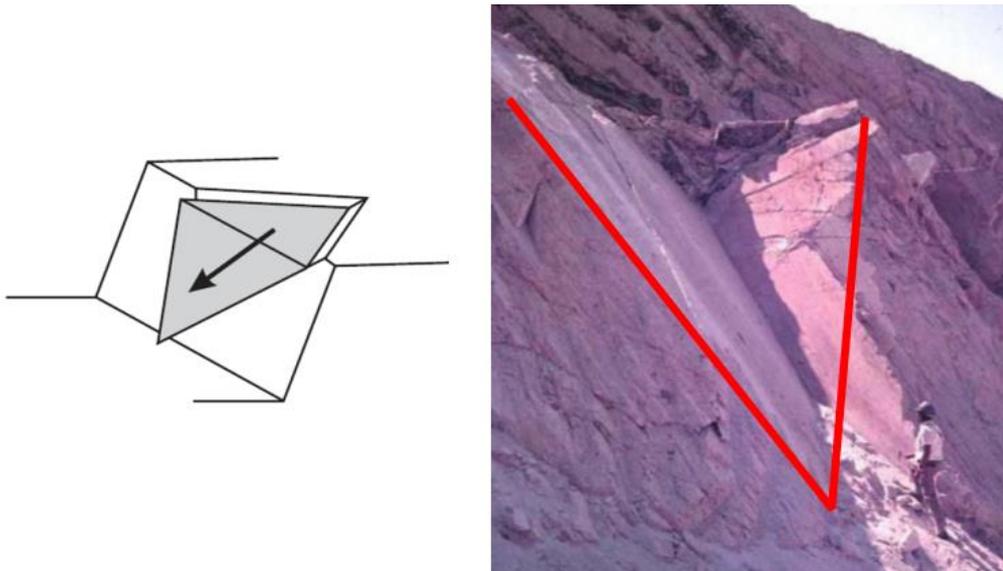


Figura 4 – Ruptura em cunha (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Hoek (2001))

### 1.2.3 Rupturas circulares

A ruptura circular (Figura 5) ocorre em maciços rochosos brandos e em maciços de rocha muito alterada ou com elevado nível de fraturas, onde os planos de descontinuidade não controlam o comportamento mecânico, se assemelhando a ruptura de um maciço de solo. A superfície de ruptura, neste caso, é semelhante a um

arco circular de grande raio gerando uma superfície de ruptura pouco profunda. Rocha (2009) ainda salienta que a existência de planos de descontinuidades nesse tipo de maciço podem originar modelos de ruptura com outras tipologias que não a circular.



Figura 5 – Ruptura circular (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Nunes (2008))

#### 1.2.4 Rupturas por tombamentos

A ruptura por tombamento (Figura 6) é comum em maciços rochosos onde as descontinuidades apresentam predominantemente o mergulho vertical ou subvertical na direção paralela do talude. O movimento de rotação ocorre sobre um ponto ou eixo abaixo do centro de gravidade da massa deslocada e se dá para frente e para fora do talude. A velocidade deste tipo de movimento pode variar de extremamente lenta a extremamente rápida (Cruden e Varnes, 1996). Os tombamentos ocorrem principalmente com blocos isolados por um sistema de descontinuidades ortogonais.



Figura 6 – Ruptura por tombamento (Adaptado de Wyllie e Mah (2004) e Highland e Bobrowsky (2008))

### 1.3 Queda de blocos rochosos

Quedas de blocos são processos associados à presença de descontinuidades que, em conjunto ao intemperismo físico e químico, geram alterações nas forças atuantes e na resistência dos maciços rochosos. Estes processos originam elementos como blocos e lascas de tamanhos variados que podem ser destacados de encostas rochosas muito íngremes ou escarpadas (Giani, 1992).

Estes fenômenos são de difícil previsão e possuem um imenso potencial destrutivo, pois geralmente ocorrem de forma abrupta, sem indícios de movimentação prévia, atingindo elevadas velocidades e desenvolvendo altas energias cinéticas durante o movimento.

Na escala de velocidade proposta por Cruden e Varnes (1996), são considerados movimentos de categoria rápida até muito rápida e podem apresentar volumes e litologias diversas, deslocando-se ao longo da encosta em movimentos do tipo deslizamento, rolamento, salto (ou repique) e queda livre, em função da geometria e da superfície do bloco e do talude, assim como da sua declividade (Figura 7). Após a ruptura, o bloco tende a desenvolver não somente um, mas dois ou mais tipos de movimentos.

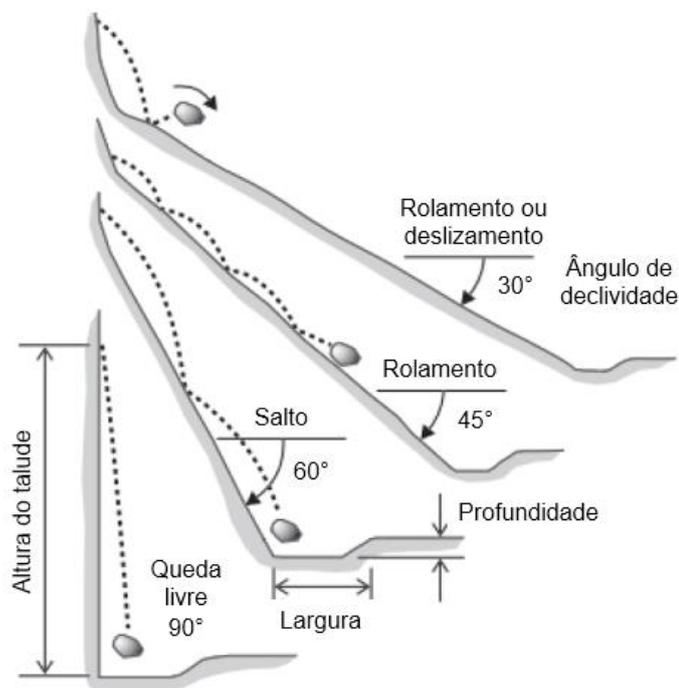


Figura 7 – Movimento do bloco rochoso em função da inclinação da encosta (Adaptado de Gálvez, 2012)

De acordo com Ritchie (1963), o movimento predominante em encostas íngremes é o de queda livre. Este tipo de movimento ocorre se a inclinação da encosta for superior a  $76^\circ$ , podendo ser generalizado para valores superiores a  $70^\circ$ . Durante a queda livre, o bloco pode desenvolver movimentos de translação ou rotação, os quais influenciam a sua trajetória (Azzoni et al., 1995), pois podem entrar em contato com a superfície e assim alterar o sentido esperado em relação ao movimento que estava ocorrendo. Assim como a translação e a rotação se, ao longo da trajetória de queda livre, a declividade da encosta diminua, o bloco acaba por chocar com a superfície, dando origem ao movimento do tipo salto.

No movimento do tipo salto, ao colidir com o maciço, os blocos tendem a se fragmentar, ocasionando uma perda de energia considerável a cada novo impacto (Bozzolo e Pamini, 1986). À medida em que a inclinação média da encosta se torna menor ou igual a  $45^\circ$ , o bloco em salto muda gradativamente seu movimento para rolamento, onde os blocos rochosos ficam na maior parte do tempo em contato com o solo. Segundo Rocha (2009), caso a inclinação da encosta não varie, o bloco continua a desenvolver os movimentos de rolamento até a sua paralisação completa, mas caso a inclinação média da encosta aumente, o bloco pode desenvolver movimentos de saltos ou queda livre novamente.

Rocha (2009) ainda afirma que, para condições onde a resultante das forças que atuam sobre o bloco rochoso é mantida dentro do plano de contato com a superfície da encosta (geralmente em encostas com inclinações menores) e durante a fase inicial ou nos estágios finais – onde os níveis de energia são baixos, pode-se desenvolver o movimento do tipo deslizamento.

Como mencionado anteriormente, além da inclinação, outros fatores como o tamanho e a geometria do bloco e o material que recobre a superfície da encosta são condicionantes para a trajetória, energia desenvolvida e o alcance de um bloco. Em relação ao tamanho, blocos menores apresentam energia cinética total menor ao serem comparados com blocos com maiores dimensões e, conseqüentemente, percorrem menores distâncias. Em mapeamentos de bacias naturais de deposição de blocos rochosos, geralmente encontram-se blocos menores mais próximos da face do talude, enquanto os blocos maiores apresentam-se mais afastados (Freitas, 2013).

Quanto ao material que recobre a superfície da encosta, Tavares (2015) menciona que, quando o bloco encontra uma superfície mais alterada ou que contem vegetação, tem-se uma maior capacidade de absorção da energia cinética do bloco,

visto que é gerada uma barreira natural que pode colaborar com a interrupção do movimento do bloco, impedindo que o mesmo atinja áreas a jusante da encosta. Entretanto, em superfícies desprovidas de solo ou vegetação, os blocos ao se chocarem com a encosta perdem menos energia e continuam em movimento, com maior probabilidade de atingir uma grande distância. A capacidade de absorver a energia dissipada devido a colisão é expressa pelos coeficientes de restituição, uma característica intrínseca do material (Ashayer, 2007).

Em física, a colisão perfeitamente elástica ocorre quando um bloco recupera totalmente sua altura de queda após o impacto, onde o valor do coeficiente de restituição é igual a 1. Isto indica que a energia cinética envolvida na colisão foi conservada. Já em uma colisão perfeitamente inelástica, o bloco fica em repouso após colidir com a superfície, tornando o valor do coeficiente de restituição igual a 0, ou seja, a energia cinética envolvida na colisão foi totalmente dissipada.

Castro (2016) aponta que, no caso de blocos de rocha, a colisão é do tipo parcialmente inelástica pois há perda gradual de energia a medida que ocorrem as colisões sucessivas dos blocos com a superfície da encosta. Sendo assim, ao longo do movimento, o bloco terá uma altura menor a cada colisão e chegará a um momento onde a altura será zero, quando toda sua energia foi dissipada. A dissipação total da energia significa que o bloco cessou seu movimento, tendo atingido seu alcance máximo. Neste tipo de colisão, o coeficiente de restituição possui valor entre 0 e 1. Quanto maior for a energia dissipada, menor é o coeficiente de restituição.

Em superfícies inclinadas, como no caso das encostas, o coeficiente de restituição pode ser decomposto em duas componentes: normal e tangencial (Figura 8). O coeficiente normal define a relação entre a velocidade de saída ( $V_{pos,n}$ ), isto é, após a colisão entre o bloco e a superfície, e a velocidade de entrada ( $V_{pre,n}$ ) que é a velocidade antes da colisão entre bloco e superfície (Equação (1)). O coeficiente tangencial define a relação entre as velocidades tangenciais de saída ( $V_{pos,t}$ ), e a velocidade de entrada ( $V_{pre,t}$ ) (Equação (2)).

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

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

O coeficiente de restituição tangencial (CRt) é geralmente igual a ou maior do que o coeficiente de restituição normal (CRn).

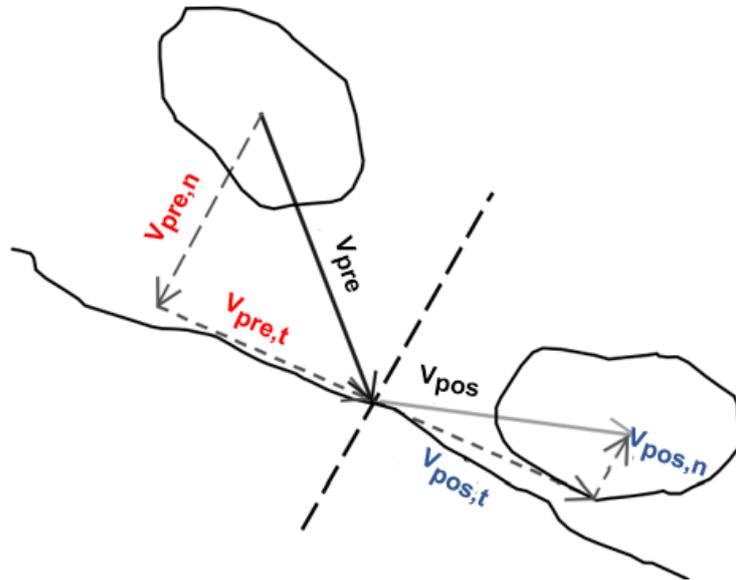


Figura 8 – Vetores de velocidade de impacto na colisão de blocos (Adaptado de Giani et al. 2004)

Os coeficientes de restituição são considerados parâmetros críticos e de difícil obtenção. Sua determinação pode ser realizada a partir de retroanálises de movimentos ocorridos ou por medidas específicas realizadas em lançamentos experimentais de blocos *in situ*.

Além de todos os fatores que influenciam este tipo de movimento, sabe-se que durante todo processo de queda de blocos, embora frequente, a fragmentação após o impacto é o aspecto mais complexo e pouco compreendido do fenômeno. As pesquisas iniciais acerca do tema mostram que a presença de descontinuidades na rocha, o material e a velocidade de impacto são fatores que favorecem a fragmentação dos blocos (Giacomini et al., 2008). A fragmentação é capaz de alterar os formatos, volumes e pesos originais dos blocos, que levam o bloco a possivelmente adotar uma nova trajetória e atingir energias e alcances diferentes do esperado se o mesmo se mantivesse intacto.

Pequenas variações durante a escolha dos parâmetros iniciais utilizados nas análises deste fenômeno também podem alterar consideravelmente o comportamento do mesmo. Portanto, quanto maior o conhecimento das condições de contorno do problema e a adoção de parâmetros mais realísticos, maior o nível de confiabilidade

dos resultados. Com isso, é possível projetar soluções eficazes e evitar desastres muitas vezes catastróficos.

#### 1.4 Técnicas de estabilização e mitigação em maciços rochosos

A compreensão dos agentes deflagradores dos movimentos de massa nas encostas é a condição fundamental para a definição de medidas de estabilização ou de mitigação de suas consequências.

A ABNT (2009) por meio da NBR 11682 estabelece que, a solução adotada deve ser antecedida da caracterização global do problema, a qual deve abordar aspectos geológicos e geotécnicos (análise da litologia local, das descontinuidades e do grau de intemperismo da rocha por exemplo), topografia e geometria da encosta, sinais de instabilidade, habitações, vegetação, surgência de água, infraestrutura, anormalidades em estruturas pré-existentes, possibilidade de ocorrência de sismos e demais riscos que possam estar associados.

Visando a elaboração de um modelo representativo, também se faz necessário o registro dos elementos instáveis ou potencialmente instáveis por meio de fotos, perfis esquemáticos e representação em planta, indicando a dimensão desses elementos e suas características (tipo de material, declividade e rugosidade), realizar um levantamento das descontinuidades com a representação estereográfica se possível (Rocha, 2009) e investigações geotécnicas de campo e laboratório.

Segundo Tavares (2015), as técnicas de estabilização podem ser divididas em dois grandes grupos: medidas ativas e medidas passivas. As medidas ativas são aquelas que tem por intuito a estabilização dos elementos instáveis ou potencialmente instáveis, tentando eliminar as deformações atuando diretamente na fonte das mesmas. Ou seja, a característica comum dessas técnicas é a minimização da descompressão e/ou desprendimento de massas rochosas. Já as medidas passivas, são aquelas que apenas minimizam o risco das quedas de blocos, permitindo que o desprendimento ocorra, mas controlando as direções e as distâncias que os blocos possam atingir, convivendo com o problema e evitando possíveis prejuízos socioeconômicos que poderiam causar.

GEO-RIO (2014) pontua que as técnicas incluídas na categoria de medidas passivas não se constituem em métodos de estabilização propriamente ditos,

justamente por não evitarem a ocorrência do movimento de massa, somente impedem que as mesmas atinjam áreas as quais se deseja proteger.

A Figura 9 a seguir esquematiza o processo de estudo de uma encosta rochosa com potencial instável para a análise e decisão da melhor solução de projeto. Na maioria dos casos existe mais de uma opção de solução, para efetuar a escolha da melhor opção leva-se em consideração o aspecto econômico, o prazo, a segurança, questões ambientais, interferências e aspectos construtivos (GEO-RIO, 2014).

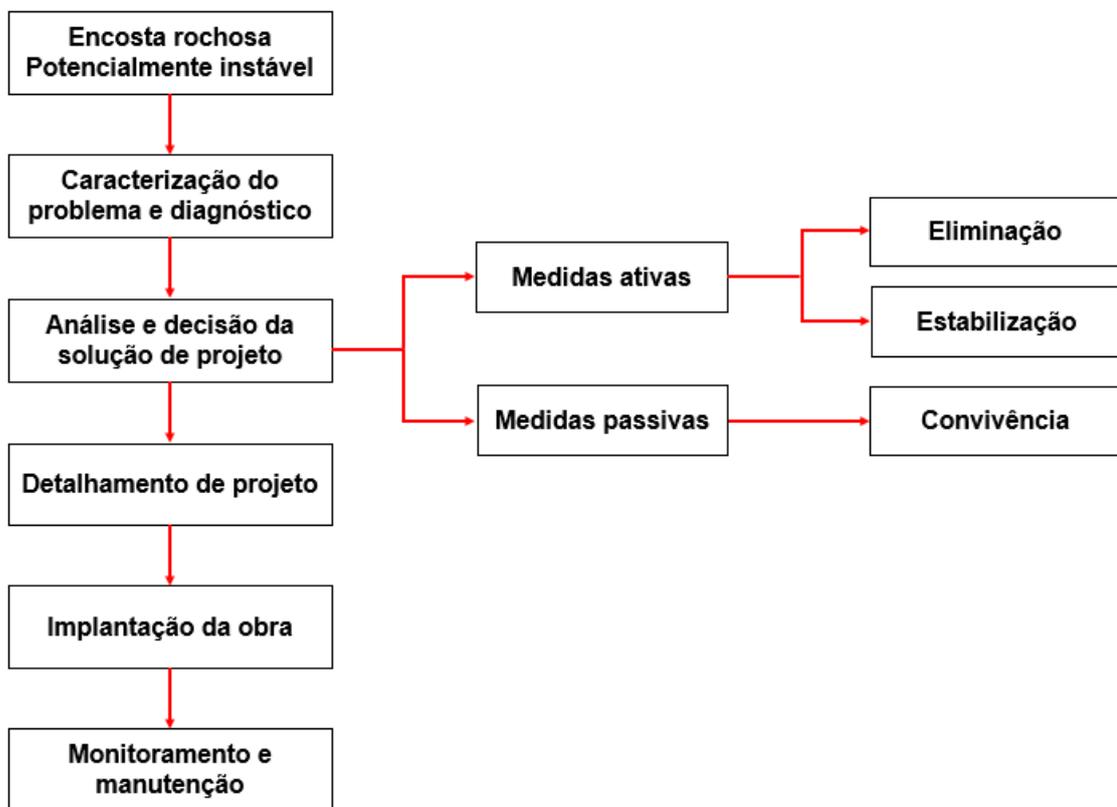


Figura 9 – Esquema representativo para o estudo de encostas com potencial instável  
(Adaptado de GEO-RIO, 2014)

A seguir, são apresentadas algumas das principais soluções de projeto utilizadas no Brasil e no Rio de Janeiro de acordo com GEO-RIO (2014).

#### 1.4.1 Eliminação do problema de instabilidade

Consiste na remoção do elemento instável (lascas ou blocos) (Figura 10) com medidas passivas. O processo de remoção pode ser feito por meio de técnicas manuais – se o bloco for de pequena dimensão, e por técnicas mecânicas ou

explosivos – se os blocos possuírem grandes dimensões. Neste caso, os blocos devem ser fragmentados em sua posição original e posteriormente retirados (Gálvez, 2012).



Figura 10 – Fragmentação de rocha para construção do gasoduto Paulínia – Jacutinga (MG)  
(DESMONTEC, 2009)

Este tipo de solução deve ser antecedida por um amplo estudo de estabilidade do talude, se tornando viável em casos em que a eliminação do elemento rochoso não geraria outras instabilidades ou maiores impactos. Os fatores que mais influenciam nesta solução são as condições de apoio do bloco, tamanho e o alcance estimado.

#### 1.4.2 Estabilização

Medidas ativas que tentam fazer com que as deformações no maciço cheguem até o valor de zero e/ou diminuir o avanço dos processos de intemperismo. Neste caso, o elemento potencialmente instável ou instável será estabilizado por meios físicos ou mecânicos. A estabilização engloba as técnicas de proteção superficial, estruturas de contenção, drenagem superficial e profunda.

- a) Proteção superficial: Solução que visa reduzir a instabilidade de maciços rochosos fraturados e/ou alterados por meio de instalações de telas metálicas com o uso de concreto projetado (Figura 11), mantendo estáveis os blocos passíveis de queda e evitando a erosão e posterior ruptura por incidência de águas.



Figura 11 – Proteção superficial com o uso de concreto projetado (Freitas, 2013)

- b) Estruturas de contenção ou de suporte: Segundo Freitas (2013), são medidas que tem por finalidade conter blocos e lascas de rocha instáveis em sua posição original no maciço. O sistema consiste em ancoragens, chumbadores ou grampos que podem ou não serem atrelados a elementos estruturais de concreto armado, criando um conjunto que estabiliza a região específica do talude desfavorável. Comumente a estabilização é feita com grelhas ancoradas e contrafortes, conforme ilustrado na Figura 12.

A ABNT NBR 11682 (2009) define as grelhas como estruturas tipicamente constituídas por vigas verticais e horizontais em concreto armado, com

ancoragens protendidas posicionadas nas interseções das vigas. As grelhas são adaptadas as irregularidades da face da encosta e aplicadas em áreas fraturadas com presença de blocos muito grandes justapostos ou taludes com foliação de mergulho desfavorável.

Já os contrafortes de concreto armado são estruturas que trabalham predominantemente à compressão, podendo ou não apresentar ancoragens (que trabalham à tração). São aplicados como apoio ou calçamento para blocos rochosos instáveis e assim como as grelhas, são construídos de forma a se adaptar as imperfeições da face da encosta.



Figura 12 – Grelhas ancoradas e contrafortes (GEO-RIO (1999) *apud* Rocha (2009))

#### 1.4.3 Convivência com o problema de instabilidade

Quando não existem condições para impedir o destacamento de blocos e a sua queda, seja por limitações técnicas ou econômicas, é necessário empregar medidas de convivência com o problema e, de forma segura, garantir a integridade física da população e das estruturas a serem afetadas pela instabilidade do maciço. Este tipo de técnica deve fornecer principalmente facilidade de manutenção e reparo quando forem acionadas.

Atualmente existem diversas técnicas de convivência com encostas rochosas instáveis, como por exemplo: trincheiras para coleta de blocos, bermas dissipadoras de energia, túnel falso, telas metálicas, barreiras rígidas de impacto e barreiras flexíveis de impacto, sendo esta última item próprio do capítulo, tal qual queda de bloco anteriormente.

- a) Trincheiras para coleta de blocos: São espaços coletores posicionados na base da encosta, como apresentado na Figura 13. Sua largura e profundidade devem ser determinadas por métodos que considerem a trajetória e a energia desenvolvida pelos blocos rochosos durante o processo de queda. Entretanto, esta técnica exige manutenção constante (remoção dos blocos depositados e limpeza da trincheira) para garantir a sua eficiência.



Figura 13 – Trincheira para coleta de bloco (Nunes, 2008)

- b) Túnel falso: Solução de proteção para trechos de rodovias ou ferrovias onde os fenômenos de quedas de blocos rochosos e fluxo de detritos sejam de grande incidência (Figura 14). São estruturas projetadas para receber o impacto e/ou desviar o movimento de massa. Nesta técnica, as dimensões do túnel devem garantir tanto a segurança dos usuários da via quanto a segurança da estrutura em relação aos impactos que possam vir a ocorrer. Podem ser feitos em estruturas metálicas ou em concreto armado.



Figura 14 – Túnel falso para proteção em uma estrada na África do Sul (Volkwein et al., 2005).

- c) Bermas dissipadoras de energia: Esta técnica possibilita a dissipação da energia cinética dos blocos rochosos em queda. Assim como em outras medidas de convivência, a geometria e a posição das bermas devem ser determinadas por metodologias que simulem a trajetória e a energia dos blocos para garantir sua estabilidade global e de cada talude entre as bermas. Para melhorar a redução da energia, pode-se ainda recobrir as bermas com vegetação ou material granular que não esteja compactado.



Figura 15 – Berma dissipadora de energia para blocos rochosos (Rocha, 2009)

- d) Telas metálicas: Mais indicada para estabilização de encostas rochosas muito alteradas e com blocos cujas dimensões não sejam inferiores à menor abertura da malha, a solução em tela metálica (Figura 16) recobre a face da encosta com uma malha de arame flexível (podendo apresentar ou não cabos de aço de alta resistência), ancoradas com tirantes e fixadas com chumbadores ao longo de sua extensão. Todos os componentes do sistema que compõe a solução em tela metálica deve ser verificado quanto à ruptura e devem ter resistência, durabilidade, proteção contra a corrosão e desempenho adequados.



Figura 16 – Tela metálica (MACCAFERRI, 2014)

- e) Barreiras rígidas ou semirrígidas de impacto: São estruturas de concreto armado ou metálicas designadas ao amortecimento do impacto de blocos rochosos e de solos alocadas na base do talude, como mostra a Figura 17. Apesar de necessitar um maior espaço disponível para implantação quando comparada a outras soluções, pois requer uma área destinada para

acumulação de blocos (menor do que para uma trincheira), quando suas dimensões atendem as questões de geometria, de trajetória e energia, é capaz de absorver impactos maiores. A manutenção apesar de simples, implica, na maioria dos casos, a substituição de um módulo completo do sistema de barreira (caso tenha sido danificado pelo impacto).



Figura 17 – Barreira rígida de impacto (Pantelidis e Kokkalin, 2011)

- f) **Barreiras flexíveis:** As barreiras flexíveis ou dinâmicas (Figura 18) são dispositivos capazes de absorver a energia de impacto dos blocos rochosos que venham a se desprender de uma encosta mediante deformações elásticas e plásticas das malhas metálicas e outros elementos que a compõem (Vallejo et al., 2002). Este tipo de solução é uma das mais versáteis, podendo ser empregada, não somente como solução única, mas concomitantemente com outras soluções ao longo da encosta.

As barreiras são estruturas esbeltas e relativamente leves, constituídas por postes metálicos que mantêm em posição vertical uma tela também metálica, que é capaz de interceptar e reter o bloco em queda e reduzir e transferir as forças geradas pelos cabos dissipadores de energia até as ancoragens fixadas no maciço rochoso, como mostra a Figura 19. A combinação dos elementos de alta resistência e com grande capacidade global de deformação fazem com que o sistema possa atender solicitações de alta energia.



Figura 18 – Barreira Flexível instalada em encosta rochosa em uma estrada na África do Sul (Volkwein et al., 2005)

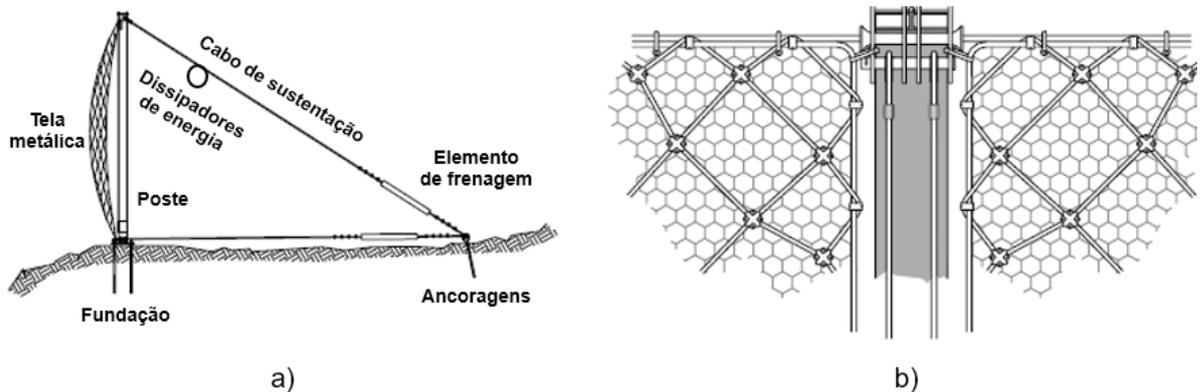


Figura 19 – Barreira flexível de impacto, sendo a) Seção transversal b) Detalhes frontais (Adaptado de CEG, 2015)

O posicionamento e o dimensionamento das barreiras são, atualmente, determinados em função do tamanho e das prováveis trajetórias dos blocos rochosos instáveis. Desta forma, além da definição correta da trajetória, as características do movimento como alcance, altura de salto, velocidade e energia do bloco são de extrema importância para o funcionamento adequado da barreira.

Atualmente, as barreiras flexíveis devem atender as especificações abordadas no guia para aprovação técnica – a ETAG 027, para receberem a certificação

por meio de ensaios específicos realizados em escala real. Esse guia foi publicado em pela organização europeia EOTA e basicamente é utilizado para pautar escolhas de projeto desse trabalho, principalmente nos quesitos de níveis de energia, nomenclaturas e demais fatores importantes a serem analisados no decorrer do dimensionamento e escolha das telas.

A ETAG 027 exige dois testes, o MEL (Nível máximo de energia) e o SEL (Nível de energia de serviço). No MEL, a barreira deve manter o bloco rochoso padrão com o seu nível máximo de energia de projeto. A altura residual da malha metálica após o impacto confere o nível de qualidade da barreira. Já No SEL, a barreira deve assegurar dois impactos de um bloco com um terço da energia apresentada no MEL sem qualquer dano. A altura residual após o primeiro impacto deve ser superior a 70%. O segundo impacto deve somente suportar o bloco rochoso padrão. Estes ensaios podem ser feitos em um plano inclinado ou um plano vertical, sendo o plano vertical a representação da pior condição de projeto (queda livre).

Segundo Turner et al. (2009), o desenvolvimento individual de cada um dos componentes das barreiras e do sistema como um todo ao decorrer dos últimos anos tem proporcionado sistemas cada vez mais resistentes e confiáveis, que podem suportar blocos com energia de impacto de até 8.500 kJ. Devido seu surgimento relativamente recente, a utilização de barreiras flexíveis de impacto contra a queda de blocos rochosos tem produzido novos estudos científicos e técnicos nos últimos anos, amparados muitas vezes por programas computacionais capazes de lidar com a aleatoriedade dos parâmetros envolvidos no fenômeno. Experimentos em escala real e reduzida em campo e laboratório também vêm sendo realizados com o fim de embasar os resultados encontrados nas simulações numéricas e nos métodos analíticos.

### 1.5 Métodos de análise do fenômeno de queda de blocos rochosos

Devido a necessidade de se projetar medidas preventivas, mitigadoras e de convivência com movimentos de massa do tipo queda de blocos, diversos métodos para a estimativa das principais variáveis têm sido desenvolvidos. A utilização destes métodos é uma das principais formas de se compreender esses eventos, e a

capacidade e intensidade que cada um deles apresenta está de acordo com os fatores deflagradores e as condições da área.

Heidenreich (2004) aponta que no caso da queda de blocos rochosos, a observação e a análise do impacto entre o bloco e a superfície são essenciais para a calibração eficiente dos parâmetros usados. Com isso, várias abordagens podem ser aplicadas para obter este tipo de informação: métodos experimentais, métodos numéricos e métodos empíricos. Seja qual for a abordagem inicialmente seguida, muitas vezes se torna necessário o uso de mais do que um dos métodos para compor o estudo, tendo em vista que se trata de um fenômeno complexo e com alta sensibilidade às variáveis iniciais.

### 1.5.1 Métodos experimentais

Os principais métodos experimentais são a retroanálise de eventos, a execução de testes in situ e a execução de testes laboratoriais.

- a) Retroanálise de eventos: A análise de traços de impacto deixados no terreno ou em árvores/vegetação após a ocorrência de uma queda de blocos e a identificação do alcance dos mesmos (Figura 20), pode auxiliar a obtenção de informações importantes como as dimensões do bloco, o espaçamento e a altura dos saltos realizados, distância total percorrida, entre outras diversas informações.

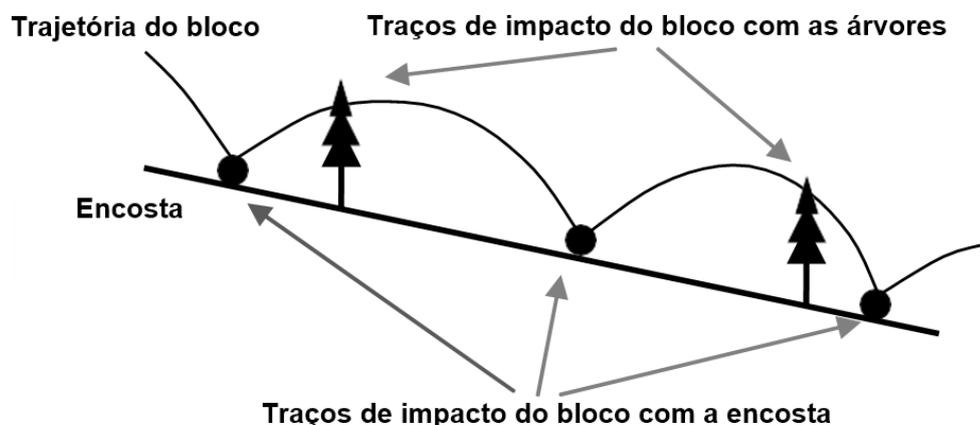


Figura 20 – Retroanálise do impacto do bloco com a encosta e com a vegetação (Adaptado de Vijayakumar et al., 2012)

Segundo Tavares (2015), a partir destas informações é possível avaliar valores de energia e velocidade dos blocos durante a queda, bem como sua porcentagem de perda ao longo do trajeto. Este método se torna interessante para proceder calibrações de modelo em programas numéricos quando se tem locais com características semelhantes às do local estudado.

Apesar de este ser um método importante no processo de aperfeiçoamento de programas que lidam com este tipo de instabilidade, é um método limitado, que não permite que se obtenha uma grande base de dados do problema em um conceito de visualização geral, visto que no caso de existirem poucas observações, não se pode obter qualquer tipo de padrão do ponto de vista estatístico.

- b) Execução de testes *in situ*: Consistem no lançamento ou libertação blocos do topo de uma encosta cuja morfologia e características já sejam previamente conhecidas. As trajetórias dos blocos são gravadas por meio de câmeras de vídeo posicionadas no terreno e analisadas posteriormente quadro a quadro de forma que sejam calculadas as velocidades, alturas de salto após o impacto e distâncias percorridas pelos blocos, bem como observar o tipo de movimento que o bloco realiza (queda livre, salto, rolamento e deslizamento). Nos contatos entre bloco-encosta que sejam relevantes, as velocidades de entrada e saída são avaliadas e, por consequência, os seus coeficientes de restituição. A Figura 21 ilustra a execução de um teste deste tipo.

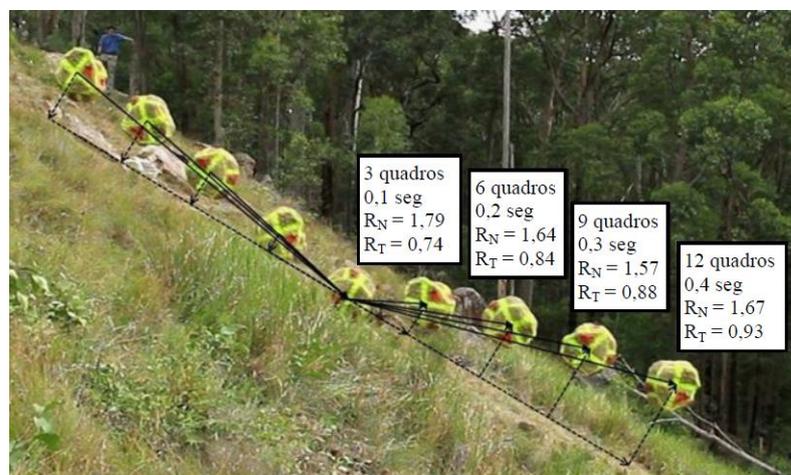


Figura 21 – Reconstrução de trajetória de queda por meio de teste de campo com filmagem de alta velocidade (Spadari et al., 2012)

De acordo com Heidenreich (2004), estes testes são vantajosos principalmente pelo fato de eles levarem em conta as condições locais do estudo, podendo contribuir não somente para a identificação das características *in loco* do problema, mas também para a calibração de programas numéricos tal qual os procedimentos de retroanálise. Entretanto, os testes *in situ* nem sempre são viáveis do ponto de vista econômico, pois são experiências onerosas e como o evento é uma causa natural, não são adequados caso se pretenda realizar uma análise estatística ou paramétrica.

- c) Execução de testes laboratoriais: Consistem geralmente em testes em escala reduzida com o uso de materiais artificiais (Figura 22), onde podem ser estudados tanto um impacto isoladamente quanto a trajetória completa.

Apesar de serem bastante didáticos para se compreender os mecanismos envolvidos nas quedas de blocos, a interpretação dos resultados na prática é mais complexa, especialmente devido as diferenças entre a escala reduzida e a escala real e também com relação aos materiais empregados no teste em comparação às encostas onde ocorrem as quedas.

Gálvez (2012) explica que uma das vantagens deste tipo de teste é a possibilidade de isolar a variabilidade de materiais em campo, visando a determinação de coeficientes de restituição para um único material, permitindo a obtenção de valores típicos.

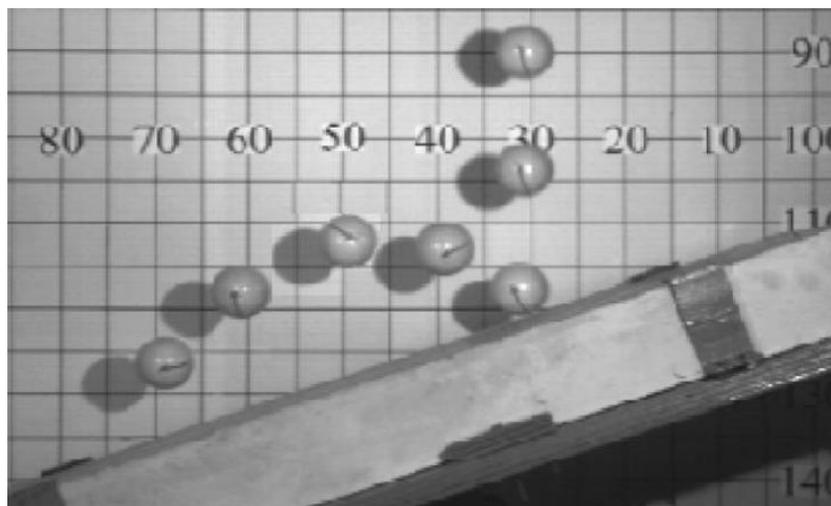


Figura 22 – Teste laboratorial em escala reduzida (Chau et al., 2002)

### 1.5.2 Métodos empíricos

Segundo Dorren (2003), os métodos empíricos de quedas de blocos rochosos geralmente são baseados na relação entre os fatores topográficos da encosta e o comprimento da zona de deposição de vários eventos de queda. As aproximações empíricas são expressas em análises de eventos de quedas ocorridas a partir do mapeamento de pontos de desprendimento de blocos, em evidência de superfície do tálus e em blocos maiores depositados além da base inferior do tálus (Rocha, 2009).

Para Rocha (2009), estes métodos são apropriados para analisar de forma rápida e preliminar os fenômenos de queda de blocos, estimando a presença e a localização de blocos que estejam instáveis e possivelmente venham a se desprender, bem como as áreas suscetíveis à passagem e deposição de blocos.

Evans e Hungr (1993) sugerem o dois princípios: o de *Fahrböschung* proposto por Heim (1932) para prever as zonas que serão possivelmente atingidas por eventos de queda de bloco. O *Fahrböschung* (F) ilustrado na Figura 23, é o ângulo formado entre um plano horizontal e uma linha reta que parte do ponto de desprendimento do bloco ao ponto máximo de alcance e deposição dos blocos encontrados após o evento. Na Figura 23 ainda é ilustrado o segundo princípio, o *Minimum Shadow Angle* (MSA), como alternativa. O MSA é o ângulo de uma linha reta entre o ponto superior do tálus – o ponto mais elevado da encosta onde se dá o acúmulo inicial de blocos, e o ponto máximo de alcance e deposição dos blocos encontrados após o evento.

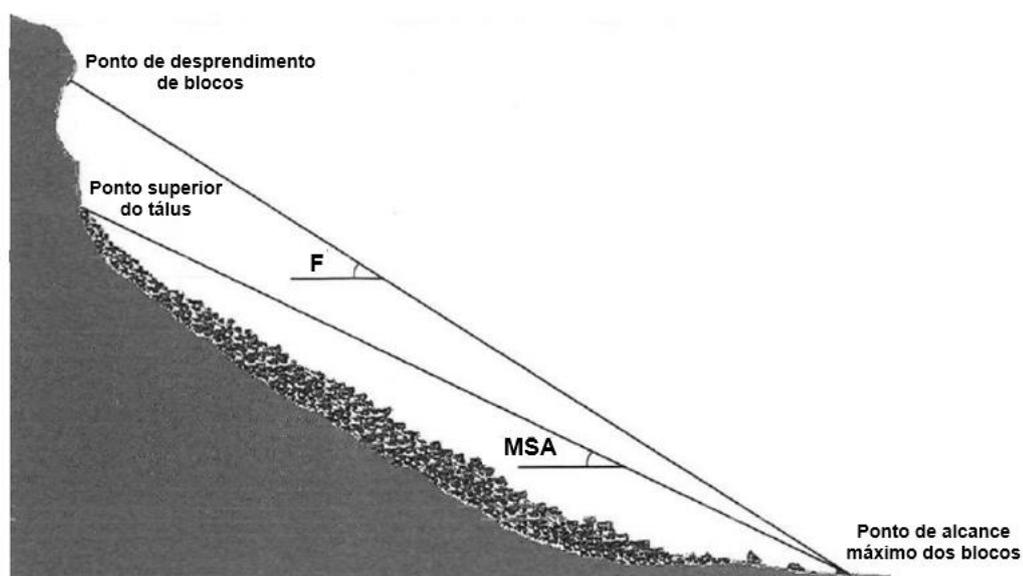


Figura 23 – Ângulos *Fahrböschung* e o *Minimum Shadow Angle* de uma encosta com presença de tálus (Adaptado de Meissl, 1998).

Rocha (2009) ressalta que ambos os princípios devem somente ser utilizados para uma aproximação inicial do comprimento de uma área de deposição de blocos rochosos.

### 1.5.3 Métodos numéricos

Com a evolução da tecnologia computacional, programas numéricos têm sido criados e aprimorados para facilitar o processo de simulação de quedas de blocos. Constituem uma importante ferramenta projeto, possibilitando a obtenção de dados importantes como trajetórias em potencial, alturas de salto, velocidades e energias alcançadas durante a queda e os alcances máximos (Gálvez, 2012).

Grande parte dos programas computacionais disponíveis são baseados em análises probabilísticas e formulações simplificadoras. O conhecimento dos parâmetros que regem o movimento em seus estágios iniciais e ao longo da trajetória são essenciais para selecionar o modelo computacional mais confiável para realizar a análise da queda. Os parâmetros mais utilizados para a modelagem numérica do evento são os coeficientes de restituição, coeficiente de atrito, geometria da encosta e a dimensão dos blocos.

Os programas numéricos podem adotar esquemas em 2 ou 3 dimensões para modelar a queda de blocos e podem ser divididos em duas categorias, os métodos de massa concentrada e os métodos rigorosos.

O método da massa concentrada adota o bloco com massa concentrada no centro de gravidade e desconsideram o formato, dimensões e volume dos blocos. Este tipo de método não permite levar em consideração o movimento de rotação do bloco, obrigando o projetista a fazer ajustes nos coeficientes de restituição caso este tipo de movimento seja previsto. Já os métodos rigorosos, consideram a forma e dimensões do bloco, incluindo sua massa e volume. Este método permite considerar os mais diversos tipos de movimentos de quedas de bloco e são considerados os de maior nível de precisão. Entretanto, requerem uma quantidade maior de dados, o que os torna de mais difícil aplicação (Rocha, 2009; Gálvez, 2012).

A Tabela 3 apresentada no Manual Técnico de Encostas da GEO-RIO (2014) e baseada na pesquisa realizada por Rocha (2009), resume os principais programas de simulação bidimensional e tridimensional de trajetória de quedas de blocos e suas

funcionalidades específicas. O programa numérico selecionado para a elaboração da presente pesquisa é o RocFall versão 6.0.

Tabela 3 – Características dos principais programas numéricos de simulação de queda de blocos rochosos (Adaptado de GEO-RIO (2014) *apud* Rocha (2009))

Características do programa	Programas				
	RocFall	CRSP	Georock	Stone	Rotomap
Referência principal	Stevens (1998)	Pfeiffer e Bowen (1989)	GeoStru (2002)	Guzzetti et al. (2002)	Scioldo (1991)
Tipo de análise	2D	2D	2D/3D	3D	3D
Superfície de análise	Perfil transversal	Perfil transversal	Perfil transversal e MDT	MDT	MDT
Movimento do tipo queda livre e/ou salto	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Movimento do tipo rolamento	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Movimento do tipo deslizamento	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Método de aproximação	Massa concentrada e Rigoroso	Massa concentrada e Rigoroso	Massa concentrada e Rigoroso	Massa concentrada	Massa concentrada
Número de blocos	Ilimitado	Ilimitado	1.000	Ilimitado	Ilimitado
Barreiras	Altura e inclinação	-	Altura e inclinação	-	Altura

Freitas (2013) esclarece que, em geral, os programas numéricos de simulação de queda de blocos são extremamente sensíveis à variação dos parâmetros de entrada, assim como o próprio movimento em si. Logo, como em qualquer modelagem numérica que visa representar e simular uma condição real ou um evento, a simulação do fenômeno de queda de blocos requer uma seleção criteriosa dos parâmetros bem como a adoção de um modelo topográfico realista.

Além disto, Freitas (2013) ainda ressalta que outro ponto importante para a modelagem numérica é a avaliação detalhada e criteriosa dos resultados de saída que os programas fornecem, pois se deve ter em mente que durante o processo podem

ser geradas eventuais trajetórias e resultados inconsistentes. Desta maneira, como todo e qualquer programa numérico, deve ser utilizado com prudência para que se torne uma ferramenta de valor prático e útil. Portanto, cabe ao usuário a responsabilidade pela definição dos parâmetros de entrada e a avaliação dos resultados obtidos.

## 2 TEORIA DO CAOS

Este capítulo tem por objetivo definir os sistemas não-lineares (caóticos), bem como apresentar suas características principais e interligar sua teoria e aplicação com a engenharia geotécnica por meio dos movimentos de massa do tipo quedas de blocos rochosos.

### 2.1 Considerações sobre sistemas lineares e não-lineares (caóticos)

A metodologia normalmente utilizada no estudo de fenômenos naturais consiste basicamente em dividir o evento em etapas menores e avaliá-las isoladamente, onde é possível estabelecer uma certa relação de proporcionalidade constante entre as variáveis. Sendo assim, a alteração em uma determinada variável irá causar uma alteração proporcional em uma outra variável (Marietto et. al, 2006). Segundo Menezes Filho (2003), em sistemas lineares nos quais o desempenho global é resultado da superposição dos efeitos de cada uma de suas etapas constituintes, o estudo a partir de partes menores é suficiente para a avaliação do sistema como um todo.

No entanto, existem casos em que as propriedades características dos sistemas só podem ser identificadas quando analisadas no comportamento coletivo, impossibilitando a divisão do problema em partes, onde suas variáveis não possuem proporcionalidade constante. Dessa forma, a alteração em uma variável irá produzir alterações não proporcionais em outra variável (Marietto et. al, 2006). Nestes casos, os sistemas são chamados de não-lineares. A literatura refere-se a este tipo de comportamento como caos – ou caótico – como serão apresentados nos próximos itens da presente pesquisa.

As particularidades dos sistemas caóticos tornam as soluções destes sistemas de difícil trato analítico e de alta sensibilidade às variações iniciais a que são expostos. Entretanto, a investigação destes sistemas tem sido desenvolvida ao longo dos anos graças ao avanço da tecnologia computacional e a concepção de modelos numéricos cada vez mais sofisticados (De La Sota, 2004).

Os cálculos que envolvem a Teoria do Caos são utilizados para compreender e descrever fenômenos das mais diversas naturezas: meteorológicos, crescimento de

populações, ascensão e queda na bolsa de valores, criptografia de computadores, movimentos de placas tectônicas, entre outros (Gleick, 1991).

### 2.1.1 Principais características dos sistemas caóticos

Em virtude de sua multidisciplinaridade, não há até o momento uma definição abrangente e rigorosa sobre os sistemas caóticos. Diversos pesquisadores ressaltam as características que julgam ser fundamentais, como um todo, para identificar os diferentes tipos de sistemas caóticos.

Os sistemas não-lineares caóticos podem ser subdivididos basicamente em dois conjuntos, os sistemas que apresentam o comportamento fracamente caótico (caos fraco ou complexo) e os sistemas que apresentam o comportamento fortemente caótico (caos forte).

Menezes Filho (2003) ressalta que, o termo “complexo” não o configura como um sistema complicado propriamente dito – mesmo que à primeira vista a evolução deste sistema se apresente de forma totalmente desordenada e randômica, sendo que na maioria das vezes, estes sistemas são constituídos por partes menores derivados de leis determinísticas com comportamentos muito simples, mas que exercem grande influência entre si, gerando uma ampla rede de conexões, e por conseguinte, o comportamento complexo de uma forma global.

De acordo com Nussenzveig (2008), as principais características encontradas nos sistemas que apresentam o comportamento fracamente caótico (complexos) são descritas a seguir.

- a) São sistemas não-lineares em evolução constante, constituídos por um grande número de partes (unidades) que interagem entre si e com o ambiente em que estão inseridos.
- b) O sistema é adaptativo, pois em seu processo de evolução constante pode desenvolver correlações de longo alcance temporal entre seus estados (memória de longo alcance) e estruturas fractais (correlações de longo alcance espacial, ou seja, são estruturas geométricas de dimensão fracionária que possuem auto similaridade em todas as escalas – Figura 24). Esta é a característica crucial dos sistemas fracamente caóticos (complexos), pois com

isso, a arquitetura básica vai sendo alterada à medida que o sistema evolui e interage com o ambiente, tornando o tratamento matemático mais difícil (Peitgen, 2004).

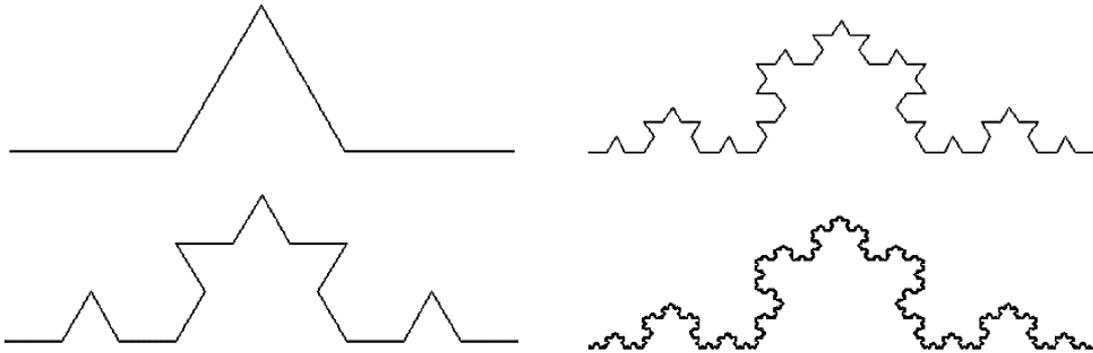


Figura 24 – Estrutura fractal de floco de neve de Von Koch (Adaptado de Menezes Filho, 2003)

- c) Cada parte constituinte do sistema pode apresentar "frustrações", tendo em vista que os estímulos recebidos por meio das interações com as outras unidades podem ser contraditórios e com isso não é possível satisfazer todos os estímulos ao mesmo tempo.
- d) Visto seu intrínseco comportamento de atuação em conjunto entre as partes constituintes, é possível o surgimento de novas propriedades coletivas, que podem não ser identificadas em nenhuma das suas partes. Estas novas propriedades surgem pelo processo de interação, de forma repetitiva e imitativa.
- e) O sistema se organiza intuitivamente na chamada criticalidade (estado desprovido de qualquer escala característica – fractal) auto-organizada (de forma espontânea, em que as estatísticas de seus principais parâmetros são em leis de potência), que também o torna extremamente sensível a perturbações. Este estado é considerado o limiar entre ordem e o caos – ou caos fraco, e é matematicamente caracterizado por apresentar o seu expoente de *Lyapunov* nulo ou muito próximo de zero. O expoente de *Lyapunov* descreve a velocidade com que dois pontos no espaço de fases (que representa a

evolução temporal do sistema, através da evolução temporal de suas variáveis relevantes) se aproximam ou se afastam.

- f) O sistema normalmente possui múltiplos atratores (mínimos locais, para onde os possíveis estados iniciais do evento tendem), o que leva a um desenvolvimento de histerese – dependência da história anterior (Gleick, 1991). Ao permanecer detido em mínimo local, o sistema ficaria impedido de visitar e encontrar outros estados possíveis. Portanto, ao sofrer qualquer pequena variação – interna ou externa, poderá deslocar o sistema para outro estado com características totalmente distintas do seu estado originário. Esta também é uma das razões pelas quais o tratamento analítico destes sistemas é difícil e, por vezes, impossível (Fiedler-Ferrara, 1994).

Segundo Valerio (2014), os atratores estranhos representam o processo de auto-organização dos sistemas caóticos. Em um sistema linear, por exemplo, obtemos trajetórias que convergem para um ponto estável ou para uma variação periódica, o que não ocorre em sistemas não-lineares, como mostra o Atrator de Lorenz na Figura 25 abaixo. Ou seja, mesmo que as condições iniciais sejam ligeiramente diferentes, pode-se desenvolver situações finais consideravelmente distintas das esperadas.

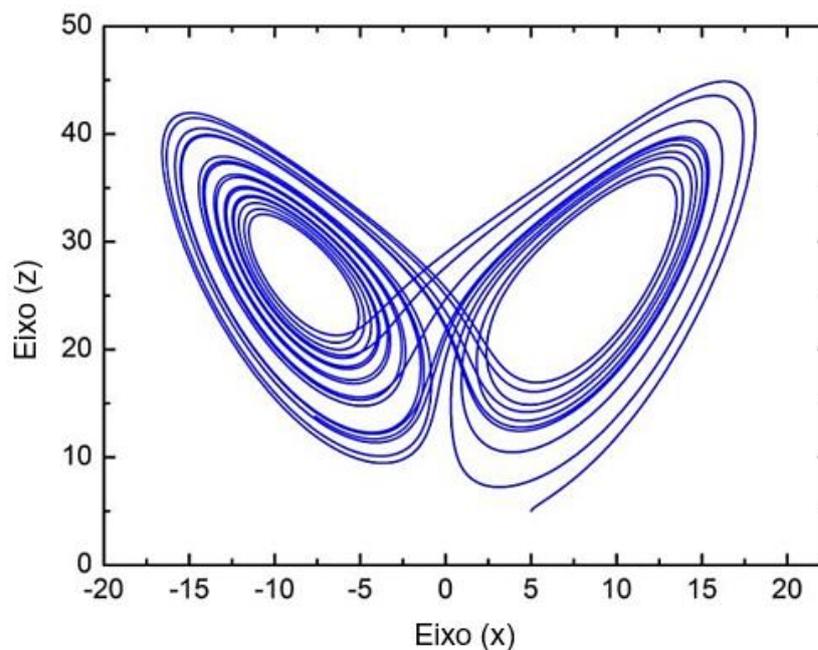


Figura 25 – Solução do sistema de Lorenz, projetada no plano xz, “atrator de Lorenz”  
(Valerio, 2014)

Menezes Filho (2003) elucida que algumas das características dos sistemas de comportamento fracamente caótico diferem significativamente das características encontradas nos sistemas que apresentam o comportamento fortemente caótico. Sendo assim, as mesmas são apresentadas a seguir.

- a) Durante seu processo de evolução, o sistema não desenvolve interação espacial e temporal ou as desenvolve, mas serão de curto alcance entre seus estados (sem memória ou com memória de curto alcance). Logo, não apresentam estruturas fractais.
- b) O expoente de *Lyapunov* do sistema será necessariamente maior que zero, ultrapassando o limite entre o caos e a ordem.

## 2.2 Entropia estatística

O conceito de entropia dentro da Mecânica Estatística é interpretado usualmente como desordem ou falta de informação suficiente a respeito do estado em que o sistema não-linear caótico se encontra. Ou seja, a entropia do sistema é a medida do número de estados possíveis que um sistema pode apresentar (Silva, 2007).

De acordo com Durão (2015), o elevado número de variáveis do sistema nos impede de resolver completamente todas as equações de movimento geradas, sendo assim, abstém-se da possibilidade de se resolver o problema de forma exata e então se insere uma distribuição de probabilidade, cujo formato está associado intimamente com a regra com que a entropia do sistema composto de diversos estados é somado.

Com isso, para o estudo realizado no presente trabalho, a física estatística é utilizada como um método de inferência e não propriamente como uma teoria física. A compreensão do conceito de entropia e sua utilização são fundamentais para a análise de sistemas estatísticos, criando uma ponte entre as propriedades microscópicas e macroscópicas do sistema.

### 2.2.1 Entropia clássica de Boltzmann-Gibbs

Para o físico austríaco Ludwig Boltzmann, a entropia está relacionada com o número de estados microscópicos acessíveis (prováveis) ao sistema macroscópico. Quanto maior for o número  $W$  de estados microscópicos acessíveis, maior será a entropia  $S_B$ . Strogatz (1994) explica que a entropia de Boltzmann não cresce linearmente com o número de estados, mas sim logaritmicamente segundo a Equação (3) – a Equação da entropia de Boltzmann. Onde  $k$  é a constante de Boltzmann, que se refere a uma constante positiva que define a unidade em que a entropia do sistema é medida (Durão, 2015).

A Equação da entropia de Boltzmann é uma particularização de um caso geral, no qual a probabilidade do sistema não é igual para todos os estados microscópicos que em conjunto, realizam o estado macroscópico.

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

Segundo Callen (1985), a Equação (3) acima pode ser reescrita para a Equação (4), a Equação da entropia de Boltzmann-Gibbs ( $S_{BG}$ ), onde  $p_i$  é a probabilidade do sistema encontrar-se em seu  $i$ -ésimo estado ( $\sum_i p_i = 1$ ) e o somatório é executado sobre todos os seus estados microscópicos possíveis ( $W$ ) quais o sistema macroscópico pode ser encontrado.

No caso de todos os estados microscópicos terem igual probabilidade de serem executados macroscopicamente ( $p_i = 1/W$ ), independentemente de  $i$ , a Equação (4) se transforma na Equação (3) (Menezes Filho, 2003).

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

Menezes Filho (2003) ressalta que a entropia de Boltzmann-Gibbs é uma entropia aditiva, fato este retratado na sua forma logarítmica. Sendo assim, a entropia de Boltzmann-Gibbs de um sistema composto é igual à soma das entropias dos estados A e B que o formam, como é apresentado na Equação (5). Esta entropia é

maximizada pela distribuição de probabilidade Gaussiana (Equação (6)), sendo a, b e c, variáveis aleatórias da distribuição gaussiana.

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

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

A entropia de Boltzmann-Gibbs é válida para sistemas que apresentem as seguintes características:

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

Tendo em vista as características apresentadas pela entropia de Boltzmann-Gibbs, percebe-se a sua validade para a regência dos sistemas não-lineares fortemente caóticos. Sendo assim, para sistemas que violam estas características, como os sistemas não-lineares fracamente caóticos, a entropia de Boltzmann-Gibbs pode não ser válida, sendo necessário o uso de entropias Generalizadas para descrevê-los.

### 2.2.2 Entropias generalizadas

As Entropias Generalizadas regem sistemas nos quais a entropia clássica de Boltzmann-Gibbs não pode ser satisfatoriamente aplicada, mais especificamente sistemas não-lineares fracamente caóticos caracterizados por:

- a) Interações de longo alcance entre seus estados;
- b) Sistemas com memória temporal de longo alcance;
- c) Sistemas cuja evolução no espaço de fase é multifractal;
- d) Existe algum tipo de dissipação dentro do sistema.

Pode-se observar que as características das entropias generalizadas são distintas daquelas fundamentadas pela mecânica estatística clássica, como a de Boltzmann-Gibbs. Sistemas que são regidos pelas entropias generalizadas requerem uma forma entrópica diferenciada, que contemple a possibilidade de tratar interações de longo alcance.

Segundo Borges (2004), dentre as principais entropias generalizadas, destaca-se a proposta por Constantino Tsallis (1988) ( $S_q$ ), apresentada na Equação (7) abaixo, generalizando a Equação proposta por Boltzmann-Gibbs, sendo  $q$  o parâmetro entrópico que caracteriza o grau de não-aditividade do sistema, e está intimamente relacionado à sua dinâmica microscópica ( $-\infty < q \leq 3, q \in \mathbb{R}$ ) – adimensional,  $k$  é uma constante positiva e a soma acontece sobre todos os estados microscópicos ( $W$ ) acessíveis ao sistema, tal qual na entropia de Boltzmann-Gibbs.

Esta entropia é maximizada pelas distribuições de probabilidade  $q$ -gaussianas e  $q$ -exponenciais.

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

$$\left[ \lim_{q \rightarrow 1} S_q = S_{BG} \right]$$

O físico Constantino Tsallis propôs ainda a generalização de sua própria entropia, propondo uma entropia  $S_{q,\delta}$ , que restitui a entropia  $S_q$  quando  $\delta = 1$ , é descrita pela Equação (8) a seguir, sendo  $\delta$  o parâmetro entrópico de ajuste, e os demais parâmetros correspondem aos mesmos apresentados anteriormente.

$$S_{q,\delta} = k \sum_{i=1}^W p_i \left( \ln_q \frac{1}{p_i} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (8)$$

$$[q \in \mathbb{R}; \delta > 0]$$

Onde:

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

E sua função inversa:

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

Esta entropia é maximizada pela distribuição de probabilidade q-exponencial estendida descrita pela Equação (9), sendo  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$  variáveis aleatórias da distribuição q-Exponencial Estendida,  $q$  é o parâmetro entrópico e  $\delta$  é o parâmetro entrópico de ajuste como nas equações anteriores.

$$y_{q(e-e)} = a' \left[ 1 - (1 - q) \left( \frac{x' - c'}{b'} \right)^{\frac{2}{\delta}} \right]^{\frac{1}{1-q}} \quad (9)$$

A partir dos modelos matemáticos das distribuições de probabilidade, é possível descrever comportamentos randômicos de fenômenos dependentes do acaso, colaborando para solução de diversos problemas práticos em sistemas não-lineares fortemente caóticos tanto quanto em sistemas não-lineares fracamente caóticos (complexos).

### 2.3 Sistemas não-lineares (caóticos) e a engenharia geotécnica

Ao longo dos anos, pesquisadores têm estudado, desenvolvido e aplicado a Teoria do Caos na elaboração de modelos matemáticos para análise dos mais diversos ramos das geociências, como por exemplo: geofísica, sismologia, geomorfologia, tectônica, hidrogeologia, petrologia, entre outros (López, 2003).

Autores como Bak e Tang (1989), Ibáñez et al. (1995), Rundle e Klein (1995), Martinez (1996), Turcotte (1997), López (2003) e Menezes Filho (2003), apresentam e destacam estes estudos, enfatizando sua importância para as áreas em questão e para a continuação de pesquisas acerca do tema. Entretanto, na engenharia civil, em particular no ramo da engenharia geotécnica, não se tem muitas pesquisas desenvolvidas sobre a Teoria do Caos, principalmente a nível Brasil.

Menezes Filho (2003) aponta que a maioria das investigações ainda se limitam a análises particulares, sendo raras as vezes em que se opera a síntese

generalizadora. Ainda cita como exemplo a retroanálise de rupturas em encostas naturais, que na maioria das vezes é totalmente inconclusiva, onde a busca é caracterizada pela identificação de algum agente externo supostamente responsável pela ruína do material, considerando a estabilidade como o estado normal do sistema, e a sua instabilidade como uma alteração desta normalidade aparente. Segundo o autor, a suposição de que algum fator externo ao sistema deva existir necessariamente, de forma a explicar o processo catastrófico, é uma forma reducionista de encarar a ciência que rege estes e demais eventos.

Diferentes pesquisadores, destacando-se Bak e Tang (1989), evidenciaram que muitos sistemas caóticos se auto organizam entre ordem (estabilidade) e caos (instabilidade), onde o tamanho dos eventos obedece a uma lei de potência. Em tais sistemas, compreende-se que, apesar de haver uma lei de distribuição bem convencionalizada, a previsão de fenômenos catastróficos a longo prazo fica comprometida, pois eventos individuais não podem ser previstos, nem suas consequências (Menezes Filho, 2003).

Com isso, o capítulo 3 apresenta o processo e as análises da pesquisa desenvolvida, ampliando o estudo e a utilização da teoria do caos na engenharia geotécnica, mais especificamente nos fenômenos de quedas de blocos rochosos no caso do corte do Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ.

### 3 ESTUDO DE CASO DO MORRO DO CANTAGALO – RJ

Este capítulo apresenta o estudo da queda de blocos rochosos no caso do corte do Morro do Cantagalo, na zona sul da cidade do Rio de Janeiro – RJ por meio de análises numéricas realizadas com o programa RocFall 6.0 e com as equações da Teoria do Caos.

Para caracterizar e compor o estudo de caso, este capítulo aborda ainda as questões relativas à geomorfologia e à geologia da cidade, os fatores que influenciam este tipo de movimento de massa no Morro do Cantagalo e também as questões inerentes ao programa numérico RocFall 6.0. Por fim, são apresentadas as análises e as discussões dos resultados obtidos durante a elaboração da presente pesquisa.

#### 3.1 Aspectos geomorfológicos e geológicos da cidade do Rio de Janeiro

A análise dos fatores condicionantes, a elaboração de projetos e a execução de obras relacionadas à mitigação ou à convivência com movimentos de massa em geral, necessitam do conhecimento geológico da região. Este conhecimento pode auxiliar os profissionais a entender melhor a composição física, química e mineralógica das rochas e solos que compõem as encostas e as suas características geotécnicas, os comportamentos geomecânicos e hidrológicos específicos, que são fundamentais para compreender estes eventos (GEO-RIO, 2014).

Segundo Dantas (2000), o cenário geomorfológico do Rio de Janeiro apresenta uma topografia acidentada e diversificada, resultado de uma interação entre aspectos tectônicos e climáticos. A Cidade é constituída por baixadas extensas em que se elevam, quase sem transição, maciços rochosos dos mais variados tipos de declividade, resultados do soerguimento do Cinturão Orogênico do Atlântico, que correspondem às estruturas produzidas pelos processos de convergência das margens das placas tectônicas. Estas estruturas são chamadas de dobramentos.

A cidade está associada ao sistema da Serra do Mar, e em sua maior parte é recoberta pela floresta da Mata Atlântica. Apresenta três principais e importantes grupos montanhosos: Maciço da Pedra Branca, Maciço da Tijuca e Maciço de Gericinó (Figura 26), mais alguns conjuntos de serras menores e morros isolados (Storino, 2003).

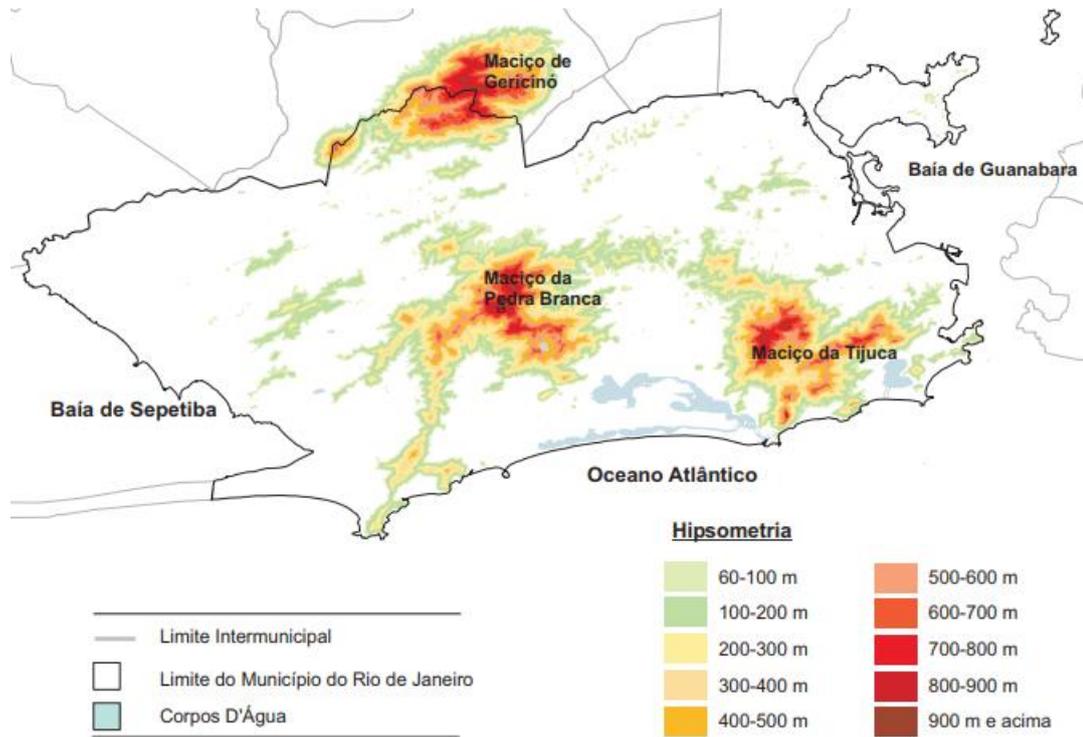


Figura 26 – Relevo da Cidade do Rio de Janeiro e seus maciços principais (SMAC, 2000)

De acordo com Menezes Filho (1993), na maior parte da orla marítima do Município do Rio de Janeiro – onde se situa a região com a Cidade mais povoada, os maciços são constituídos principalmente por três tipos de gnaisses da era Pré-Cambriana: kinzigito, gnaisse facoidal e o leptinito, conforme ilustra a Figura 27.

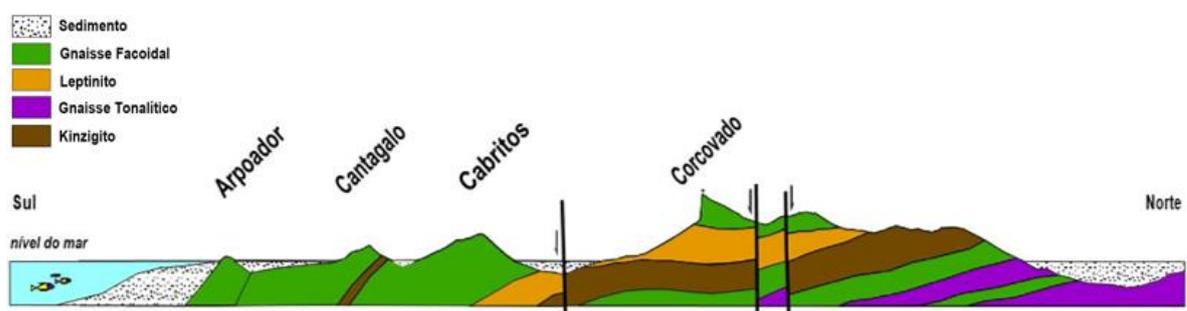


Figura 27 – Parte Sul da Geologia da Cidade do Rio de Janeiro (Adaptado de Valeriano et al. 2007)

O kinzigito (ou biotita-gnaisse) é uma rocha metamórfica de granulação grosseira, ácida (teor de sílica > 65%), composta basicamente por biotita, quartzo, feldspato e rica em granada. Associa-se ao biotita-gnaisse, para o qual passa de forma

gradativa. É o gnaïsse mais disseminado ao longo da Cidade do Rio de Janeiro, atravessando-a de noroeste a sudeste.

Já o gnaïsse facoidal é uma rocha metamórfica de granulação grosseira, ácida, composta por quartzo, feldspato e mica biotita. É a litologia que constitui a maior parte dos maciços da orla marítima, como por exemplo o Morro do Corcovado, Pão de Açúcar, Urca, Pasmado, Cantagalo, Cabritos, Dois irmãos, entre outros.

E por fim, leptinito, que também é uma rocha metamórfica de granulação fina, ácida, composta por quartzo-feldspáticos e possui uma menor abrangência em comparação aos dois tipos de gnaïsse apresentados anteriormente, pode ser encontrado na encosta sul da Serra da Carioca, desde Santa Teresa, Corcovado e Morro Dona Marta.

A Tabela 4 apresenta as rochas descritas acima com as suas principais características e os problemas geotécnicos relacionados à estabilidade de taludes que comumente apresentam.

Tabela 4 – Caracterização dos principais grupos de rochas presentes nas encostas do Rio de Janeiro (Adaptado de GEO-RIO, 2014)

<b>Rocha</b>	<b>Principais características</b>	<b>Problemas que podem gerar a instabilidade de taludes</b>
<b>Gnaïsse facoidal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta resistência ao intemperismo;</li> <li>- Muitos afloramentos;</li> <li>- Taludes íngremes;</li> <li>- Pequenas espessuras de solos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lascas, blocos e matacões;</li> <li>- Depósito de tálus.</li> </ul>
<b>Kinzigito</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa resistência ao intemperismo;</li> <li>- Poucos afloramentos;</li> <li>- Espessas camadas de solos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taludes de solo;</li> <li>- Depósito de tálus.</li> </ul>
<b>Leptinito</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Média resistência ao intemperismo;</li> <li>- Poucos afloramentos relativamente;</li> <li>- Saibreiras (solo + atividade humana).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taludes de saibreiras;</li> <li>- Lascas e matacões.</li> </ul>

Devido as suas condições de formação, os gnaïsses normalmente apresentam textura anisotrópica determinada pelo bandamento gnáïssico, podendo representar planos de fraqueza da estrutura, apresentando muitas vezes blocos de rocha de formatos irregulares e em formato de placa (Barotorelli e Haralyi, 2000).

### 3.2 Localização da área de estudo e caracterização geológico-geotécnica

O Morro do Cantagalo (Figura 28) – caso de estudo da presente pesquisa, encontra-se localizado na Zona Sul da Cidade do Rio de Janeiro, especificamente entre os bairros de Copacabana e Ipanema, como mostra a região em destaque na vista aérea da Figura 29, obtida via satélite (Google Earth).



Figura 28 – Morro do Cantagalo (Adaptado de Andrade, 2018)



Figura 29 – Localização do Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ

No corte Cantagalo (trecho que separa o Morro dos Cabritos do Morro do Cantagalo), na face contornada pela Rua Professor Gastão Bahiana próximo a Avenida Barata Ribeiro e Túnel Prefeito Sá Freire Alvim, tem-se uma escarpa rochosa com cerca de 175 metros de desnível, em uma área de aproximadamente 8.000 m<sup>2</sup> onde aflora o gnaiss facoidal que constitui o Morro do Cantagalo. A área de estudo está destacada na Figura 30.

A escarpa está constantemente sujeita à ação do intemperismo físico e químico, dado pela pouca vegetação que a recobre e principalmente pela variação térmica durante o dia, que leva à dilatação e à contração dos minerais de diferentes coeficientes de dilatação térmica, repetindo-se constantemente ao longo dos anos. Por esse motivo, é comum a formação de blocos irregulares e lascas delgadas, descontínuas e parcialmente engastadas ao longo de toda a escarpa, podendo se desprender ocasionalmente.



Figura 30 – Representação da área de estudo no mapa geológico-geotécnico da escarpa rochosa com face para a Rua Professor Gastão Bahiana, próxima a Avenida Barata Ribeiro e Túnel Prefeito Sá Freire Alvim (Adaptado de GEO-RIO, 2009)

As inspeções realizadas pela GEO-RIO (2009), identificaram que o maciço rochoso possui poucas fraturas de origem tectônica, que poderiam eventualmente destacar porções mais volumosas da encosta. As fraturas presentes são, em sua maioria, resultantes da esfoliação térmica (processo de desagregação de rochas a

partir de suas isotermas ou de suas linhas de maior fraqueza), pouco persistentes e os volumes destacados, registrados até o momento, são pequenos.

Desde a década de 1960, em virtude das condições apresentadas no maciço e de sua localização em contato com inúmeras construções que acompanham todo o entorno no Morro do Cantagalo, o poder público municipal realizou diversas intervenções na escarpa com a face voltada para a Rua Professor Gastão Bahiana (Figura 31, Figura 32 e Figura 33 por exemplo). Dentre elas a estabilização de blocos de rocha por meio de contrafortes e grelhas atirantadas, drenagens, retaludamento, manutenção para remoção de vegetação e lascas de rocha próximas às edificações existentes no local e mais recentemente, barreiras flexíveis de impacto.



Figura 31 – Grelha atirantada na escarpa da Rua Prof. Gastão Bahiana (GEO-RIO, 2009)

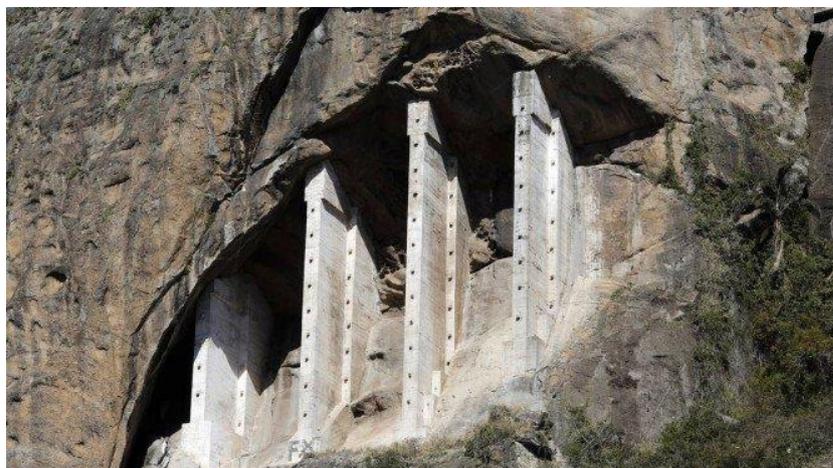


Figura 32 – Contrafortes na escarpa da Rua Prof. Gastão Bahiana (Rossi, 2013)



Figura 33 – Barreiras flexíveis de impacto instaladas no Morro do Cantagalo com face para a Rua Prof. Gastão Bahiana (GEOBRUGG, 2011)

O banco de dados da GEO-RIO indica que, historicamente, os acidentes geológicos nos últimos 60 anos nesta encosta se referem ao desprendimento de pequenas lascas e blocos irregulares no maciço rochoso, com capacidade para causar danos de pequeno a médio porte nas edificações próximas. As informações encontradas no banco de dados da GEO-RIO foram verificadas pela Autora durante visita técnica de campo ao local e por meio de registros contidos nos livros de ocorrências dos edifícios e de entrevistas com moradores e funcionários ao longo da Rua Prof. Gastão Bahiana.

Apesar do maciço não fornecer indícios prévios de movimentação (diferentemente de uma encosta em solo, onde o surgimento de rachaduras no solo e em prédios, inclinação de postes e/ou árvores, são indicativos de que o processo de movimentação está instaurado), não pode se descartar a existência de uma situação de risco geológico-geotécnico na encosta bem como futuras intervenções, principalmente pela proximidade das edificações locais com a vertente sudeste do Morro do Cantagalo, onde o afastamento não é suficiente para eliminar o perigo de alcance direto da queda de blocos.

Considerando que o risco geológico-geotécnico corresponde ao produto da possibilidade de ocorrência de um acidente pela sua consequência, verifica-se que a possibilidade de ocorrência do desprendimento de medianas e pequenas lascas e blocos é considerável e tem se apresentado ao longo dos anos, mas até o momento sem consequências de grave magnitude.

### 3.3 Programa numérico RocFall 6.0

Conforme discutido nos capítulos anteriores, movimentos de massa do tipo queda de blocos são de difícil previsão e muito sensíveis a pequenas variações de parâmetros. De acordo com Stevens (1998), ao analisar este fenômeno, é comum identificar um conjunto de fatores que contribuem negativamente para a exatidão deste mecanismo, como por exemplo, a geometria da seção altamente variável ao longo do talude, blocos com a localização inicial desconhecida, diferentes materiais compondo o talude, ou as propriedades principais dos materiais não são conhecidas.

Segundo Giani et al. (2004), a concepção de medidas mitigadoras e de convivência em áreas com alto risco de quedas de rochas requer a avaliação tanto quantitativa quanto qualitativa das ações produzidas pelo fenômeno. Desse modo, torna-se de extrema importância o estudo das trajetórias e das energias cinéticas desenvolvidas pelos blocos durante o seu percurso de queda.

A partir do conhecimento das variáveis que governam o movimento em seu estágio inicial e ao decorrer da trajetória, é possível eleger o modelo computacional mais adequado para simular a queda de bloco, e como nos mais diversos problemas de engenharia, a confiabilidade do modelo de cálculo depende intimamente dos parâmetros de entrada atribuídos e das hipóteses simplificadoras adotadas.

#### 3.3.1 RocFall 6.0

Dentre os diversos programas disponíveis atualmente, o RocFall desenvolvido pela Rocscience Inc., se vale de amostragens estatístico-probabilísticas por meio dos Métodos de Monte Carlo ou *Latin Hypercube* para a simulação bidirecional da queda de blocos rochosos em encostas. Com isso, é capaz de determinar a energia, velocidade, altura de salto, trajetória e ponto de parada do bloco, que são informações cruciais para a concepção de projetos de intervenção. O estudo apresentado na presente dissertação é realizado pelo Método de Monte Carlo.

Silva (2015) descreve o Método de Monte Carlo como um processo probabilístico que se caracteriza pela obtenção de uma sequência de números aleatórios gerados a partir de distribuições estatísticas das variáveis independentes e assim, os valores da variável dependente podem ser calculados após N repetições

deste mesmo processo. O objetivo deste método é a aproximação da função de probabilidade para uma ou mais variáveis aleatórias.

No caso do RocFall, o método simula as prováveis trajetórias dos blocos rochosos baseando-se na variação aleatória dos parâmetros do fenômeno inseridos na fase inicial do programa. Com isso, o método resolve uma equação matemática – no caso de quedas de blocos, a equação da energia potencial e das trajetórias adotadas – tantas vezes quantas forem determinadas, dando início ao processo de iteração. As iterações da simulação selecionam aleatoriamente os valores dos parâmetros de entrada seguindo suas distribuições probabilísticas (Macciota et al., 2014).

Segundo Wyllie (2015), este método é aplicável tanto para problemas de sistemas lineares quanto para sistemas não-lineares e permite um número muito maior de simulações dentro de uma única análise. Entretanto, exige um grande número de simulações para proporcionar uma distribuição confiável, demandando um tempo de processamento maior durante a execução do programa. O Método de Monte Carlo permite a estimativa de valores probabilísticos mais precisos e soma uma maior confiabilidade às conclusões acerca dos eventos de quedas de blocos rochosos.

A seguir, também são apresentados os dois diferentes métodos para as simulações de impacto associadas ao Método de Monte Carlo: o Método da Massa Concentrada e o Método do Corpo Rígido.

### 3.3.2 Método de Massa Concentrada e Método do Corpo Rígido

Em suas versões iniciais, o programa operava somente por meio do método de Massa Concentrada ou *Lump Mass*, onde algoritmos simulam as trajetórias assumindo o bloco rochoso como uma partícula de massa concentrada em seu centro de gravidade e apenas o movimento de deslizamento é considerado. Estas considerações negligenciam a influência que a forma, o tamanho e o momento angular do bloco exercem no movimento (Vijayakumar et al., 2012).

Stevens (1998) explica ainda que, no método *Lump mass*, a massa do bloco permanece constante ao longo de toda simulação gerada pelo programa e não é empregada para calcular o movimento do bloco, mas sim a sua energia cinética no decorrer da queda. Também não se considera a resistência do ar nos cálculos, pois

se assume que os blocos de rocha são maciços o suficiente para que essa variável não exerça uma grande influência no processo de simulação.

Com o passar dos anos, diversas evoluções foram implementadas no programa (incluindo a versão 6.0 utilizada na presente pesquisa, Figura 34) e as principais delas foram a possibilidade de incluir a geometria da encosta com base em coordenadas e também por perfis topográficos gerados pelo programa AutoCAD e a inserção do Método do Corpo Rígido ou *Rigid Body*. Neste método, o impacto é resultante da colisão entre o bloco rochoso e a encosta, em uma pequena área comum às duas superfícies, sem que as tensões geradas sejam distribuídas nesta área de contato (Silveira, 2017).

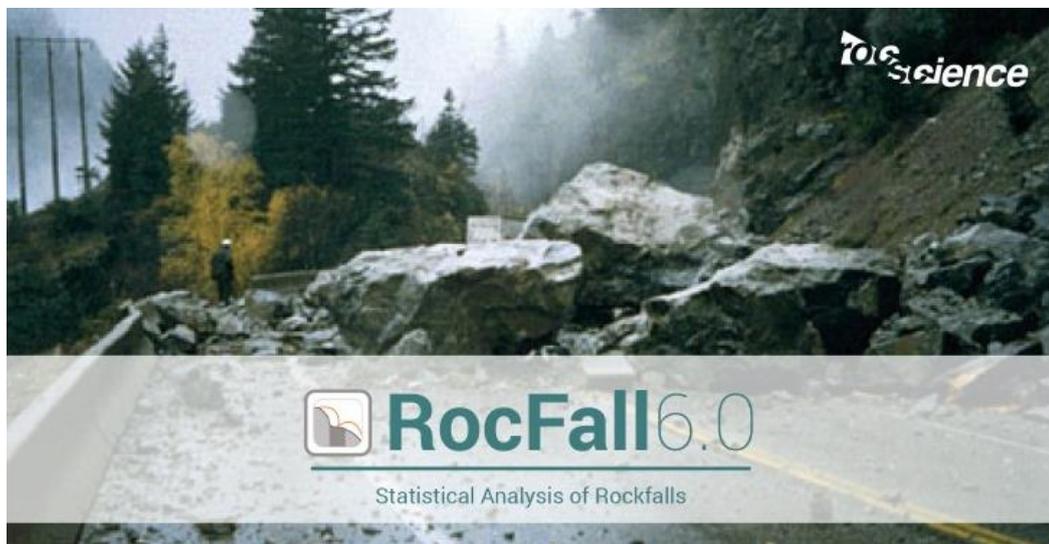


Figura 34 – RocFall versão 6.0 (Rocscience, 2018)

De acordo com o pesquisador Ashayer (2007), em uma situação ideal, o tempo de contato entre o bloco e a encosta em que ele colide é extremamente curto e depende da rigidez, da massa e das velocidades envolvidas. Durante o encadeamento da colisão, há dissipação de energia e se desenvolve uma grande força, de forma que essa força cessa o contato entre o bloco e a encosta quando a direção das velocidades é invertida no ponto de contato.

### 3.3.3 Tipos de movimentos disponíveis

Tavares (2015) ressalta que devido ao rápido contato entre o bloco e a encosta, pode se observar dois tipos básicos de movimento: *Sticking* e *Sliding*. *Sticking* é

descrito como um movimento de rolamento puro. Ocorre quando a velocidade tangencial da parte do bloco em contato com a encosta é zero. Caso contrário, o impacto é denominado de *Sliding* ou deslizamento. Sendo assim, neste caso, pode-se dizer que o movimento do bloco rochoso é uma combinação de rolamento e deslizamento (Heidenreich, 2004).

O coeficiente de restituição normal é utilizado durante as duas fases do período de contato, primeiramente para calcular o impulso final e, com esse valor, calcular as velocidades pós contato.

### 3.3.4 Intervenções de convivência disponíveis

Com relação especificamente às intervenções de convivência, as barreiras protetoras – às quais o programa dedica um módulo de análise específico, os resultados obtidos pelo programa como a localização do impacto, energia cinética e seu alcance são fatores que podem ajudar a determinar melhor a capacidade resistente, o tamanho e a localização da barreira ao longo do trajeto percorrido pelos blocos potenciais.

O programa ainda disponibiliza uma vasta lista de barreiras flexíveis comercializadas que o usuário pode eleger, ou se caso preferir, é possível definir as próprias características que desejar.

### 3.3.5 Considerações acerca do RocFall 6.0

Além das melhorias relacionadas ao tipo de impacto, o Método do Corpo Rígido permite a adoção de diversos parâmetros associados às características geológicas, geotécnicas e da própria geometria do problema. Com isso, as simulações de quedas de blocos pelo MCR começaram a retratar situações mais realísticas, visto que é possível fazer considerações que podem modificar significativamente a trajetória, o salto e o alcance final desses blocos. É importante salientar também que a maioria dos programas numéricos, incluindo o RocFall 6.0, ainda não levam em consideração a fragmentação dos blocos de rocha ao longo do movimento.

Por fim, a Figura 35 e a Figura 36 apresentam um exemplo da interface do programa RocFall ao gerar os resultados das trajetórias de quedas de blocos em potencial para uma encosta e o detalhe da descrição de um movimento de queda com todos os pontos de contato com o maciço, respectivamente.

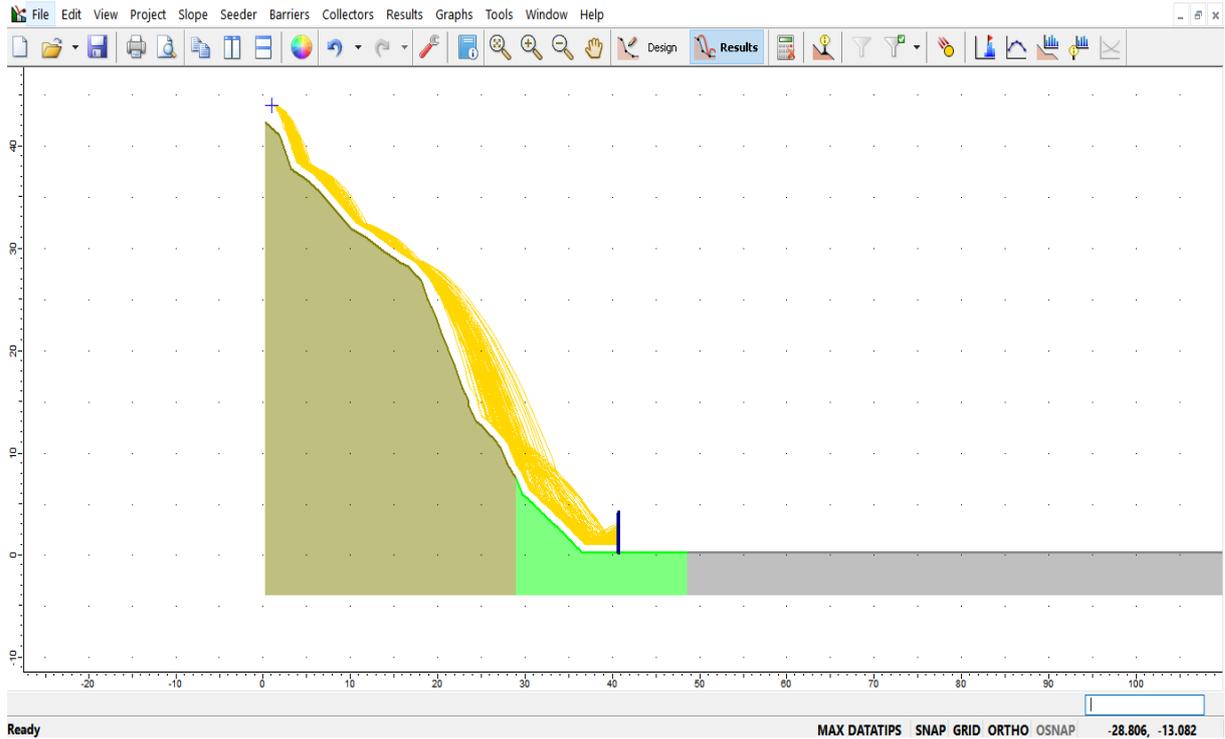


Figura 35 – Interface do programa RocFall na fase de resultados

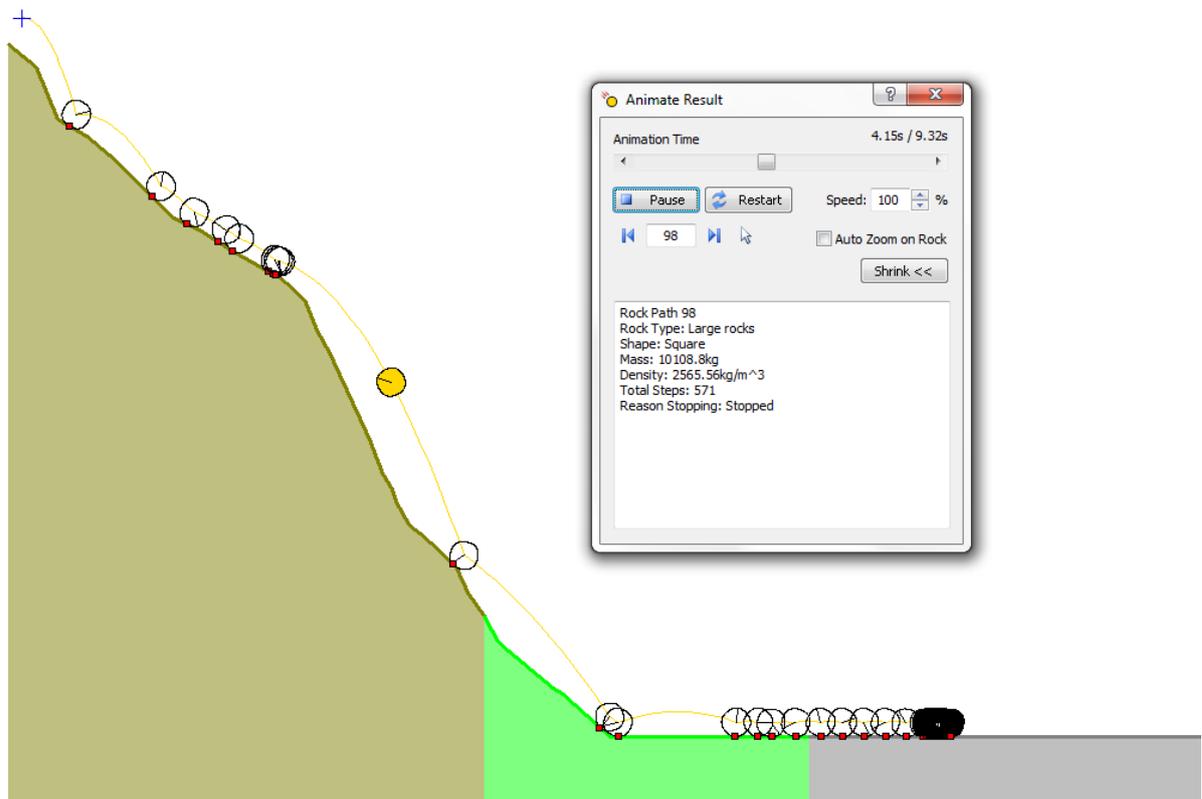


Figura 36 – Detalhe da descrição do movimento de queda de um único bloco rochoso e todos seus pontos de contato com a encosta (Rocscience, 2018)

### 3.4 Metodologia de estudo

Para compor o estudo preliminar, primeiramente, foram gerados no programa RocFall 6.0 quatro modelos (C1, C2, C3 e C4) de seções de encostas rochosas constituídas integralmente por gnaisses facoidais e de geometrias distintas. Para cada seção de encosta, modelou-se blocos comumente gerados por rochas desta natureza (como visto nos itens 3.1 e 3.2 anteriormente), neste caso, optou-se por utilizar blocos de mesmo formato irregular com diferentes tamanhos. Para cada modelo, foram adotados três tamanhos de blocos: Bloco Irregular Pequeno (BIP), Bloco Irregular Médio (BIM) e Bloco Irregular Grande (BIG).

A partir das simulações das quedas de blocos de diferentes tamanhos (BIP, BIM e BIG) nas seções das encostas (C1, C2, C3 e C4) no programa RocFall 6.0, obteve-se as distribuições de probabilidade resultantes da trajetória e do alcance, bem como as demais distribuições que viabilizam a análise global do comportamento do movimento estudado, como por exemplo a energia cinética total, o salto e a velocidade descrita pelo bloco rochoso ao longo do maciço.

Para este estudo preliminar, serão utilizadas as distribuições de probabilidade da trajetória-alcance, tendo em vista que esta é uma das distribuições resultantes mais relevantes que regem o fenômeno. Com isto, torna-se possível a análise do movimento pela teoria do caos em sua forma espacial, pois o programa RocFall 6.0 não apresenta, até esta versão, uma saída de resultados temporal, que permita o estudo da teoria do caos também nesta vertente.

A fim de se obter estatísticas e distribuições de probabilidades mais confiáveis, foram consideradas simulações com um grupo de 100.000 blocos de cada tamanho (BIP, BIM e BIG) para cada geometria de encosta (C1, C2, C3 e C4), gerando as trajetórias desenvolvidas pelos blocos rochosos e seu respectivo alcance ao fim do movimento de massa.

Todos os três casos inseridos no programa foram modelados pelo Método do Corpo Rígido, isto se deve principalmente pela possibilidade de se adotar a geometria e o tamanho desejado para os blocos rochosos com a função "*Custom Polygons*" da *Rock Type Library* do programa RocFall 6.0, gerando resultados mais realísticos. Com a simulação das quedas dos blocos pelo Método do Corpo Rígido, optou-se por utilizar a amostragem estatístico-probabilística de Monte Carlo, visto que é a mais consagrada atualmente para este tipo de estudo.

A partir dos resultados extraídos das simulações de trajetória e alcance geradas no programa RocFall 6.0, empregou-se as formulações apresentadas no Capítulo 3 junto ao programa de tratamento Grapher 4.0, permitindo o ajuste dos resultados nas distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida – referentes à entropia de Boltzmann-Gibbs (caos forte) e a entropia  $S_{q,\delta}$  (caos fraco) respectivamente (Equações (6) e (9)), verificando a possibilidade de enquadramento dos casos C1, C2, C3 e C4 de quedas de bloco nas distribuições de probabilidade acima referidas e o seu tipo de comportamento (fortemente caótico ou fracamente caótico).

Por fim, o processo realizado no estudo preliminar é também aplicado no estudo de caso do corte do Morro do Cantagalo – RJ, em uma das seções mapeada pela GEO-RIO durante o trabalho de investigação de campo para a implantação de barreiras flexíveis de impacto executadas em 2011 no local. O fluxograma da metodologia adotada para a realização deste estudo está ilustrado na Figura 37.

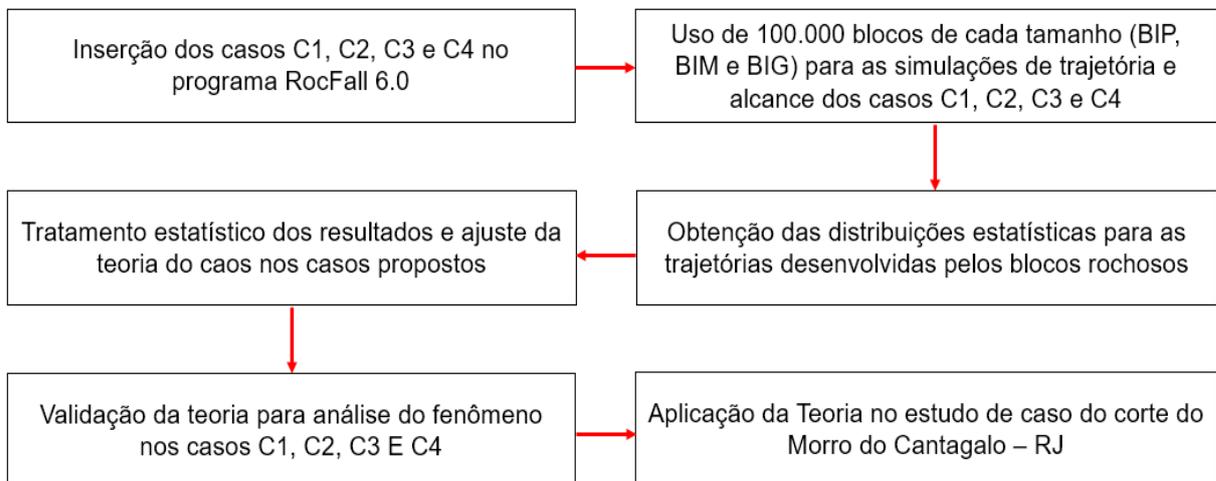


Figura 37 – Fluxograma da metodologia adotada para o estudo preliminar e estudo de caso

### 3.4.1 Parâmetros e considerações sobre o material da encosta e dos blocos

Os valores relativos aos parâmetros geotécnicos das encostas de gnaiss facoidal adotadas e dos seus respectivos blocos rochosos foram selecionados a partir de estudos realizados por Menezes Filho (2003), Nunes et. al (2008), Rocha (2009) e Pelizoni (2014), bem como estudos técnicos cedidos pela GEO-RIO no próprio Morro do Cantagalo – RJ, composto por este tipo de rocha.

Na Tabela 5 constam os parâmetros de coeficiente de restituição normal e coeficiente de restituição tangencial, atrito dinâmico (também chamado de atrito cinético) e o atrito de rolamento solicitados pelo programa RocFall 6.0 para a modelagem geotécnica das seções das encostas rochosas de gnaiss facoidal (C1, C2, C3, C4 e Estudo de caso). O formato dos blocos rochosos BIP, BIM e BIG estão representados na Figura 38 e as características e os parâmetros geotécnicos de cada bloco específico estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 – Parâmetros para a modelagem geotécnica das encostas de gnaiss facoidal

Material rochoso	Cor	Coeficiente de restituição normal (CRn)	Coeficiente de restituição tangencial (CRt)	Atrito dinâmico	Atrito de rolamento
Gnaiss facoidal		0,35	0,85	0,5	0,15

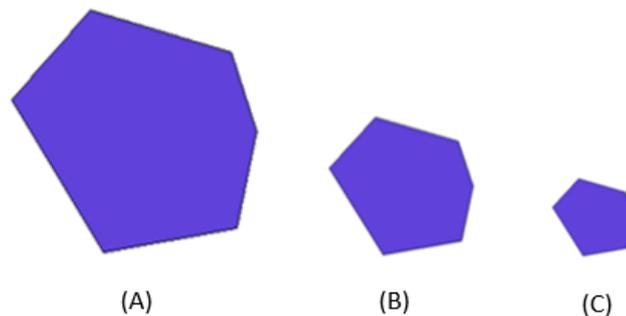


Figura 38 – Formato dos blocos na modelagem dos casos C1, C2 e C3 e Estudo de caso: (A) Blocos irregulares grandes (BIG), (B) Blocos irregulares médios (BIM) e (C) Blocos irregulares pequenos (BIP)

Tabela 6 – Parâmetros para a modelagem dos blocos rochosos de gnaiss facoidal

Tipo de bloco	Cor e formato representativo	Tamanho aproximado (m)	Massa (kg)	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )
BIP		0,50	337,50	27,00
BIM		1,00	2.700,00	27,00
BIG		1,40	7.408,80	27,00

As geometrias selecionadas para as seções das encostas (C1, C2, C3, C4 e Estudo de caso) são compostas de gnaiss facoidal e possuem a base alongada, de forma que seja possível avaliar todas as trajetórias desenvolvidas pelos blocos rochosos durante a simulação de queda e seu respectivo alcance final, sem que o bloco encontre qualquer empecilho. Além disto, o ponto inicial de lançamento para todos os tipos de tamanhos de blocos rochosos encontra-se fixado no ponto mais alto das seções.

Com isso, ressalta-se que nesta oportunidade, optou-se por investigar o comportamento das distribuições de probabilidade na região de sua cauda, razão pela qual decidiu-se pela confecção dos gráficos com o eixo vertical em escala logarítmica decimal para cada seção de encosta e tamanho de bloco específico.

Para cada tamanho de bloco, também elaborou-se o gráfico  $\text{Ln}_q(P(x)/a')$  versus  $((x-c')/b')^{(2/\delta)}$ , com o intuito de investigar a aplicabilidade da relação funcional q-Exponencial Estendida (e por extensão, a própria distribuição gaussiana, já que a primeira tende a segunda quando  $q$  e  $\delta$  tendem a 1) a todos os perfis analisados, o que se constituiria em uma universalidade desta função probabilística, ou seja, uma possível tendência da distribuição trajetória-alcance de todos os tipos de seções e blocos avaliados na presente pesquisa.

As particularidades e os resultados das simulações e dos ajustes estatísticos com as distribuições de probabilidades gaussiana e q-exponencial estendida obtidos pelo programa RocFall 6.0 e tratadas no Grapher 4.0 para cada seção e cada tamanho de bloco rochoso são apresentados e discutidos no itens 3.5 e 3.6.

### 3.5 Teoria do caos aplicada ao estudo preliminar de queda de blocos

Para possibilitar a aplicação da teoria do caos ao estudo de caso do corte do Morro do Cantagalo – RJ, executou-se a investigação da hipótese de que o movimento de queda de blocos rochosos atende as principais características de um sistema não-linear (caótico – fortemente ou fracamente) em um estudo preliminar e assim, após esse processo de investigação, validar a teoria pretendida para este tipo de movimento de massa nas condições em questão. Finalmente, a teoria é aplicada ao estudo de caso apresentado.

### 3.5.1 Caso C1

O primeiro modelo numérico a ser apresentado – Caso C1, é composto por uma encosta de gnaiss facoidal de geometria simplificada com a superfície globalmente côncava, porém com um trecho central levemente convexo, perfil este baseado em um dos tutoriais fornecidos pelo programa RocFall 6.0, conforme o recorte da Figura 39.

A seção da encosta do caso C1 possui 14,43 m de altura por 41,50 m de comprimento. Ao longo de sua extensão, percebe-se que ocorre uma articulação de transição suave entre o perfil da encosta e o nível de base alongada. Durante as simulações realizadas com o programa RocFall 6.0, pôde-se observar que, no caso C1, os movimentos predominantes descritos pelos blocos rochosos BIP, BIM e BIG foram de rolamento, deslizamento e salto.

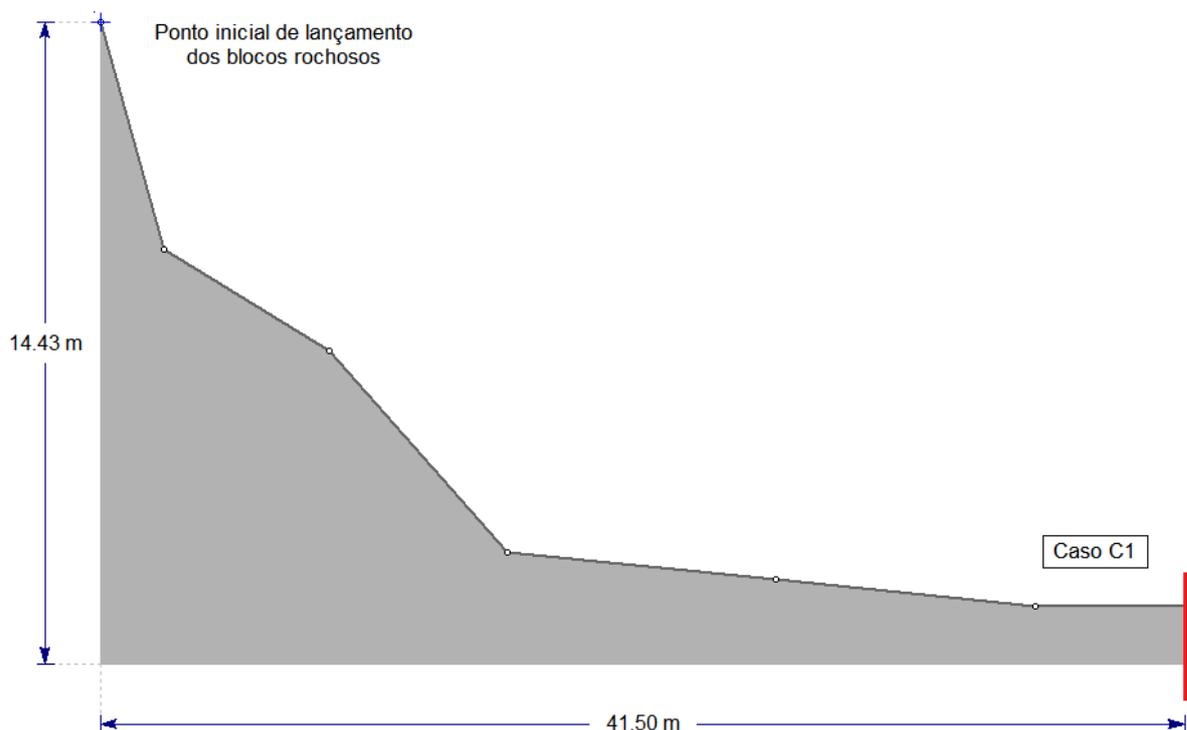


Figura 39 – Geometria da encosta rochosa – Caso C1 (sem escala)

Os resultados obtidos pelos ajustes das distribuições de probabilidade da trajetória-alcance realizados a partir das simulações do caso C1 no programa RocFall 6.0 para os blocos BIP, BIM e BIG com a teoria do caos são apresentadas na Figura 40 a Figura 45.

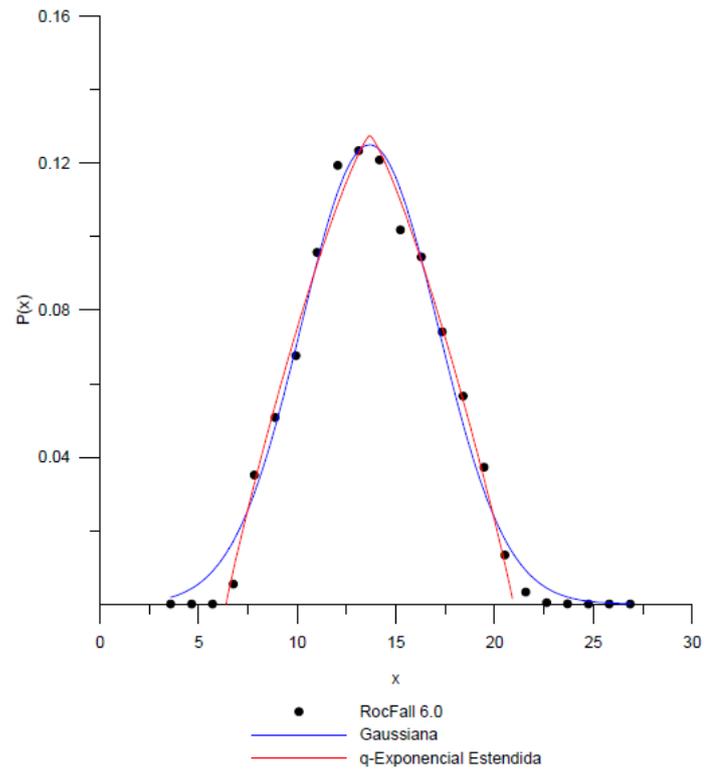


Figura 40 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BIP

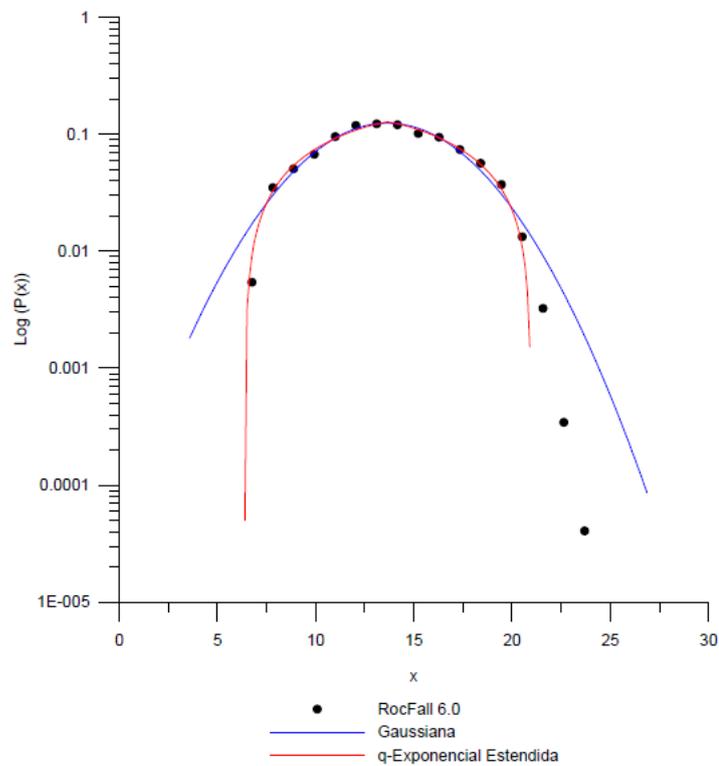


Figura 41 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BIP

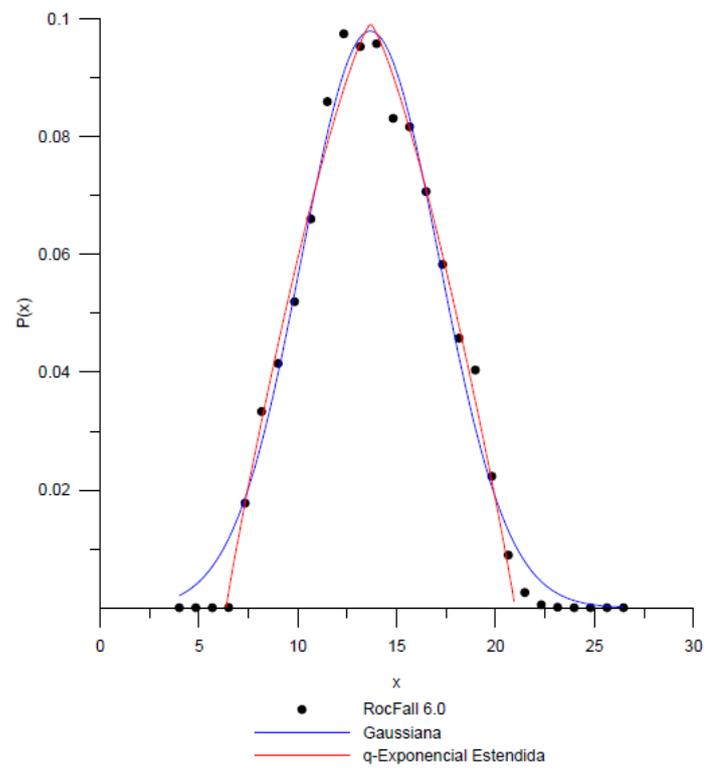


Figura 42 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BIM

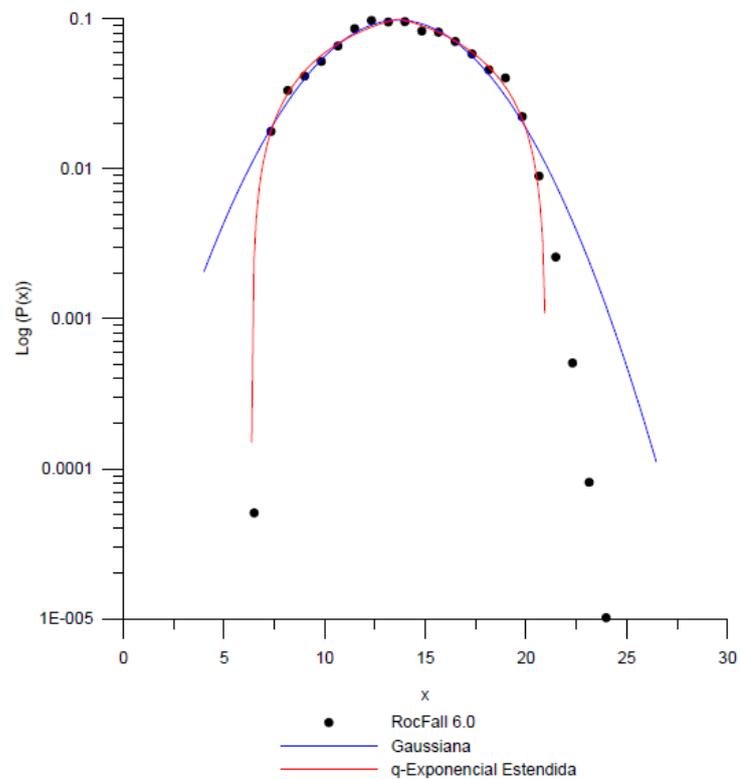


Figura 43 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BIM

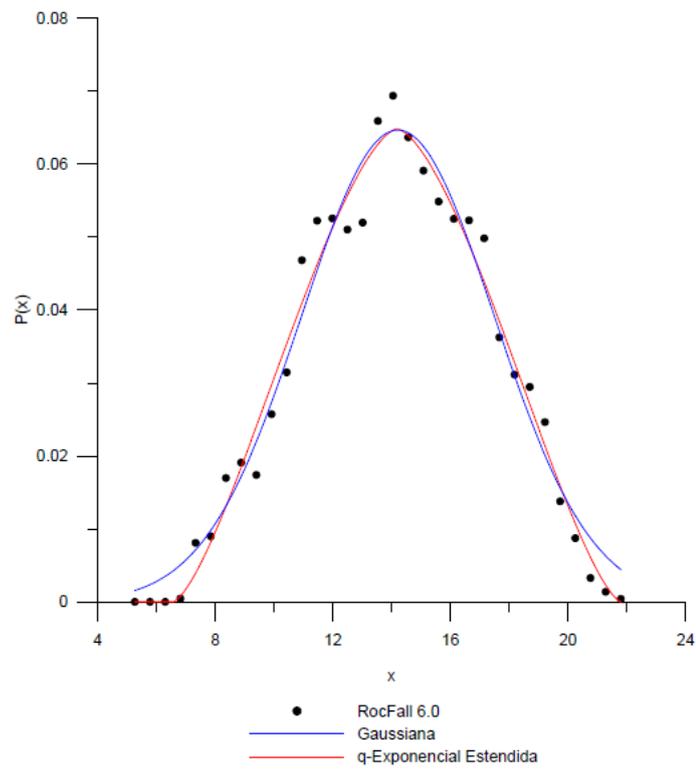


Figura 44 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BIG

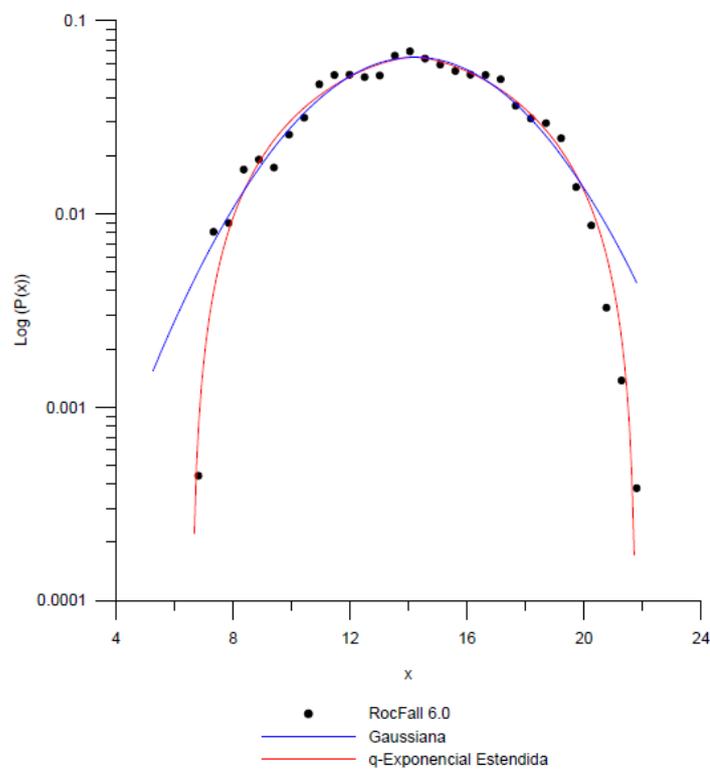


Figura 45 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BIG

A fim de se compilar os dados obtidos nos ajustes estatísticos, a Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam os resultados gerais obtidos pelos ajustes estatísticos do caso C1 para as distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, respectivamente.

Tabela 7 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C1 (distribuição de probabilidade gaussiana)

		Caso C1				
		Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
			a	b	c	R <sup>2</sup>
<b>Gaussiana</b>	<b>BIP</b>	0,1250	4,8956	13,6603	0,9864	
	<b>BIM</b>	0,0979	4,9167	13,6636	0,9835	
	<b>BIG</b>	0,0646	4,6254	14,2087	0,9688	

Tabela 8 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C1 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida)

		Caso C1					
		Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade				Coefficiente de correlação
			q	$\delta$	a'	b'	c'
<b>q-Exponencial Estendida</b>	<b>BIP</b>	-0,0577	1,6167	0,1277	7,6181	13,6729	0,9940
	<b>BIM</b>	-0,0489	1,5675	0,0992	7,5860	13,6769	0,9921
	<b>BIG</b>	0,3467	1,2719	0,0647	5,8479	14,1900	0,9768

Para uma melhor visualização dos ajustes dos dados experimentais, o gráfico da Figura 46 apresenta os resultados das distribuições de probabilidade alinhados ao longo de uma reta de coeficiente angular 1 (Equação da reta de ajuste caso C1:  $y = -0,9898x - 0,0055$ ;  $R^2 = 0,9767$ ). Neste gráfico pode-se distinguir pontos experimentais vermelhos e pretos, relacionados aos ramos esquerdo e direito respectivamente, contados a partir dos pontos máximos das distribuições probabilísticas q-exponenciais estendidas. Ressalta-se que os dados apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8, sugerem que a diferença de tamanho entre os blocos não influenciam suficientemente

os resultados das distribuições de probabilidade do caso C1. Portanto, para este caso, optou-se por utilizar os resultados obtidos com o bloco de tamanho BIG.

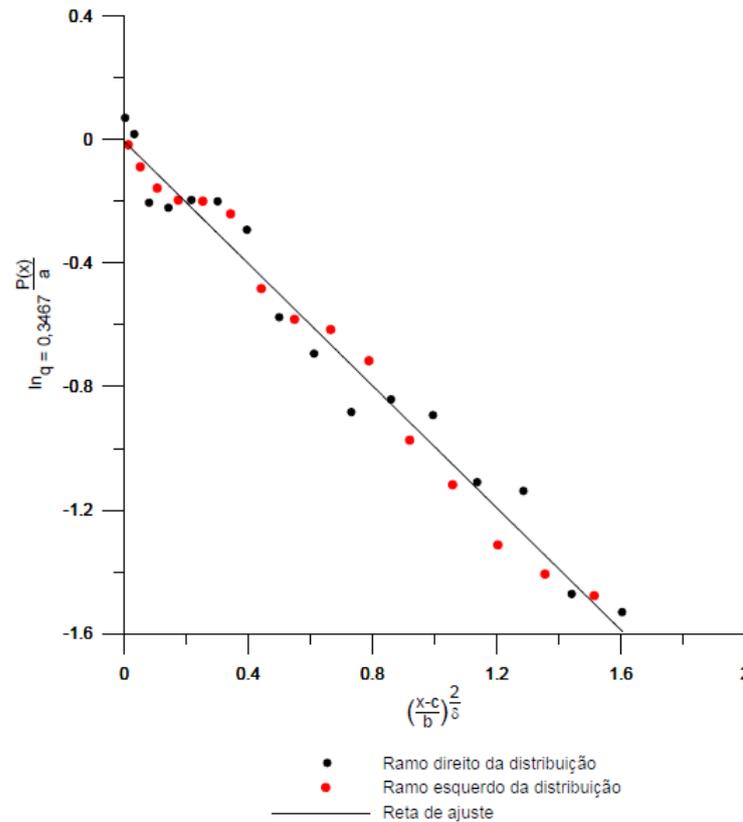


Figura 46 – Gráfico  $\ln_q(P(x)/a')$  versus  $((x-c)/b)^{2/\delta}$  – Caso C1 – Bloco BIG

Por meio dos gráficos dos ajustes estatísticos da trajetória-alcance dos blocos BIP, BIM e BIG e dos coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida do caso C1, é possível verificar que, apesar da proximidade do ajuste entre as duas distribuições, a distribuição q-exponencial estendida apresenta uma tendência a melhores resultados de ajuste. Para tal, seria necessário um número extremamente elevado de simulações para compor o espaço amostral do método de Monte-Carlo. Entretanto, o programa RocFall 6.0 apresentou grandes limitações neste quesito, apesar da pesquisa apresentada por GEO-RIO (2014) *apud* Rocha (2009) (Tabela 3) sugerir que o programa tem um número de blocos ilimitados, e conseqüentemente de simulações.

Desta forma, visto que a distribuição de probabilidade q-exponencial estendida proporciona um ajuste estatístico mais fidedigno, pode-se dizer que a seção de encosta do caso C1 apresenta comportamento fracamente caótico (complexidade).

### 3.5.2 Caso C2

O segundo modelo numérico – Caso C2, é composto por uma encosta de gnaiss facoidal de superfície acentuadamente convexa e com a geometria mais refinada em relação ao caso C1. Assim como o caso C1, o caso C2 também foi baseado em um dos tutoriais do programa RocFall 6.0, como ilustra o recorte da Figura 47.

A seção da encosta possui 45,00 m de altura por 100,00 m de comprimento e ao longo de sua extensão, pode-se perceber que ocorre uma articulação de transição suave entre o perfil da encosta e o nível de base alongada. Durante as simulações no programa RocFall 6.0, pôde-se observar que, no caso C2, os movimentos predominantes descritos pelos blocos rochosos BIP, BIM e BIG foram o rolamento, o deslizamento e o salto.

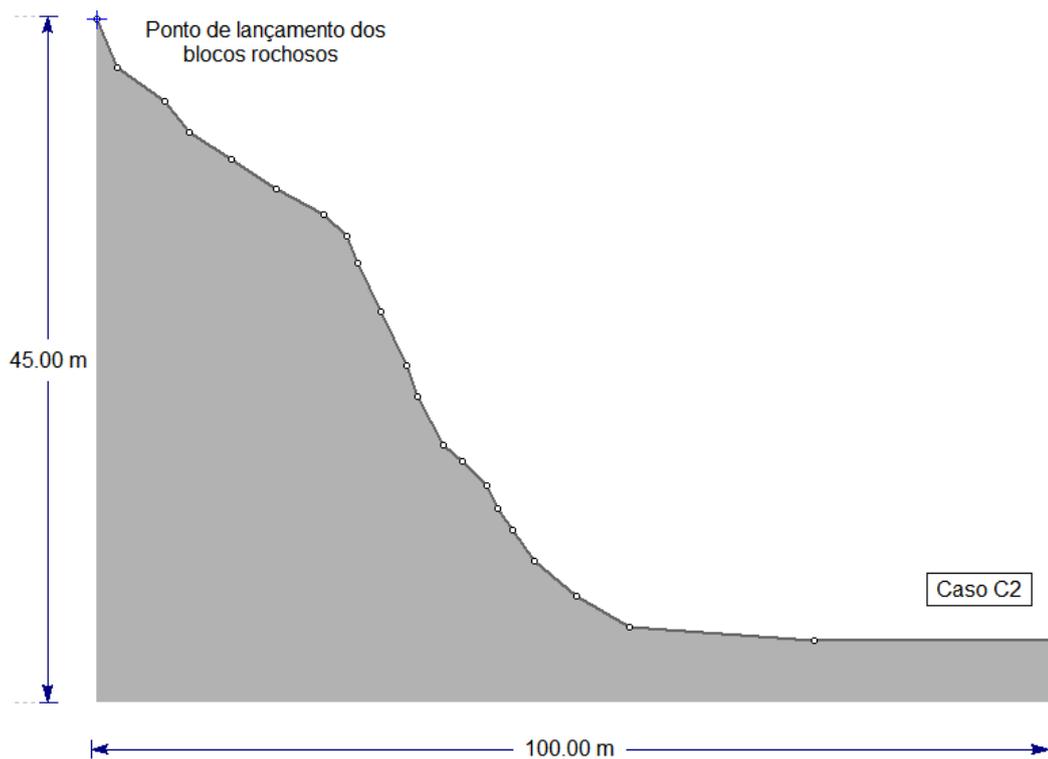


Figura 47 – Geometria da encosta rochosa – Caso C2 (sem escala)

Os resultados obtidos pelos ajustes das distribuições de probabilidade da trajetória-alcance realizados a partir das simulações do caso C2 no programa RocFall 6.0 para os blocos BIP, BIM e BIG com a teoria do caos são apresentadas na Figura 48 a Figura 53.

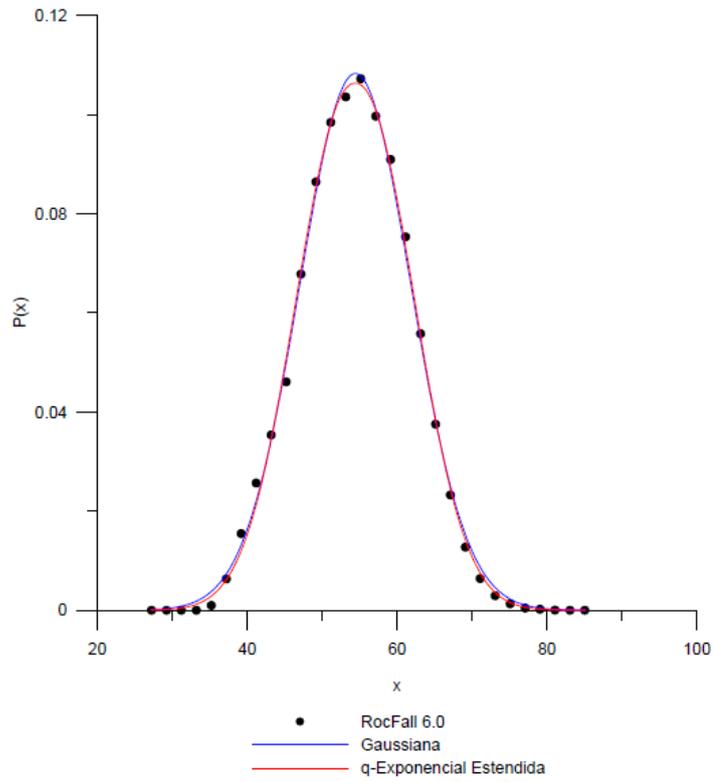


Figura 48 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BIP

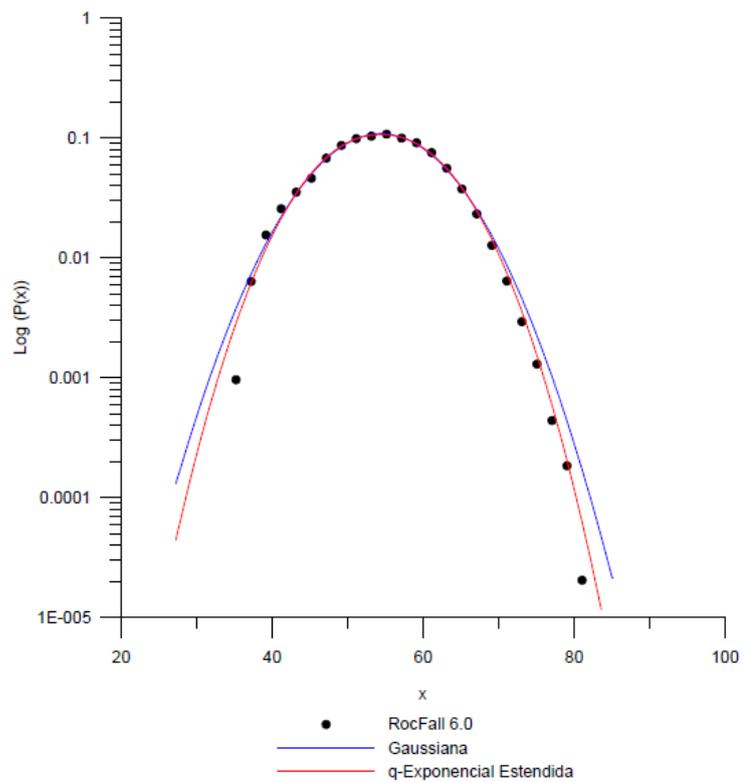


Figura 49 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BIP

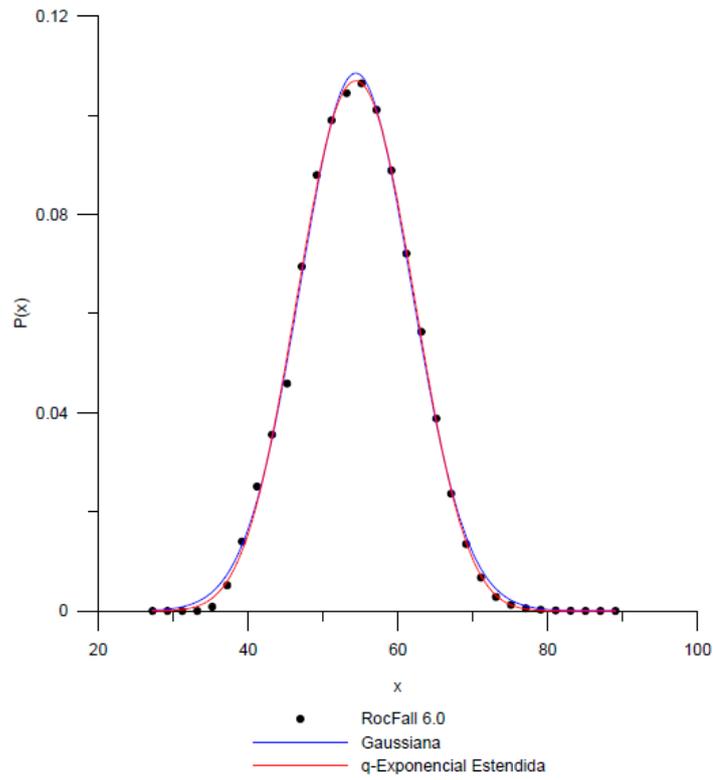


Figura 50 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BIM

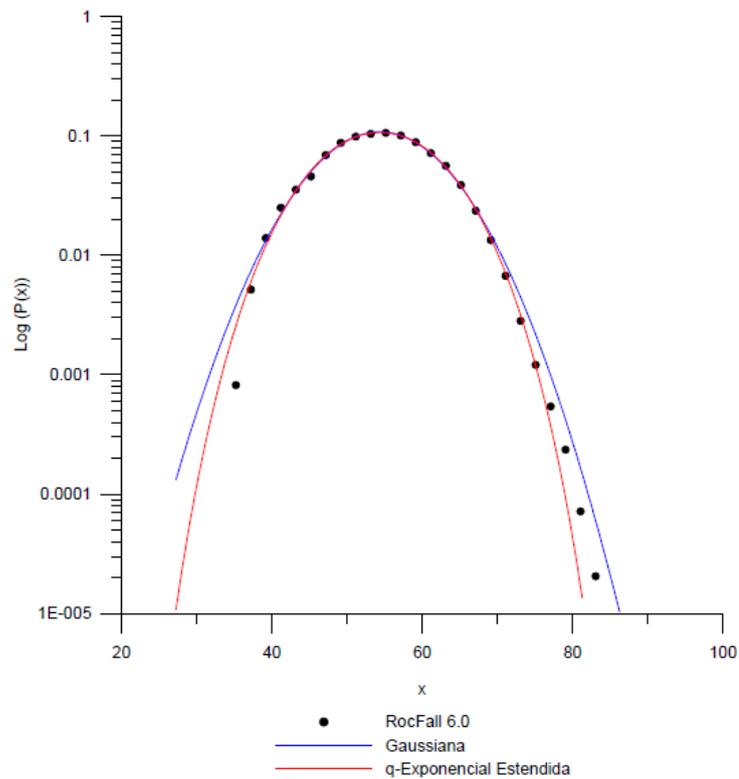


Figura 51 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BIM

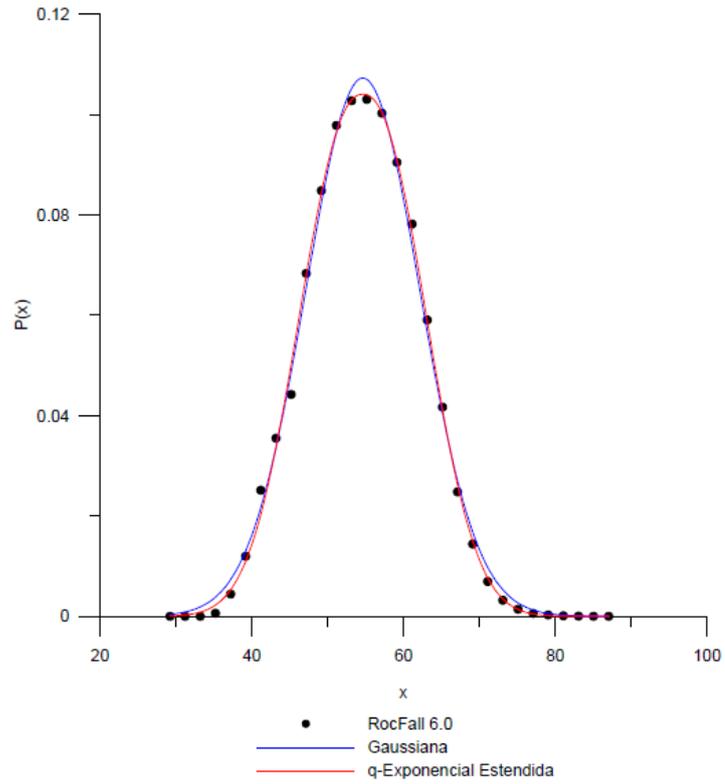


Figura 52 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BIG

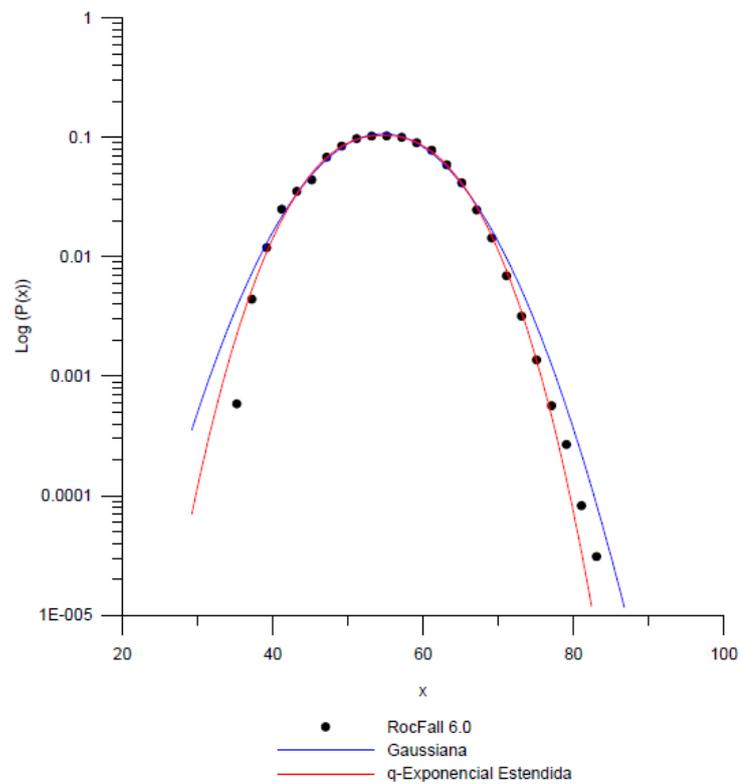


Figura 53 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BIG

Como no caso C1, a Tabela 9 e a Tabela 10 compilam os dados gerais resultantes dos ajustes estatísticos do caso C2 para a distribuição de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, respectivamente.

Tabela 9 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C2 (distribuição de probabilidade gaussiana)

		Caso C2				
		Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
			a	b	c	R <sup>2</sup>
Gaussiana	<b>BIP</b>	0,1083	10,4856	54,4303	0,9976	
	<b>BIM</b>	0,1085	10,4728	54,3761	0,9981	
	<b>BIG</b>	0,1073	10,6303	54,6382	0,9965	

Tabela 10 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C2 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida)

		Caso C2					
		Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade				Coefficiente de correlação
			q	δ	a'	b'	c'
q-Exponencial Estendida	<b>BIP</b>	0,9906	0,9303	0,1064	10,6417	54,4267	0,9982
	<b>BIM</b>	0,9265	0,9680	0,1069	10,8133	54,3756	0,9987
	<b>BIG</b>	0,9803	0,8826	0,1041	10,9006	54,6392	0,9982

Assim como no caso C1, para uma melhor visualização dos ajustes dos dados experimentais, o gráfico da Figura 54 apresenta os resultados das distribuições de probabilidade alinhados ao longo de uma reta de coeficiente angular 1 (Equação da reta de ajuste caso C2:  $y = - 1,0318x + 0,0246$ ;  $R^2 = 0,9969$ ). Neste gráfico pode-se distinguir os pontos experimentais vermelhos e pretos, relacionados aos ramos esquerdo e direito respectivamente, contados a partir dos pontos máximos das distribuições probabilísticas q-exponenciais estendidas.

Os dados apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10, também sugerem que a diferença de tamanho entre os blocos BIP, BIM e BIG não influenciam suficientemente

os resultados das distribuições de probabilidade do caso C2. Portanto, para este caso, optou-se por utilizar os resultados obtidos com o bloco de tamanho BIP.

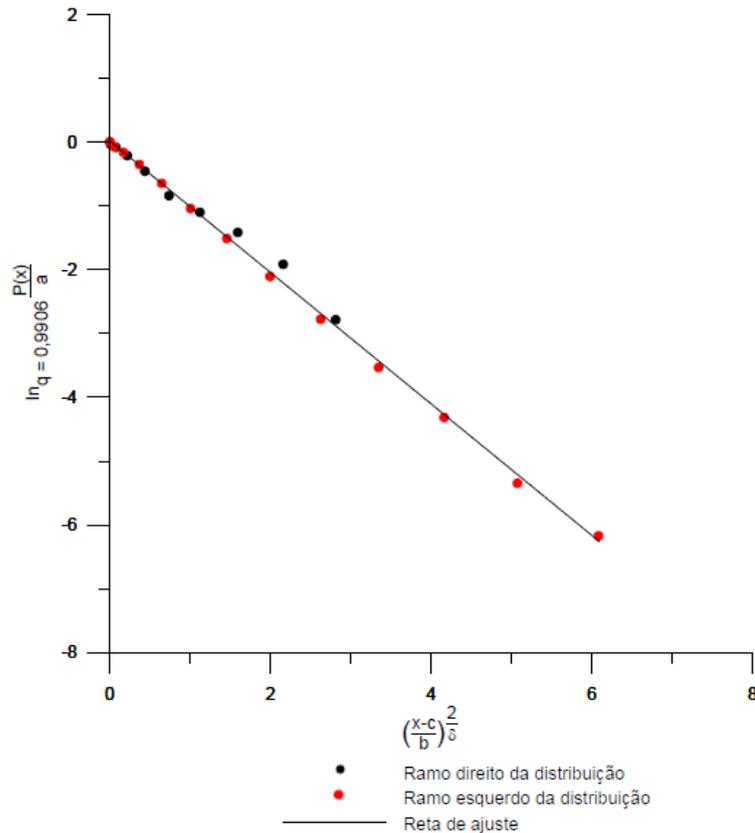


Figura 54 – Gráfico  $\ln_q(P(x)/a')$  versus  $((x-c')/b')^{2/\delta}$  – Caso C2 – Bloco BIP

Repetindo o processo de análise realizado para o caso C1, com os gráficos dos ajustes estatísticos da trajetória-alcance dos blocos BIP, BIM e BIG e dos coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida do caso C2 (Tabela 9 e Tabela 10), verifica-se uma proximidade muito grande entre os ajustes duas distribuições.

Contudo, ao observar as variáveis da distribuição  $q$  e  $\delta$ , percebe-se sua proximidade do valor 1. Isto quer dizer que a distribuição de probabilidade q-exponencial estendida está convergindo para a distribuição de probabilidade gaussiana – tal qual as formulações apresentadas no Capítulo 3. Sendo assim, esta distribuição é a que melhor representa a estatística das quedas de blocos na seção de encosta do caso C2, indicando comportamento fortemente caótico, ou caos forte.

### 3.5.3 Caso C3

O terceiro modelo numérico – Caso C3, é composto por uma encosta de gnaiss facoidal de superfície acentuadamente convexa e com uma geometria mais refinada tal qual o Caso C2. Entretanto este caso, representado pelo recorte da Figura 55, é similar a um evento real ocorrido em abril de 2018 na Pedra do Elefante, distrito de Banquete, Município de Bom Jardim – RJ.

A seção da encosta possui 81,89 m de altura por 216,80 m de comprimento e a articulação de transição entre o perfil da encosta e o nível de base alongada também é suave. Durante as simulações no programa RocFall 6.0, pôde-se observar que, no caso C3, os movimentos predominantes descritos pelos blocos rochosos BIP, BIM e BIG foram a queda livre, o rolamento e o salto.

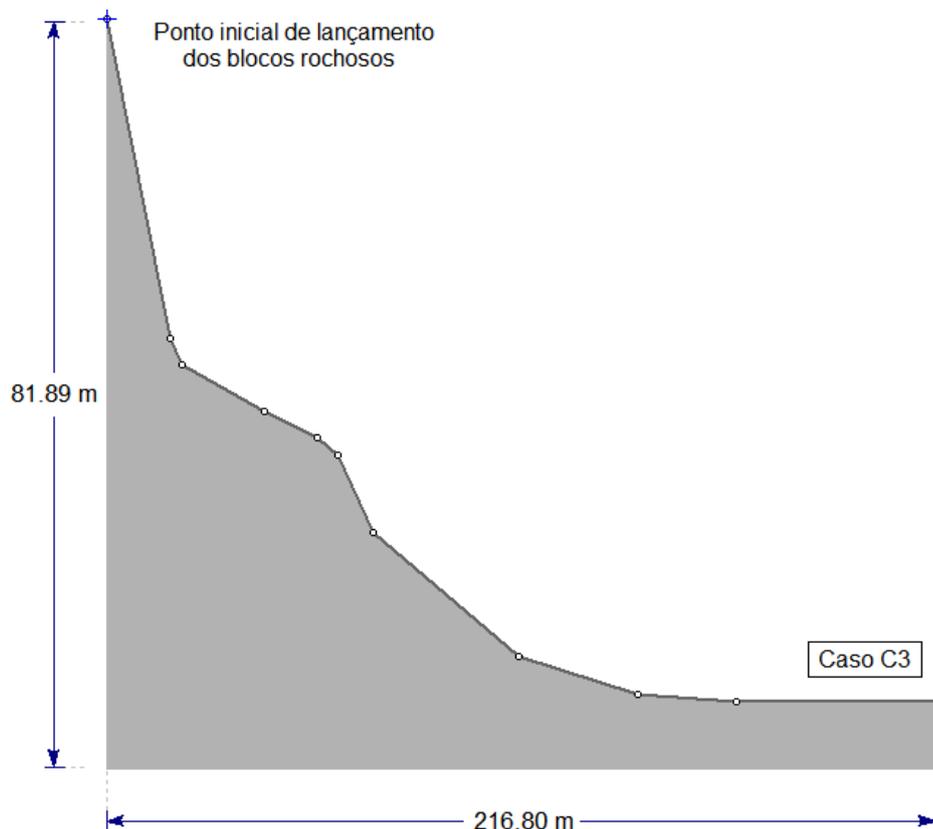


Figura 55 – Geometria da encosta rochosa – Caso C3 (sem escala)

Os resultados obtidos pelos ajustes das distribuições de probabilidade da trajetória-alcance realizados a partir das simulações do caso C3 no programa RocFall 6.0 para os blocos BIP, BIM e BIG com a teoria do caos são apresentadas na Figura 56 a Figura 61.

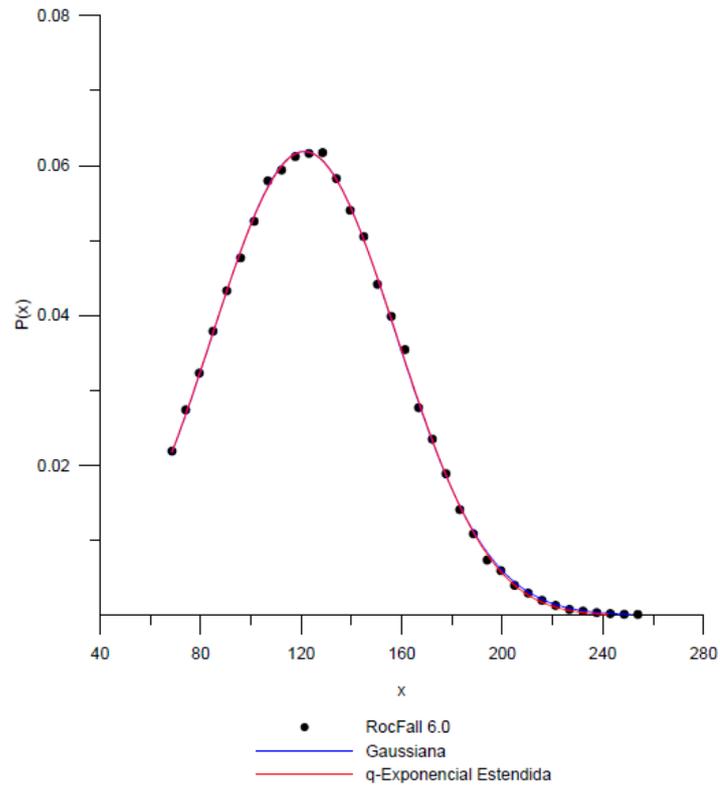


Figura 56 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BIP

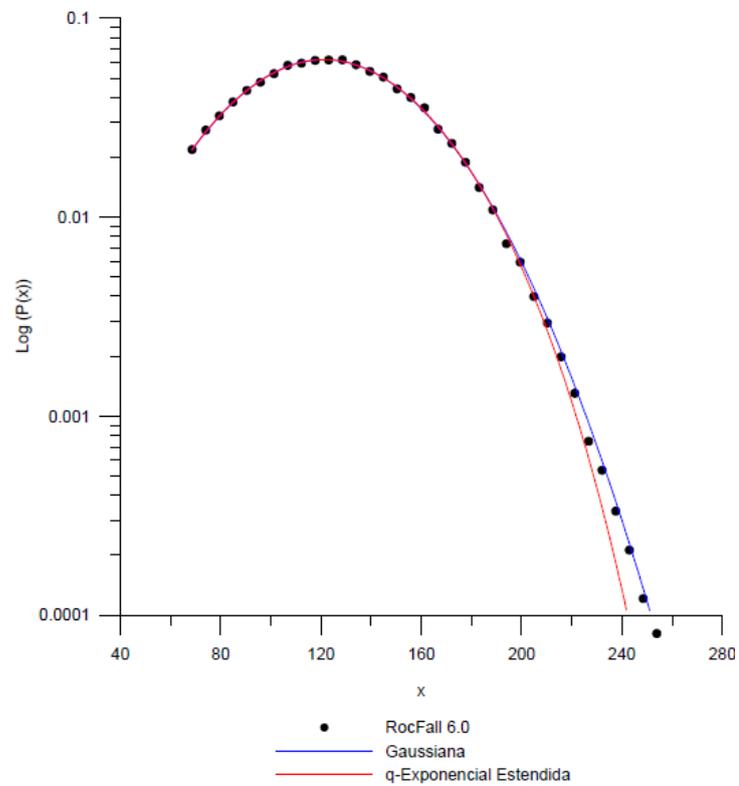


Figura 57 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BIP

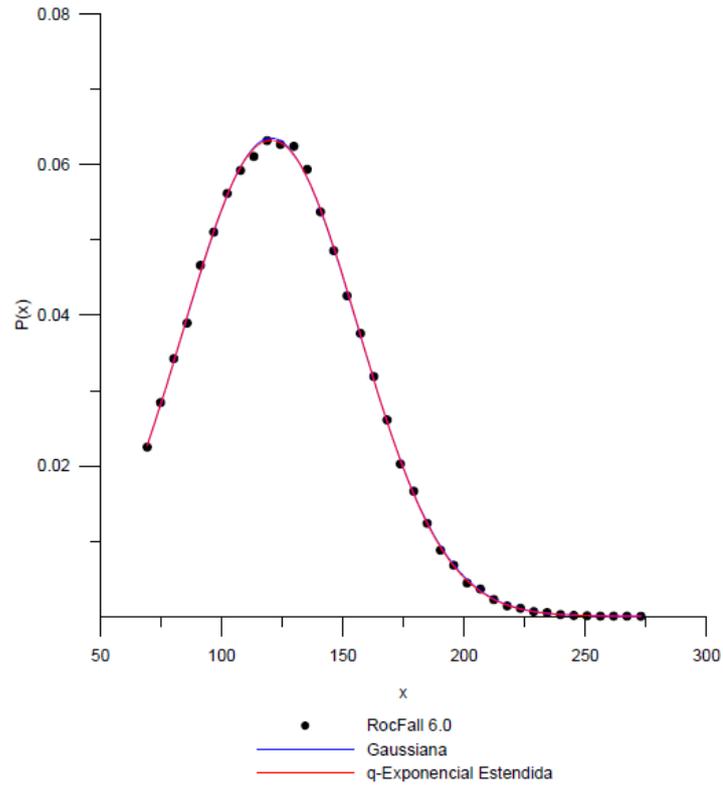


Figura 58 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BIM

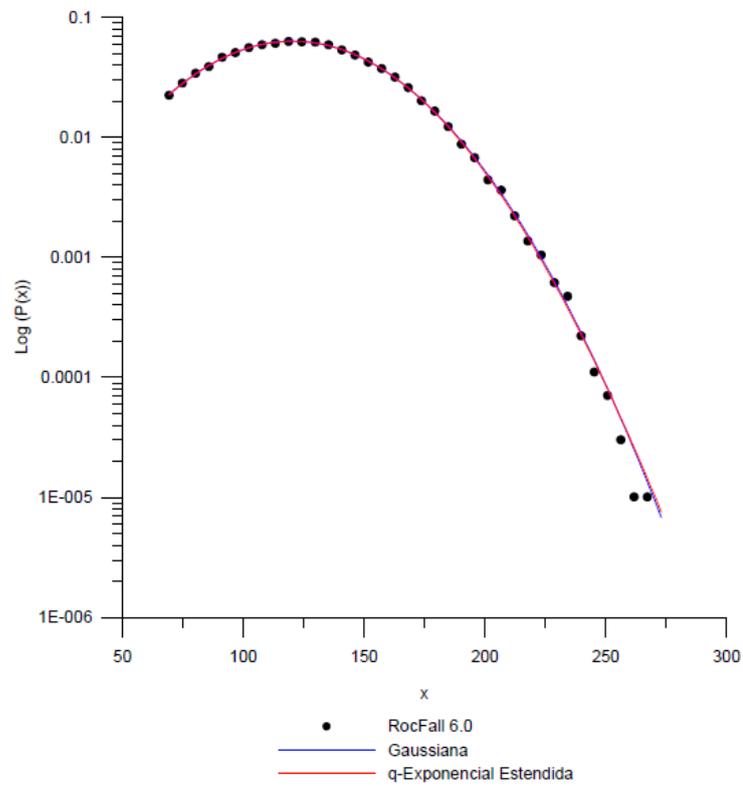


Figura 59 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BIM

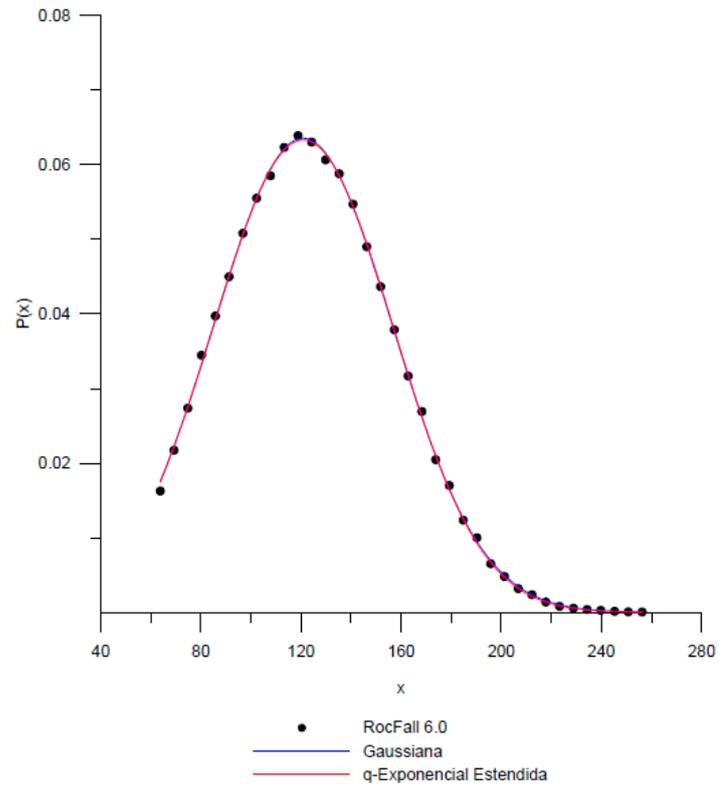


Figura 60 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BIG

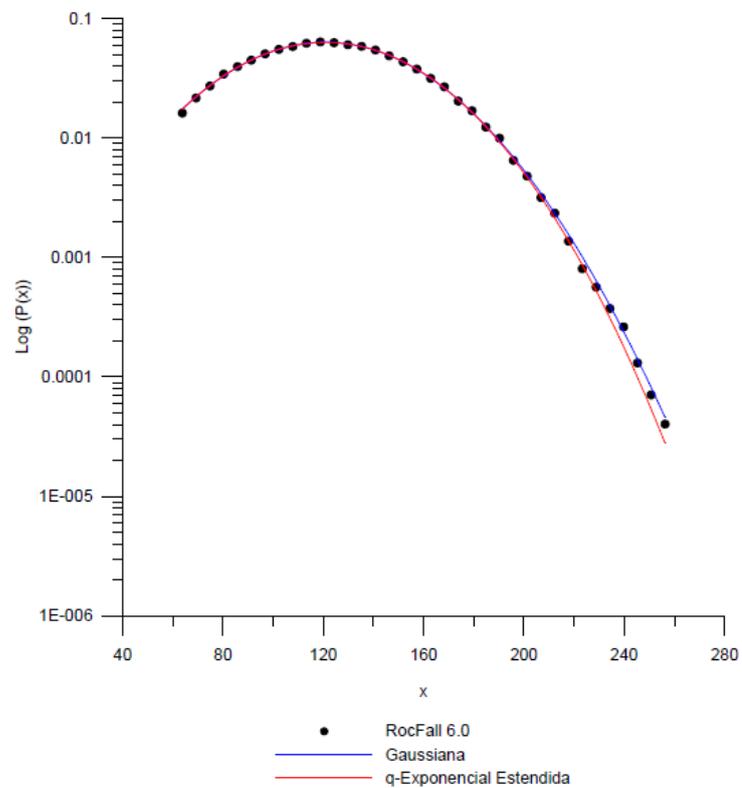


Figura 61 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BIG

Cabe ressaltar que os dados experimentais e as distribuições de probabilidade do caso C3 apresentadas anteriormente encontram-se propositalmente truncados, em razão da influência da inclinação da encosta junto ao platô horizontal, na região de articulação do perfil C3 ao seu nível de base, alterando a posição final dos blocos rolados nesta região e deformando acentuadamente a estatística do fenômeno.

A Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os resultados gerais dos ajustes estatísticos do caso C3 para a distribuição de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, respectivamente.

Tabela 11 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C3 (distribuição de probabilidade gaussiana)

		Caso C3				
		Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
			a	b	c	R <sup>2</sup>
<b>Gaussiana</b>	<b>BIP</b>	0,0618	51,4413	121,2068	0,9994	
	<b>BIM</b>	0,0635	50,4913	120,3660	0,9996	
	<b>BIG</b>	0,0635	50,3423	120,8341	0,9995	

Tabela 12 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C3 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida)

		Caso C3					
		Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade				Coefficiente de correlação
			q	$\delta$	a'	b'	c'
<b>q-Exponencial Estendida</b>	<b>BIP</b>	0,9249	1,023	0,0618	52,5824	121,2521	0,9995
	<b>BIM</b>	1,0178	0,9723	0,0632	50,3215	120,3945	0,9996
	<b>BIG</b>	0,9876	0,9854	0,0633	50,605	120,8701	0,9996

O gráfico da Figura 62 apresenta as distribuições de probabilidade alinhadas ao longo de uma reta de coeficiente angular 1 (Equação da reta de ajuste do caso C3:  $y = - 1,0452x + 0,0302$ ;  $R^2 = 0,9946$ ) para uma melhor visualização dos resultados

obtidos, onde os pontos experimentais vermelhos e pretos, são relacionados aos ramos esquerdo e direito respectivamente.

Os dados da Tabela 11 e da Tabela 12 também sugerem, tal qual os casos anteriores, que a diferença de tamanho entre os blocos não influencia suficientemente os resultados das distribuições de probabilidade do caso C3. Sendo assim, para representar este caso, optou-se por utilizar os resultados obtidos com o bloco de tamanho BIM.

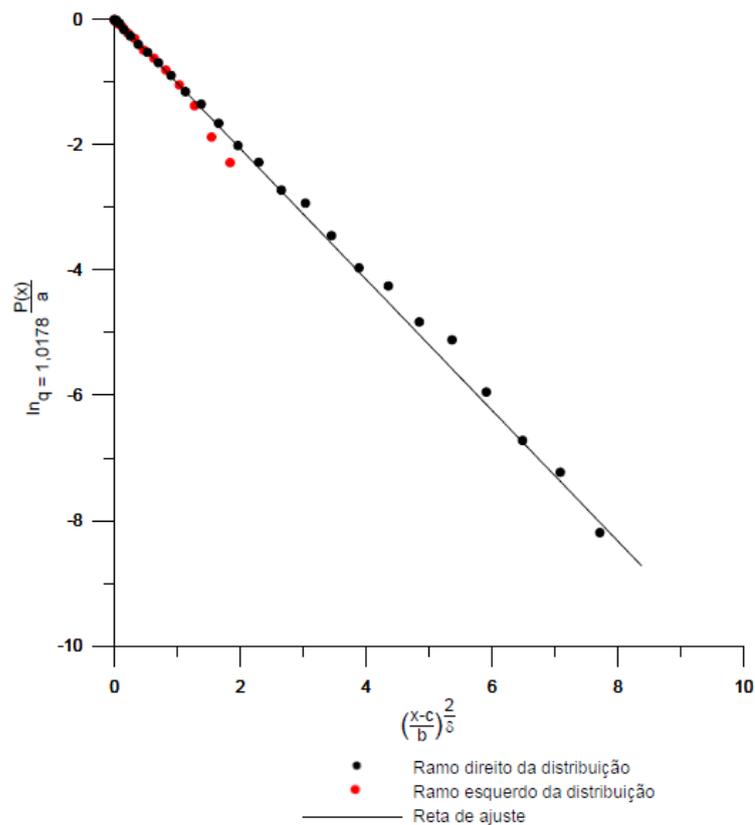


Figura 62 – Gráfico  $\ln_q(P(x)/a)$  versus  $((x-c)/b)^{2/\delta}$  – Caso C3 – Bloco BIM

Como nos casos C1 e C2, os gráficos de ajustes estatísticos da trajetória-alcance dos blocos BIP, BIM e BIG e os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial do caso C3, apresentam uma proximidade muito grande entre os ajustes das duas distribuições. Entretanto, como observado no caso C2, as variáveis  $q$  e  $\delta$  da distribuição q-exponencial estendida do caso C3 apresentam a mesma convergência para o valor 1 e conseqüentemente para a distribuição de probabilidade gaussiana.

Sendo assim, verifica-se que tal qual o caso C2, a distribuição gaussiana é a que melhor representa a estatística das quedas de blocos do caso C3, indicando comportamento fortemente caótico, ou caos forte.

#### 3.5.4 Caso C4

Por fim, encerrando o estudo preliminar desta pesquisa, a Figura 63 apresenta o quarto modelo numérico – Caso C4. O caso C4 é composto por uma encosta de gnaiss facoidal de geometria simples tal qual o caso C1, sofrendo apenas algumas alterações, mas que ainda o mantém como um perfil de superfície côncava.

A seção da encosta possui 15,72 m de altura por 49,16 m de comprimento e neste caso, a articulação de transição entre o perfil e a base alongada também é suave, como nos casos anteriores. Durante as simulações no programa RocFall 6.0, pôde-se observar que, no caso C4, os movimentos predominantes descritos pelos blocos rochosos BIP, BIM e BIG foram similares ao do caso C3: queda livre, rolamento e salto.

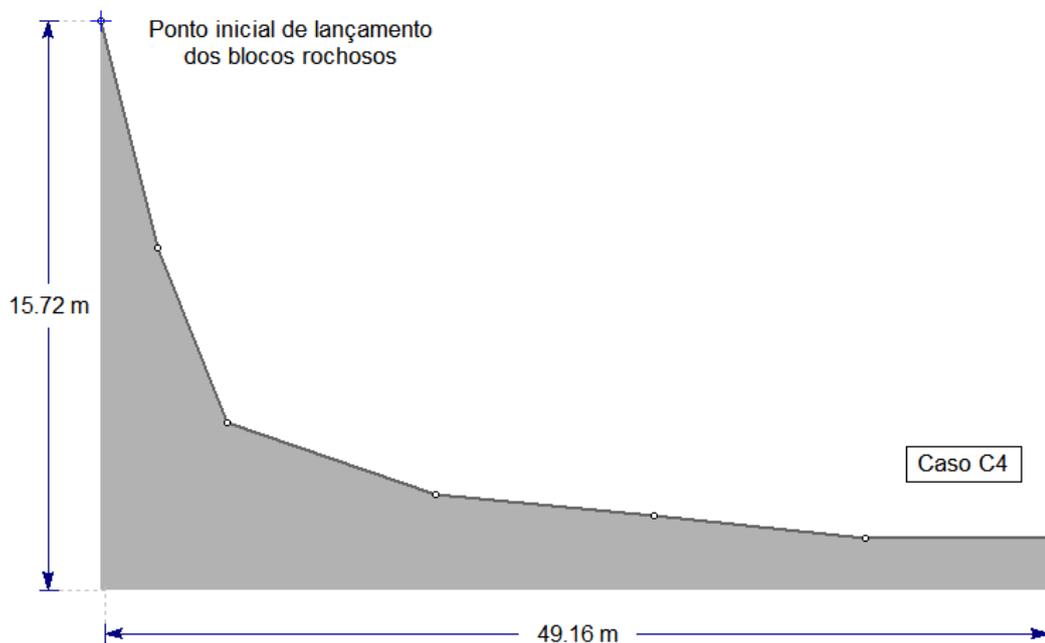


Figura 63 – Geometria da encosta rochosa – Caso C4 (sem escala)

Os resultados obtidos pelos ajustes das distribuições de probabilidade da trajetória-alcance realizados a partir das simulações do caso C4 no programa RocFall 6.0 para os blocos BIP, BIM e BIG com a teoria do caos são apresentados na Figura 64 a Figura 69.

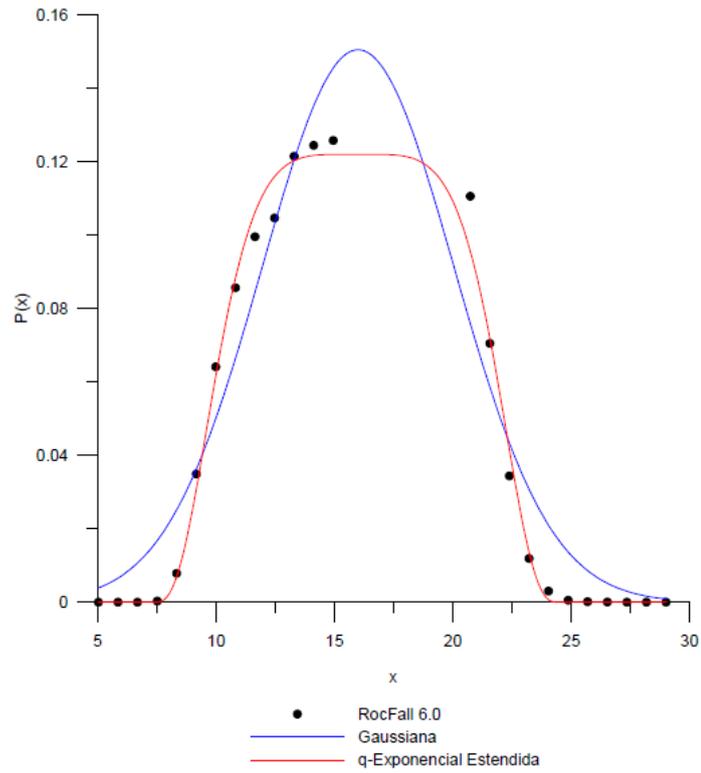


Figura 64 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BIP

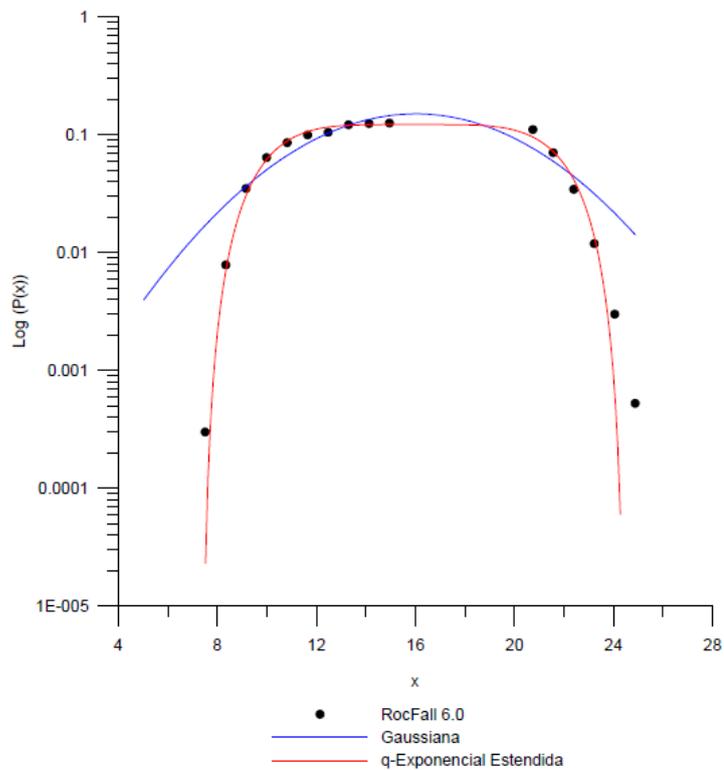


Figura 65 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BIP

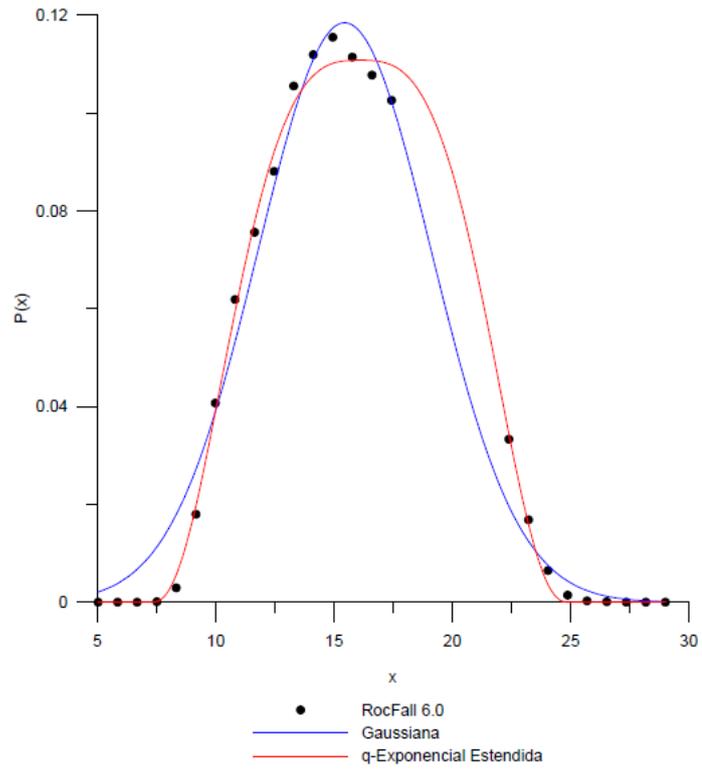


Figura 66 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BIM

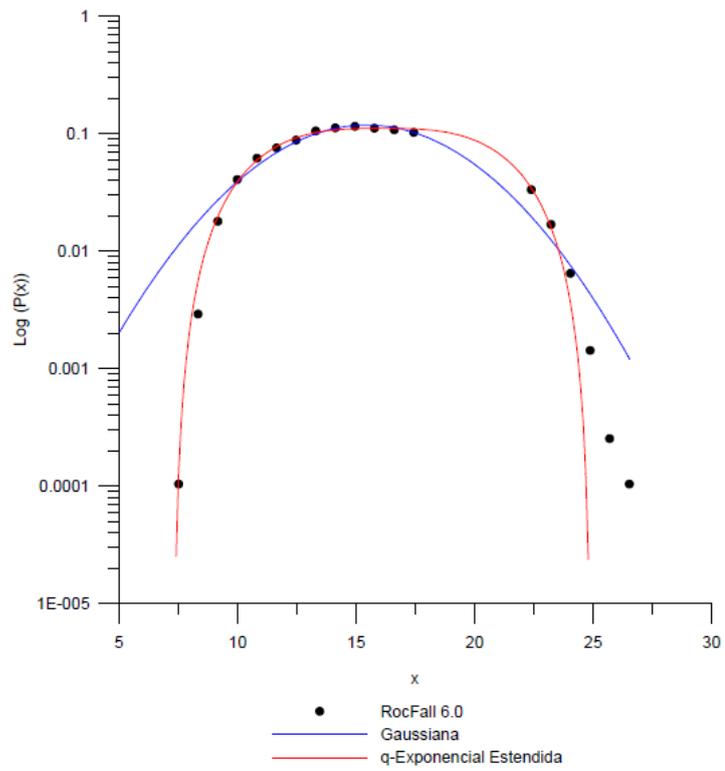


Figura 67 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BIM

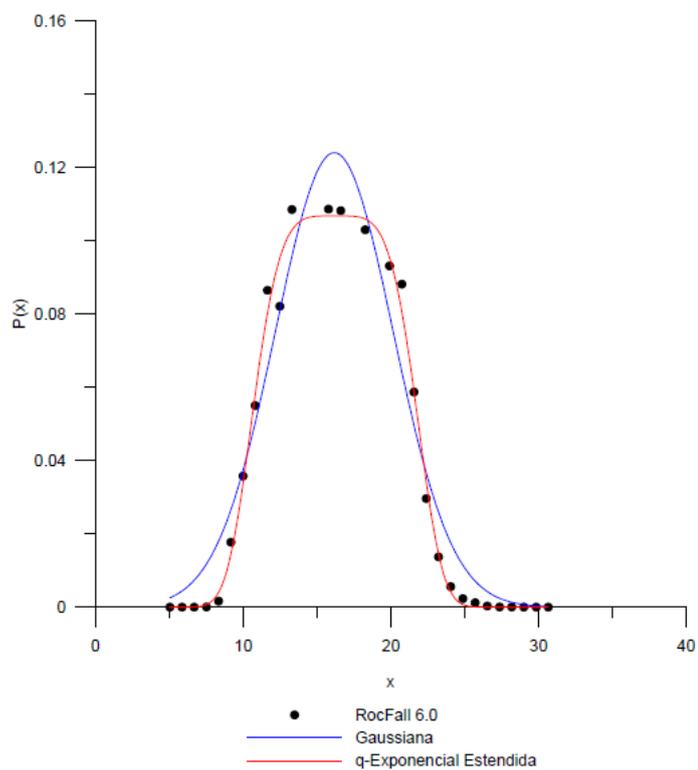


Figura 68 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BIG

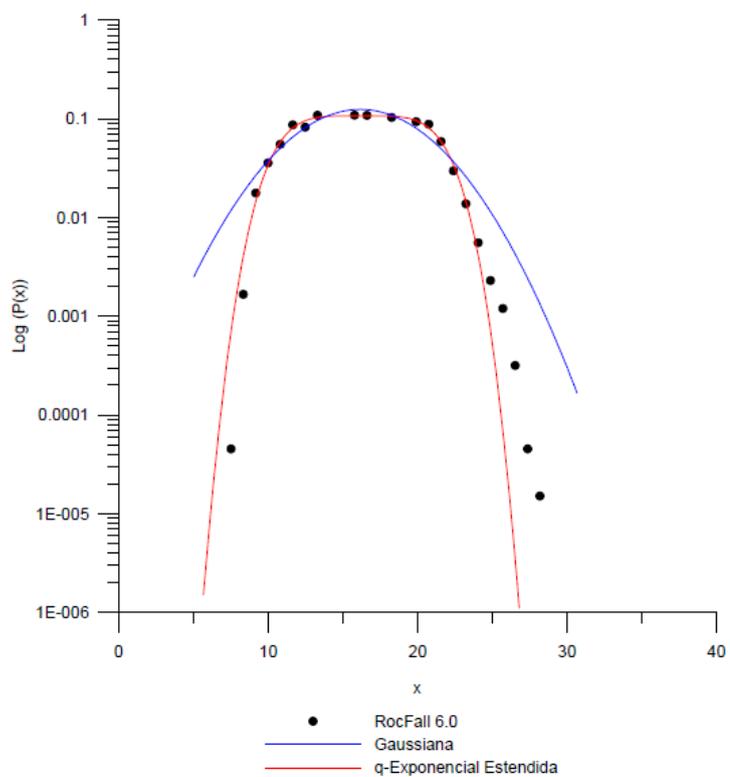


Figura 69 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BIG

A Tabela 13 e a Tabela 14 apresentam os resultados gerais dos ajustes estatísticos do caso C4 para a distribuição de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, respectivamente.

Tabela 13 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C4 (distribuição de probabilidade gaussiana)

Gaussiana	Caso C4				
	Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coeficiente de correlação
		a	b	c	
	<b>BIP</b>	0,1505	5,7314	16,002	0,9215
	<b>BIM</b>	0,1184	5,1797	15,4512	0,9816
	<b>BIG</b>	0,1240	5,6423	16,1675	0,9402

Tabela 14 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Caso C4 (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida)

q-Exponencial Estendida	Caso C4						
	Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade				Coeficiente de correlação	
		q	$\delta$	a'	b'		c'
	<b>BIP</b>	0,7013	0,4319	0,1220	6,5867	15,9253	0,9909
	<b>BIM</b>	0,6150	0,6624	0,1107	6,4231	16,1018	0,9966
	<b>BIG</b>	1,0242	0,4404	0,1067	6,0054	16,2007	0,9925

O gráfico da Figura 70 apresenta as distribuições de probabilidade alinhadas ao longo de uma reta de coeficiente angular 1 (Equação da reta de ajuste do caso C4:  $y = -0,9800x - 0,0016$ ;  $R^2 = 0,9944$ ) para uma melhor visualização dos resultados obtidos, onde os pontos experimentais vermelhos e pretos, são relacionados aos ramos esquerdo e direito respectivamente.

Os dados da Tabela 13 e da Tabela 14 também sugerem, tal qual os casos anteriores, que a diferença de tamanho entre os blocos BIP, BIM e BIG não influencia suficientemente os resultados das distribuições de probabilidade do caso C4.

Portanto, para representar este caso, optou-se por utilizar os resultados obtidos com o bloco de tamanho BIP.

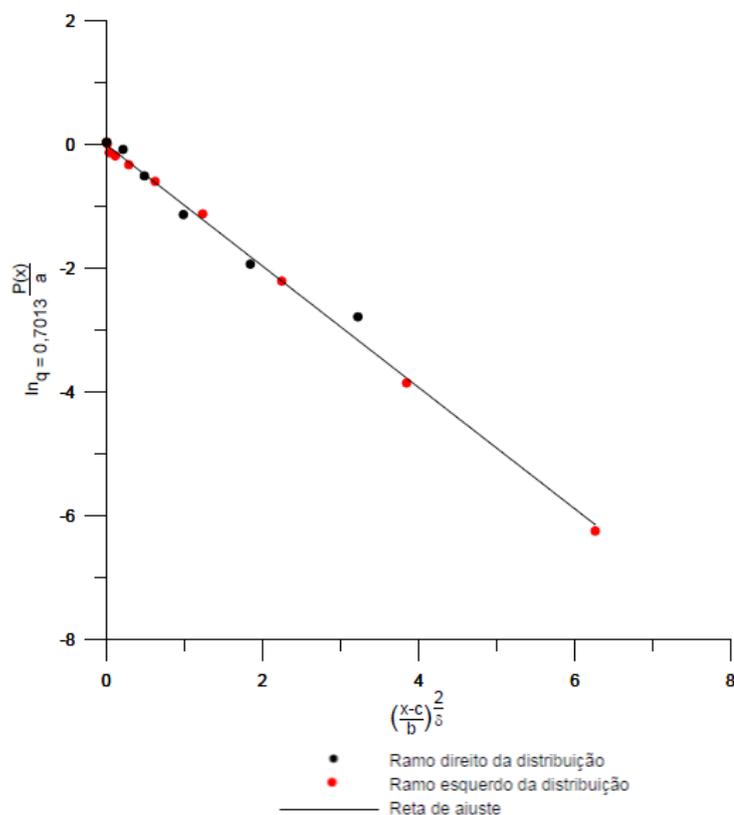


Figura 70 – Gráfico  $\ln_q(P(x)/a')$  versus  $((x-c')/b')^{2/\delta}$  – Caso C4 – Bloco BIP

Assim como nos demais casos anteriores, os gráficos de ajustes estatísticos da trajetória-alcance dos blocos BIP, BIM e BIG e os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial do caso C4, apresentam uma proximidade muito grande entre os ajustes das duas distribuições. Entretanto, como observado no caso C1, a distribuição de probabilidade q-exponencial estendida apresenta uma maior tendência a melhores resultados de ajuste.

Neste caso também foi possível observar a necessidade de um número extremamente elevado de simulações para compor o espaço amostral do método de Monte-Carlo, número este prejudicado pelas limitações apresentadas pelo programa RocFall 6.0, adotado na presente pesquisa.

Sendo assim, verifica-se que tal qual o caso C1, a distribuição q-exponencial estendida é a que melhor representa a estatística das quedas de blocos na seção de

encosta do caso C4, indicando comportamento fracamente caótico, ou caos fraco (complexidade).

### 3.5.5 Considerações acerca do estudo preliminar

O estudo preliminar realizado para a verificação da aplicabilidade da teoria do caos no movimento de massa do tipo queda de blocos permitiu algumas constatações importantes, expostas a seguir.

Apesar de ser robusto, de interface simplificada e de fácil utilização e entrada de dados, o programa RocFall 6.0 foi um agente limitante no que diz respeito ao número máximo de simulações de trajetórias. O programa permite simular apenas 100.000 trajetórias de quedas de blocos apesar de a empresa RocScience e da pesquisa apresentada por GEO-RIO (2014) *apud* Rocha (2009) (Tabela 3) indicarem que o programa tem um número de blocos ilimitados, e conseqüentemente de simulações.

O valor de 100.000 simulações apresenta resultados consistentes, suficientes para confirmar o comportamento caótico do fenômeno. Entretanto, deve-se apontar que executando simulações com valores mais elevados (da ordem de 500.000 simulações), é possível obter estatísticas mais realistas e, com isso, gerar distribuições de probabilidades com ajustes mais fidedignos. Sendo assim, para este tipo de pesquisa, faz-se necessário o uso de *cluster* (rede de computadores que trabalham em conjunto, de tal forma que podem ser considerados como um único sistema).

Em todos os perfis apresentados inicialmente no estudo preliminar (Casos C1, C2, C3 e C4) pôde-se observar a aplicabilidade da teoria do caos para descrever o comportamento do fenômeno de queda de blocos rochosos de tamanhos diferentes (BIP, BIM e BIG) para um mesmo tipo de material de composição dos perfis das encostas (gnaisse facoidal).

Os resultados indicam que as distribuições de probabilidade gaussianas e q-exponenciais estendidas que regem as entropias estatísticas de Boltzmann-Gibbs e  $S_{q,\delta}$ , respectivamente, são as mesmas que se ajustam aos resultados da trajetória-alcance obtidos pelas simulações dos casos preliminares C1, C2, C3 e C4 no programa RocFall 6.0. Além disto, o fenômeno apresenta as mesmas características de um sistema não linear, tratando-se tanto de um comportamento fracamente caótico

quanto de um comportamento fortemente caótico, conforme formulações descritas no Capítulo 3.

Portanto, os itens 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 e 3.5.4 anteriormente descritos, justificam a aplicabilidade da teoria do caos no estudo de caso do Morro do Cantagalo que será apresentado no item 3.6.

### 3.6 Teoria do caos aplicada no estudo de caso do Morro do Cantagalo

Após a confirmação da hipótese que o movimento de queda de bloco se enquadra na teoria do caos, é possível aplicar a mesma metodologia para um caso no qual se tenha o mapeamento real da encosta, tal qual o estudo de caso abordado na presente pesquisa, visando conferir uma maior veracidade aos dados e às análises apuradas no estudo preliminar.

A seção da encosta selecionada para a representação do corte do Morro do Cantagalo é composta por gnaiss facoidal, de superfície acentuadamente convexa. Possui 82,50 m de altura por cerca de 234,95 m de comprimento (Figura 71). O perfil em questão foi mapeado pela GEO-RIO em 2009 a fim de se estudar e viabilizar a solução de convivência de barreiras flexíveis de impacto no local, como mencionado anteriormente.

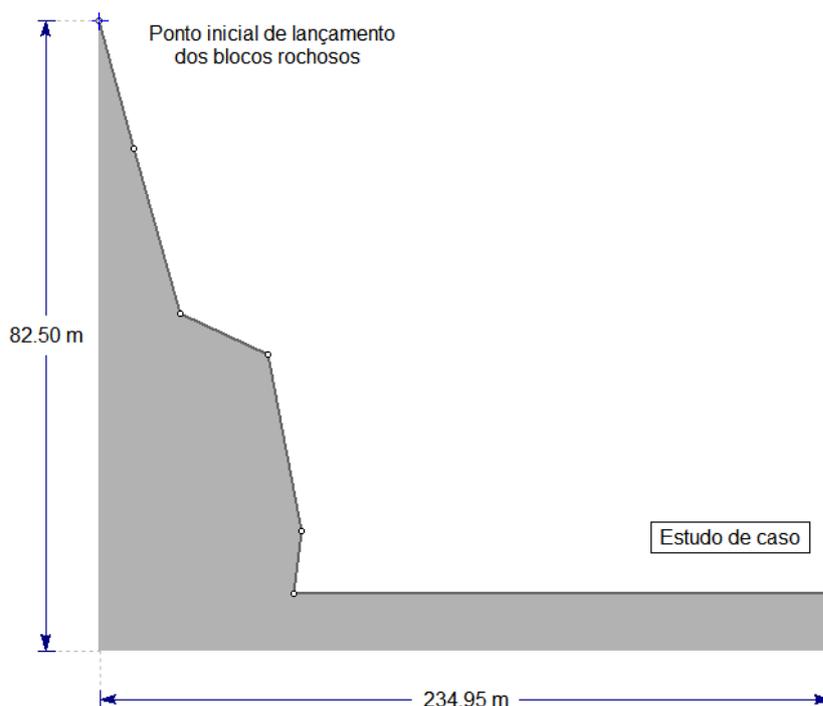


Figura 71 – Geometria da encosta rochosa – Estudo de caso (sem escala)

Diferentemente dos casos que compõem o estudo preliminar (C1, C2, C3 e C4), o estudo de caso não apresenta uma articulação de transição suave entre o perfil da encosta e a base alongada, mas sim uma articulação de transição repentina, onde o talude é interrompido bruscamente como representado na Figura 71.

Esta articulação está intimamente associada ao histórico de alterações na geomorfologia da cidade do Rio de Janeiro durante os anos 20 e 30, onde o morro do Cantagalo (que era associado ao morro dos Cabritos) sofreu um grande corte em seu talude para que fosse possível abrir duas vias: Rua Gastão Bahiana e Av. Henrique Dodsworth, que interligam os bairros de Copacabana e Lagoa (Figura 72). Ou seja, devido à intervenção humana, o perfil natural da encosta foi artificialmente modificado e conseqüentemente, suas distribuições de probabilidades naturais também.

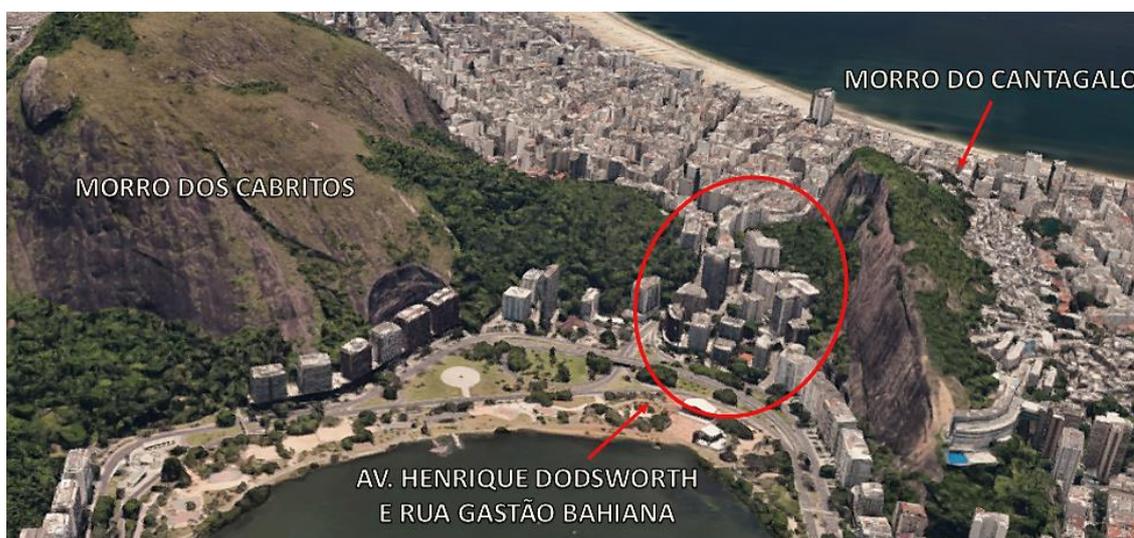


Figura 72 – Área de corte entre o Morro dos Cabritos e o Morro do Cantagalo

Para elaborar os ajustes das distribuições de probabilidade do estudo de caso, foi necessária a supressão dos resultados iniciais do ramo esquerdo das distribuições fornecidas pelo programa RocFall 6.0, pois as mesmas apresentavam diversas inconsistências e não seriam dados confiáveis para compor o estudo devido a presença do corte acentuado da encosta, tornando o sistema arbitrariamente finito neste ramo. Os resultados obtidos pelos ajustes das distribuições de probabilidade da trajetória-alcance realizados a partir das simulações do Estudo de Caso no programa RocFall 6.0 para os blocos BIP, BIM e BIG com a teoria do caos são apresentados na Figura 73 a Figura 77.

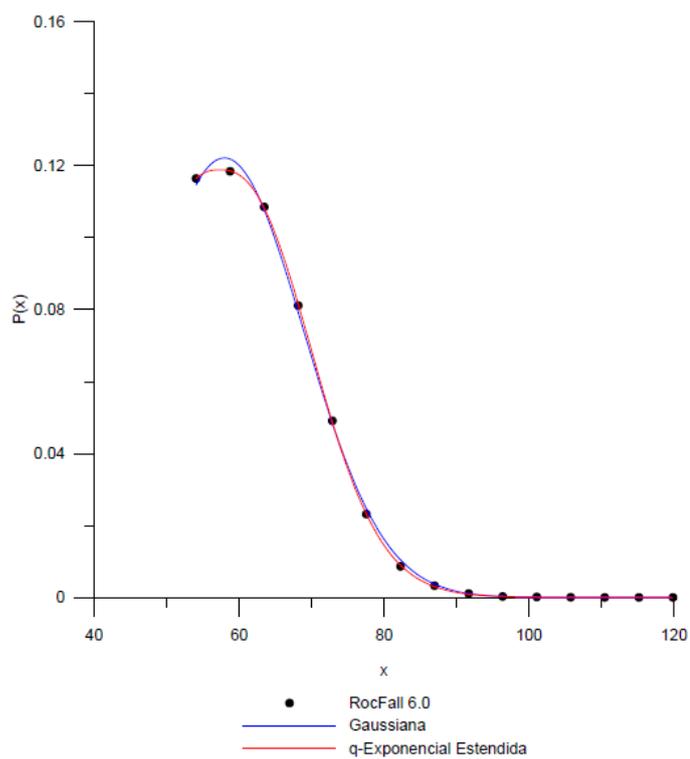


Figura 73 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Estudo de caso – Bloco BIP

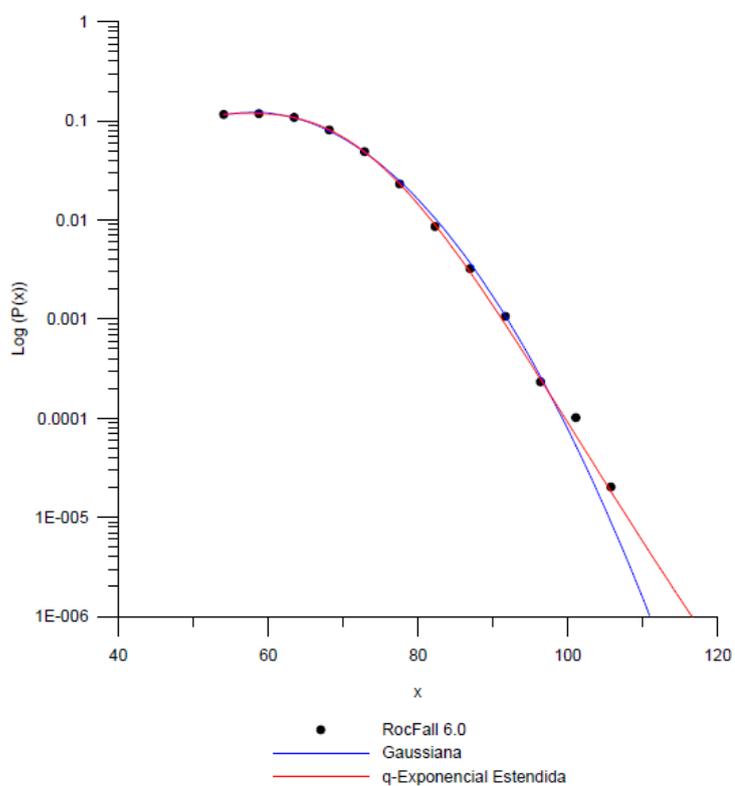


Figura 74 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Estudo de caso – Bloco BIP

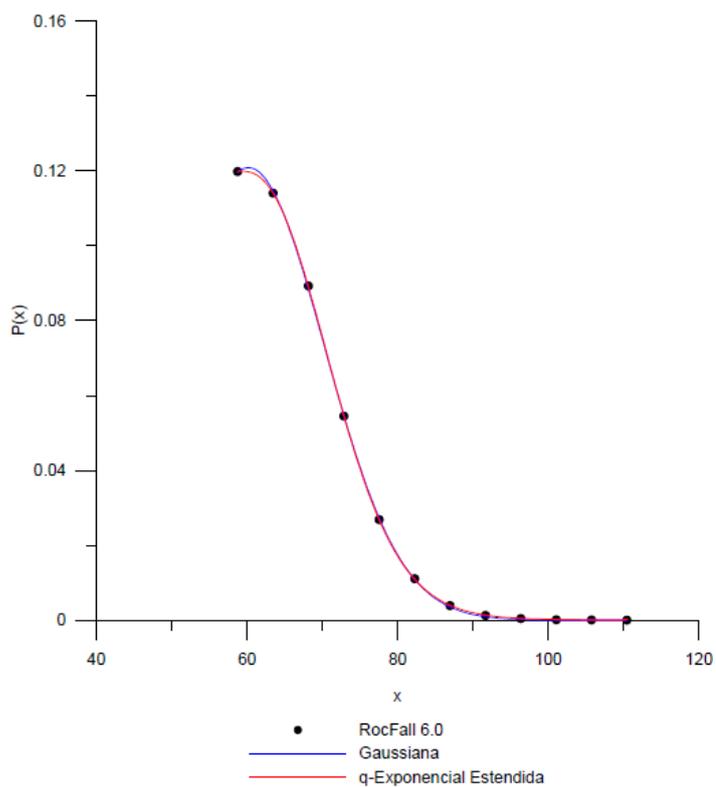


Figura 75 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Estudo de caso – Bloco BIM

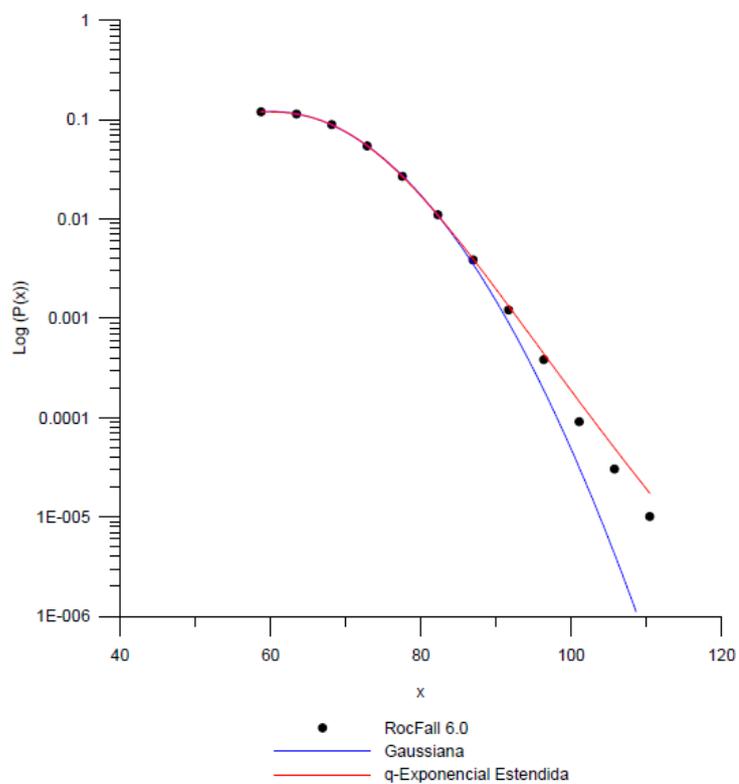


Figura 76 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Estudo de caso – Bloco BIM

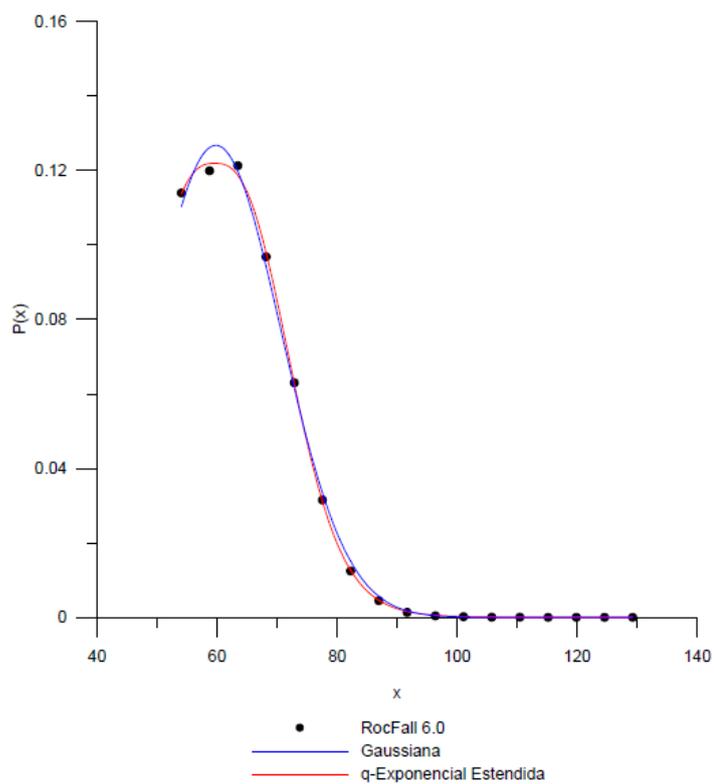


Figura 77 – Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Estudo de caso – Bloco BIG

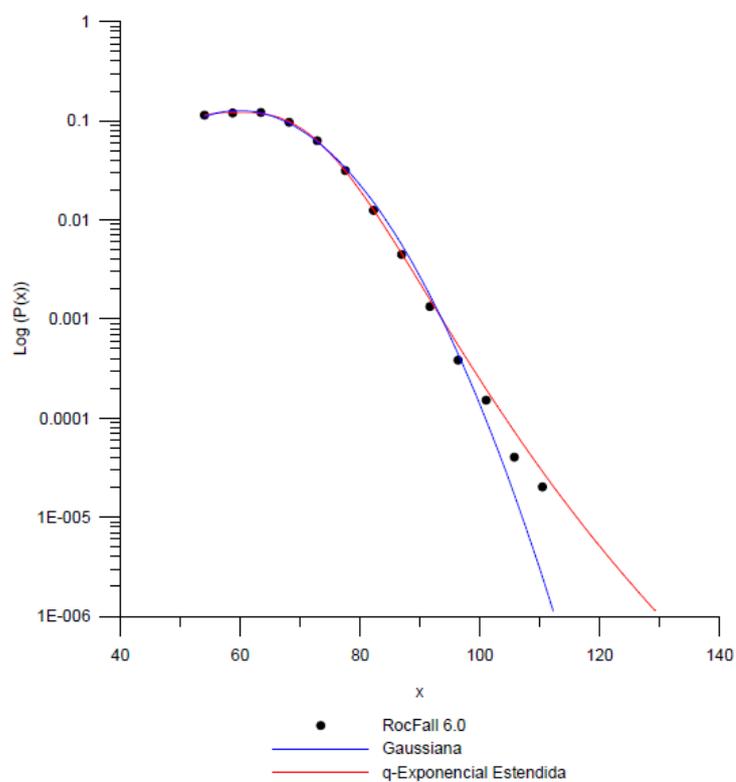


Figura 78 – Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Estudo de caso – Bloco BIG

Na Tabela 15 e na Tabela 16 são apresentados os resultados gerais dos ajustes estatísticos do estudo de caso para a distribuição de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, respectivamente.

Tabela 15 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Estudo de caso (distribuição de probabilidade gaussiana)

Gaussiana	Estudo de caso				
	Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
		a	b	c	R <sup>2</sup>
<b>BIP</b>	0,1222	15,4913	57,9611	0,9992	
<b>BIM</b>	0,1208	14,2274	60,1906	0,9999	
<b>BIG</b>	0,1267	15,3847	59,7876	0,9980	

Tabela 16 – Resultados gerais obtidos pelo ajuste estatístico do Estudo de caso (distribuição de probabilidade q-exponencial estendida)

q-Exponencial Estendida	Estudo de caso					
	Tamanho do bloco	Variáveis da distribuição de probabilidade				Coefficiente de correlação
		q	$\delta$	a'	b'	c'
<b>BIP</b>	1,1211	0,8099	0,1188	15,8895	57,3481	0,9999
<b>BIM</b>	1,1597	0,8472	0,1199	14,5317	59,3769	0,9999
<b>BIG</b>	1,2327	0,7513	0,1219	15,0223	59,5913	0,9996

Assim como nos perfis de encostas do estudo preliminar, elaborou-se o gráfico que apresenta as distribuições de probabilidade alinhadas ao longo de uma reta de coeficiente angular 1 (Figura 79) (Equação da reta de ajuste do estudo de caso:  $y = -1,0347x + 0,0382$ ;  $R^2 = 0,9997$ ) para uma melhor visualização dos resultados obtidos.

Os dados da Tabela 15 e Tabela 16 também sugerem, tal qual os casos do estudo preliminar, que a diferença de tamanho entre os blocos BIP, BIM e BIG não influencia significativamente os resultados das distribuições de probabilidade do estudo de caso. Portanto, para representar este caso, optou-se por utilizar os resultados obtidos com o bloco de tamanho BIM.

Os gráficos de ajustes estatísticos da trajetória-alcance dos blocos BIP, BIM e BIG e os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial do estudo de caso apresentam uma proximidade muito grande entre os ajustes das duas distribuições. Entretanto, como observado no caso C2 e C3, a distribuição de probabilidade q-exponencial estendida aproxima-se da distribuição de probabilidade gaussiana, fato este comprovado pela proximidade dos parâmetros q e  $\delta$  da unidade.

Sendo assim, como o caso C2 e o caso C3, verifica-se que a distribuição gaussiana é a que melhor representa a estatística das quedas de bloco na seção de encosta do estudo de caso do corte do Morro do Cantagalo, indicando comportamento fortemente caótico, ou caos forte.

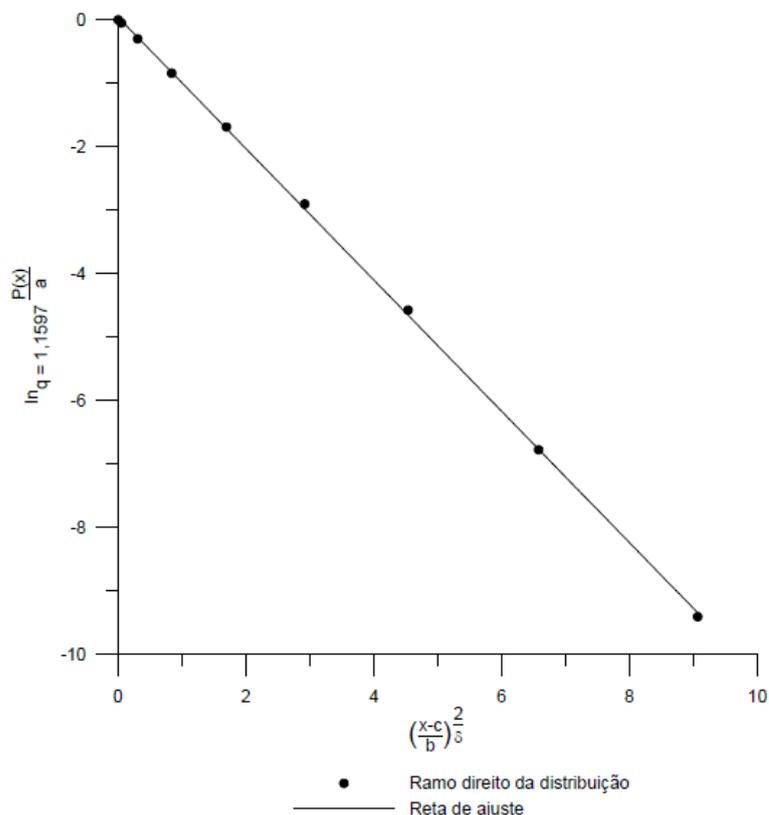


Figura 79 – Gráfico  $\ln_q(P(x)/a')$  versus  $((x-c')/b')^{2/\delta}$  – Caso C1 – Bloco BIM

### 3.6.1 Considerações acerca do estudo de caso

De forma similar ao ocorrido no estudo preliminar constatou-se também neste estudo de caso a aplicabilidade da teoria do caos no movimento de massa do tipo

queda de blocos. Além disto, o programa RocFall 6.0 foi um agente limitante no que diz respeito ao número máximo de simulações de trajetórias, tal qual o ocorrido no estudo preliminar.

Cabe ressaltar mais uma vez que, devido à geometria muito peculiar da encosta do Morro do Cantagalo, constituída por um paredão rochoso quase vertical criado artificialmente, constatou-se que tal presença condicionou a resposta dos dados experimentais. Esta limitação levou à necessidade de se desconsiderar uma parte da distribuição de probabilidade experimental à esquerda de seu ponto máximo, objetivando com isso uma análise isenta desta influência em todas as simulações (BIP, BIM e BIG), como apresenta a Figura 80.

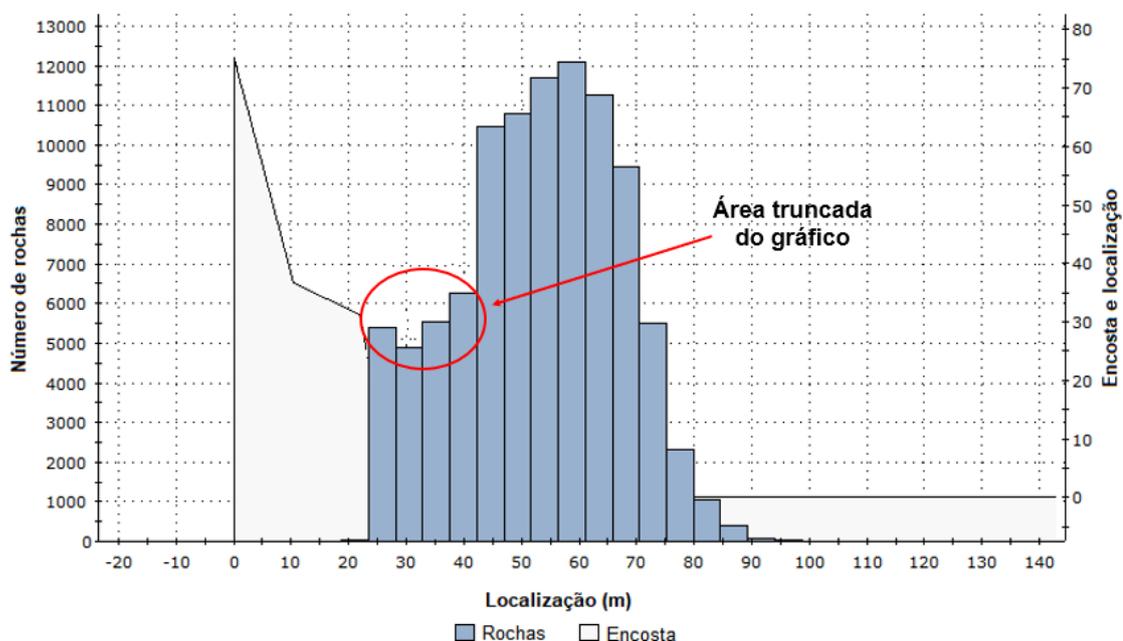


Figura 80 – Área truncada do gráfico de dados experimentais RocFall 6.0

### 3.7 Análise dos resultados e discussões

Este capítulo apresentou o estudo da aplicação da teoria do caos para descrever o possível comportamento do fenômeno de queda de blocos rochosos na encosta do corte do Morro do Cantagalo com face para a Rua Professor Gastão Bahiana, Bairro de Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro – RJ.

A fase preliminar do estudo visou analisar o comportamento de trajetórias de quedas de blocos simuladas em quatro perfis de encostas de gnaiss facoidal distintas

(Casos C1, C2, C3 e C4) a fim de se verificar a aplicabilidade da teoria do caos neste tipo de movimento de massa. Para tal, foram realizadas as simulações numéricas das trajetórias no programa RocFall 6.0 para três tipos de blocos de geometrias iguais e tamanhos diferentes (BIP, BIM e BIG), mantendo-se fixados apenas os parâmetros geotécnicos do material da encosta – os mesmos utilizados no estudo de caso.

Nestas análises, os blocos BIP, BIM e BIG foram lançados do ponto mais alto de cada encosta seguindo o método de Monte Carlo. O bloco BIP corresponde ao bloco irregular pequeno com massa igual a 337,50 kg, o bloco BIM ao bloco irregular médio com massa igual a 2.700,00 kg e o bloco BIG ao bloco irregular grande com massa igual a 7.408,80 kg. A utilização destes blocos possibilitou uma abordagem completa quanto à ordem de grandeza dos blocos presentes na encosta do Morro do Cantagalo.

Por fim, após a conclusão do estudo preliminar e de seus resultados favoráveis à teoria do caos, o mesmo processo de verificação e análise foi realizado para o estudo de caso propriamente dito, levando em consideração uma das seções do Morro do Cantagalo com face para a Rua Professor Gastão Bahiana mapeadas pela GEO-RIO em 2009.

A Tabela 17 fornece a compilação dos resultados obtidos com o estudo preliminar e com o estudo de caso, criando uma relação entre o tipo de superfície da encosta, o tipo de distribuição de probabilidade associada e por conseguinte, o tipo de comportamento encontrado.

Tabela 17 – Compilação dos resultados obtidos por meio do estudo preliminar (Casos C1, C2, C3 e C4) e do estudo de caso (Morro do Cantagalo)

<b>Perfil da encosta</b>	<b>Superfície da encosta</b>	<b>Distribuição de probabilidade de ajuste</b>	<b>Comportamento caótico</b>
Caso C1	Côncava	q-Exponencial Estendida	Fraco
Caso C2	Convexa	Gaussiana	Forte
Caso C3	Convexa	Gaussiana	Forte
Caso C4	Côncava	q-Exponencial Estendida	Fraco
Estudo de caso	Convexa	Gaussiana	Forte

Constatou-se inicialmente em cada caso, que o tamanho dos blocos (BIP, BIM e BIG) não influencia significativamente a análise final do fenômeno pela teoria do caos. Entretanto, ressalta-se a necessidade de ampliar estes estudos dando enfoque a diferentes geometrias, visto que na presente pesquisa foi utilizada a mesma geometria para todos os tamanhos de blocos.

Os perfis de encostas com superfícies acentuadamente convexas como os casos C2, C3 e Estudo de caso apresentam comportamento fortemente caótico. Neste caso, isto se deve ao fato de que este perfil possibilita a ejeção de blocos em diferentes trajetórias promovendo uma ampla difusão ao longo da encosta em que, as várias trajetórias apresentam uma expressiva divergência entre si. Portanto, os resultados espaciais parecem indicar que, a nível temporal a divergência entre trajetórias segue uma lei exponencial, o que caracteriza fenômenos fortemente caóticos.

Em contrapartida, nota-se que os perfis de encostas com superfícies côncavas ou globalmente côncavas com suaves trechos convexos como o caso C1 e C4 apresentam comportamento fracamente caótico. Isto parece estar relacionado principalmente ao fato de que nestes perfis, diferentemente do que ocorre nos convexos, há uma tendência a convergir trajetórias. Além disso, os blocos se mantêm mais tempo em contato com a encosta, o que favorece o desenvolvimento de uma memória de longo alcance face à troca de informações dentro do sistema, ao mesmo tempo em que facilita a dissipação da energia.

Por meio das análises anteriores, e com os dados obtidos no estudo preliminar e no estudo de caso foi possível elaborar o gráfico da Figura 81. Este gráfico, além de proporcionar uma melhor visualização dos resultados obtidos, ilustra a tendência dos dados experimentais de se agruparem em torno de uma mesma reta. Observa-se, com isso, uma clara manifestação de um tipo de universalidade funcional que ocorre no fenômeno de quedas de blocos.

Assim, os resultados mostram que, ao menos nos marcos e limitações envolvidos nesta tese, independentemente da geometria da encosta, da altura de queda e do tamanho do bloco, a estatística do fenômeno parece ser adequadamente descrita pela distribuição q-exponencial estendida (e seu caso limite gaussiano). Mais especificamente, o colapso dos dados experimentais se dá claramente em torno da reta de equação geral:  $y = - 1,0346x + 0,0295$  e coeficiente de correlação  $R^2$  de 0,9961.

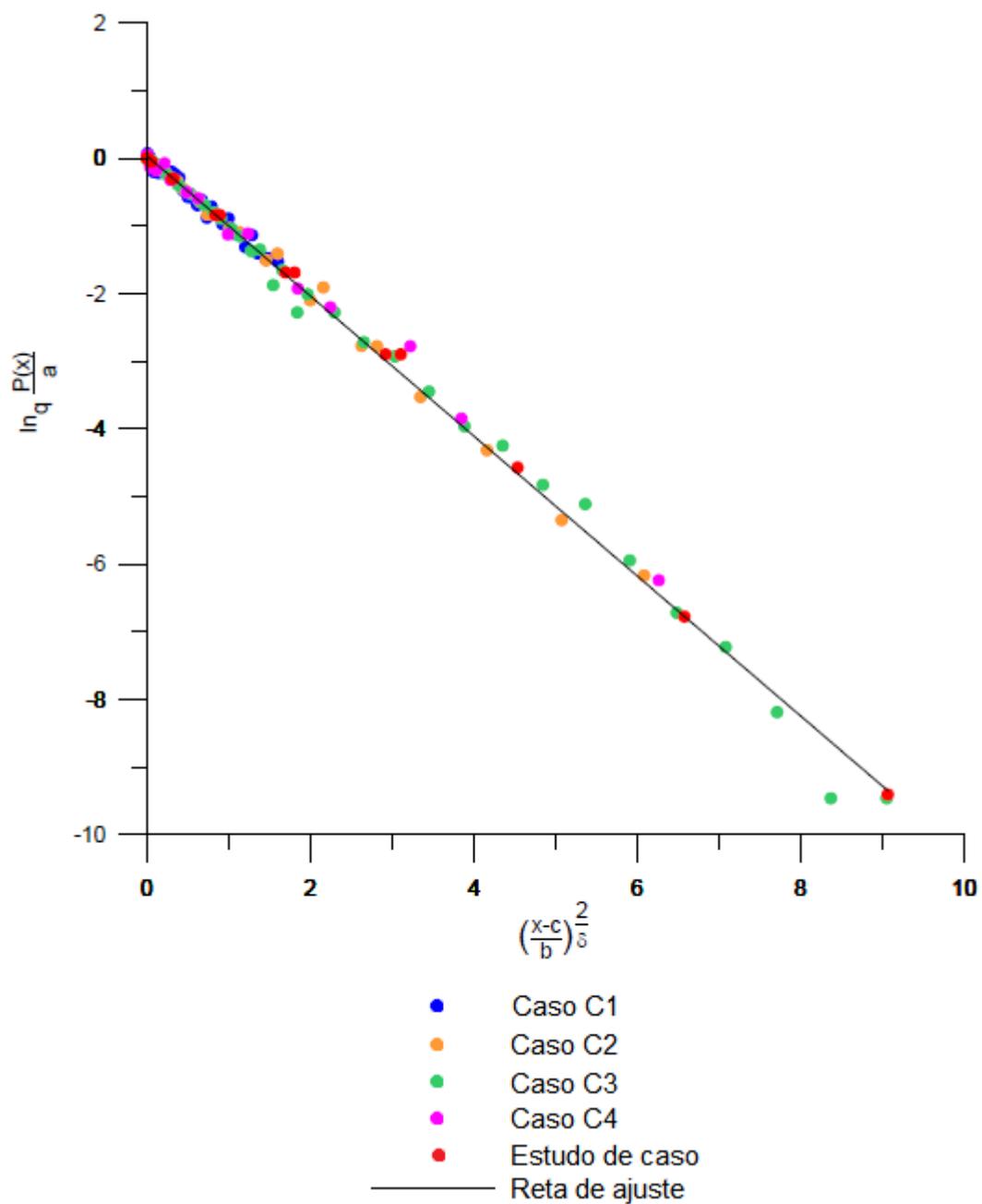


Figura 81 – Gráfico de universalidade funcional (estudo preliminar e estudo de caso)

## 4 CONCLUSÕES

Encostas rochosas apresentam grande potencial de instabilização por queda de blocos. Este tipo de movimento de massa geralmente ocorre de forma abrupta e sem indícios de movimentação prévia, envolvendo energias cinéticas e velocidades elevadas, que resultam em eventos muitas vezes catastróficos. Apesar das pesquisas existentes acerca do tema, ainda se faz necessário um nível de compreensão maior acerca das interações existentes entre os fatores condicionantes e a susceptibilidade de ocorrência destes eventos.

Neste âmbito, a presente pesquisa procurou contribuir com uma nova abordagem interdisciplinar associando este movimento de massa à teoria do caos. Esta teoria analisa fenômenos que, além de possuírem sensibilidade às condições iniciais, apresentam o comportamento global do sistema notoriamente distinto daqueles observados em Sistemas Lineares, nos quais é possível realizar a divisão do problema em partes e as investigar isoladamente. Esta dependência decorre das não-linearidades existentes no sistema, que amplificam pequenas variações nas condições iniciais, tornando a evolução do fenômeno de difícil previsão.

A presente pesquisa visou investigar a aplicabilidade da teoria do caos para descrever o comportamento deste fenômeno por meio de simulações de trajetórias de movimentos utilizando o programa RocFall 6.0.

Inicialmente foi realizado um estudo preliminar de quatro casos distintos para a verificação da possibilidade de utilização da teoria do caos para descrever o comportamento da queda de blocos rochosos em encostas de gnaiss facoidal. No estudo, variou-se somente a geometria das encostas, mantendo-se invariáveis a geometria dos blocos e os coeficientes de restituição normal e tangencial. Com isso, viabilizou-se a aplicação da teoria para o estudo de caso, elaborado a partir de uma seção da escarpa do Morro do Cantagalo, com face para a Rua Professor Gastão Bahiana, Bairro de Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro mapeada pela GEO-RIO em 2009.

Os resultados experimentais obtidos durante a pesquisa mostraram claramente que perfis de superfície convexa fornecem distribuições de probabilidade de trajetória-alcance invariavelmente gaussianas (ou q-exponenciais estendidas em que  $q$  e  $\delta$  tendem a 1), ao passo que, nos perfis côncavos ou globalmente côncavos com suaves trechos convexos, as distribuições de probabilidade q-exponenciais estendidas

forneem resultados consideravelmente melhores que os das distribuiçõs de probabilidade gaussianas.

Ademais, os resultados sugerem que os movimentos de massa do tipo quedas de blocos rochosos podem ser descritos pela teoria do caos, tendo em vista a universalidade funcional encontrada. Ou seja, a distribuiçãõ de probabilidade  $q$ -exponencial estendida (e a gaussiana, para os casos em que  $q$  e  $\delta$  tendem a 1) é capaz de descrever estatisticamente o fenômeno independentemente da forma geométrica das encostas, da altura de queda e do tamanho dos blocos. Estas leis universais são típicas de fenômenos críticos/caóticos, e que denotam o seu grande poder de unificação e sistematização de conhecimentos adquiridos.

Ressalta-se que a correta definição das distribuições probabilísticas que regem o fenômeno de queda de blocos no que diz respeito à sua trajetória e alcance tem influência decisiva no estabelecimento de zonas de segurança de construções e obras civis ao redor destas áreas potencialmente perigosas, colaborando, por conseguinte, para um melhor planejamento urbano do crescimento das cidades, especialmente aquelas estabelecidas em regiões serranas e montanhosas.

Diante do exposto, pode-se considerar que os objetivos propostos no início desta pesquisa foram alcançados, principalmente no que diz respeito aos dados experimentais e às análises efetuadas.

#### 4.1 Sugestões para pesquisas futuras

Com base nos resultados e análises obtidas com a presente pesquisa, são apresentadas a seguir as sugestões e recomendações para estudos futuros.

- a) Desenvolvimento de estudos com base na teoria do caos a partir de resultados elaborados em programas de simulação de trajetórias de quedas de blocos tridimensionais;
- b) Realização de estudos em que se avalie a influência dos parâmetros geotécnicos do bloco de rocha desprendido e da encosta sob a ótica da teoria do caos;

- c) Elaboração de um estudo comparativo entre o Método de Massa Concentrada e o Método do Corpo Rígido por meio do programa RocFall, verificando a influência que as diferenças entre os métodos exercem na teoria do caos;
- d) E por fim, utilização da teoria do caos para um estudo – similar ao apresentado na presente pesquisa – para o movimento de massa do tipo fluxo de detritos, que envolve tanto massas de solo quanto de material rochoso.

## REFERÊNCIAS

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

ANDRADE, S. Foto de Arquivo Pessoal. Disponível em: <URL: <https://www.flickr.com/photos/sileneandrade/26147254157>>. 2018.

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.

BAK, P.; TANG, C. Earthquakes as a Self-Organized Critical Phenomenon. Journal of Geophysical Research. No. 94, 3p., 1989.

BARTORELLI, A.; HARALYI, N. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 10p., 2000.

BORGES, E. P. Manifestações Dinâmicas e Termodinâmicas de Sistemas Não-Extensivos. Tese de Doutorado em Ciências Físicas. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Rio de Janeiro. 272p., 2004.

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

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

CASTRO, A. S.; Variação de Rigidez no Contato Rocha e Solo em Função do Grau de Saturação. Dissertação de Mestrado em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 124p., 2016.

CHAU, K. T.; WONG, R. H. C.; WU, J. J. Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rockfalls Impacts. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, England, No. 39, 9p., 2002.

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.

DANTAS, M. E. Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro: Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Minas e Metalurgia, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Brasília, 75p., 2000.

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

DESMONTEC. Fotografia Comercial do Gasoduto entre Paulínia e Jacutinga – MG. Disponível em: <URL: <http://demolidoradesmontec.com.br/obras/desmonte-de-rocha-para-construcao-de-gasoduto/>>. 2009.

DORREN, L. K. A. A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approches. Progress in Physical Geography, No. 27, USA, 18p., 2003.

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

EOTA. ETAG 027: Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits. Bruxelas, Bélgica, 59p., 2013.

EVANS, S. G.; HUNGR, O. The Assessment of Rockfall Hazards at the Base of Talus Slopes. Canadian Geotechnical Journal, No. 30/4, 16p., 1993.

FIEDLER-FERRARA, N.; PRADO, C. P. C. Caos: Uma Introdução. 1ª Ed. Editora Blucher. São Paulo. 402 p., 1994.

MENEZES FILHO, A. P. Aspectos Geológico-Geotécnicos de um Perfil de Alteração de Gnaisse Facoidal. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 254p. 1993.

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.

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.

GÁLVEZ, J. H. F. Condicionantes Geotécnicos e Análise de Quedas de Blocos Rochosos da Rodovia RS471 / BR153, Lote 2. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 164p., 2012.

GEG. Fotografia Comercial. Disponível em: <URL: <http://geg.pt/comunicacao/publicacoes/>>. 2015.

GEOBRUGG. Fotografia Comercial. Disponível em: <URL: <https://www.geobrugg.com/pt/Copacabana-69565.html>>. 2011.

GEO-RIO. A Caracterização do Risco Geológico para Encosta da Rua Prof. Gastão Bahiana. Relatório de Diagnóstico Disponibilizado. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 4p., 2009.

GEO-RIO. Manual Técnico de Encostas. 2 Ed. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 518p., 2014.

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.; GIACOMINI, A.; MIGLIAZZA, M.; SEGALINI, A. Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. Rock Mechanics and Rock Engineering. Disponível em: <URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s0>

0603-004-0027-2>. 20p., 2004.

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

HEIDENREICH, B. *Small and Half Scale Experimental Studies of Rockfall impacts on sandy slopes*. Doutorat ès Sciences Techniques. Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, France, 231p., 2004.

HEIM, A. *Bergsturz und Menschenleben*. Beiblatt zur Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, (English translation by Skremer, N. A. Bitech Publishers, Vancouver, Canada), No. 77, 218 p., 1932.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. *O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos*. USGS - United States Geological Survey, Virgínia, USA, 176p., 2008.

HOEK, E. *Big Tunnels in Bad Rock*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. No. 9, Reston, USA, 14p., 2001.

IBÁÑEZ, J. J.; DE ALBA, S.; ÁLVAREZ A. G. *Aportaciones del Caos a las Ciencias de la Tierra (Estructura, Evolución y Dinámica del Modelado Terrestre)*. Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC Madrid. Madrid, España. 37p., 1995.

ISRM. *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, England, No. 15, 49p., 1978.

LÓPEZ, R. P. *Sobre la Teoría del Caos Aplicada En Sismotectónica: Geometría Fractal de Fallas y Terremotos*. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas. Madrid, España. 398p., 2003.

MACCAFERRI. Sistemas Contra a Queda de Rochas – Necessidades e Soluções. Material Comercial. Jundiaí, São Paulo, 20p., 2014.

MACCIOTTA, R.; MARTIN, C. D.; CRUDEN, D. M. Probabilistic estimation of rockfall height and kinetic energy based on three-dimensional trajectory model and Monte Carlo simulation. Landslides, No. 12, 16p., 2014.

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

MARTINEZ, P. G. Fractales, su Importancia en Geología. Simulación de Patrones Fractales Naturales. Geogaceta, No. 20, 3p., 1996.

MEISSL, G. Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien No. 28, Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Austria, 249p., 1998.

NORRISH, N.; WYLLIE, D. C. Rock Slope Stability Analysis. Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board – National Research Council. Washington, USA, 34p., 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.

NUNES, A. L. L. S. Geomecânica de Encostas. Publicação Didática, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 160p., 2004.

NUNES, A. L. L. S. Princípios Básicos de Mecânica das Rochas. Publicação Didática, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 110p., 2009.

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

PANTELIDIS, L.; KOKKALIN, A. Designing Passive Rockfall Measures Based on Computer Simulation and Field Experience to Enhance Highway Safety. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, England, No. 8, 7p., 2011.

PEITGEN, H. O.; JURGENS, H.; SAUPE, D. Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. 2nd Edition. Springer Press. 904 p., 2004.

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.

RITCHIE, A. M. Evaluation of Rockfall and its Control. Highway Research Record, USA, No. 17, 15p., 1963.

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. Fotografia Comercial. Disponível em: <URL: <https://www.rocscience.com/software/rockfall>>. 2018.

ROSSI, F. Foto de Reportagem: Nas pedras do Rio, as cicatrizes provocadas pela chuva. Agência O Globo. Disponível em: <URL: <https://oglobo.globo.com/rio/nas-pedras-do-rio-as-cicatrizes-provocadas-pela-chuva-9847299>>. 2013.

RUNDLE, J. B; KLEIN, W. New Ideas About the Physics of Earthquakes. U.S International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Reviews of Geophysics, Supplement, 4p., 1995.

SILVA, A. A. As Várias Facetas do Termo Entropia. Será Difícil Entender Este Conceito? Trabalho de Conclusão de Curso de Física, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 22 p., 2007.

SILVA, C. C. Análise de Estabilidade de um Talude da Cava de Alegria Utilizando Abordagem Probabilística. Dissertação de Mestrado em Geotecnia Aplicada à Mineração. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais 134p., 2015.

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.

SMAC. Espécies Ameaçadas de Extinção no Município do Rio de Janeiro: Fauna e Flora. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. 1ª Ed. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 68p., 2000.

SPADARI, M.; GIACOMINI, A.; BUZZI, O.; FITYUS, S.; GIANI, G. P. In Situ Rockfall Testing in New South Wales, Australia. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, England, No. 49, 10p., 2012.

STEVENS, W. D. RocFall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. Master Thesis of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 31p., 1998.

STROGATZ, S. H. Nonlinear Dynamics and Chaos. 2nd. Edition, CRC Press, USA, 498 p., 1994.

STORINO, V.C. Indicação de Áreas Favoráveis à Novas Explorações Minerárias no Município do Rio de Janeiro, RJ, com o Auxílio do Sistema de Informações Geográficas (SIG). Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 112p., 2003.

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.

TURCOTTE, D. L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. 2th Edition, Cornell University. USA, New York, 414p., 1997.

TURNER, R.; DUFFY, J.; TURNER, J. P. Post Foundations for Flexible Rockfall Fences. 60th Highway Geology Symposium. Buffalo, New York. Disponível em: <URL: [http://www.highwaygeologysymposium.org/wp-content/uploads/60\\_HGS-OPT.pdf](http://www.highwaygeologysymposium.org/wp-content/uploads/60_HGS-OPT.pdf)> 15p., 2009.

VALERIANO, C. M.; HEILBRON, M.; NASCIMENTO, V.; MANSUR, K. L. Morro do Corcovado: de Braços Abertos para a Geologia. Disponível em: <URL: [www.drm.rj.gov.br/index.php/.../68-rio-de-janeiro?...de...abertos-para-a-geologia](http://www.drm.rj.gov.br/index.php/.../68-rio-de-janeiro?...de...abertos-para-a-geologia)> 1p. 2007.

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

VALLEJO, L. L. G.; FERRER, M.; OTEO, C. Ingeniería Geológica. Prentice Hall. Madrid, España, 744p., 2002

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.

VIEIRA, B. C.; VIEIRA, A. C. F.; AMARAL, C. P.; FERNANDES, N. F. Estudo Comparativo dos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1996 nas Bacias

do Quitite e do Papagaio (RJ): Uma Abordagem Geomorfológica. Simpósio Pan-Americano de Escorregamentos de Terra. Anais ABMS/ABGE/ISSME, v.1, Rio de Janeiro. 10p., 1997.

VIJAYAKUMAR, S.; YACOUB, T.; RANJRAM, M.; CURRAN, J. H. Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. 46th US Rock Mechanics – Geomechanics Symposium 2012. Disponível em: <URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84873138304&partnerID=40&md5=b165655ca224155400422d118622060e>>. 9p., 2012.

VOLKWEIN, A.; MELIS, L.; HALLER, B.; PFEIFER, R. Protection from Landslides and High Speed Rockfall Events – Reconstruction of Chapman’s Peak Drive. Protection Structures and Extreme Events, IABSE Symposium, Lisbon, Portugal, 8p., 2005.

USGS. Landslide Types and Processes. Fact Sheet 2004-3072 of United States Geological Survey. Disponível em: <URL: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>>. 4p., 2004.

WYLLIE, D. C. Rock Fall Engineering. 1st. Ed. CRC Press, Florida, USA, 270p., 2015.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. Rock Slope Engineering: Civil and Mining. 4th. Ed. Spon Press, New York, USA, 431p., 2004.