



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Tecnologia e Ciências**

**Faculdade de Engenharia**

**Alana da Costa Moreira Assis Ribeiro**

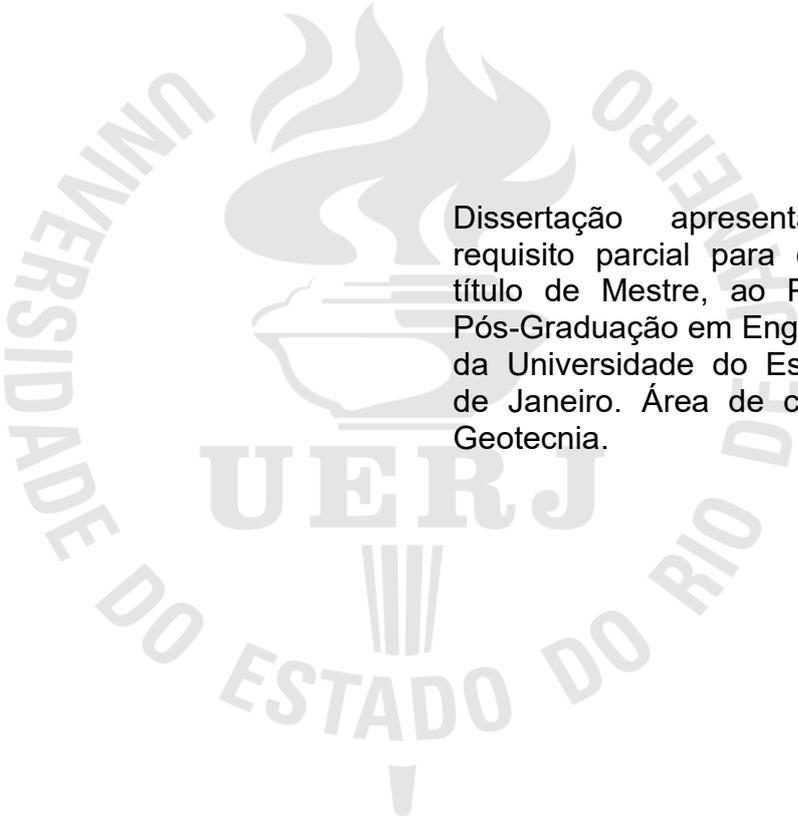
**Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na  
dinâmica de queda de blocos – Uma aplicação da Teoria do Caos**

**Rio de Janeiro**

**2020**

Alana da Costa Moreira Assis Ribeiro

**Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda de blocos – Uma aplicação da Teoria do Caos**



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

Orientador: Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho

Rio de Janeiro

2020

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

R484 Ribeiro, Alana da Costa Moreira Assis.  
Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda de blocos – uma aplicação da teoria do caos / Alana da Costa Moreira Assis Ribeiro. – 2020.  
140f.

Orientador: Armando Prestes de Menezes Filho.  
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) - Estabilidade - Teses. I. Menezes Filho, Armando Prestes de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.121.537

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

Alana da Costa Moreira Assis Ribeiro

**Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda de blocos – Uma aplicação da Teoria do Caos**

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

Aprovado em: 30 de janeiro de 2020.

Banca Examinadora:

---

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

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

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

---

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

Rio de Janeiro

2020

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Marise e Vitor por estarem ao meu lado, apoiando-me e incentivando-me, e por toda paciência e carinho ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Marise e Luiz, e meu irmão, Rafael, por me ensinarem o valor da educação e por me apoiarem em cada decisão da minha vida.

Ao meu marido, Vitor, pelo amor e compreensão durante todos os momentos dessa caminhada, incentivando-me e mostrando que sou capaz.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho, que tanto admiro, pela paciência, disponibilidade e excelente orientação, por me incentivar a pensar fora dos padrões e acreditar no meu potencial, até nos momentos que duvidei de minha capacidade.

Aos professores, Dr<sup>a</sup>. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira e PhD Marcos Peigas Pacheco, pela dedicação à docência, pelos conhecimentos transmitidos, e por gentilmente se disponibilizarem a fazer parte desta banca.

Ao Prof. Dr. Evaldo Mendonça Fleury Curado por atenciosamente aceitar o convite de participar desta banca e contribuir com a pesquisa realizada.

A todos os colegas de mestrado pelo acolhimento e companheirismo durante o curso, em especial Carlos Alexandre Silva e Paulo Castanheira.

A Fernanda Ignacio por me fornecer informações de sua pesquisa, além da paciência e disponibilidade para sanar todas as minhas dúvidas.

Aos professores e funcionários do PGEIV pela manutenção da excelência no ensino e na pesquisa.

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

Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você  
estará fazendo o impossível.

*São Francisco de Assis*

## RESUMO

RIBEIRO, Alana da Costa Moreira Assis. *Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda de blocos* – uma aplicação da teoria do caos. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Os maciços rochosos fraturados apresentam diversos mecanismos de instabilização, dentre os quais os de queda de blocos acham-se os mais frequentes. Este tipo de instabilização em geral ocorre repentinamente e sem sinais prévios de movimentação, podendo abranger grandes volumes de material e implicar elevados valores de energia e velocidade. O grande desenvolvimento e aperfeiçoamento das metodologias de estudo deste fenômeno têm proporcionado um grande avanço em sua compreensão e análise, possibilitando projetos de mitigação mais condizentes com a realidade do problema. No entanto, ainda se faz necessário um entendimento maior a respeito dos fatores que regem estes eventos e como estes se manifestam. Assim, Ignacio (2019) propôs e aplicou em sua pesquisa uma nova perspectiva de análise utilizando a teoria do caos e obtendo resultados satisfatórios. Esta teoria trata de sistemas dinâmicos não lineares, que apresentam como característica principal sua grande sensibilidade às condições iniciais, o que os torna não previsíveis na prática a longo prazo, aspecto este marcante no fenômeno de queda de blocos. Desta forma, esta dissertação objetiva continuar o estudo do fenômeno de queda de blocos utilizando-se a teoria do caos. Mais precisamente, propõe analisar a influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda, a partir das distribuições de probabilidade de localização final dos blocos, obtidas por meio de simulações numéricas para dezesseis cenários propostos. Cada cenário é formado pela combinação entre quatro perfis transversais distintos e quatro geometrias de blocos diferentes, que variam em formatos hexagonais e quadrangulares, com bordas arredondadas e vivas. Os resultados mostraram que a teoria do caos pode ser utilizada na análise do fenômeno de queda de blocos, sugerindo, entretanto, que o estabelecimento de um comportamento dinâmico fraco ou fortemente caótico não depende somente do tipo de geometria apresentada pelo perfil das encostas e dos blocos instáveis, mas também de sua interação mútua, o que confere a este fenômeno aspectos de difícil apreensão.

Palavras-chave: Queda de Blocos Rochosos; Mecânica das Rochas; Sistemas Não Lineares; Teoria do Caos.

## ABSTRACT

RIBEIRO, Alana da Costa Moreira Assis. *Influence of block and rock slope geometry on rockfall dynamics* – an application of chaos theory. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Fractured rock mass have several instability mechanisms, among which the falling blocks are the most frequent. This type of instability usually occurs suddenly and without previous signs of movement, it may cover large volumes of material and involve high values of energy and speed. The great development and improvement of the study methodologies of this phenomenon has provided a great advance in its understanding and analysis, enabling mitigation projects more consistent with the reality of the problem. However, a better understanding is still needed concerning the factors that governing these events and how they manifest themselves. Therefore, Ignacio (2019) proposed and applied in her research a new perspective of analysis using the theory of chaos and obtaining satisfactory results. This theory deals with nonlinear dynamic systems, which have as their main characteristic a high sensitivity to the initial conditions, what makes them unpredictable in the long term practice, a remarkable aspect in the rockfall phenomenon. This dissertation aims to study the phenomenon of block falling using chaos theory. More precisely, it proposes to analyze the influence of block and rocky slopes geometry on the fall dynamics, from the probability distributions of final blocks location obtained through numerical simulations for sixteen proposed scenarios. Each scenario is formed by the combination of four distinct cross section and four different block geometry, which range in hexagonal and square shapes and rounded and vivid edges. The research results indicate that chaos theory can be used in the rockfall phenomenon analysis, however, suggesting that the formation of weakly or strongly chaotic behavior does not depend only on the type of geometry presented by the profile of the slope and the unstable blocks, but also on their mutual interaction, which gives this phenomenon aspects of difficult comprehension.

Keywords: Rock falls; Rock Mechanics; Non-Linear Systems; Chaos Theory.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação dos tipos de movimentos de massa: (A) Queda, (B) Tombamento, (C) Escorregamento rotacional, (D) Escorregamento translacional, (E) Espalhamento lateral e (F) Corridas. (Adaptado de Highland e Bobrowsky, 2008)...	23
Figura 2 - Formação das juntas de alívio em consequência da expansão do corpo rochoso. (Toledo et al., 2009).....	27
Figura 3 - Área de superfície exposta e Gráfico – Superfície específica x Número de fragmentos. (Adaptado de Toledo et al., 2009) .....	28
Figura 4 - Representação do fenômeno de intemperismo esferoidal (Adaptado de Tarbuck et al., 2014) .....	30
Figura 5 - Alteração intempérica esferoidal de rocha ígnea. (Toledo et al., 2009) ....	30
Figura 6 - Gráfico da variação das condições do intemperismo em função da pluviosidade anual e da temperatura média anual (Toledo et al., 2009) .....	31
Figura 7- Influência da topografia na intensidade do intemperismo (Toledo et al., 2009) .....	32
Figura 8 - Perfis de alteração de acordo com o sistema de classificação de Deere e Patton (a) rocha metamórfica, (b) rocha ígnea (Adaptado de Deere e Patton, 1971)	33
Figura 9 - Parâmetros das descontinuidades (Nunes, 2009) .....	35
Figura 10 - Mecanismos de ruptura: (a) Ruptura planar; (b) Ruptura em cunha; (c) Ruptura por tombamento; (d) Ruptura circular (Adaptado de Wyllie e Mah, 2004) ...	39
Figura 11 - Esquema do comportamento da velocidade antes e após o impacto (Adaptado de Giani et al., 2004).....	42
Figura 12 - Tela metálica para controle de queda de blocos (Adaptado de Freitas, 2013) .....	46
Figura 13 - (a) Muro de impacto de concreto; (b) Dique de solo reforçado (Rocha, 2009 <i>apud</i> (a) Nunes, 2008 e (b) Peila et al., 1998).....	47
Figura 14 - Bermas em encosta rochosa (Adaptado de Galvéz, 2012).....	48
Figura 15 - Trincheira para coleta de blocos (Freitas, 2013 <i>apud</i> Nunes, 2008).....	49
Figura 16 - (a) Túnel falso de concreto (Diaz, 2005); (b) Túnel falso flexível (Geobruigg, 2018) .....	50

Figura 17 – (a) Barreira ancorada com cabos (Geobruigg, 2012); (b) Barreira com ancoragem na fundação (Geobruigg, 2018); (c) Solução híbrida barreira-cortina (Geobruigg, 2017) .....	51
Figura 18 - Desmonte de blocos rochosos com rompedor hidráulico (Prefeitura de Petrópolis, 2018) .....	52
Figura 19 – (a) Sistema de drenagem superficial com canaleta e caixa coletora (Deflor Bioengenharia, 2006); (b) Sistema de drenagem profunda associada a canaleta (Deflor Bioengenharia, 2019).....	54
Figura 20 - Proteção superficial em encosta com uso de concreto projetado (Solotrat, 2010) .....	55
Figura 21 - Retaludamento em banquetas (Nascimento, 2015).....	56
Figura 22 - Grelhas ancoradas em talude rochoso (Freitas, 2013) .....	57
Figura 23 - Reconstrução da posição do bloco em diferentes intervalos de tempo a partir da gravação da câmera de vídeo e referenciada aos sistemas de coordenadas globais (X, Y) e locais (n, t). (Giani et al., 2004) .....	61
Figura 24 – (a) campo de testes suíço, (b) vista de barreira flexível fixada na face do talude, (c) vista do equipamento para teste (Freitas, 2013 <i>apud</i> Grassl et al., 2003). .....	62
Figura 25 - Imagem sobreposta do elemento esférico em vários momentos ao longo da trajetória (Chau et al., 2002).....	63
Figura 26 - Ensaio em escala reduzida: liberação de bloco sobre superfície de areia (Heidenreich, 2004).....	64
Figura 27 - <i>Fahrböschung</i> e <i>Minimum Shadow Angle</i> de uma encosta de tálus (Adaptado de Dorren, 2003 <i>apud</i> Meissl, 1998).....	66
Figura 28 - Estrutura fractal - Triângulo de Sierpinsky (Adaptado de López, 2003) ..	72
Figura 29 - Desenvolvimento das trajetórias de um atrator estranho. (Adaptado de Gleick, 1991) .....	73
Figura 30 - <i>RocFall</i> versão 6.0 ( <i>Rocscience</i> , 2019) .....	81
Figura 31 - Condições do mecanismo – Configuração padrão .....	85
Figura 32 - Perfil transversal e materiais constituintes da encosta.....	86
Figura 33 - Definição das características dos blocos .....	88
Figura 34 – Exemplo de posicionamento de barreira e coletor .....	90
Figura 35 - Histograma de localização final dos blocos .....	91
Figura 36 - Envoltória de Energia Cinética Total .....	91

Figura 37 - Gráfico de Distribuição de altura de salto dos blocos .....	91
Figura 38 - Tipos dos Blocos: (a) Bloco Hexagonal Arredondado (BHA), (b) Bloco Hexagonal Vivo (BHV), (c) Bloco Quadrado Arredondado (BQA) e (d) Bloco Quadrado Vivo (BQV) .....	94
Figura 39 - Perfil transversal do caso C1 (Sem escala) .....	96
Figura 40 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BHA .....	97
Figura 41 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BHA .....	98
Figura 42 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BHV .....	98
Figura 43 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BHV .....	99
Figura 44 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BQA .....	99
Figura 45 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BQA .....	100
Figura 46 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BQV .....	100
Figura 47 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C1 – Bloco BQV .....	101
Figura 48 - Perfil transversal do caso C2 (Sem escala) .....	103
Figura 49 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BHA .....	103
Figura 50 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BHA .....	104
Figura 51 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BHV .....	104
Figura 52 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BHV .....	105
Figura 53 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BQA .....	105
Figura 54 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BQA .....	106
Figura 55 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BQV .....	106
Figura 56 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C2 – Bloco BQV .....	107
Figura 57 - Perfil transversal do caso C3 (Sem escala) .....	109
Figura 58 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BHA .....	110
Figura 59 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BHA .....	110
Figura 60 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BHV .....	111
Figura 61 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BHV .....	111
Figura 62 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BQA .....	112
Figura 63 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BQA .....	112
Figura 64 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BQV .....	113
Figura 65 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C3 – Bloco BQV .....	113
Figura 66 - Perfil transversal do caso C4 (Sem escala) .....	115
Figura 67 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BHA .....	116
Figura 68 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BHA .....	116

Figura 69 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BHV .....	117
Figura 70 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BHV .....	117
Figura 71 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BQA .....	118
Figura 72 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BQA .....	118
Figura 73 - Gráfico $P(x)$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BQV .....	119
Figura 74 - Gráfico $\text{Log}(P(x))$ versus $x$ – Caso C4 – Bloco BQV .....	119
Figura 75 - Caso C3 - Histograma de localização final Blocos Hexagonais Arredondados.....	127
Figura 76 - Caso C3 - Histograma de localização final Blocos Hexagonais Vivos ..	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos movimentos de massa (Adaptado de Cruden e Varnes, 1996) .....	22
Tabela 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)	23
Tabela 3 - Principais características dos programas numéricos de simulação de queda de blocos (Ignacio, 2019 <i>apud</i> GEO-RIO, 2014).....	68
Tabela 4 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C1 .....	101
Tabela 5 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C1 .....	101
Tabela 6 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C2 .....	107
Tabela 7 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C2.....	107
Tabela 8 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C3 .....	114
Tabela 9 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C3.....	114
Tabela 10 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C4 .....	120
Tabela 11 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C4.....	120
Tabela 12 - Compilação dos resultados obtidos por meio do estudo preliminar (Ignacio, 2019) .....	122
Tabela 13 - Compilação dos resultados obtidos por meio do presente estudo .....	123

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BHA	Bloco Hexagonal Arredondado
BHV	Bloco Hexagonal Vivo
BQA	Bloco Quadrado Arredondado
BQV	Bloco Quadrado Vivo
$CR_n$	Coeficiente normal de restituição
$CR_t$	Coeficiente tangencial de restituição
F	<i>Fahrböschung</i>
GEO-RIO	Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro
IAEG	<i>International Association for Engineering Geology and Environment</i>
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
M	<i>Minimum Shadow Angle</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
NBR	Norma Brasileira
RHRS	<i>Rockfall Hazard Rating System</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Parâmetro de ajuste da distribuição de probabilidade Gaussiana
$a'$	Parâmetro de ajuste da distribuição de probabilidade q-Exponencial Estendida
$b$	Parâmetro de ajuste da distribuição de probabilidade Gaussiana
$b'$	Parâmetro de ajuste da distribuição de probabilidade q-Exponencial Estendida
$c$	Parâmetro de ajuste da distribuição de probabilidade Gaussiana
$c'$	Parâmetro de ajuste da distribuição de probabilidade q-Exponencial Estendida
$\delta$	Parâmetro entrópico que caracteriza a sensibilidade do sistema a lei de potencia
$e$	Número de Euler
$k_B$	Constante de Boltzmann
$\lambda$	Expoente de Lyapunov
$p_i$	Probabilidade do sistema encontrar-se em seu i-ésimo estado
$p(x)$	Distribuição de probabilidade gaussiana
$p_q(x)$	Distribuição de probabilidade q-exponencial
$p_{q,\delta}(x)$	Distribuição de probabilidade q-exponencial estendida
$q$	Parâmetro entrópico que caracteriza o grau de não aditividade
$R^2$	Coeficiente de correlação
$S$	Entropia Clássica de Boltzmann-Gibbs
$S_q$	Entropia generalizada de Tsallis
$S_{q,\delta}$	Generalização da entropia generalizada de Tsallis
$V_{pos}$	Velocidade de saída após impacto
$V_{pos,n}$	Velocidade normal de saída após impacto
$V_{pos,t}$	Velocidade Tangencial de saída após impacto
$V_{pré}$	Velocidade de entrada pré impacto
$V_{pré,n}$	Velocidade normal de entrada pré impacto
$V_{pré,t}$	Velocidade tangencial de entrada pré impacto
$x$	Variável das distribuições de probabilidade
$W$	Número de microestados de um sistema

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	<b>21</b>
<b>1.1 Movimentos de massa</b> .....	<b>21</b>
<b>1.2 Queda de blocos rochosos</b> .....	<b>26</b>
1.2.1 Intemperismo .....	26
1.2.2 Descontinuidades .....	34
<b>1.3 Tipos de instabilidades em maciços rochosos</b> .....	<b>37</b>
1.3.1 Ruptura planar: .....	37
1.3.2 Ruptura em cunha: .....	38
1.3.3 Ruptura por tombamento: .....	38
1.3.4 Ruptura circular: .....	39
<b>1.4 Condicionantes para a trajetória de queda</b> .....	<b>40</b>
<b>1.5 Estabilização e mitigação em maciços rochosos instáveis</b> .....	<b>44</b>
1.5.1 Soluções de convivência .....	45
1.5.2 Eliminação do Problema .....	51
1.5.3 Técnicas de Estabilização .....	52
<b>2 MÉTODOS DE ANÁLISE</b> .....	<b>59</b>
<b>2.1 Métodos usuais de análise</b> .....	<b>59</b>
2.1.1 Métodos Experimentais .....	60
2.1.1.1 Ensaio de campo ( <i>in situ</i> ) .....	60
2.1.1.2 Ensaio de laboratório .....	63
2.1.1.3 Retroanálise de eventos .....	65
2.1.2 Métodos numéricos .....	66
<b>2.2 Nova perspectiva de análise</b> .....	<b>68</b>
2.2.1 Sistemas não lineares e a Teoria do caos .....	69
2.2.1.1 Características dos sistemas caóticos .....	71
2.2.1.2 Expoente de Lyapunov .....	74
2.2.2 Método de análise .....	75
2.2.2.1 Entropia clássica de Boltzmann-Gibbs .....	75
2.2.2.2 Entropias Generalizadas .....	77
2.2.3 A teoria do caos e a engenharia geotécnica .....	79

<b>3 PROGRAMA NUMÉRICO.....</b>	<b>81</b>
<b>3.1 Programa Numérico RocFall 6.0 .....</b>	<b>81</b>
3.1.1 Métodos de amostragem.....	82
3.1.2 Métodos de análise .....	83
3.1.3 Condições do mecanismo .....	84
3.1.4 Definição da geometria e do material da encosta .....	85
3.1.5 Definição das características dos blocos.....	87
3.1.6 Definição de Barreiras e Coletores:.....	89
3.1.7 Resultados .....	90
<b>4 ESTUDO DE CENÁRIO .....</b>	<b>93</b>
<b>4.1 Modelos adotados para as análises .....</b>	<b>93</b>
<b>4.2 Análises e Resultados obtidos .....</b>	<b>95</b>
4.2.1 Caso C1 .....	96
4.2.2 Caso C2 .....	102
4.2.3 Caso C3 .....	108
4.2.4 Caso C4 .....	115
<b>4.3 Comparativo entre resultados.....</b>	<b>121</b>
<b>4.4 Considerações quanto ao estudo de cenário .....</b>	<b>124</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>129</b>
<b>5.1 Conclusão .....</b>	<b>129</b>
<b>5.2 Sugestões para futuras pesquisas .....</b>	<b>131</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>133</b>

## INTRODUÇÃO

Em muitas ocasiões, a atividade humana instala-se em áreas próximas a maciços rochosos, os quais podem estar sujeitos a processos de instabilização. Nestes casos, qualquer movimento de massa, que possa vir a acontecer nestas regiões, trará enorme risco as pessoas e estruturas, muitas vezes com consequências socioeconômicas graves.

Pode-se dizer que um maciço rochoso fraturado é uma associação de blocos de matriz rochosa e descontinuidades, sendo suas propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade consequência do conjunto das propriedades individuais destas duas partes constituintes. Deste modo, um dos tipos de movimentos de massa que podem se formar em uma encosta são as quedas de blocos rochosos.

As quedas de blocos são eventos muito comuns, de difícil previsão e que ocorrem repentinamente. Podem abranger grandes volumes de material, de litologias e geometrias variadas, e implicar elevados valores de energia e velocidade, desta forma, possuindo grande potencial destrutivo. Além do mais, seu desencadeamento não pode ser atribuído a uma única causa, e sim a um conjunto de fatores que colaboram para o colapso, sendo estes divididos em naturais, humanos e acidentais.

Os blocos de matriz rochosa podem ter tamanhos e formatos variados, em decorrência da orientação, espaçamento e persistência das descontinuidades presentes e dos processos de intemperismo sobre o maciço rochoso. Ao se destacarem da encosta, desenvolvem alguns tipos de movimentos que serão influenciados principalmente pela geometria e tipo de revestimento da encosta, bem como pela geometria e fragmentação dos blocos.

As técnicas de mitigação para este tipo de instabilidade estão divididas em eliminação do problema, medidas de convivência e técnicas de estabilização. Sendo a escolha dependente fundamentalmente de uma boa compreensão do fenômeno de queda de blocos, incluindo a identificação de todos os fatores envolvidos e o conhecimento da dinâmica do movimento.

O desenvolvimento e o aperfeiçoamento das metodologias de estudo têm proporcionado um grande avanço na compreensão deste fenômeno, possibilitando a

realização de análises mais racionais e a obtenção de previsões mais precisas. Os métodos experimentais e numéricos têm colaborado para o entendimento do movimento, determinação de parâmetros e avaliação de áreas de risco, além de testar e projetar medidas de proteção.

No entanto, o fenômeno de queda de blocos apresenta características muito peculiares típicas de sistemas não lineares, como grande sensibilidade às condições iniciais, o que o torna não previsível a longo prazo, e comportamento intensamente sistêmico, o que faz com que suas propriedades só possam ser identificadas quando analisadas no âmbito coletivo, pois suas variáveis não apresentam proporcionalidade constante. Este fato acaba por dificultar a compreensão deste fenômeno e, conseqüentemente, o seu tratamento.

## **Motivação**

Embora já se tenha uma grande compreensão sobre o fenômeno de queda de blocos, ainda se faz necessária a busca por novos conceitos e métodos que acrescentem mais informações sobre os fatores que o regem e como estes se manifestam.

## **Objetivos**

A presente pesquisa tem por objetivo principal dar seqüência à análise da aplicabilidade da teoria do caos para descrever o comportamento do fenômeno de queda de blocos, de modo a observar a influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda. Verificando se os sistemas formados satisfazem as principais características de um sistema não-linear e buscando descrever o comportamento deste fenômeno por intermédio das proposições desta teoria.

Para se atingir o objetivo principal proposto, cinco objetivos específicos foram determinados:

1. Obter as distribuições de probabilidade de localização final para simulações utilizando-se os quatro perfis transversais do estudo preliminar de Ignacio (2019) e quatro modelos de blocos distintos, nos formatos hexagonais e quadrados e com bordas arredondadas e vivas, por meio do programa *RocFall* 6.0;
2. Ajustar as distribuições de probabilidade de localização final às formulações das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, obtendo gráficos de ajuste estatísticos, valores dos parâmetros de ajuste e coeficientes de correlação;
3. Compilar e analisar os resultados obtidos nos ajustes de modo a identificar a distribuição que melhor representa a estatística das quedas de bloco para cada cenário proposto e consequentemente identificar o tipo de comportamento que ocorre em cada cenário;
4. Comparar os resultados obtidos na presente pesquisa com os resultados encontrados na pesquisa de Ignacio (2019);
5. Verificar se os resultados obtidos apresentam características de um sistema não linear e se a teoria do caos pode ser utilizada para a análise do comportamento de quedas de bloco de uma forma geral;

## **Estrutura da dissertação**

O presente trabalho encontra-se estruturado em um capítulo inicial, no qual é feita uma introdução ao tema da dissertação e são expostos a motivação e os objetivos que se propõem desenvolver nessa pesquisa, além de cinco capítulos principais.

O capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno de queda de blocos, partindo de uma visão geral sobre movimentos de massa, e, em seguida, focando nos principais conceitos sobre queda de bloco rochosos. Deste modo, são apresentados os fatores condicionantes deste movimento de massa, os principais tipos de instabilidades que podem ocorrer, os condicionantes ao desenvolvimento das trajetórias de queda e um resumo das medidas de estabilização e mitigação em maciços instáveis.

No capítulo 2 são abordadas as metodologias usualmente empregadas no estudo dos fenômenos de quedas de blocos, como os métodos experimentais e os métodos numéricos; um resumo da pesquisa de Ignacio (2019), apresentando a nova perspectiva de análise; e um breve apanhado dos principais conceitos sobre sistemas não lineares e teoria do caos.

No Capítulo 3 é feita uma introdução ao programa *RocFall* versão 6.0, que foi utilizado no desenvolvimento do presente trabalho. São abordados seus aspectos gerais e ferramentas mais importantes, além de fornecer um panorama resumido do processamento das informações.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de cenário realizado para testar a influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica das quedas de blocos, utilizando-se da teoria do caos para descrever o comportamento deste fenômeno. Desta forma, são apresentados os modelos utilizados nas análises, os resultados obtidos, um comparativo com os resultados encontrados no estudo preliminar de Ignacio (2019) e considerações quanto ao estudo realizado.

Por fim, no Capítulo 5 são apontadas as principais conclusões e considerações sobre o estudo, além de algumas sugestões para futuras pesquisas.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O presente capítulo tem por objetivo fornecer uma visão geral sobre o fenômeno de queda de blocos. Para isto, são apresentados conceitos e classificações dos tipos de movimentos de massa, os fatores condicionantes de quedas, como os processos de intemperismo e a presença de descontinuidades, os principais tipos de instabilidades que podem ocorrer em maciços rochosos, os condicionantes ao desenvolvimento das trajetórias dos blocos e algumas medidas de estabilização e mitigação para encostas instáveis.

### 1.1 Movimentos de massa

Também conhecidos como deslizamento, escorregamento, ruptura de talude, fluxo de detritos, entre outros, os movimentos de massa são foco de estudo de vários ramos da ciência e, por isso, ainda não se formulou uma definição única para este fenômeno. Essa diversidade de definições reflete a complexidade da natureza destes eventos, deixando que cada disciplina se apoie em definições específicas e com ligeiras diferenças entre si.

O movimento de massa, para o propósito desse estudo, é considerado como um deslocamento de material de granulometria diversa, na direção descendente de uma encosta por meio de forças gravitacionais, combinadas ou não com a ação da água. O desencadeamento destes processos se dá pela redução da resistência ao cisalhamento e pelo aumento da tensão cisalhante no maciço rochoso, que, por sua vez, são induzidos por agentes naturais, antrópicos e acidentais. (Varnes, 1958)

Diversos autores, como Guidicini e Nieble (1976) e Varnes (1958), abordam e classificam estes agentes, destacando como mais importantes: as propriedades físicas do material que compõem as encostas, a geomorfologia da região, a geometria do terreno, o tipo de cobertura vegetal, o regime pluviométrico, a variação da temperatura, a presença de sismos e atividades vulcânicas, além do tipo de uso e ocupação do solo na região.

Existem diversas propostas de classificação para os movimentos de massa. No cenário internacional, destaca-se a de Cruden e Varnes (1996) fundamentada na proposta de Varnes (1978), sendo esta a adotada pela *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG), a qual é apresentada na Tabela 1 e na Figura 1 a seguir. Para o cenário nacional, a de maior aceitação, e que se permite ser aplicada em nosso contexto regional, é a definida por Augusto-Filho (1992), apresentada na Tabela 2.

Tabela 1 - Classificação dos movimentos de massa (Adaptado de Cruden e Varnes, 1996)

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

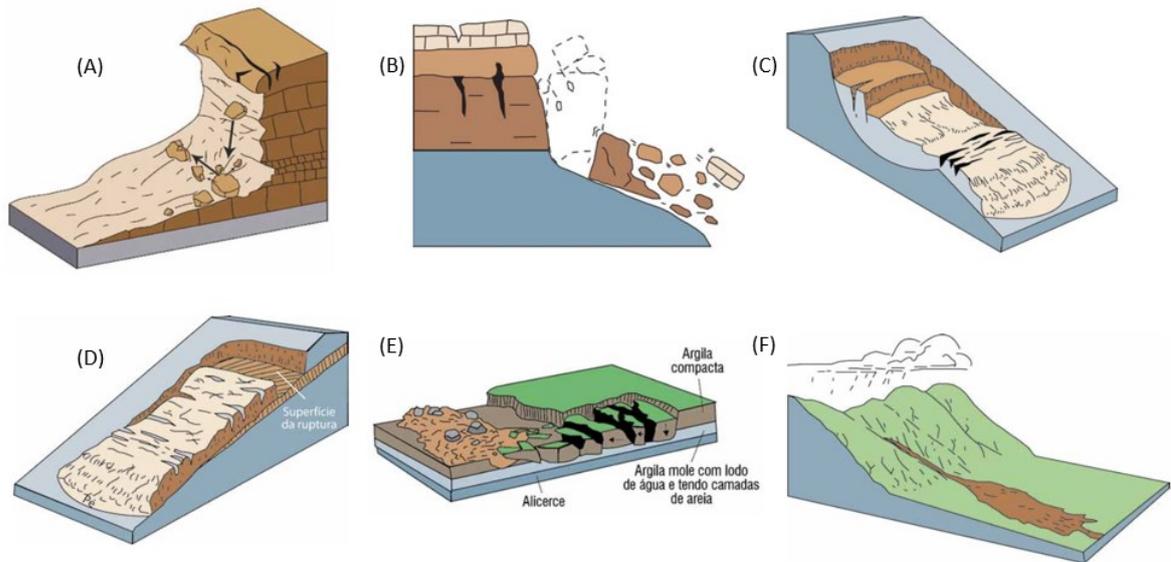


Figura 1 - Exemplificação dos tipos de movimentos de massa: (A) Queda, (B) Tombamento, (C) Escorregamento rotacional, (D) Escorregamento translacional, (E) Espalhamento lateral e (F) Corridas. (Adaptado de Highland e Bobrowsky, 2008)

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

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou fluência	Vários planos de deslocamento (internos); Velocidades de muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; Geometria indefinida
Escorregamentos	Poucos planos de deslocamento (externos); Velocidades de médias (km/h) a altas (m/s); Pequenos a grandes volumes de material; Geometria e materiais variáveis Planares $\Rightarrow$ solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares $\Rightarrow$ solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha $\Rightarrow$ solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	Sem planos de deslocamento; Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; Velocidades muito altas (vários m/s); Material rochoso; Pequenos à médios volumes; Geometria variável: lascas, placas, blocos; Rolamento de matacão; Tombamento
Corridas	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas); Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; Desenvolvimento ao longo das drenagens; Velocidades de médias a altas; Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material; Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

A fim de um melhor entendimento dos tipos de movimentos de massa, são brevemente apresentadas, a seguir, as principais características de cada um com base no exposto pelo trabalho de Cruden e Varnes (1996).

- a) Queda - É caracterizada pelo descolamento do solo ou rocha de uma encosta íngreme ao longo de uma superfície na qual ocorre pouca ou nenhuma deformação de cisalhamento. O material desce principalmente por força da gravidade, em queda livre, saltando ou rolando. Além disso, estes tipo de movimento envolve elevada velocidade e de pequenos a grandes volumes;
- b) Tombamento - Caracteriza-se pela rotação de um bloco de solo ou rocha sobre um eixo localizado abaixo de um ponto de gravidade, atingindo desde velocidades extremamente lentas a extremamente rápidas, sem sofrer colapso. Ocorre sob influência da ação da gravidade e forças exercidas por unidades adjacentes ou por fluidos em rachaduras. Assim, os tombamentos podem levar a quedas ou escorregamentos, dependendo da geometria da massa em movimento, da geometria da superfície de separação e da orientação e extensão das descontinuidades;
- c) Escorregamento - São movimentos descendentes de solo ou rocha, relativamente rápidos, que ocorrem predominantemente em superfícies de ruptura ou em zonas pouco espessas, onde se concentram intensas deformações cisalhantes. Os escorregamentos podem ser de dois tipo: os rotacionais ocorrem através de uma superfície de deslizamento curva e côncava, sendo predominante em materiais homogêneos; já nos translacionais, o material se desloca por sobre uma superfície de ruptura planar ou ondulada, sendo geralmente movimentos mais rasos que os rotacionais. Esta superfície de ruptura normalmente se localiza em descontinuidades do maciço ou na interface entre solo e rocha;
- d) Espalhamento lateral – É a expansão lateral de uma massa de solo ou rocha acomodada por fraturas de cisalhamento ou tração. O solo ou a rocha fraturada localizada sobre um material mais frágil podem sofrer movimentos de subsidência, rotação e translação, até que se desintegre, ao passo que o

material subjacente, menos resistente, flui de forma ascendente através das fraturas;

- e) Corrida – É caracterizada como um movimento espacialmente contínuo sem uma superfície de cisalhamento bem definida. O material se desloca de forma semelhante a um líquido viscoso, estando a velocidade do movimento ligada diretamente à quantidade de água contida na massa;

Cruden e Varnes (1996) ressaltam também que, nos casos em que se dispõe de uma maior quantidade de informação sobre as condições do movimento, estas poderão auxiliar na definição mais precisa do mecanismo analisado, e destacam algumas características importantes:

- estado: refere-se ao comportamento do deslizamento em relação a diferentes tempos de análise;
- distribuição: tenta explicar as possíveis direções da massa em movimento;
- estilo: indica de que maneira os diferentes movimentos contribuem no deslizamento;
- taxa de movimento (ou velocidade): expressa a rapidez com a qual as massas se movimentam. Possibilita estabelecer se o processo permitirá, ou não, certos tipos de intervenções ou se pelo menos a evacuação poderá ser feita;
- teor de umidade: orientação de tipo qualitativa, estimativa da quantidade de água contida na massa deslocada. Poderá ajudar na definição de fenômenos que envolvam principalmente solos;

Uma compreensão maior dos mecanismos do movimento, assim como o reconhecimento de áreas mais propensas e a frequência com que estes eventos ocorrem, se mostra de grande importância para intervenções mais eficazes.

## 1.2 Queda de blocos rochosos

As quedas de blocos são um tipo de movimento de massa comum em regiões montanhosas, caracterizadas pela instabilidade de blocos de matriz rochosa que se desprendem do maciço e se deslocam encosta abaixo sob o efeito da gravidade. É um fenômeno de difícil previsão e de grande potencial destrutivo, podendo envolver grandes volumes e alcançar longas distâncias, além de atingir valores elevados de velocidade e energia cinética durante o movimento.

Este fenômeno, como um evento natural, está condicionado principalmente a presença de descontinuidades e a ação do intemperismo, que juntos serão responsáveis pela formação dos blocos de matriz rochosa individualizados, pelo controle dos processos de ruptura e deformação, assim como pela alteração das forças atuantes e da resistência do maciço rochoso.

### 1.2.1 Intemperismo

O intemperismo ou meteorização é o conjunto de processos que ocasiona a desintegração e a decomposição das rochas por ação de agentes atmosféricos e biológicos, com a consequente produção de outros materiais que irão constituir os solos, os sedimentos e as rochas sedimentares (Chiossi, 1983). De acordo com os mecanismos predominantes de atuação, os processos são classificados em intemperismo físico (ou mecânico) e químico, porém, quando há também a ação de organismos vivos ou da matéria orgânica, o intemperismo é chamado de físico-biológico ou químico-biológico.

Todo processo em que as rochas se quebram, com a separação dos grãos minerais antes coesos, como resultado da energia desenvolvida por forças físicas, constitui o intemperismo físico. Toledo et al. (2009) destacam os processos mais significativos, os quais são resumidamente apresentados a seguir:

- Ação da variação de temperatura – Repetidas seguidamente por muito tempo, essas variações afetam a rocha, que tem seus minerais ora em estado de

expansão, ora em estado de contração. Estas ocorrências causam pequenas fraturas que vão se alargando com o tempo e acabam por desintegrar a rocha. As mudanças cíclicas de umidade em associação com a variação térmica, também colaboram para este fraturamento. Esse é um processo que ocorre mais superficialmente, pois, à medida que se aprofundam, essas variações tornam-se menores;

- Congelamento da água – A água presente nas fendas e aberturas de uma rocha aumenta o seu volume ao se congelar, o que força as paredes, causando esforços que terminam por fraturar ainda mais a rocha. Assim, processos sucessivos de congelamento e descongelamento causam tensões internas que acarretam a formação de redes de fissuras;
- Cristalização de sais – A evaporação da água infiltrada nas aberturas presentes em uma rocha causa a cristalização dos sais dissolvidos nesta água, e, conforme estes aumentam de tamanho, vão exercendo uma certa tensão nas paredes, gerando a desagregação;
- Alívio de tensões – Como consequência da diminuição da pressão litostática, ocorre um alívio da tensão, que acarreta a expansão do corpo rochoso em favor de planos de fratura que são gerados paralelamente à superfície do terreno, dando origem a uma estrutura em camadas, conforme exemplificado na Figura 2;

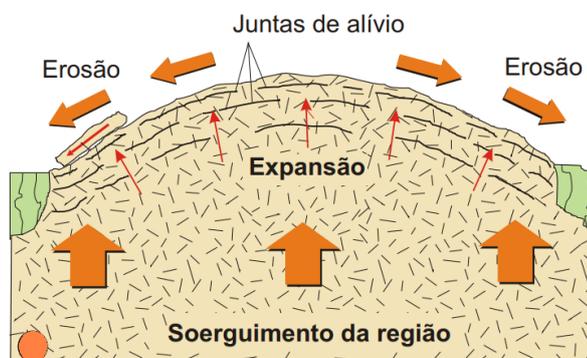


Figura 2 - Formação das juntas de alívio em consequência da expansão do corpo rochoso.  
(Toledo et al., 2009)

- Ação física dos vegetais – Muitas rochas podem se desintegrar pelo crescimento de raízes ao longo de suas fraturas, que vão exercendo pressão nas paredes rochosas para ganhar espaço;

Sabe-se que, em geral, os intemperismos físico e químico trabalham simultaneamente, contudo há predominância do intemperismo físico nos primeiros estágios, que, entre outras alterações, fragmenta a rocha e, portanto, aumenta a superfície exposta ao ar e à água, abrindo caminho e facilitando a ação química. Assim, o intemperismo químico tende a ser mais importante nos estágios finais de alteração.

A Figura 3 apresenta este processo de aumento da superfície específica dos blocos de rocha. Para isso, foi utilizado um bloco aproximadamente cúbico com área exposta de  $6\text{m}^2$  e este foi dividido em oito blocos cúbicos menores, que passaram a apresentar um total de superfície exposta de  $12\text{m}^2$ . Ao projetar em um gráfico, é possível observar que a superfície específica aumenta geometricamente com o aumento do número de fragmentos em que o bloco é dividido. (Toledo et al., 2009)

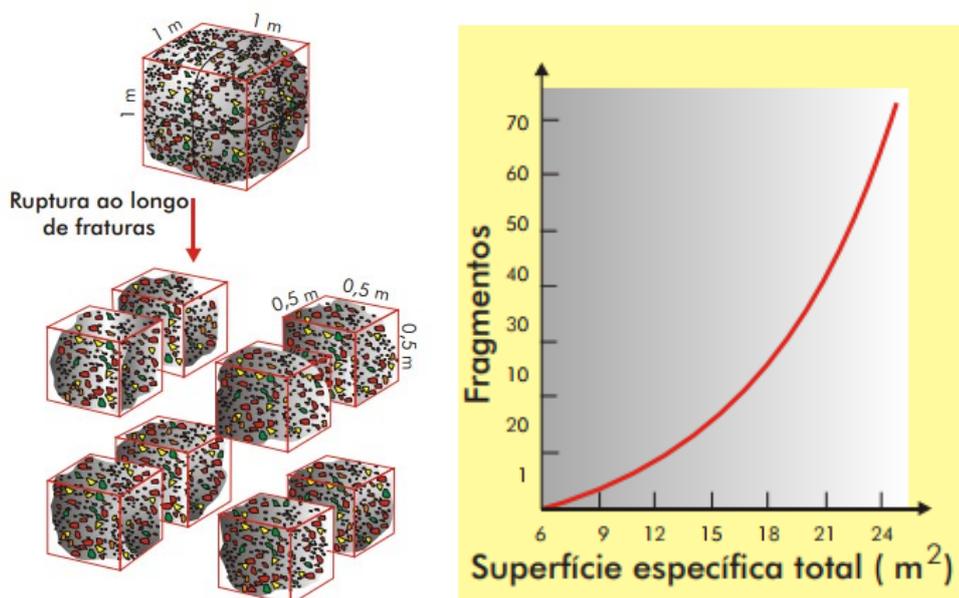


Figura 3 - Área de superfície exposta e Gráfico – Superfície específica x Número de fragmentos. (Adaptado de Toledo et al., 2009)

O intemperismo químico caracteriza-se pela reação química entre a rocha e a água das chuvas, que se infiltra e percola por entre as fraturas. Estes processos acarretam o desaparecimento de certos minerais, originando a alteração das rochas e, conseqüentemente, o aparecimento de outros minerais. As reações químicas mais importantes, destacadas por Chioffi (1983), são apresentadas a seguir.

- Hidrólise – A água penetra nos capilares dos minerais e, combinando seus íons com os destes, forma novas substâncias;
- Hidratação – Certos minerais podem adicionar moléculas de água a sua composição, formando novos compostos. Como consequência, os minerais têm seu volume aumentado, tensionando-se mutuamente, o que lhes diminui a coesão, causando a desintegração das rochas;
- Oxidação – Alguns minerais se decompõem facilmente pela ação oxidante do  $O_2$  e do  $CO_2$  dissolvidos na água, dando origem a hidratos, óxidos, carbonatos;
- Carbonatação – Processo de decomposição, onde o  $CO_2$  contido na água forma pequenas quantidades de ácido carbônico;
- Decomposição químico-biológica – O produto da decomposição microbiana e química dos detritos orgânicos é o húmus, que se transforma em ácido húmico, o qual acelera grandemente a decomposição das rochas, assim como outros ácidos;

Tarbuck et al. (2014) explicam que inicialmente todas essas reações de intemperismo químico acontecem nas fissuras das rochas, acarretando um fenômeno denominado intemperismo esferoidal, representado na Figura 4. Neste processo, as arestas e vértices dos blocos são atacados pela água em mais de uma direção, causando uma decomposição mais rápida nessas regiões do que nas faces.

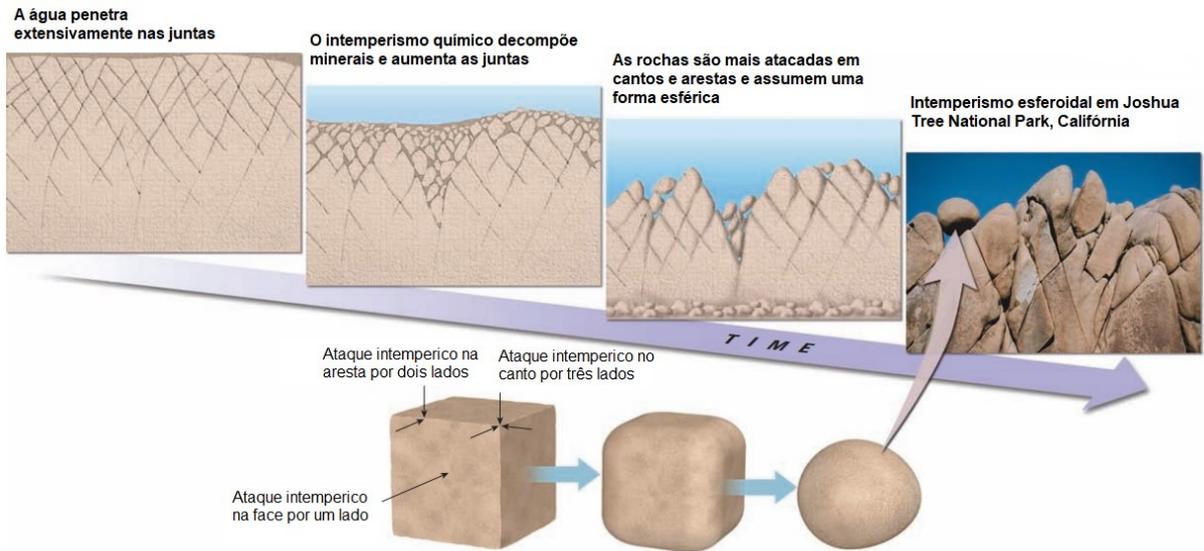


Figura 4 - Representação do fenômeno de intemperismo esférico (Adaptado de Tarbuck et al., 2014)

Por meio do processo de hidratação, blocos concêntricos são separados das partes pouco ou ainda não afetadas, provocando um arredondamento dos cantos, o que resulta na formação dos blocos de formas arredondadas a partir de formas angulosas. Toledo et al. (2009) apontam que este tipo de alteração é mais frequente em rochas ígneas, que não tem orientação preferencial, como granito e basaltos. A Figura 5 apresenta um exemplo deste processo em um bloco de rocha ígnea com formação em escamas concêntricas.



Figura 5 - Alteração intempérica esférica de rocha ígnea. (Toledo et al., 2009)

Toledo et al. (2009) citam que “várias características do ambiente em que se processa o intemperismo influem diretamente nas reações de alteração, no que diz respeito a sua natureza, velocidade e intensidade.” São os chamados fatores de controle do intemperismo, basicamente representados pelo clima, topografia, biosfera, tempo e material parental.

O clima se expressa pela variação sazonal da temperatura e pela distribuição das chuvas, determinando o tipo e a eficácia do intemperismo numa dada região e, conseqüentemente, regulando a natureza e a velocidade das reações químicas. A Figura 6, a seguir, apresenta um gráfico que mostra as variações das condições de intemperismo em função da pluviosidade anual e da temperatura média anual, sendo possível observar que, em regiões áridas, há uma predominância da ação dos agentes físicos em relação aos químicos, acontecendo o inverso nas regiões úmidas.

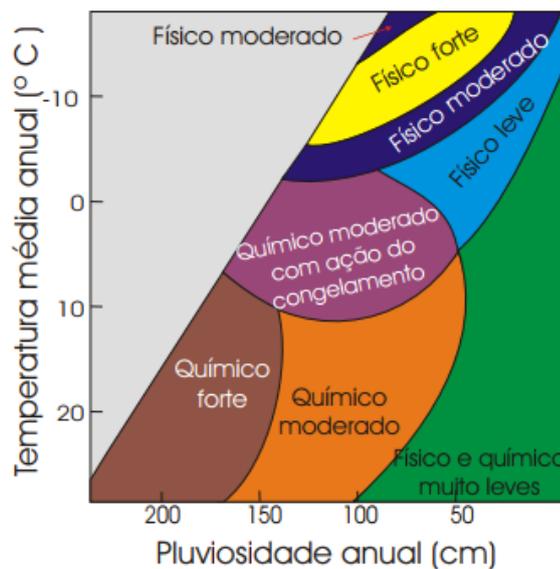


Figura 6 - Gráfico da variação das condições do intemperismo em função da pluviosidade anual e da temperatura média anual (Toledo et al., 2009)

A topografia da região influencia diretamente no regime de infiltração e drenagem das águas pluviais e, conseqüentemente, controla o desenvolvimento do intemperismo químico, uma vez que as reações químicas precisam de certas condições para ocorrerem. Estas vão acontecer mais intensamente em regiões do relevo onde é possível uma boa infiltração da água, percolação por tempo suficiente

para a consumação das reações e drenagem suficiente para lixiviação dos produtos solúveis. Na Figura 7 são apresentadas diferentes situações de relevo e sua influência no intemperismo químico.

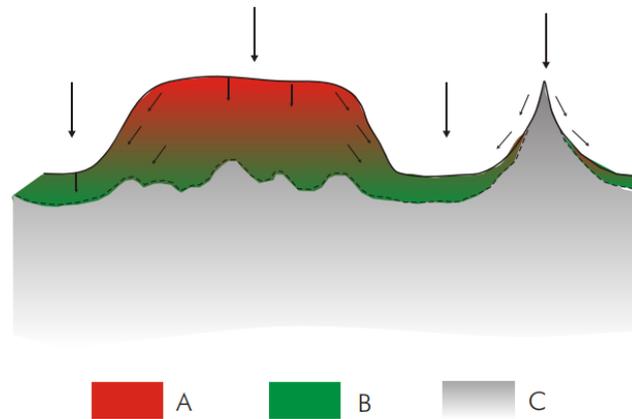


Figura 7- Influência da topografia na intensidade do intemperismo (Toledo et al., 2009)

Setor A: Boa infiltração e boa drenagem – favorecem o intemperismo químico.

Setor B: Boa infiltração e má drenagem – desfavorece o intemperismo químico.

Setor C: Má infiltração e má drenagem – desfavorece o intemperismo químico.

A Biosfera fornece matéria orgânica para as reações químicas e remobiliza materiais. Um exemplo são os ácidos orgânicos produzidos pelos micro-organismos, que atacam mais rapidamente as superfícies rochosas do que outros tipos de agentes do intemperismo. Além disso, influencia bastante a qualidade da água que promove o intemperismo químico, baixando seu pH e tornando-a mais ácida.

O tempo como um fator de controle do intemperismo vai depender de uma série de fatores. As rochas não se decompõem ou se desintegram instantaneamente e em geral requerem um período relativamente longo para sofrerem alteração, que é variável em função do tipo de rocha e das condições climáticas locais. Pode-se citar, como exemplo, que é necessário um tempo mais longo de exposição às intemperes para haver o desenvolvimento de um perfil de alteração em condições pouco agressivas.

A rocha parental influi na ação do intemperismo, segundo as diferentes resistências oferecidas ao ataque físico e químico, que depende principalmente da natureza dos minerais constituintes, da sua textura e da sua estrutura. Ou seja, alguns minerais constituintes das rochas são mais suscetíveis que outros a

alteração, bem como a textura original influencia à medida que permite maior ou menor infiltração da água, além do fato de sua estrutura possuir descontinuidades ou não, como juntas e diáclases.

As diferenças na natureza, velocidade e intensidade dos processos de intemperismo provocadas por estes fatores de controle vão acarretar diferentes estágios de alteração no maciço rochoso, que variam de acordo com a profundidade em relação a superfície, assim como para diferentes seções do maciço.

Deere e Patton (1971) definem como perfil de alteração a sequência de camadas com diferentes níveis de intemperismo, que apresentam diferentes propriedades geotécnicas e características mistas de solos e rochas recobrendo o maciço rochoso. A Figura 8 ilustra dois perfis de alteração que se desenvolvem sobre rochas metamórficas (a) e ígneas (b) de acordo com o sistema de classificação de Deere e Patton (1971), que divide o perfil em três zonas principais: solo residual, rocha alterada e rocha sã.

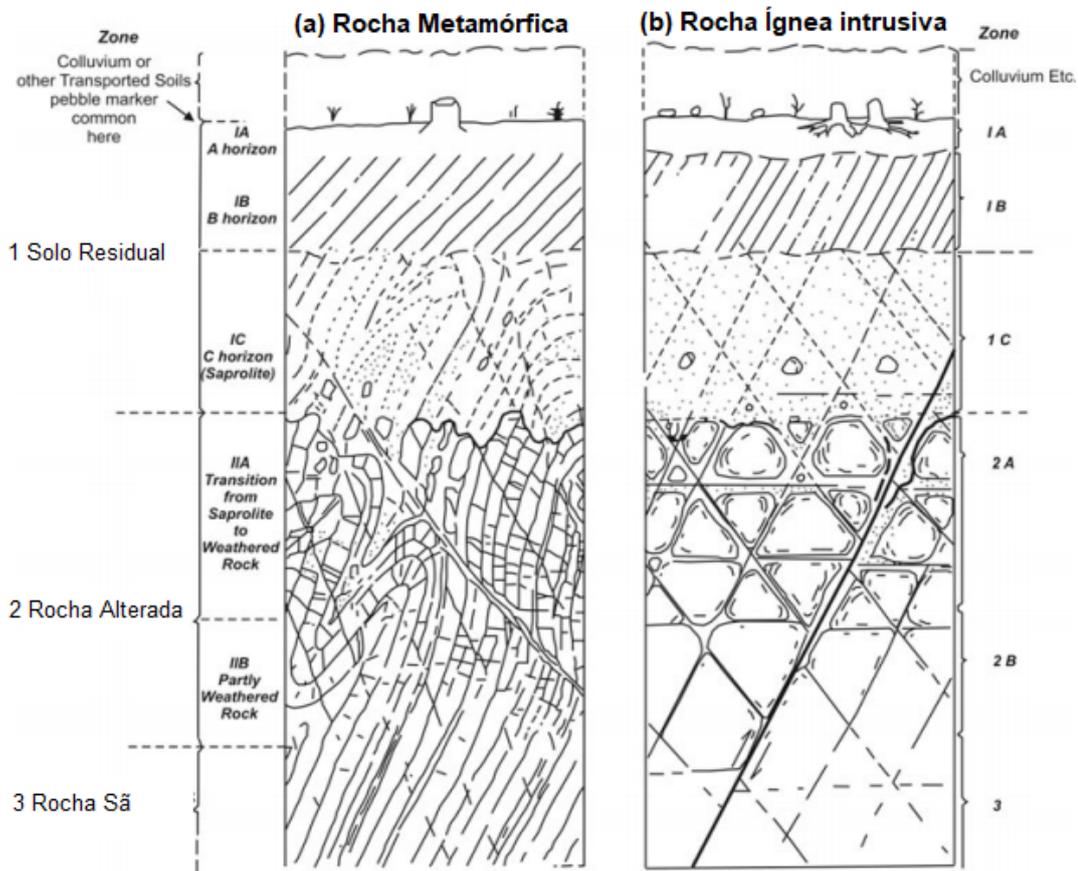


Figura 8 - Perfis de alteração de acordo com o sistema de classificação de Deere e Patton (a) rocha metamórfica, (b) rocha ígnea (Adaptado de Deere e Patton, 1971)

### 1.2.2 Descontinuidades

Diáclases, juntas, falhas e acamamentos são exemplos de descontinuidades. Estas constituem um importante papel na infiltração e circulação da água, pois atuam como caminhos preferenciais de alteração, permitindo que as frentes de intemperismo progridam para o interior do maciço rochoso de um modo muito mais incisivo.

O encontro dos planos de descontinuidades juntamente com os processos de intemperismo vão originar a individualização de blocos de matriz rochosa no interior de um material mais alterado, produzindo um aumento da heterogeneidade do maciço rochoso como um todo (Fernandes e Amaral, 1996). Deste modo, pode-se dizer que maciços rochosos fraturados são uma associação de blocos de matriz rochosa e descontinuidades.

A ISRM (1978) descreve as descontinuidades como sendo qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma formação rochosa, ou seja, é uma superfície natural em que a resistência à tração é nula ou muito baixa. Por este motivo, Vallejo et al. (2002) citam que estes planos de descontinuidade vão condicionar as propriedades e o comportamento resistente, deformacional e hidráulico dos maciços rochosos fraturados. Conferindo um caráter descontínuo e anisotrópico ao maciço, tornando-o assim mais deformável e fraco.

O reconhecimento e caracterização das descontinuidades são essenciais para o estudo do comportamento mecânico e hidro geológico dos maciços rochosos. De modo a auxiliar este processo de caracterização, foram definidos alguns parâmetros básicos de identificação, como parâmetros de distribuição espacial, geométricos e geomecânicos.

De acordo com a ISRM (1978), Wyllie e Mah (2004) e Pinheiro (2014), os principais parâmetros que caracterizam as descontinuidades são os apresentados graficamente na Figura 9 e descritos resumidamente a seguir.

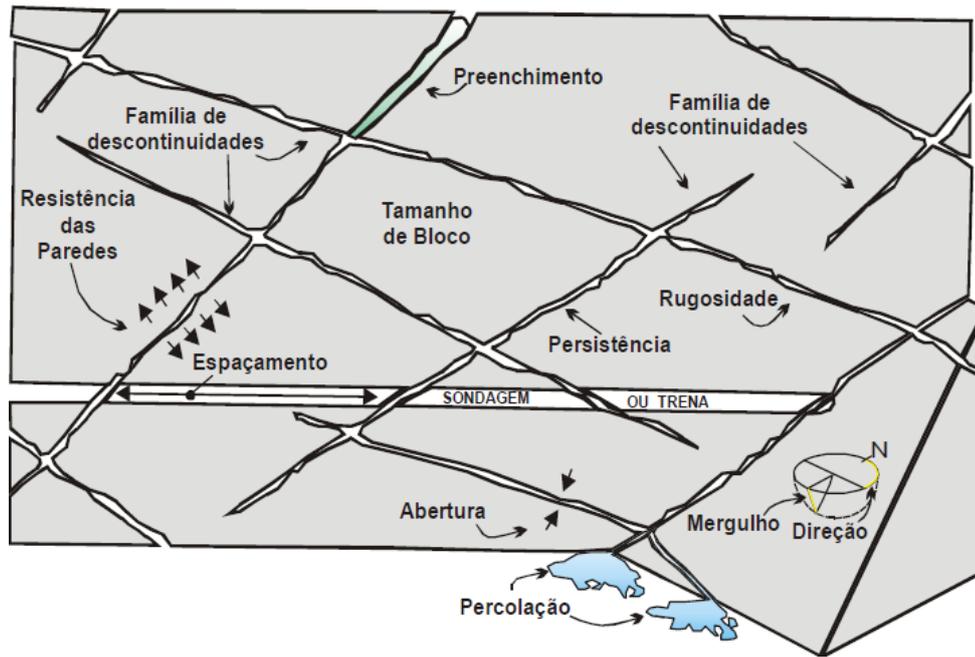


Figura 9 - Parâmetros das descontinuidades (Nunes, 2009)

- a) Orientação: Descreve a atitude da descontinuidade no espaço e é definida por dois parâmetros angulares; a direção do mergulho, que é o azimute da linha normal ao plano da descontinuidade; e o mergulho, que é a inclinação vertical do plano da descontinuidade com relação ao plano horizontal;
- b) Espaçamento: Corresponde à distância entre duas descontinuidades dentro do mesmo conjunto, medida na direção normal a elas. A resistência do maciço está diretamente relacionada com o espaçamento, pois, em rochas muito fraturadas, as descontinuidades individuais se juntarão mais facilmente para formar uma zona contínua de fraqueza;
- c) Persistência: Refere-se a medida do comprimento ou área contínua da descontinuidade dentro do maciço rochoso. Esse parâmetro define o comprimento das possíveis superfícies deslizantes, e o volume potencial da massa de falha, de modo que o mapeamento deve se concentrar em medir a persistência do conjunto de descontinuidades que terão maior influência na estabilidade;

- d) Rugosidade: Caracterizada pelas irregularidades e ondulações inerentes da superfície da descontinuidade, é um componente importante da resistência ao cisalhamento. A rugosidade se torna menos importante quando a descontinuidade é preenchida ou deslocada e o intertravamento é perdido;
- e) Resistência da parede: É a resistência à compressão das paredes rochosas adjacentes a uma descontinuidade. Pode ser menor que a resistência do bloco de rocha devido a intemperismo ou alteração das paredes. É um importante componente da força de cisalhamento se as paredes da rocha estiverem em contato;
- f) Abertura: É a distância perpendicular que separa as paredes rochosas adjacentes de uma descontinuidade aberta, na qual o espaço intermediário é preenchido com ar ou água;
- g) Preenchimentos: Este parâmetro se refere aos minerais e alguns outros materiais que possam aparecer no meio das descontinuidades. Uma descrição completa do material de preenchimento é necessária para prever o comportamento da descontinuidade;
- h) Percolação/ infiltração: Fluxo de água presente nas descontinuidades ou no maciço rochoso em geral. Além de aumentar a poropressão, também promove a alteração do material do maciço;
- i) Tamanho dos blocos: O tamanho e a forma do bloco são determinados pelo espaçamento e persistência da descontinuidade e pelo número de conjuntos presentes no maciço rochoso;
- j) Número de conjuntos: O número de conjuntos de descontinuidades que se cruzam influenciará a extensão em que a massa rochosa pode se deformar sem a ruptura da matriz rochosa (ou rocha intacta);
- k) Famílias de descontinuidades: grupo de descontinuidades com as mesmas características;

### 1.3 Tipos de instabilidades em maciços rochosos

Vallejo et al. (2002) explicam que os diferentes tipos de ruptura são condicionados pelo grau de fraturamento do maciço rochoso e pela orientação e distribuição das descontinuidades em relação à encosta, sendo a estabilidade definida por uma combinação dos parâmetros resistentes das descontinuidades e da matriz rochosa.

Em maciços rochosos duros ou resistentes, as descontinuidades determinam a disposição dos planos de ruptura, enquanto em maciços rochosos brandos ou muito fraturados, a matriz rochosa também desempenha um papel importante na geração destes planos e do tipo de ruptura. No caso de instabilidades envolvendo movimentos em planos de descontinuidades, essas podem combinar um ou mais padrões de ruptura.

Diversos autores abordam o assunto classificando as rupturas em vários padrões, porém a maioria considera quatro tipos como os principais (planar, cunha, tombamento e circular) e os outros como desdobramentos. A seguir, é feita uma breve descrição dos principais tipos, segundo o exposto por Norrish e Wyllie (1996) e Vallejo et al. (2002).

#### 1.3.1 Ruptura planar:

As rupturas planares ocorrem a favor de uma descontinuidade principal de mesma direção da encosta, cumprindo a condição na qual o ângulo de mergulho da encosta seja maior que o ângulo da descontinuidade, e este, por sua vez, seja maior que o ângulo de atrito da superfície da junta (Figura 10 - a). Além disso, devem existir outros planos de descontinuidades, perpendiculares à face da encosta, para formar um bloco isolado junto com a descontinuidade principal, permitindo assim o livre escorregamento.

De acordo com a distribuição e a característica das descontinuidades, a ruptura planar pode se apresentar de várias maneiras, sendo as mais frequentes por um plano paralelo à face do talude, provocada por erosão ou perda de resistência na

base da encosta, ou por um plano que aflora na face ou na base da encosta, com ou sem fenda de tração.

### 1.3.2 Ruptura em cunha:

A ruptura em cunha é formada por dois planos de descontinuidades cuja interseção mergulha em direção à encosta, definindo um bloco em formato de cunha (Figura 10 - b). Para que seja produzido este tipo de ruptura, os dois planos devem aflorar na superfície da encosta e, assim como na ruptura planar, o ângulo de mergulho da encosta deve ser maior que o ângulo do mergulho da linha de interseção dos dois planos de descontinuidade, que, por sua vez, deve ser maior que o ângulo de atrito das juntas.

Este tipo de ruptura ocorre em maciço com duas ou mais famílias de descontinuidades, cuja orientação, espaçamento e continuidade determinam a forma e o volume da cunha.

### 1.3.3 Ruptura por tombamento:

A ruptura por tombamento ocorre em maciços rochosos que apresentam descontinuidades paralelas ou subparalelas entre si, formando acamamentos ou colunas, onde estas colunas apresentam direção de mergulho contrária a inclinação da encosta (Figura 10 - c). Em geral, as colunas apresentam-se subdivididas em blocos formados por sistemas de descontinuidades ortogonais entre si.

Este tipo de ruptura implica um movimento rotacional dos blocos, sobre um ponto ou eixo abaixo do centro de gravidade da massa deslocada, e se dá para frente e para fora da encosta. Neste caso, sua estabilidade não é condicionada apenas pela resistência ao deslizamento.

#### 1.3.4 Ruptura circular:

A ruptura circular ocorre em maciços rochosos brandos pouco competentes e em maciços altamente alterados ou fraturados, onde os planos de descontinuidade não controlam o comportamento mecânico. Isto faz com que a superfície de deslizamento tenha o formato de um arco de circunferência, semelhante a uma ruptura em solo (Figura 10 - d).

No entanto, a existência de áreas singulares de fraqueza e grandes planos de descontinuidade nesse tipo de maciço, como falhas, pode condicionar modelos de ruptura com outras tipologias.

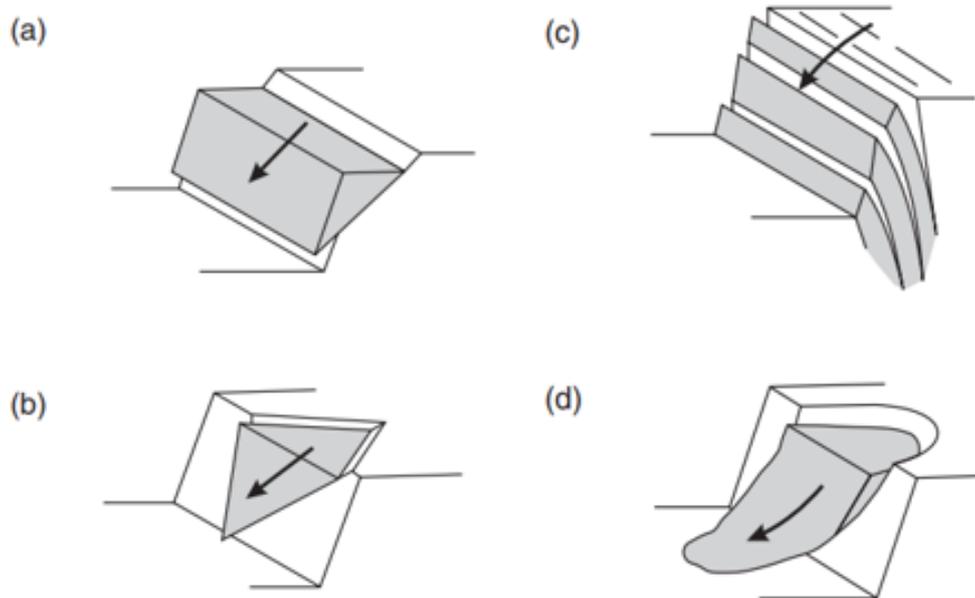


Figura 10 - Mecanismos de ruptura: (a) Ruptura planar; (b) Ruptura em cunha; (c) Ruptura por tombamento; (d) Ruptura circular (Adaptado de Wyllie e Mah, 2004)

#### 1.4 Condicionantes para a trajetória de queda

De acordo com Ritchie (1963), muitos fatores são condicionantes para o desenvolvimento da trajetória de queda de um bloco de rocha, dentre eles, tamanho e formato do bloco, ângulo de inclinação da encosta, características e revestimento da superfície da encosta, altura de queda, tipo de rocha, gravidade e tempo; porém alguns influenciando mais que outros.

A geometria e o tipo de revestimento da encosta controlam principalmente os padrões de movimento do bloco ao longo da sua trajetória de queda, os quais se apresentam em quatro tipos distintos: queda livre, salto, rolamento e deslizamento. Sendo que, em um desprendimento típico, o bloco tende a desenvolver não somente um, mas dois ou mais tipos de movimento. (Ritchie, 1963)

Para Ritchie (1963), o movimento de queda livre ocorre se a inclinação da encosta for superior a  $76^\circ$ , podendo ser generalizado para valores superiores a  $70^\circ$ . Azzoni et al. (1995) citam que na fase de queda livre, os blocos podem desenvolver movimentos de rotação e translação, os quais influenciarão sua trajetória, pois, ao entrar em contato com a superfície, podem saltar em um sentido inesperado em relação aos movimentos anteriores.

Ao longo do percurso de queda livre, caso a declividade da encosta diminua, o bloco colide com a superfície, dando origem ao movimento definido como salto. Este impacto, na maioria dos casos, gera uma perda de energia significativa, que pode ser proveniente da natureza do revestimento da superfície da encosta ou da fragmentação do bloco em decorrência da colisão. (Bozzolo e Pamini, 1986)

À medida que a inclinação média da encosta se torna igual ou inferior a  $45^\circ$ , o movimento de salto aos poucos dá lugar ao movimento de rolamento, onde os blocos estão quase constantemente em contato com o solo. No entanto, quando a resultante das forças atuantes sobre o bloco encontrar-se dentro do plano de contato entre o bloco e a superfície da encosta, ocorrerá o deslocamento por deslizamento. Este normalmente acontece nas fases inicial e final da trajetória, onde os níveis de energia são mais baixos. (Gálvez, 2012)

Bozzolo e Pamini (1986) explicam que, se a inclinação média da encosta torna a aumentar, um bloco em movimento de rolamento ou deslizamento pode voltar a desenvolver movimentos como rolamento, salto ou queda; entretanto, se a

inclinação se mantiver constante ou diminuir, o bloco continua a desenvolver o movimento de rolamento ou deslizamento até sua paralização completa, devido à perda de energia que sofre por meio do efeito do atrito.

Quanto ao tipo de revestimento da superfície da encosta, Hoek (2007) explica que superfícies de rochas sem revestimento e sem desgastes não retardam o movimento de queda em qualquer grau significativo, tornando-se as mais perigosas. Estas podem transmitir uma alta velocidade horizontal ao bloco em queda, fazendo com que ele salte um longo caminho para fora da encosta. Por outro lado, superfícies muito alteradas ou cobertas de material como pedriscos ou vegetação, absorvem uma quantidade considerável de energia e, em alguns casos, irão parar completamente o movimento dos blocos.

Esta capacidade de retardamento do material da superfície é expressa pelo coeficiente de restituição, uma característica particular de cada material (Hoek, 2007). Trata-se de um conceito da física clássica, originário da teoria das colisões, que diz que o coeficiente de restituição caracteriza a quantidade de energia perdida devido à parcela de deformação inelástica sofrida por um corpo durante uma colisão.

No estudo das quedas de bloco, Gálvez (2012) o descreve como a resultante da comparação das propriedades de movimento do bloco imediatamente antes e logo após o impacto com a superfície da encosta. Tavares (2015) ressalta que existem várias definições, porém nenhum consenso generalizado sobre o coeficiente de restituição. Este fato fez com que diferentes modelos de impacto fossem desenvolvidos ao longo dos anos, sendo os mais comuns aqueles que abordam uma relação entre velocidades, impulsos e energias.

Entretanto, a necessidade de se decompor o coeficiente de restituição no estudo de superfícies inclinadas, como o caso das encostas, é um ponto em comum para alguns autores (Buzzi et al., 2011; Chau et al., 2002; Giani et al., 2004; Rayudu, 1997). Isto posto, a componente normal à superfície estaria relacionada ao amortecimento do impacto, enquanto a componente tangencial estaria associada ao atrito entre as superfícies em contato.

O cálculo dos coeficientes de restituição (CR) normal (n) e tangencial (t), com base em uma relação entre as velocidades antes do impacto (pré) e após o impacto (pós), é apresentado nas equações (1) e (2) e esquematicamente na Figura 11, a seguir.

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

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

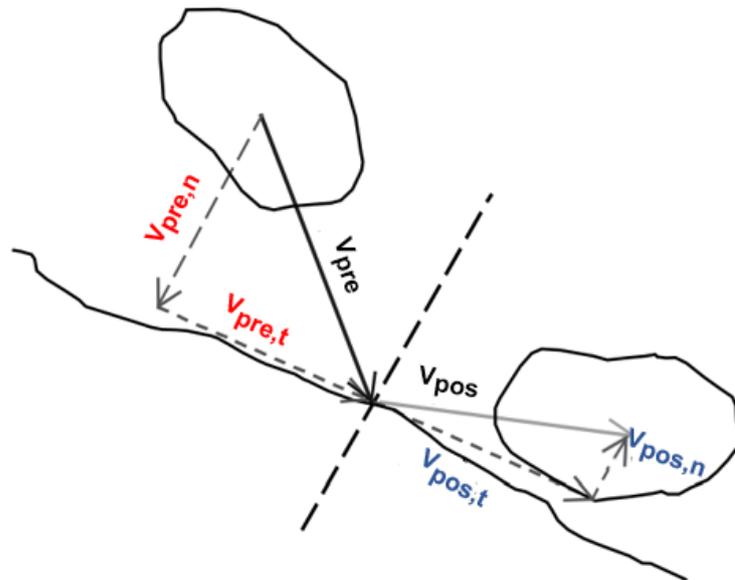


Figura 11 - Esquema do comportamento da velocidade antes e após o impacto (Adaptado de Giani et al., 2004)

Rayudu (1997) aponta que uma ligeira mudança no valor adotado de coeficiente de restituição resulta em trajetórias de queda totalmente diferentes, demonstrando a importância de se obter valores de coeficientes com maior precisão. Sua determinação pode ser feita por meio de testes laboratoriais e em campo ou por retroanálise de eventos ocorridos. Deste modo, os coeficientes de restituição são considerados parâmetros críticos e de difícil obtenção.

A forma e o tamanho dos blocos também exercem uma influência significativa para o desenvolvimento da trajetória. Azzoni et al. (1995) apontam que a análise experimental de um impacto mostra que as características do movimento após o choque são fortemente condicionadas pela forma do bloco, além da geometria da encosta e energia dissipada.

Deste modo, Giani et al. (2004) destacam em sua pesquisa os seguintes efeitos observados: a eficiência do movimento é maior para blocos com forma esférica e superfícies lisas do que para blocos com superfícies e forma irregulares; a posição relativa do bloco no momento do impacto pode favorecer a parada do movimento se a colisão ocorrer entre duas superfícies planas ou, por outro lado, pode causar perdas limitadas de energia se o impacto envolver a borda do bloco; e a distância percorrida pelo bloco pode ser extremamente variável, dependendo do plano ao qual seu momento de inércia esteja referenciado.

Da mesma forma, Rocha (2009) destaca que blocos menores atingirão distâncias menores, pois apresentam energia cinética total consideravelmente menor em relação aos blocos maiores, e faz menção que tal fato pode ser observado no mapeamento de tálus em campo, onde geralmente o material fino é encontrado perto da face da encosta e os blocos maiores são encontrados na parte final da base da encosta.

O último fator que merece destaque como condicionante da trajetória de queda é a fragmentação do bloco após o impacto com a superfície. Este fenômeno, apesar de ser natural e muito frequente, é provavelmente o aspecto mais complicado e pouco compreendido de uma queda de bloco, sendo poucas as contribuições encontradas na literatura a este respeito.

Giacomini et al. (2009) tratam a quebra de um bloco como um fenômeno desencadeado por um limiar de energia de fragmentação, que depende principalmente do tipo de rocha e da geometria do bloco. Quando a energia cinética impactante atinge esta energia de fragmentação, o bloco é aleatoriamente dividido em vários fragmentos e a energia cinética restante é distribuída entre os fragmentos na proporção do volume de cada um deles. Sendo a presença de descontinuidades, o ângulo de impacto e as altas velocidades fatores que também colaboram para a fragmentação dos blocos.

Esta fragmentação altera o formato e tamanho dos blocos e frequentemente causa altas perdas de energia, o que leva estes fragmentos a pararem completamente seu movimento ou a seguirem trajetórias muito diferentes e até maiores daquelas desenvolvidas pelo bloco intacto, tornando relevante a consideração deste fenômeno nas análises de quedas de bloco. (Giani et al., 2004)

Em vista disso, torna-se muito importante no estudo das quedas de bloco um melhor conhecimento dos mecanismos e condicionantes das trajetórias, de maneira

a se adotar modelos matemáticos e parâmetros mais condizentes com o problema em questão, visando um melhor dimensionamento dos elementos de proteção necessários para a mitigação ou eliminação das instabilidades.

### 1.5 Estabilização e mitigação em maciços rochosos instáveis

A realização completa de um projeto de estabilização e/ou mitigação implica três fases distintas: diagnóstico, solução e monitoramento. A primeira inclui a identificação do problema e fornece todos os elementos relevantes para a escolha da solução a ser adotada. A segunda contempla a escolha da solução, o detalhamento do projeto e a implantação da obra. Já a terceira abrange os planos de manutenção e os sistemas de monitoramento, tanto das encostas que sofreram intervenção, como das que ainda não apresentaram esta necessidade. (GEO-RIO, 2014)

Segundo Rocha (2009), a definição da solução a ser adotada, seja esta de estabilização e/ou mitigação de suas consequências, tem como condição primordial a compreensão dos fatores que desencadearam o movimento de massa na encosta.

Visando a orientação para uma correta identificação e caracterização do problema, a NBR 11682 (ABNT, 2009) estabelece procedimentos preliminares de investigação, dentre estes, pode-se citar o conhecimento das características do local, consulta a mapas e levantamentos disponíveis, verificação de restrições legais e ambientais, elaboração de laudo de vistoria, programa de investigações geotécnicas com instrumentação preliminar, levantamentos topográficos e levantamento de dados hidrológicos, geológicos e geomorfológicos.

De posse de todas as informações pertinentes, inicia-se a fase de diagnóstico, onde é feita a caracterização do perfil geológico-geotécnico e do tipo de instabilidade, define-se o modelo de cálculo com os respectivos parâmetros e avalia-se as possíveis soluções para o problema. Na maioria dos casos, existe mais de uma alternativa de solução, sendo sua escolha feita levando-se em consideração aspectos econômicos e construtivos, questões ambientais, prazo, segurança e interferências.

Alguns autores, como Tavares (2015), Pelizone (2014) e Rayudu (1997), dividem as soluções para problemas de instabilidade em encostas rochosas em dois grandes grupos: medidas ativas e medidas passivas. O primeiro grupo contempla a eliminação do problema e técnicas de estabilização, já o segundo grupo contempla as soluções de convivência com as instabilidades.

As medidas ativas são aquelas que interferem diretamente no processo de instabilidade, tentando extinguir as deformações existentes e eliminando as possibilidades de ruptura, sendo consideradas medidas predominantemente técnicas. Por outro lado, as medidas passivas são associadas aos processos de instabilidade, na tentativa de reduzir os danos da ruptura, porém sem evitá-las. Estas técnicas têm a capacidade de absorver a energia proveniente dos blocos em queda, imobilizando ou desviando-os ao longo do seu percurso, e são consideradas medidas tanto técnicas quanto político-administrativas. (Pelizone, 2014)

A seguir, são descritas resumidamente algumas soluções para instabilidade em encostas rochosas encontradas nas seguintes fontes: Freitas (2013), Gálvez (2012), Ignácio (2019), Rocha (2009), Tavares (2015), Vallejo et al. (2002), Wyllie (2015) e Wyllie e Mah (2004). Devido à grande variedade de técnicas disponíveis atualmente, buscou-se priorizar as apontadas pela GEO-RIO (2014), que são as de maior utilização no município do Rio de Janeiro.

### 1.5.1 Soluções de convivência

As soluções de convivência com encostas rochosas instáveis, também chamadas de medidas passivas, aplicam-se a encostas muito fraturadas ou com uma grande quantidade de blocos soltos, quando não existe limitação técnica ou econômica impedindo o destacamento e a queda do bloco.

Este tipo de projeto visa controlar a trajetória e o alcance dos blocos, de forma a garantir a integridade física das estruturas e da população presentes próximas das áreas de instabilidade. Quando comparadas às técnicas de estabilização, estas soluções apresentam maior economia e facilidade executiva, porém exigem um compromisso contínuo de manutenção e reparo.

As supracitadas soluções vêm se desenvolvendo ao longo dos anos e atualmente existem vários tipos sendo comercializadas, dentre elas, a GEO-RIO (2014) destaca a tela metálica, o muro de impacto, a berma dissipadora de energia, a trincheira para coleta de blocos, o túnel falso e a barreira flexível, a seguir descritas resumidamente.

a) Telas metálicas

Estas são compostas de malha de arame flexível apresentando ou não cabos de aço de alta resistência, dispostas junto a face da encosta, ancoradas com tirantes no topo do talude e fixadas com chumbadores ao longo da sua extensão (Figura 12). Esta solução pode exibir comportamento ativo ou passivo, dependendo do seu dimensionamento, e é indicada para estabilização de encostas rochosas muito fraturadas com blocos de dimensão reduzidas, mas não inferior a abertura da malha.

Todos os componentes do sistema de telas metálicas devem ser verificados quanto à ruptura e apresentar resistência, proteção anticorrosiva, durabilidade e desempenho adequado. (Freitas, 2013)



Figura 12 - Tela metálica para controle de queda de blocos (Adaptado de Freitas, 2013)

b) Muro de impacto (ou rígidos)

São estruturas metálicas ou em concreto armado, rígidas ou semi-rígidas, projetadas para receber o impacto de blocos de rocha em queda, além de massas de solo (Figura 13 - a). Este tipo apresenta como principal desvantagem a exigência de maior espaço geométrico para sua construção, quando comparado com outras medidas de convivência, além de poder implicar uma grande obra de substituição no caso de danos por impacto. Como vantagens, podem-se destacar a capacidade de receber impactos de alta energia e a sua fácil manutenção.

Outra solução é o uso de diques constituídos de solo reforçado com geossintético, apresentando como vantagem a possibilidade de revestir as faces com vegetação, o que representa uma solução melhor integrada com a natureza (Figura 13 - b). (Rocha, 2009)



(a)



(b)

Figura 13 - (a) Muro de impacto de concreto; (b) Dique de solo reforçado (Rocha, 2009 *apud* (a) Nunes, 2008 e (b) Peila et al., 1998)

c) Bermas dissipadoras de energia

Têm como objetivo limitar os ganhos de velocidade e energia cinética dos blocos mediante trajetórias mais curtas de queda livre (Figura 14). Seu dimensionamento deve ser feito de maneira a garantir a estabilidade global da encosta, assim como a estabilidade de cada talude entre as bermas. Além disso, é possível aumentar a redução de energia utilizando-se recobrimento vegetal ou material granular não compactado nos patamares.

Gálvez (2012) considera, como vantagem deste método, a facilidade de execução, e, como desvantagem, aponta que em alguns casos a existência de bermas pode fazer com que, durante o repique, alguns blocos consigam atingir grandes distâncias nas suas trajetórias. Além disto, o processo de manutenção e limpeza das bermas pode ser complicado e custoso, principalmente para aquelas localizadas em taludes muito altos.



Figura 14 - Bermas em encosta rochosa (Adaptado de Galvéz, 2012)

#### d) Trincheira/valas para coletas de blocos

São áreas destinadas a receber o impacto dos blocos em queda, além de servir de retentor e depósito destes materiais. São implantadas na base da encosta e tem sua largura e profundidade dimensionadas em função da dimensão, trajetória

e energia cinética total do bloco em queda (Figura 15). Como vantagem apresentam estrutura simples e bons resultados na proteção permanente, já a exigência de manutenção constante, com a retirada dos blocos e limpeza da trincheira/vala se apresenta como um ponto negativo desta técnica. (Freitas, 2013)



Figura 15 - Trincheira para coleta de blocos (Freitas, 2013 *apud* Nunes, 2008)

#### e) Túnel falso

É uma solução aplicada principalmente em rodovias e ferrovias, e utilizada como proteção para trechos onde existe grande incidência de queda de blocos rochosos e fluxo de detritos. São estruturas metálicas ou em concreto armado, projetadas para receber e/ou desviar os materiais em queda (Figura 16 - a). As dimensões do túnel devem garantir a segurança dos usuários da via e devem levar em conta a segurança da estrutura em relação aos impactos, permitindo manter a operação mesmo durante as tarefas de remoção e limpeza, salvo quando projetadas para evitar o acúmulo de materiais. (Gálvez, 2012)

Para situações em que a energia cinética não é tão alta, vêm sendo desenvolvidas soluções, utilizando-se elementos de barreira flexível (Figura 16 - b).



Figura 16 - (a) Túnel falso de concreto (Diaz, 2005); (b) Túnel falso flexível (Geobruigg, 2018)

#### f) Barreira Flexível ou Dinâmica

A formulação para este tipo de solução é a de conseguir interceptar os blocos de rocha em movimento de uma maneira gradual, reduzindo a existência de picos de carga durante o impacto, por meio de deformações elásticas e plásticas das malhas metálicas e outros componentes constituintes.

As barreiras flexíveis são estruturas esbeltas e relativamente leves, compostas de postes, redes de aço, redes de anéis de aço, cabos, dispositivos de frenagem e ancoragens, que se apresentam em disposições diferentes, dependendo da situação em campo que se precisa atender. A seguir, são apresentadas três tipos distintos: barreira ancorada com cabos (Figura 17 - a), barreira com ancoragem na fundação (Figura 17 - b) e solução híbrida barreira-cortina (Figura 17 - c).

Uma vantagem deste tipo de sistema é a sua versatilidade, podendo ser empregado sozinho ou concomitantemente com outras soluções, além de apresentar melhor desempenho para conter solicitações de alta energia, quando comparado às barreiras rígidas. A manutenção constante para a remoção e limpeza da área pode se apresentar como uma desvantagem, quando não existe área suficiente para acumulação de material. (Galvéz, 2012)

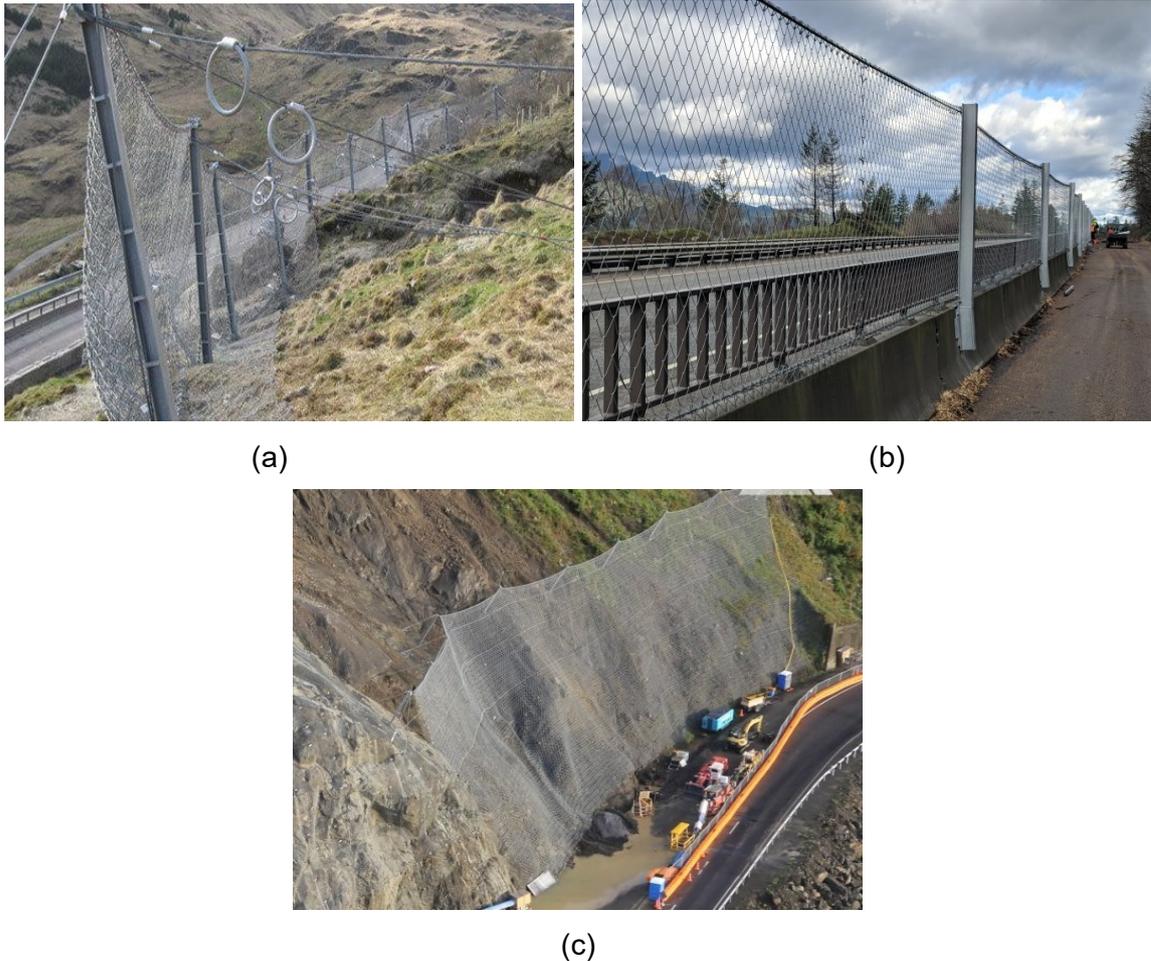


Figura 17 – (a) Barreira ancorada com cabos (Geobrugg, 2012); (b) Barreira com ancoragem na fundação (Geobrugg, 2018); (c) Solução híbrida barreira-cortina (Geobrugg, 2017)

### 1.5.2 Eliminação do Problema

A eliminação do bloco de rocha instável é a opção mais viável em alguns casos, seja por motivos econômicos ou técnicos. Os fatores que determinam a remoção são: o tamanho do bloco, as suas condições de apoio e o alcance estimado no caso de desprendimento. O tamanho do bloco vai influenciar diretamente no processo de remoção, pois, no caso de blocos com pequenas dimensões, a remoção pode ser feita manualmente, no entanto, blocos com grandes dimensões precisam ser primeiramente reduzidos (fragmentados), para sua posterior remoção, que pode ser total ou parcial.

A fragmentação destes blocos de grandes dimensões pode ser feita de várias formas e os tipos mais utilizados são o emprego de equipamentos mecânicos (rompedor hidráulico e cunha hidráulica), corte a fogo (explosivos) e a utilização de polímero expansivo. Um exemplo pode ser observado na Figura 18, que apresenta um desmonte de bloco rochoso com utilização de rompedor hidráulico.

No caso de uso de explosivos, um projeto criterioso deve ser elaborado, uma vez que a expansão dos gases liberados na explosão pode acarretar a abertura de novas fissuras no maciço, resultando na individualização de novos blocos instáveis. (Freitas, 2013)



Figura 18 - Desmonte de blocos rochosos com rompedor hidráulico (Prefeitura de Petrópolis, 2018)

### 1.5.3 Técnicas de Estabilização

As técnicas de estabilização, também chamadas de medidas ativas, têm como objetivo conter qualquer deslocamento de blocos, estabilizando os elementos instáveis ou potencialmente instáveis por meios físicos ou mecânicos, tentando levar as deformações a um valor zero ou diminuir o avanço dos processos de desconfinamento do maciço e intemperismo nas faces expostas.

Dentre as várias técnicas de estabilização comercializadas atualmente, a GEO-RIO (2014) destaca a drenagem (superficial e profunda), a proteção superficial, o retaludamento em banquetas, as estruturas de contenção (contraforte e grelha) e o preenchimento de fissuras. Sendo algumas destas apresentadas resumidamente a seguir.

De acordo com Galvéz (2012), os processos de modificação de geometria ou de abatimento do talude também são considerados técnicas de estabilização, assim como os muros de arrimo, quando sua aplicação atua na diminuição das quedas de blocos ou na contenção de encostas muito fraturadas, cuja estabilidade global se encontre comprometida.

#### a) Drenagem

É uma técnica comumente associada com as mais diversas soluções, salvo nos casos em que as instabilidades são geradas unicamente por excessos de poropressão ou por fluxos contínuos ou sazonais entre as descontinuidades do maciço. Dependendo da situação, pode-se usar somente a drenagem superficial ou, em alguns casos, drenagem profunda associada a elementos de drenagem superficial, para condução do fluido drenado a destinação adequada.

A drenagem superficial tem por objetivo coletar e encaminhar a água da superfície a um local apropriado. Geralmente é composta por estruturas do tipo canaleta ou escada em concreto armado e instaladas ao longo da superfície da encosta (Figura 19 - a). Para topografias bastante íngremes, se faz necessária a construção de caixas de dissipação da energia hidráulica, diminuindo assim o risco de danos a própria estrutura de drenagem. Este tipo de drenagem reduz os processos de erosão e a infiltração da água no maciço, além de apresentar uma boa relação custo/benefício, uma vez que, com investimentos bastante reduzidos, conseguem-se excelentes resultados.

A drenagem profunda é feita por meio de drenos, que, em geral, são tubos plásticos perfurados envolvidos com geotêxtil que tem por objetivo coletar a água do interior do maciço (Figura 19 - b). Seu projeto deve levar em conta os aspectos geológicos e hidrológicos da encosta e os períodos de medição de vazão, sendo importante destacar que, no caso de encostas rochosas, estes drenos devem ser dimensionados de forma a interceptar o maior número possível de descontinuidades.



Figura 19 – (a) Sistema de drenagem superficial com canaleta e caixa coletora (Deflor Bioengenharia, 2006); (b) Sistema de drenagem profunda associada a canaleta (Deflor Bioengenharia, 2019)

#### b) Proteção superficial

É uma técnica muito utilizada em encostas alteradas e fraturadas, que consiste na aplicação de um revestimento de concreto, de forma manual ou projetada, na superfície da encosta. De maneira geral, adiciona-se uma malha metálica fixada por chumbadores, dando ao sistema maior resistência a variações de temperatura e processos de retração mecânica (Figura 20).

O projeto deve contemplar também um sistema de drenagem eficiente, preparo prévio da superfície e dosagem adequada do concreto. Para garantir maior resistência ao revestimento e evitar patologias, fibras de aço ou polipropileno têm sido adicionadas ao concreto projetado. (Freitas, 2013)

Esta técnica tem por objetivo estabilizar os blocos instáveis ou potencialmente instáveis e proteger a superfície da encosta contra os processos de degradação por intemperismo. Não se recomenda sua utilização em maciços que se encontram em condições de fraturamento intenso, devido às dificuldades para conseguir uma ancoragem estável dos chumbadores. (Galvéz, 2012)



Figura 20 - Proteção superficial em encosta com uso de concreto projetado (Solotrat, 2010)

### c) Retaludamento em banquetas

O retaludamento de uma encosta rochosa é realizado através da suavização da inclinação e/ou execução de banquetas (Figura 21). Esta técnica permite elevar o fator de segurança com a redução do ângulo médio de inclinação da encosta, devendo ser precedida de uma avaliação geotécnica cuidadosa e específica, de modo a garantir a estabilidade entre níveis e a estabilidade global da encosta. As banquetas podem atuar como bermas para dissipação da energia cinética de blocos em queda e ainda permitem que o sistema de drenagem superficial seja projetado de modo a dividir a vazão por cada seção. (Freitas, 2013)



Figura 21 - Retaludamento em banquetas (Nascimento, 2015)

#### d) Estruturas de contenção

São indicadas para casos em que o tamanho do bloco instável é significativo e a sua remoção de difícil execução. Tais estruturas consistem em ancoragens, chumbadores ou grampos que podem, ou não, estar atrelados a elementos estruturais de concreto armado, criando um conjunto que estabiliza uma área instável específica da encosta.

Os modelos mais comumente utilizados são as grelhas ancoradas e os contrafortes. As grelhas ancoradas são formadas por um conjunto de vigas verticais e horizontais em concreto armado, cujas ancoragens são posicionadas nas interseções. Estas são adaptadas às irregularidades da face da encosta e aplicadas em área fraturadas, com grandes blocos justapostos ou encostas com foliação de mergulho desfavorável (Figura 22).

Os contrafortes são estruturas em concreto armado destinadas ao apoio (calçamento) de blocos de rocha instáveis. Geralmente trabalham à compressão, podendo ou não apresentar ancoragens (as quais trabalham à tração) e são construídos de forma a se integrar com as imperfeições da face da encosta.



Figura 22 - Grelhas ancoradas em talude rochoso (Freitas, 2013)

A definição da solução a ser adotada é sucedida pela elaboração do projeto e execução da obra. Em relação a estas duas etapas, a NBR 11682 (ABNT, 2009) estabelece procedimentos a serem seguidos de maneira a alcançar os melhores resultados possíveis. Na elaboração dos projetos, por exemplo, determina estudos obrigatórios, critérios a serem adotados e os elementos a serem representados. Em relação a execução da obra, são feitas considerações sobre técnicas e sequências executivas, detalhes de acabamentos, segurança, controle de qualidade, dentre outros.

As etapas pós intervenção (manutenção e monitoramento) também são muito importantes aos projetos de estabilização ou mitigação em maciços rochosos. Os programas de manutenção têm como objetivo a durabilidade das obras e a continuidade da estabilidade da encosta no longo prazo. Já o acompanhamento dos deslocamentos e das pressões de água no interior do maciço, assim como das cargas nas ancoragens, fazem parte dos programas de monitoramento, de maneira a prever novas intervenções e evitar futuros acidentes.

Pode-se destacar como principais instrumentos de monitoramento os pluviômetros, os piezômetros, os indicadores de nível d'água e os medidores de deslocamento (marcos superficiais e inclinômetros). Para o acompanhamento do

comportamento das estruturas de estabilização, são utilizadas células de carga. Por fim, os alarmes por área e a instrumentação de encosta específica complementam o programa de monitoramento.

O presente trabalho não tem por objetivo descrever ou detalhar os equipamentos e procedimentos supracitados, mas, para o leitor que estiver interessado, o Manual técnico de encostas, elaborado pela GEO-RIO, possui um capítulo inteiro dedicado às instrumentações de encostas e sistemas de alarmes, apresentando a experiência com o sistema Alerta-Rio e a instrumentação da encosta do Itanhangá. Além deste, recomenda-se o livro de Wyllie e Mah (2004) e o artigo de Bressani (2009).

## 2 MÉTODOS DE ANÁLISE

Atualmente já se conquistou um avanço significativo a respeito da compreensão do fenômeno de queda de blocos, tanto em relação aos parâmetros envolvidos, como em relação a um melhor entendimento sobre o mecanismo do movimento, o que possibilitou projetos de mitigação mais condizentes com as situações encontradas. Isto em decorrência do desenvolvimento e do aprimoramento das metodologias de estudo.

Contudo, por se tratar de um evento repentino e em razão da grande variabilidade de fatores envolvidos, ainda é tarefa difícil a previsão deste tipo de movimento de massa e, conseqüentemente, o seu tratamento, tornando necessária a busca por novos conceitos e métodos que consigam explicar melhor os fatores que regem esse fenômeno e como eles se manifestam.

Neste contexto, Ignacio (2019) propõe uma nova perspectiva de análise utilizando conceitos de sistemas não lineares e de teoria do caos, que se destacaram como uma opção viável a aplicação no estudo do fenômeno de queda de blocos, apresentando resultados satisfatórios na pesquisa proposta.

Dessa forma, este capítulo visa identificar alguns métodos que são usualmente empregados na análise dos fenômenos de queda de bloco, assim como apresentar a nova perspectiva de análise iniciada por Ignacio (2019), a partir de um resumo de sua pesquisa e de um breve apanhado dos principais conceitos de sistemas não lineares e de teoria do caos.

### 2.1 Métodos usuais de análise

Conforme já apresentado no capítulo anterior, o fenômeno de queda de bloco, além de difícil previsão, pode apresentar um poder de destruição muito grande, o que torna necessárias medidas preventivas e mitigadoras. Para a execução destes projetos, é essencial um bom conhecimento dos fatores envolvidos, como as condições da área e materiais presentes, e dos mecanismos relevantes para o

movimento, como os momentos de impacto, que podem causar perda de energia e fragmentação do material, significativos na continuação do movimento.

A fim de se obter estas informações, foram desenvolvidos, ao longo dos anos, métodos experimentais e métodos numéricos, que juntos possibilitam a realização de análises mais racionais e a obtenção de previsões mais precisas. Os métodos experimentais se dividem em ensaios (de campo e laboratório) e retroanálises de eventos já ocorridos, ajudando na compreensão do movimento, na calibração de programas numéricos e na avaliação preliminar de áreas de risco, além de determinarem parâmetros e testar barreiras de proteção.

Os métodos numéricos tiveram seu maior desenvolvimento com o avanço tecnológico, pois, como os computadores são mais eficientes para simular comportamentos aleatórios e repetitivos, a simulação computacional tornou-se um método fácil de análise de queda de blocos (Peng, 2000). Assim sendo, este método colabora para a compreensão do movimento, auxilia na determinação de áreas de risco e é utilizado para projetar medidas de proteção.

A seguir, é feita uma breve apresentação destes métodos e suas aplicações.

### 2.1.1 Métodos Experimentais

#### 2.1.1.1 Ensaio de campo (*in situ*)

O principal objetivo dos ensaios de campo é analisar o comportamento do bloco durante toda a sua trajetória de queda, desde o início do seu movimento até o ponto de parada dos blocos. Desse modo, a área de testes deve ser escolhida de forma a permitir o desenvolvimento do movimento de forma natural e a garantir a segurança das pessoas e estruturas próximas.

O ensaio consiste na liberação ou lançamento de blocos em uma área, que pode ser construída, como a confecção de uma rampa de lançamento, ou que pode ser natural, o que exige conhecimento prévio da morfologia e das seções transversais relevantes da encosta. O volume e formato destes blocos são pré-

determinados e seus lançamentos são feitos com o auxílio de guindastes ou escavadeiras.

As trajetórias desenvolvidas são registradas via câmeras de filmagem e fotográficas de alta velocidade, posicionadas estrategicamente ao longo da encosta, permitindo uma cobertura completa do movimento. As imagens obtidas são trabalhadas em um programa de computador, por meio do qual a posição do centroide do bloco é referenciada a um sistema de coordenadas cartesianas e, juntamente com o intervalo de tempo entre os quadros, permitem o cálculo das velocidades linear e angular e do ângulo de rotação do bloco. A Figura 23 ilustra a execução de um ensaio deste tipo realizado por Giani et al., 2004.

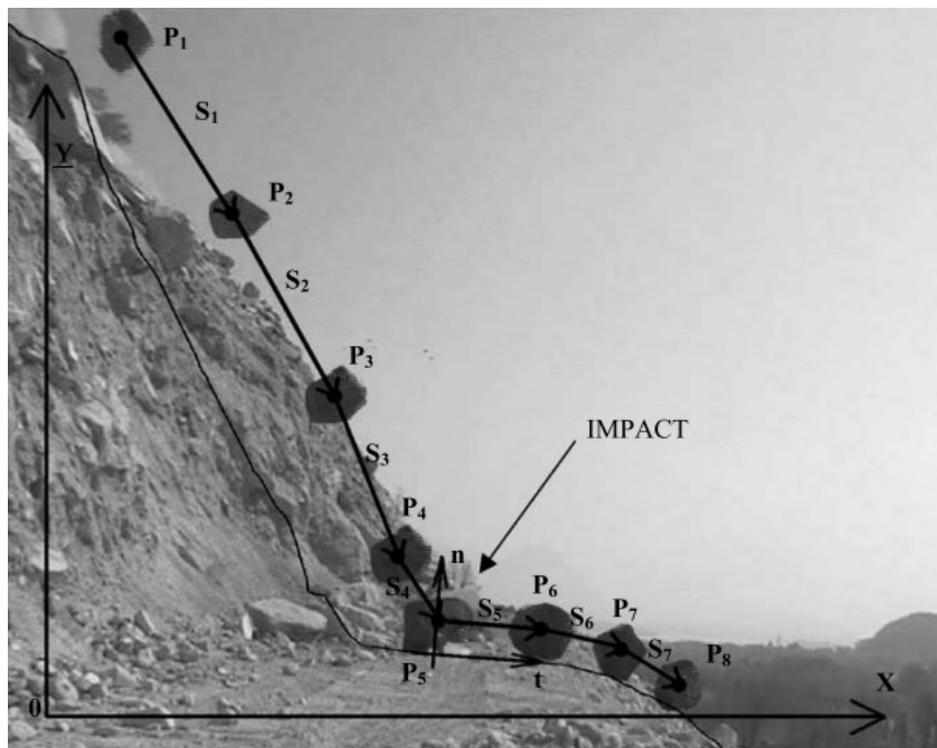
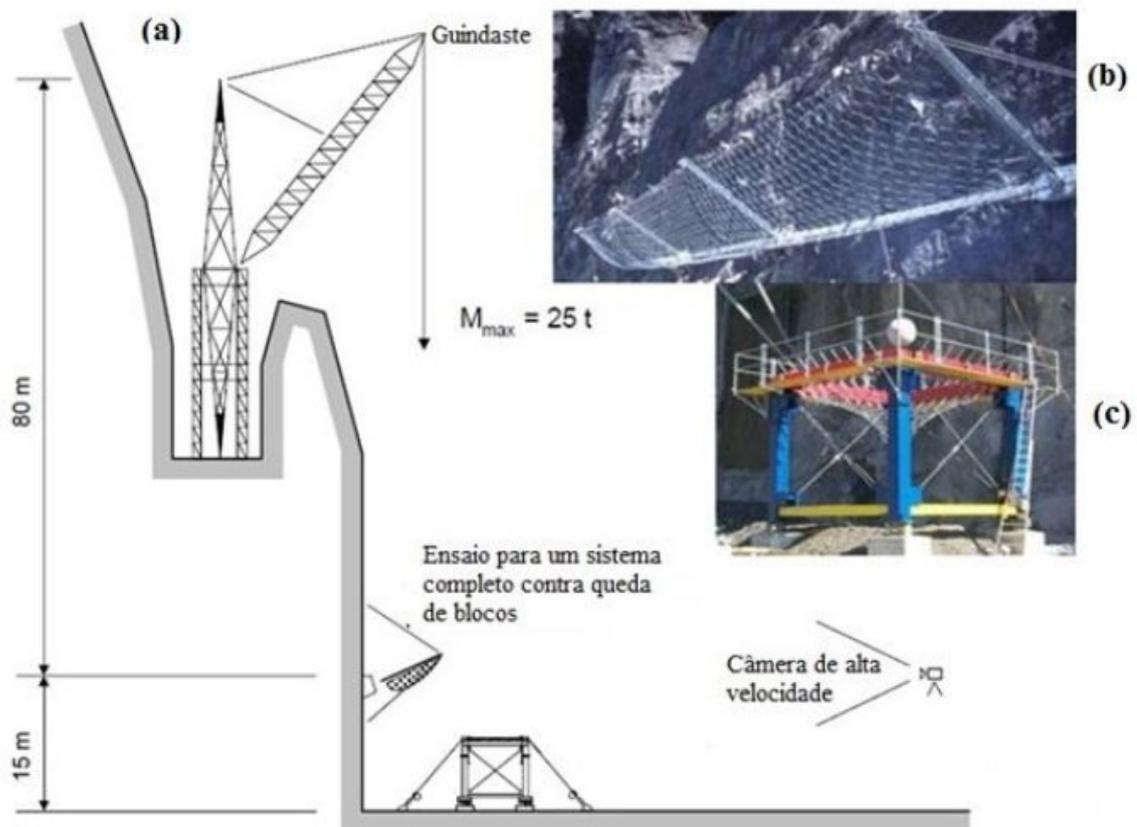


Figura 23 - Reconstrução da posição do bloco em diferentes intervalos de tempo a partir da gravação da câmera de vídeo e referenciada aos sistemas de coordenadas globais (X, Y) e locais (n, t). (Giani et al., 2004)

Para cada contato entre o bloco e a encosta, considerado relevante para o estudo, é feita uma análise dos dados da energia cinética dissipada no momento do impacto, proporcionando a determinação dos coeficientes de restituição normal e

tangencial, obtidos mediante quociente entre os vetores de velocidade antes e após o impacto nas direções normal e tangencial. (Giani et al., 2004)

Segundo Freitas (2013), os ensaios em escala real, além de permitirem a avaliação dos parâmetros envolvidos e a calibração de modelos numéricos, também podem ser utilizados para a avaliação do comportamento de estruturas mitigadoras, e cita, como exemplos, os experimentos de Pierson et al. (2001) envolvendo valas de amortecimento e coleta de blocos, o trabalho de Nomura et al. (2002) sobre muros de impacto rígidos e os ensaios de Grassl et al. (2003) com barreiras flexíveis (Figura 24), entre outros.



Heidenreich (2004) destaca que essa prática tem a vantagem de levar em conta as condições próprias do local de estudo, como os tipos de materiais, rugosidade superficial e níveis diferenciados de alteração e fraturamento, porém testes *in situ* são caros e, tratando-se esse de um evento natural, não são

adequados para análise estatística ou paramétrica. Assim, os testes laboratoriais representam um importante complemento para uma investigação experimental mais exata.

#### 2.1.1.2 Ensaio de laboratório

Os ensaios realizados em laboratório consistem na execução de testes em modelos em escala normal e reduzida, com uso de materiais artificiais ou não, podendo tanto ser estudada uma trajetória inteira, como se concentrar em um único ponto de impacto. A Figura 25 apresenta um modelo em escala reduzida de um ensaio de impacto entre um elemento esférico e uma superfície rochosa.

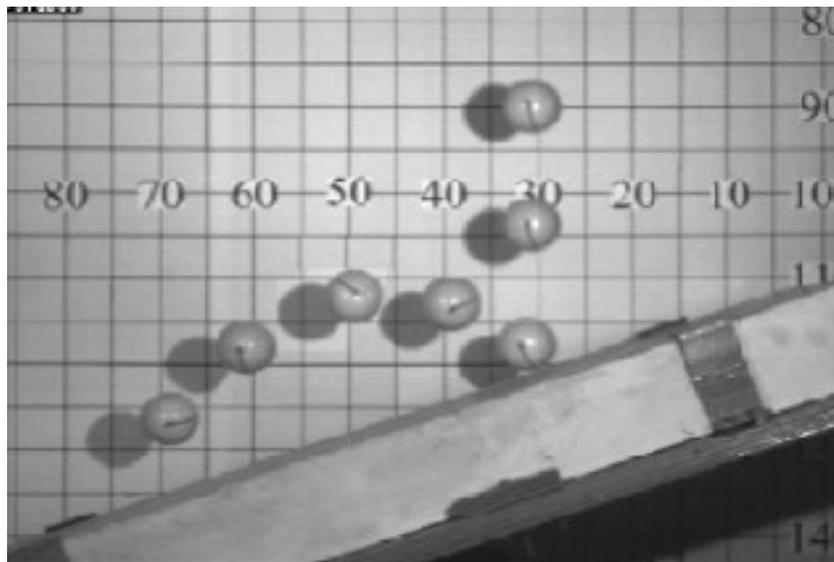


Figura 25 - Imagem sobreposta do elemento esférico em vários momentos ao longo da trajetória (Chau et al., 2002)

As metodologias empregadas nestes ensaios se assemelham as utilizadas nos ensaios de campo, entretanto, em se tratando do cálculo do coeficiente de restituição, Dias e Barroso (2006) apresentaram um estudo utilizando o método acústico, que indicou uma precisão adequada para sua aplicação.

Este método consiste na liberação de um elemento esférico, a uma certa altura, sob uma superfície plana rochosa. Os sons, produzidos pelos sucessivos impactos, são captados por um microfone interligado a um programa computacional, que converte esta informação em um gráfico de frequência versus tempo. O

experimento é repetido várias vezes para diferentes alturas de queda, obtendo-se, assim, uma representatividade estatística. (Dias e Barroso, 2006)

Contudo, Heidenreich (2004) *apud* Camponuovo (1977) ressalta que a interpretação quantitativa dos resultados obtidos em escala reduzida não é tão simples, pois, embora seja possível determinar as características estáticas dos materiais no modelo, não é fácil combinar os requisitos de similaridade para os parâmetros envolvidos no processo dinâmico.

Segundo Gálvez (2012), a vantagem deste tipo de procedimento é poder determinar coeficientes de restituição para diversos materiais isoladamente, visando a obtenção de valores típicos.

Como exemplos de ensaios laboratoriais é possível citar a pesquisa de Heidenreich (2004), que realizou ensaios em modelos de pequena e média escala, variando o formato do bloco, assim como o ângulo de impacto, sobre superfícies de material granular (Figura 26); o trabalho desenvolvido por Rayudu (1997), onde foram ensaiadas superfícies de rocha impactando-as com esferas de aço; e o estudo de Peng (2000), onde foram ensaiadas superfícies de rocha polida impactando-as com esferas de rocha artificiais, além de testes com superfícies de rocha rugosa, leito de detritos e solo impactando-os com pedaços irregulares e esféricos de rocha.

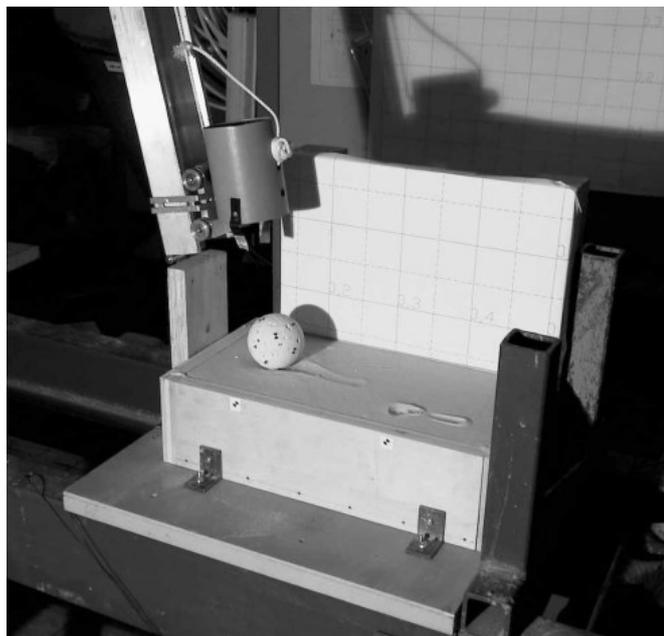


Figura 26 - Ensaio em escala reduzida: liberação de bloco sobre superfície de areia (Heidenreich, 2004)

### 2.1.1.3 Retroanálise de eventos

A retroanálise de eventos de queda de blocos consiste no estudo das trilhas deixadas no terreno ou na vegetação e na observação de depósitos formados pelos blocos com o objetivo de entender e coletar informações sobre o fenômeno, tais como o tamanho dos blocos, a distância alcançada por eles e alturas atingidas nos saltos.

Em áreas de queda com alguma vegetação, a identificação de pontos de impacto em árvores permite obter informações sobre eventos acontecidos em vários anos, a partir da identificação de cicatrizes nos troncos. Em sua pesquisa, Galvéz (2012) cita que, assim como a identificação da idade de uma árvore pode ser feita a partir dos anéis existentes no seu tronco e do período de formação de anéis consecutivos, a existência de uma cicatriz em determinado anel permite identificar o ano de ocorrência daquele impacto.

Tavares (2015) afirma que a análise de todas as informações coletadas permite uma estimativa das velocidades e energias dos blocos em queda, bem como suas porcentagens de perda na colisão. Tais observações podem ser utilizadas para calibrar programas numéricos, permitindo assim análises de trajetórias em locais com características similares.

Embora esse tipo de investigação não seja apropriado para estudos paramétricos ou do ponto de vista estatístico, permite obter informação com alguma precisão sobre a frequência de ocorrência de quedas e os caminhos preferenciais dos blocos. À vista disto, Rocha (2009) explica que aproximações empíricas, baseadas em processos de retroanálise, são convenientes para uma análise rápida e preliminar, possibilitando uma estimativa da localização de possíveis blocos instáveis e da área suscetível a passagem e deposição destes.

Dois exemplos de métodos empíricos muito utilizados são *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS), que classifica as encostas de acordo com o grau de risco de queda de bloco por um sistema de pontuação por categoria (Hoek, 2007), e o método destacado por Evans e Hungr (1993), que se divide em dois princípios: o Princípio de *Fahrböschung* e do *Minimum Shadow Angle*, os quais preveem zonas que possivelmente serão impactadas por eventos de queda. (Dorren, 2003)

A Figura 27 mostra um esquema destes princípios. O ângulo formado por um plano horizontal e uma linha reta que liga o ponto do desprendimento e vai até o ponto máximo de parada do bloco caracteriza o Princípio de *Fahrböschung*, já o ângulo formado pelo plano horizontal e uma linha reta que liga o ponto mais alto do tálus na encosta e vai até o ponto máximo de parada do bloco é o *Minimum Shadow Angle*.

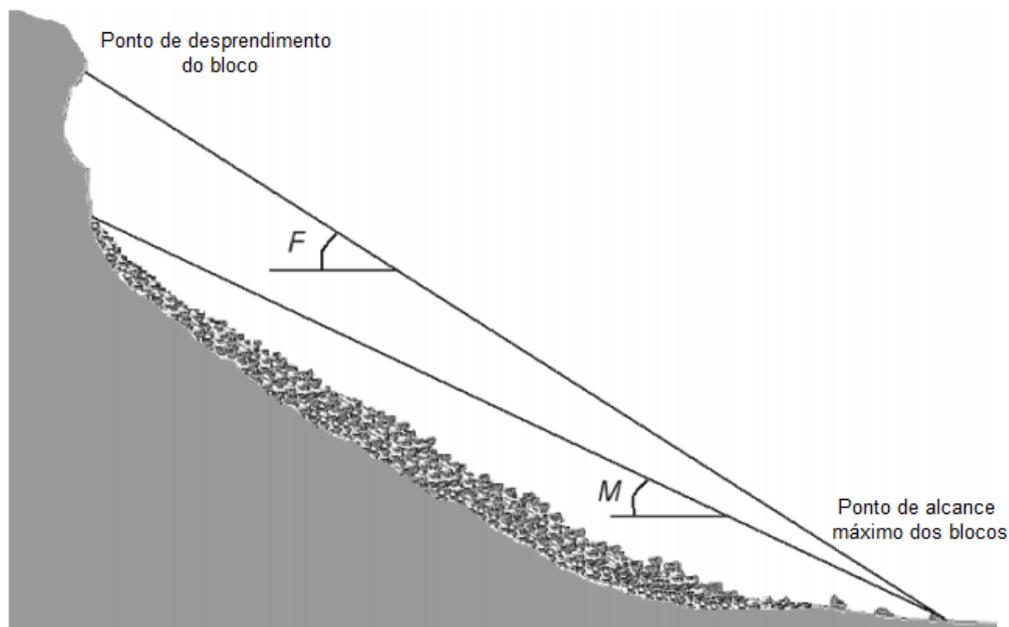


Figura 27 - *Fahrböschung* e *Minimum Shadow Angle* de uma encosta de tálus (Adaptado de Dorren, 2003 *apud* Meissl, 1998)

### 2.1.2 Métodos numéricos

O avanço no desenvolvimento e no aprimoramento de programas computacionais têm possibilitado simulações mais racionais de quedas de blocos, permitindo a previsão de trajetórias e a obtenção de dados, como velocidade, altura de salto e distâncias de alcance, relevantes para o estudo e concepção de projetos de mitigação. (Rocha, 2009)

Os modelos de programas disponíveis diferem-se basicamente quanto ao espaço de simulação, o qual pode ser bi ou tridimensional; quanto ao método de

análise que permitem adotar, métodos do corpo rígido e massa concentrada (explicado no capítulo 3); e quanto ao tipo de análise que executam, seja determinística ou estatística.

A análise determinística usa valores médios de entrada ou a hipótese de “pior caso” para o cálculo. Os parâmetros de entrada são fixados e permanecem constantes durante todo o processo, conseqüentemente as trajetórias geradas a partir de um mesmo ponto serão sempre iguais. No entanto, a maioria dos parâmetros relevantes, como a forma do bloco e as características do terreno, mostram uma variabilidade natural, com isto, os programas estatísticos permitem a entrada desses parâmetros considerando uma variação estatística. Neste caso, para um mesmo ponto de origem, serão geradas múltiplas trajetórias de queda e o resultado será uma distribuição estatística. (Heidenreich, 2004)

As informações de entrada essenciais para as modelagens são a geometria da encosta e dos blocos e os parâmetros do material. Segundo Freitas (2013), os programas numéricos são muito sensíveis à variação destes parâmetros, bem como do modelo geométrico adotado, o que exige um bom conhecimento do caso em estudo. Outro requisito relevante é a avaliação crítica dos resultados, sendo de responsabilidade do profissional avaliar e rejeitar eventuais trajetórias e resultados inconsistentes.

Todos os programas têm suas vantagens e desvantagens, logo a credibilidade de um modelo depende diretamente da precisão dos parâmetros atribuídos e da validade das hipóteses consideradas. Deste modo, o conhecimento profundo do caso em estudo é fundamental na escolha do modelo computacional a ser utilizado.

A Tabela 3 resume os principais programas de simulação de queda de blocos e suas características mais relevantes. No capítulo 3, encontra-se uma breve apresentação do programa *RocFall* versão 6.0, o qual foi utilizado nas análises dessa pesquisa.

Tabela 3 - Principais características dos programas numéricos de simulação de queda de blocos (Ignacio, 2019 *apud* GEO-RIO, 2014)

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

## 2.2 Nova perspectiva de análise

Ignacio (2019) introduz uma nova perspectiva de análise para o fenômeno de queda de blocos segundo a teoria do caos, campo de estudo em franco desenvolvimento com aplicação em várias disciplinas. Esta teoria trata de sistemas não lineares, que apresentam como característica principal uma grande sensibilidade às condições iniciais, o que os torna não previsíveis na prática a longo prazo, aspecto este marcante no fenômeno de queda de blocos.

A pesquisa de Ignacio (2019) buscou analisar a aplicabilidade da teoria do caos para descrever o comportamento deste tipo de movimento de massa, utilizando para isso ajustes estatísticos as distribuições de probabilidade de localização final dos blocos, obtidas através de simulações de trajetórias no programa *RocFall* 6.0.

Sua pesquisa foi dividida em duas etapas, um estudo preliminar e um estudo de caso. No primeiro, foi testada a validade da aplicação da teoria do caos em quatro perfis transversais distintos interagindo com blocos que apresentavam a mesma geometria, porém três tamanhos diferenciados. Com base na resposta positiva, aplicou-se a teoria no estudo de caso, de modo a avaliar a interação entre os mesmos tipos de bloco e uma seção da escarpa do Morro do Cantagalo, localizado no bairro de Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro.

Os resultados obtidos, juntamente com o fato deste fenômeno apresentar características de um sistema não linear, sugerem que a queda de blocos pode ser analisada pela teoria do caos, e mais, que pode haver uma relação entre a concavidade ou convexidade da superfície do perfil da encosta e o tipo de comportamento fracamente ou fortemente caótico apresentado pelo sistema.

A partir da resposta positiva alcançada pelo trabalho de Ignacio (2019), a atual pesquisa propõe uma continuidade dessa nova perspectiva de análise, sugerindo uma modificação em relação ao trabalho referido. Como proposta, pretende-se verificar a influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda, por meio da aplicação da teoria do caos, assim como buscar descrever o comportamento deste fenômeno por intermédio das proposições desta teoria.

### 2.2.1 Sistemas não lineares e a Teoria do caos

Conforme a mecânica analítica clássica, o universo deveria seguir um caminho dinâmico único, temporalmente reversível e pré-determinado. Por consequência, durante anos, todos os fenômenos foram analisados com base na ótica da linearidade. Nesta perspectiva, a solução para um sistema pode ser deduzida a partir do estudo de suas partes, o efeito é proporcional a causa e os termos desconfortáveis a este princípio são minimizados ou eliminados. Contudo,

este processo não era universal, permanecendo intocáveis áreas inteiras do mundo natural. (Ibáñez et al., 1995)

Gomes (2008) trata desta situação a partir de um exemplo bem simples, “na visão clássica, se um objeto tem uma aceleração, uma força resultante está agindo sobre ele; quando a força se duplica, a aceleração também se duplica, e assim por diante. Porém, quando muitos objetos interagem com forças de curto alcance, torna-se muito difícil identificar o que leva ao efeito observado”, ressaltando, desta maneira, que na natureza são encontrados vários sistemas os quais não se encaixam nesse tipo de comportamento reducionista.

De acordo com Menezes Filho (2003), estes casos, que não se adaptam ao paradigma anterior, são chamados de não lineares. Em razão do seu comportamento intensamente sistêmico, suas propriedades características só podem ser identificadas quando analisadas no âmbito coletivo, onde suas variáveis não apresentam proporcionalidade constante. Assim, impossibilitando a separação do problema em partes menores, o que torna difícil sua compreensão e seu tratamento analítico.

Nesse contexto, uma nova ciência surge disposta a entender e explicar estes fenômenos de difícil previsão. A chamada teoria do caos nasce da compreensão de que pequenas diferenças nas condições iniciais podem gerar grandes variações nos resultados finais, que a ordem pode surgir espontaneamente da desordem generalizada e que equações matemáticas simples podem servir de modelo para a resolução de sistemas considerados complexos. Deste modo, apresentando-se capaz de explicar como processos, que parecem se comportar de acordo com o acaso, têm seu desenvolvimento determinado por leis precisas. (Gleick, 1991)

Como resultado, o comportamento dos sistemas não lineares passa a ser chamado de caótico e, à medida que os estudos eram aprofundados, uma subdivisão tornava-se evidente. Enquanto uns sistemas se comportavam de maneira totalmente instável e imprevisível, completamente caótico, outros apresentavam um comportamento intermediário entre a ordem e o caos, denominados sistemas complexos. (Borges, 2004)

De La Sota (2004) exemplifica esta divisão da seguinte maneira, ao lançar um dardo contra um alvo quadrado, a probabilidade de atingir a diagonal será quase zero, dada a infinidade de pontos possíveis. Em um caos fraco (limitado), encontrar um comportamento não periódico é o mesmo que atingir o quadrado na diagonal, ou

seja, ínfima probabilidade, já no caso do caos forte (total) a probabilidade de encontrar um comportamento periódico é zero.

Claramente a teoria do caos e suas subdivisões são mais complexas e profundas do que este estudo pode sugerir, no entanto, este capítulo visa fornecer alguma noção de sua natureza e como ela se insere no contexto dessa pesquisa.

### 2.2.1.1 Características dos sistemas caóticos

A aplicação da teoria do caos é utilizada para compreender fenômenos das mais diversas naturezas (meteorologia, biologia, matemática, economia, entre outros). Vários pesquisadores de sistemas dinâmicos evolutivos, em suas diversas áreas de interesse, destacam as características que acreditam ser fundamentais nestes tipos de sistemas, mediante a falta de uma definição precisa e abrangente.

Em vista disto, são apresentadas, a seguir, algumas destas características, além das que evidenciam as diferenças entre comportamentos fortemente e fracamente caóticos.

Nussenzveig (2008) resume algumas das características que são compartilhadas, em maior ou menor grau, por diferentes sistemas complexos (fracamente caóticos).

- São sistemas dinâmicos em evolução constante formados por muitas unidades, que interagem com um certo número bem menor de outras e com o meio ambiente. Esta interação não guarda uma relação de proporcionalidade entre si, porém pode apresentar caráter excitatório ou inibitório.
- Levando-se em conta que os sinais recebidos de outras unidades podem ser contraditórios, não dá para satisfazer a todos ao mesmo tempo, configurando o fenômeno de frustração.
- O sistema normalmente apresenta múltiplos atratores, que são estados de quase-equilíbrio (mínimos locais), para onde os possíveis estados iniciais tendem, após um longo período. O sistema pode ficar enalhado por muito tempo em um destes mínimos locais, deixando de visitar todos, ou quase todos os estados possíveis (quebra de ergodicidade), mas, ao sofrer qualquer pequena perturbação, pode ser levado a um outro estado, de características

totalmente distintas. Este fato denota um desenvolvimento temporal dependente de toda a história anterior e um número grande de configurações de quase-equilíbrio.

- As interações locais entre as diversas unidades que formam o sistema acabam conduzindo a propriedades coletivas emergentes, qualitativamente novas, que não podem ser identificadas em nenhuma de suas partes formadoras, mas sim no sistema como um todo. Tais propriedades surgem por processos de competição e cooperação locais, de forma repetitiva e imitativa.
- O sistema é adaptativo, ou seja, à medida que evolui e interage com o ambiente apresenta correlações de longo alcance temporal (memória) e espacial (estruturas fractais). A Figura 28 apresenta um exemplo desta evolução a partir de uma estrutura fractal. Estas são estruturas geométricas de dimensão fracionária, sendo cada parte uma pequena cópia, em escala menor, do objeto todo.



Figura 28 - Estrutura fractal - Triângulo de Sierpinsky (Adaptado de López, 2003)

- O sistema se organiza na chamada criticalidade auto-organizada, ou seja, estrutura-se de forma espontânea, a partir de um estado inicialmente desordenado e isento de qualquer escala característica, em que as estatísticas de seus principais parâmetros são em lei de potência, desta forma, tornando-o extremamente sensível a qualquer perturbação, externa ou interna. Este estado é considerado a fronteira entre ordem e caos e caracteriza-se por apresentar o seu expoente de Lyapunov nulo ou muito próximo de zero. (Menezes Filho, 2003)

Ao se projetar a trajetória que o sistema desenvolve durante sua evolução, entre os diferentes estados possíveis que são acessíveis a ele, é possível observar que, em um sistema linear, esta vai convergir para um ponto (atratores pontuais) ou para uma ciclo limite, correspondendo a uma variação periódica (atratores limite). Já em um sistema não linear, o estado final do sistema é estável, porém imprevisível, podendo adotar um número fixo, porém infinito, de configurações, formando assim os atratores ditos estranhos (Figura 29) (Ibáñez et al., 1995). Estes foram caracterizados por Valério (2014) como um processo de auto-organização dos sistemas caóticos.

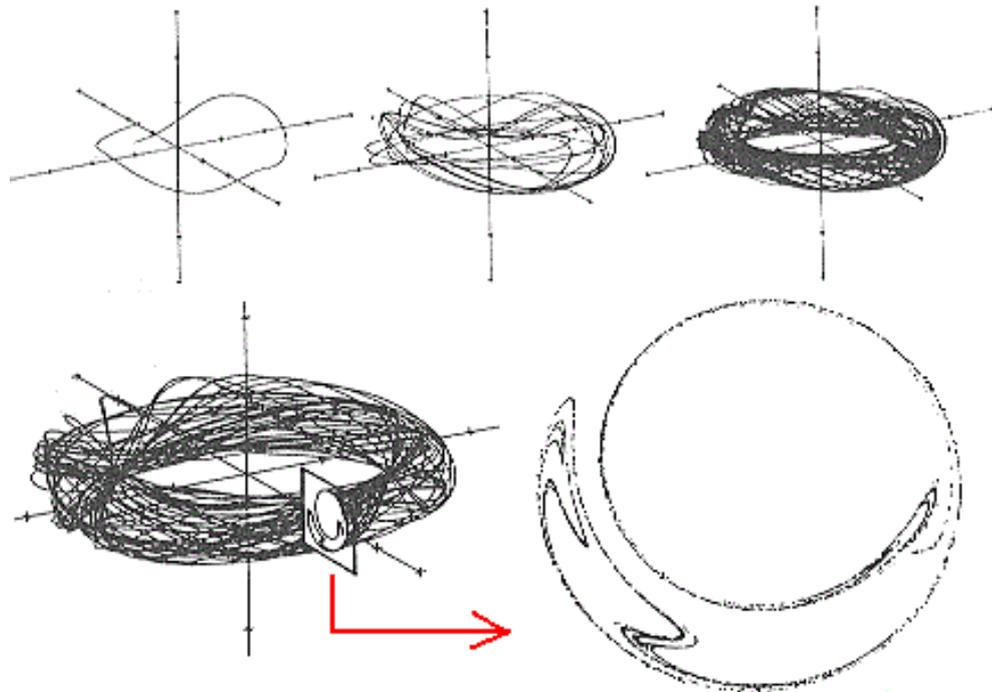


Figura 29 - Desenvolvimento das trajetórias de um atrator estranho. (Adaptado de Gleick, 1991)

Isto posto, pode-se dizer que o principal motivo pelo qual os sistemas complexos (fracamente caóticos) evoluem na fronteira entre a ordem e o caos é devido, não só ao fato de partilharem com sistemas ordenados a capacidade de se adaptarem gradualmente a pequenas perturbações, mas também por responder rapidamente a mudanças bruscas externas ou internas. Neste contexto, o termo complexo foge a compreensão de complicado. Conforme esclarecido por Menezes Filho (2003), “são apenas sistemas constituídos por inúmeras unidades de

comportamento muito simples, influenciando-se mutuamente numa intrincada rede de conexões e gerando, deste modo, o comportamento complexo global”.

Menezes Filho (2003) também esclarece que grande parte das características inerentes aos sistemas complexos (fracamente caóticos) são compartilhadas pelos sistemas fortemente caóticos, porém algumas diferem significativamente, são elas:

- À medida que evolui e interage com o ambiente, o sistema não desenvolve interação temporal e espacial ou as desenvolve, mas serão de curto alcance entre seus subsistemas (sem memória ou com memória de curto alcance). Logo, não apresentam estruturas fractais no espaço de configuração, somente no espaço de fase; e
- O expoente de Lyapunov do sistema será necessariamente maior que zero, ultrapassando o limite entre a ordem e o caos.

#### 2.2.1.2 Expoente de Lyapunov

Um artifício desenvolvido para avaliar se determinado sistema possui um comportamento caótico e seu grau de caoticidade é o expoente de Lyapunov. Calvão (2014) explica que a maneira com que duas trajetórias, desenvolvidas pelo mesmo sistema, se separam ao longo das suas evoluções depende não somente do número de interações, como também das condições iniciais; sendo assim, um afastamento mais rápido ou mais lento entre elas caracteriza como o sistema se comporta. Portanto, o expoente de Lyapunov ( $\lambda$ ) é a taxa média de crescimento da divergência exponencial entre duas trajetórias inicialmente próximas e tem a seguinte interpretação:

- $\lambda < 0$ , indica que as trajetórias são atraídas para um ponto de equilíbrio, o sistema é estável;
- $\lambda = 0$ , indica que as trajetórias são ora estáveis e ora divergentes, e que esta divergência é mais lenta que a exponencial, o sistema é fracamente caótico (complexo);

- $\lambda > 0$ , indica que as trajetórias vão divergir de uma distância arbitrária, o sistema é fortemente caótico (instável);

Conforme pode ser observado nos múltiplos atratores, a maioria dos sistemas apresentam trajetórias que ficam restritas a uma região específica de estados possíveis, deste modo, embora as trajetórias se separem exponencialmente, eventualmente se aproximam novamente. Por este motivo, é relevante calcular uma divergência média das trajetórias para as inúmeras iterações. (Calvão, 2014)

### 2.2.2 Método de análise

As particularidades dos sistemas caóticos tornam as soluções analíticas e os procedimentos de verificação clássicos (contrastar previsões com dados experimentais) muito mais delicados e de difícil execução (De La Sota, 2004). Contudo, princípios e sistemas físicos simples, juntamente com o avanço da física computacional, e a formulação de modelos numéricos mais sofisticados vêm contribuindo muito no entendimento e investigação destes sistemas (Calvão, 2014).

Uma alternativa que se tem mostrado válida na análise de sistemas com comportamento caótico é a aplicação da mecânica estatística. Tal método faz uso de distribuições probabilísticas, que refletem o comportamento dos muitos corpos formadores do sistema, juntamente com o conceito de entropia, relacionado ao comportamento termodinâmico do sistema, a fim de investigar como as propriedades relativas à microescala aparecem na macroescala. (Menezes Filho, 2003).

#### 2.2.2.1 Entropia clássica de Boltzmann-Gibbs

Partindo-se do conceito de entropia, grandeza física capaz de medir a multiplicidade de estados possíveis que um sistema pode apresentar, e de probabilidade termodinâmica de um estado macroscópico, número de estados

microscópicos que realizam aquele estado macroscópico, Ludwig Boltzmann propôs a seguinte relação:

$$S = k_B \ln (W) \quad (3)$$

A equação (3) define que quanto maior for o número de microestados acessíveis ( $W$ ) a um sistema, maior será a entropia deste sistema ( $S$ ). E, para isso, leva em consideração os seguintes fatores: todos os microestados têm igual probabilidade de serem realizados macroscopicamente, a entropia cresce de forma logarítmica com o número de microestados (dada sua propriedade aditiva) e  $k_B$  é uma constante que define a unidade em que a entropia é medida (Durão, 2015; Menezes Filho, 2003).

Posteriormente Willard Gibbs introduz uma versão mais abrangente para a expressão de Boltzmann, levando-se em conta que a probabilidade termodinâmica do sistema não é igual para todos os microestados que realizam aquele dado estado macroscópico. Esta nova expressão é chamada entropia de Boltzmann-Gibbs e se apresenta conforme a equação (4):

$$S = k_B \sum_{i=1}^W p_i \ln(p_i) \quad (4)$$

onde  $p_i$  é a probabilidade do sistema encontrar-se no seu  $i$ -ésimo estado e o somatório é efetuado sobre todos os microestados possíveis ( $W$ ) em que o sistema pode ser encontrado. (Callen, 1985; Menezes Filho, 2003).

Em razão da propriedade de aditividade da entropia, pode-se dizer que a soma das entropias de dois subsistemas A e B, estatisticamente independentes, é igual a entropia do sistema formado por estes subsistemas. Este fato é representado na forma logarítmica da entropia de Boltzmann-Gibbs.

De acordo com Durão (2015), a entropia é um funcional da distribuição de probabilidade de um sistema, deste modo a forma desta distribuição está diretamente relacionada à maneira com que as entropias dos subsistemas componentes deste sistema são somadas. Isto posto, e baseado no fato de que os estados de equilíbrio termodinâmico são aqueles de máxima entropia, a distribuição

de probabilidade mais adequada a um sistema será aquela que maximizar a sua entropia.

O processo de maximização é feito por meio da extremização da equação de entropia, considerando-se duas restrições, uma segundo a qual as probabilidades adicionam-se dando a unidade ( $\sum p_i(x) = 1$ ) e outra na qual a variância de  $p(x)$  deve ser finita, devido às interações serem de curto alcance. O resultado é a distribuição de probabilidade gaussiana, que se apresenta na forma da equação (5) (Menezes Filho, 2003; Tsallis, 2000):

$$p(x) = a \left[ e^{-\left(\frac{x-c}{b}\right)^2} \right] \quad (5)$$

sendo  $a$ ,  $b$  e  $c$  parâmetros de ajuste da distribuição, que estão diretamente relacionados, respectivamente, à variação do tamanho, à média e ao desvio padrão da distribuição.

Ainda de acordo com Menezes Filho (2003), a entropia de Boltzmann-Gibbs tem encontrado aplicação satisfatória em sistemas com as seguintes características:

- Sistemas sem interação ou com interações espaciais de curto alcance entre seus elementos constituintes;
- Sistemas com memória temporal de curto alcance; e
- Sistemas cuja evolução no espaço de fase não é multifractal.

#### 2.2.2.2 Entropias Generalizadas

Muitos são os sistemas que apresentam comportamento totalmente incompatível com o estabelecido pela mecânica estatística de Boltzmann-Gibbs e a termodinâmica clássica. Não se conhece ao certo as razões necessárias e suficientes, mas são conhecidas algumas das características que levam um dado sistema a exceder este contexto (Borges, 2004; Menezes Filho, 2003):

- Sistemas com interações espaciais de longo alcance entre seus elementos constituintes;
- Sistemas com memória temporal de longo alcance;
- Sistemas cuja evolução no espaço de fase é multifractal; e
- A existência de algum tipo de dissipação dentro do sistema.

Sistemas que compartilham destas características são ditos não extensivos e necessitam de uma forma entrópica diferenciada, que leve em consideração as interações de longo alcance. Em consequência da nulidade da propriedade aditiva, torna-se necessário considerar que a entropia de um sistema composto possa ser maior ou menor que a soma das entropias de seus subsistemas (Menezes Filho, 2003).

Diante desta nova perspectiva, várias formulações surgiram, destacando-se a de Constantino Tsallis (1988), que propôs uma generalização para a entropia de Boltzmann-Gibbs. Esta nova forma entrópica (equação (6)) adiciona aos cálculos o parâmetro  $q$ , que caracteriza o grau de não-aditividade, refletindo a dinâmica microscópica do sistema. Além de manter a constante positiva  $k$  e o somatório acontecendo sobre todos os microestados acessíveis ao sistema.

$$S_q = k \sum_{i=1}^w p_i \ln_q \left( \frac{1}{p_i} \right) = k \frac{1 - \sum_{i=1}^w p_i^q}{q - 1} \quad (6)$$

Para  $\sum_{i=1}^w p_i = 1$ , com

$$\ln_q x = \frac{(x^{(1-q)} - 1)}{(1 - q)}$$

$$e_q^x = [1 + (1 - q) x]^{\frac{1}{1-q}}$$

Conforme Tsallis (2000), o processo de maximização desta nova forma entrópica mantém as restrições utilizadas para a entropia de Boltzmann-Gibbs e seu resultado é a distribuição de probabilidade  $q$ -exponencial apresentada a seguir (equação (7)):

$$p_q(x) = [1 - (1 - q)x^2]^{\frac{1}{1-q}} \quad (7)$$

Menezes Filho (2003) aponta que a nova entropia proposta por Tsallis retorna à entropia de Boltzmann-Gibbs no limite  $q \rightarrow 1$ , utilizando-se para o cálculo o seguinte recurso  $p_i^{q-1} \cong 1 + (q - 1) \ln p_i$  e, conseqüentemente, reduzindo-se a uma distribuição de probabilidade gaussiana para  $q$  igual a 1. Por esse motivo, a distribuição de probabilidade  $q$ -exponencial também é chamada de  $q$ -gaussiana.

Porém, Tsallis e Cirto (2013) perceberam que ainda existiam casos que não se encaixavam nem em  $S$ , nem em  $S_q$ , e propôs uma generalização da generalização, a entropia  $S_{q,\delta}$ , descrita pela equação (8).

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

Mantendo o parâmetro  $q$ , a constante  $K$  e o somatório para todos os microestados acessíveis ao sistema, essa nova forma entrópica insere o parâmetro  $\delta$ , que caracteriza a sensibilidade do sistema em lei de potência. Esta nova entropia restitui a entropia  $S_q$ , para  $\delta$  igual a 1, e restitui a entropia de Boltzmann-Gibbs, para  $q$  e  $\delta$  iguais a 1.

Utilizando-se o mesmo processo de maximização e as mesmas restrições, a nova entropia pode ser maximizada pela distribuição de probabilidade  $q$ -exponencial estendida (equação (9)), onde  $q$  e  $\delta$  são parâmetro entrópicos e  $a'$ ,  $b'$  e  $c'$  parâmetros de ajuste da distribuição, que estão diretamente relacionados à variação do tamanho, à média e ao desvio padrão da distribuição, respectivamente.

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

### 2.2.3 A teoria do caos e a engenharia geotécnica

Muitos cientistas acreditam que o surgimento das chamadas ciências do caos está causando uma mudança de paradigma ou revolução científica, propiciado pelos avanços tecnológicos e conceituais (Ibáñez et al., 1995). Vários autores vêm apresentando resultados satisfatórios em suas pesquisas e um movimento expressivo vem se formando com o uso da nova teoria na área das geociências.

Na engenharia geotécnica são encontradas muitas situações que possuem as características de um sistema não linear e que não têm recebido tratamento adequado, em função da padronização dos procedimentos de análise instalada há tempo nos ramos das geociências.

Menezes Filho (2003) destaca que grande parte das investigações ainda se concentram na análise do particular e no pressuposto de que existe necessariamente uma causa externa ao sistema a acarretar certo comportamento, atitudes estas que refletem a conduta reducionista da ciência clássica. E esclarece que a adoção de novas práticas não se trata de se priorizar uma dada categoria em detrimento de outra, trata-se de identificar, no particular e contingente, aspectos que possam conduzir ao geral e ao necessário.

Com esta visão, Menezes Filho (2003) e Ignacio (2019) propõem e apresentam pesquisas com a aplicação da teoria do caos na engenharia geotécnica, obtendo resultados satisfatórios e enfatizando a importância da continuação de estudos acerca do tema.

Deste modo, o presente trabalho visa realizar mais uma contribuição para a utilização dessa nova perspectiva de análise na área geotécnica, dando seguimento ao trabalho iniciado por Ignacio (2019) sobre a aplicação da teoria do caos no estudo do comportamento do fenômeno de queda de blocos.

### 3 PROGRAMA NUMÉRICO

A simulação computacional tornou-se um meio fácil e econômico de análise de quedas de blocos. Assim, durante as últimas décadas, diferentes programas numéricos foram desenvolvidos e aplicados na previsão destes eventos. Estes programas usam parâmetros simplificados para simular o comportamento dos blocos durante a queda, calcular trajetórias e fornecer estatísticas úteis para o projeto de medidas de mitigação. (Peng, 2000)

Este capítulo tem por objetivo apresentar o programa *RocFall* versão 6.0, que foi utilizado no desenvolvimento do presente trabalho. Buscou-se identificar alguns aspectos e ferramentas mais importantes, além de fornecer um panorama geral de processamento das informações.

#### 3.1 Programa Numérico *RocFall* 6.0

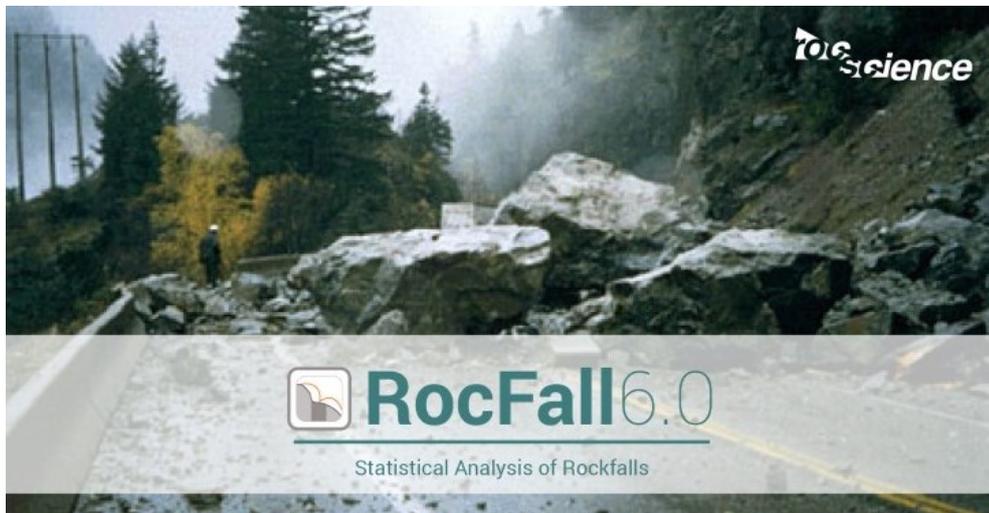


Figura 30 - *RocFall* versão 6.0 (Rocscience, 2019)

O *RocFall* (Rocscience Inc.) é um *software* de análise estatística projetado para auxiliar na avaliação de risco de queda de blocos em encostas. O programa é considerado de fácil utilização, devido a sua interface simplificada, e de alta capacidade de processamento, por não apresentar limitação para a quantidade de

simulações. Atualmente, encontra-se disponível na versão 2019, porém, para no presente trabalho, foi utilizada versão 6.0 (Figura 30).

Pode-se dizer que a utilização do *RocFall* 6.0 está dividida em quatro passos principais: Configuração de projeto, Entrada de dados, Processamento de dados e Resultados. Em Configurações de projeto são inseridos parâmetros de análise, buscando modelar o programa para análises mais precisas. Na Entrada de dados, o programa é alimentado com as características da encosta, dos blocos e das barreiras. Realizam-se as devidas análises sobre o movimento dos blocos ao longo da encosta na etapa de processamento e, por fim, os resultados são gerados em forma de gráficos e relatórios.

Como funcionalidades, o programa é capaz de determinar energias, velocidades e alturas de salto desenvolvidas ao longo do movimento, além de estimar os pontos finais de parada dos blocos. Vale ressaltar que relatórios de barreiras também podem ser gerados, possibilitando a verificação da eficácia das mesmas.

A seguir, são apresentadas, de forma resumida, as principais características relacionadas ao programa. A maior parte das informações descritas foram extraídas de documentos e tutoriais sobre o programa disponíveis no *site* da *Rocscience Inc.*, bem como foram utilizadas informações disponíveis em pesquisas que fizeram uso do mesmo programa.

### 3.1.1 Métodos de amostragem

Programas de análise estatística utilizam métodos de amostragem específicos para determinar como as distribuições estatísticas de entrada serão amostradas. O *RocFall* 6.0 disponibiliza dois tipos de métodos a serem escolhidos: o método de Monte Carlo e o método Hipercubo Latino.

Risso et al. (2008) explicam que o método de Monte Carlo baseia-se na geração de números aleatórios para amostrar, tomando por base as premissas e as distribuições associadas às variáveis de entrada, bem como a relação entre elas. Por outro lado, o método Hipercubo Latino seleciona valores aleatoriamente de forma dependente, baseando-se em uma amostragem estratificada, dividindo a

distribuição em intervalos com probabilidades iguais de ocorrência, e selecionando um valor aleatório pertencente a cada estrato.

Os dois métodos apresentam resultados satisfatórios, todavia, o método de Monte Carlo necessita de um elevado número de simulações para que se obtenha uma boa distribuição, enquanto o método Hipercubo Latino é pouco utilizado, se comparado a outros métodos, pois poucos trabalhos utilizando esta técnica foram encontrados na literatura. (Risso et al., 2008)

Para Wyllie (2015), o método de Monte Carlo permite um número muito maior de simulações dentro de uma única análise e estimativas de valores probabilísticos mais precisos, proporcionando uma maior confiabilidade às conclusões a respeito dos eventos de quedas de blocos rochosos.

### 3.1.2 Métodos de análise

A versão 6.0 do *RocFall* disponibiliza dois métodos de análise relacionados as características dos blocos rochosos em estudo, Massa Concentrada (*Lump Mass*) e Corpo Rígido (*Rigid Body*), e cada um destes utiliza diferentes mecanismos de cálculo para o processamento dos dados.

No método de Massa Concentrada, cada bloco é modelado como um ponto adimensional, simulando uma partícula de massa concentrada no seu centro de gravidade. O mecanismo de cálculo utiliza uma análise de partículas dividida em três algoritmos: de partículas, do projétil e de deslizamento.

O algoritmo de partícula garante que os parâmetros de simulação sejam válidos, define as condições iniciais e dá início ao algoritmo do projétil. Este é usado para calcular o movimento do bloco ao longo da sua permanência no ar, enquanto o algoritmo de deslizamento é usado para calcular o movimento do bloco durante seu contato com a encosta.

Segundo Silveira (2017) *apud* Stevens (1998), “a massa permanece constante ao longo da simulação e não é utilizada para calcular o movimento do bloco, mas sim a sua energia cinética ao longo da queda. A resistência do ar não é considerada nos cálculos, pois se considera que os blocos são maciços o suficiente para que esse parâmetro não exerça grande influência nas simulações”.

No Método de Corpo Rígido, a forma do bloco é atribuída pela seleção de uma grande variedade de formatos, suaves ou poligonais, predefinidos. As formas são bidimensionais e extrudadas na terceira dimensão para representar o tamanho e a massa tridimensionais. A massa do bloco determina o seu tamanho real, assumindo que a dimensão fora do plano é aproximadamente igual à média das dimensões no plano.

O mecanismo de cálculo para esse método considera a reação de impulso do bloco durante o período de contato com a encosta para determinar os eventos posteriores, como o comportamento de deslizamento, rolamento e reversão durante a fase de compressão e restituição. O coeficiente de restituição normal é usado durante as duas fases do período de contato para calcular o impulso final, e, com este, calcular as velocidades de saída do ponto de contato.

### 3.1.3 Condições do mecanismo

Os parâmetros de análise que determinarão quando o cálculo de um determinado bloco será interrompido são definidos como condições de mecanismo. Dessa forma, podem ser definidos: o tempo máximo de análise por bloco, o número máximo de passos de análise por bloco, a velocidade na qual se considera que o bloco está parado (ao final do percurso), a velocidade de transição entre a queda livre e o instante que o bloco passa a ficar em contato com a encosta e o tempo máximo entre um passo e outro da análise.

Em geral, as configurações padrões devem ser usadas. Entretanto, dependendo do tipo de análise que se estiver realizando, pode ser aceitável aumentar o número de passos ou diminuir a velocidade de parada do bloco, por exemplo. O importante é ter em mente que, em determinado momento, esses parâmetros afetarão os resultados da análise, sendo importante sua verificação e acompanhamento durante todo o processo. Na Figura 31 é apresentada a configuração padrão presente na versão 6.0.

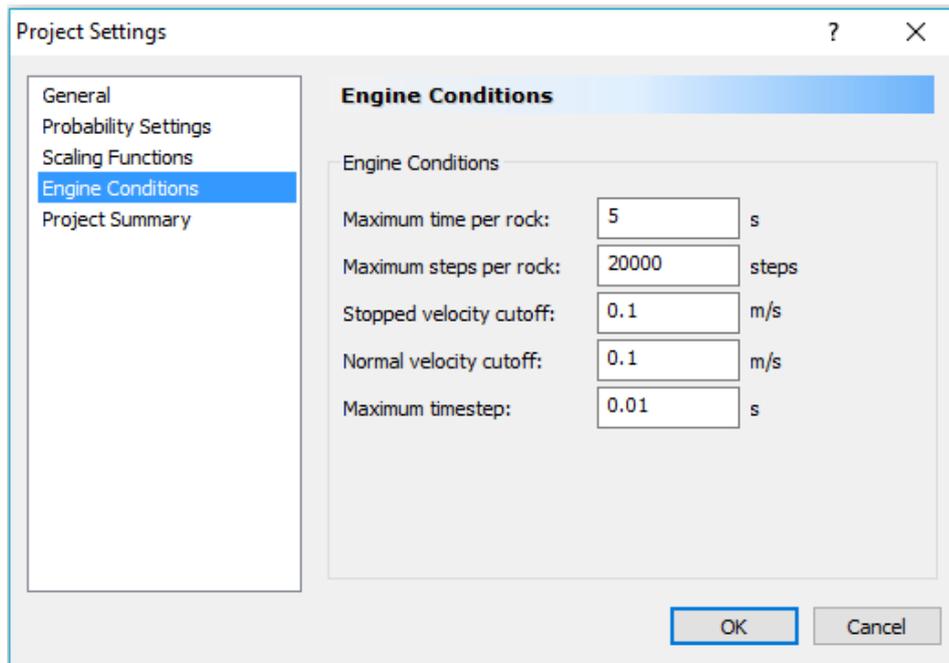


Figura 31 - Condições do mecanismo – Configuração padrão

### 3.1.4 Definição da geometria e do material da encosta

Os resultados das análises realizadas pelo *RocFall* são muito sensíveis aos parâmetros envolvidos, de tal forma que uma boa configuração dos parâmetros do projeto conduz a resultados mais confiáveis. Assim, a definição da geometria e do material da encosta é um passo muito importante deste processo.

A geometria pode ser inserida por coordenadas (x e y), inclusive por meio de planilhas do *Excel*; ou pela importação de perfis topográficos gerados em outros programas, *Autocad*, por exemplo; como também desenhada a mão livre. Portanto, é basicamente formada por segmentos de reta unidos por pontos de coordenadas.

A definição do material da encosta é orientada por três parâmetros principais: coeficientes de restituição, ângulo de atrito e rugosidade; estes sendo variáveis de acordo com o método de análise escolhido (Massa Concentrada e Corpo Rígido). Ademais, o programa permite que sejam atribuídos diferentes tipos de materiais ao longo do perfil da encosta, obtendo assim perfis que melhor se assemelham às situações encontradas em campo. A Figura 32 apresenta um exemplo da interface

do programa, ao serem inseridos o perfil transversal e os materiais constituintes da encosta.

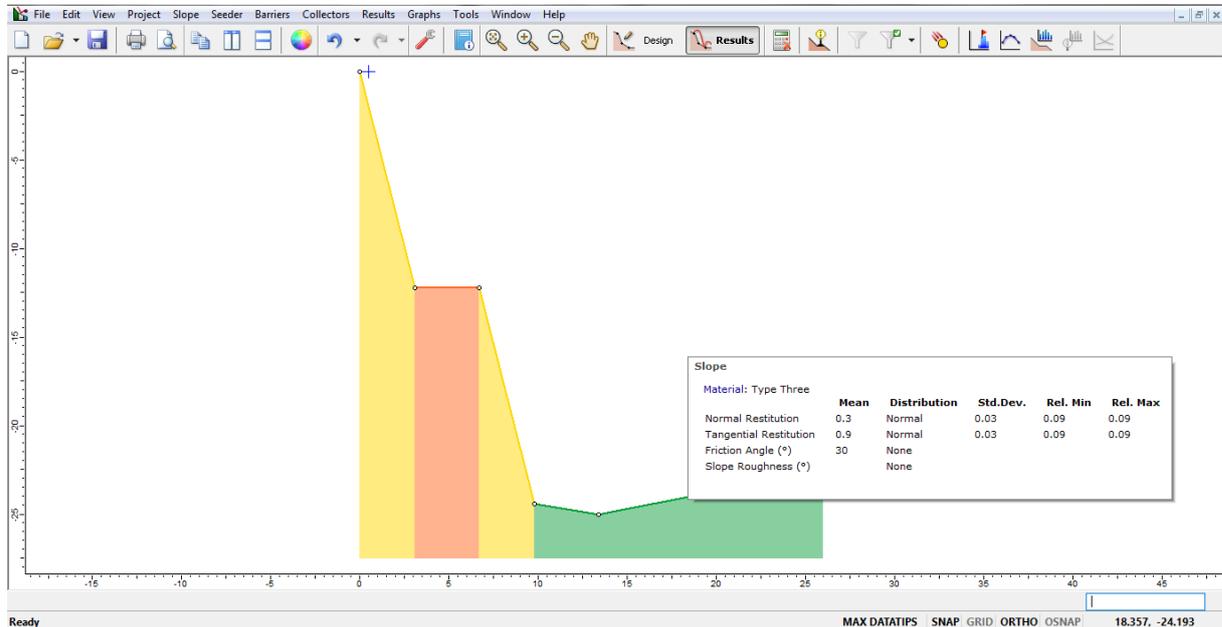


Figura 32 - Perfil transversal e materiais constituintes da encosta

Para análises de Massa Concentrada, podem ser definidos parâmetros, como por exemplo, coeficientes de restituição normal e tangencial, ângulo de atrito e rugosidade da encosta. Porém, nas análises de Corpo Rígido, além destes, podem ser definidos o atrito dinâmico e a resistência ao rolamento.

Apoiado no trabalho de Freitas (2013) e no próprio tutorial do programa, são apresentados, a seguir, cada um destes parâmetros.

- (a) Rugosidade - Simula as imperfeições encontradas na superfície da encosta. É representada por um desvio padrão do ângulo de inclinação da encosta, sendo determinada pelo usuário com base nas características da encosta real e do tamanho e formato dos blocos instáveis;
- (b) Ângulo de atrito - Parâmetro determinante para as condições de movimento do bloco, pois, quando o segmento da seção apresenta inclinação maior que o ângulo de atrito adotado, o bloco continua seu movimento. Contudo, no

momento que o trecho exibe inclinação menor que o ângulo de atrito, o bloco apresentará uma tendência de redução do movimento;

- (c) Coeficiente de restituição normal e tangencial - Estes fatores estabelecem a quantidade de energia que é dissipada em função da colisão ou contato do bloco com a encosta. Em função disto, atuam reduzindo as velocidades normal e tangencial na superfície da encosta e são determinados em função do material encontrado na superfície estudada;
- (d) Atrito dinâmico - É aquele que atua quando há deslizamento no contato entre o bloco e a encosta. Corresponde ao valor da tangente do ângulo de atrito do material;
- (e) Coeficiente de resistência ao rolamento - Representa a energia perdida para outros fatores além do atrito dinâmico, como deformação plástica, histerese e deslizamento da superfície de contato;

O *RocFall* 6.0 permite também que o usuário utilize um fator de escala para ajustar o coeficiente de restituição normal, adicionando à análise uma transição de condições quase elásticas para condições altamente inelásticas, causadas pelo fraturamento do bloco e da superfície do talude nos altos impactos. Este fator pode ser calculado por meio da massa ou da velocidade do bloco e se ajusta para a diminuição do coeficiente de restituição a cada impacto entre o bloco e a superfície ao longo da trajetória.

### 3.1.5 Definição das características dos blocos

O local de partida dos blocos, também chamado semeador, poder ser facilmente posicionado em qualquer lugar do perfil, bem como se definir mais de um semeador ao longo da encosta. Este pode ser definido não só como um ponto, quando se tem a localização exata em campo, mas também como um segmento de

reta, quando somente se possui uma noção da área de onde os blocos possam ter partido.

Quando se está analisando o lançamento de mais de um bloco de uma única vez, é possível especificar a maneira como estes serão lançados. Podemos optar por definir a quantidade individualmente por semeador, como também distribuir a partir do total de blocos, neste caso, escolhendo entre uma distribuição igualitária ou de acordo com o comprimento de cada semeador.

Nessa etapa, são determinadas as condições iniciais dos blocos, ou seja, são definidos os valores das velocidades horizontal, vertical e rotacional e da rotação inicial do bloco no instante em que começa seu movimento.

O bloco é definido a partir de sua massa e densidade, sendo, no método do Corpo Rígido, também determinada a sua geometria. Buscando fornecer meios de melhor se assemelhar às condições encontradas em campo, o *RocFall* 6.0 disponibiliza uma grande variedade de formas, inclusive variando em suaves e poligonais, além de disponibilizar uma ferramenta de customização, permitindo que o usuário crie seu próprio bloco.

A Figura 33, a seguir, mostra como a caixa de definição dos blocos se apresenta na versão 6.0 do *RocFall*.

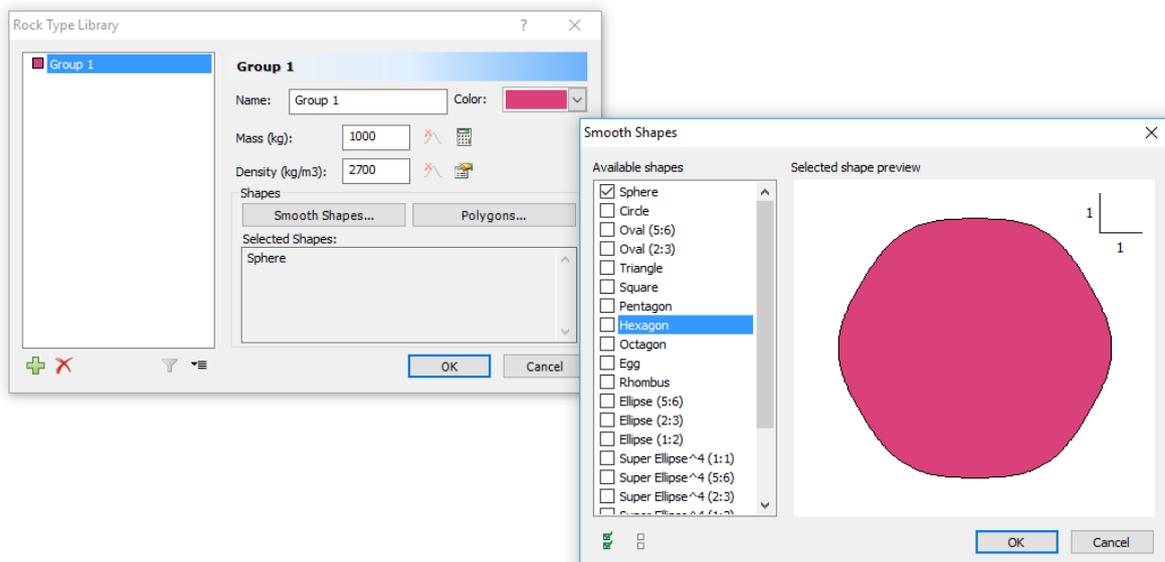


Figura 33 - Definição das características dos blocos

### 3.1.6 Definição de Barreiras e Coletores:

As barreiras são segmentos de reta, com uma extremidade em contato com o perfil transversal, que podem ser colocadas em qualquer lugar ao longo da superfície e na quantidade que se desejar. Têm por objetivo parar os blocos que caem, ou absorver um pouco de sua energia, ao longo de sua trajetória pela encosta.

Existem duas maneiras de modelar uma barreira, seja especificando sua localização na encosta, sua altura e seu ângulo, seja especificando seus pontos finais. O *RocFall* 6.0 disponibiliza para uso uma vasta lista de barreiras comerciais com suas devidas características, mas também permite que o usuário crie sua própria barreira.

Os coletores de dados são usados quando se deseja determinar informações sobre um determinado local, mas não se deseja alterar os caminhos que os blocos percorrem ao descer a encosta. Não há restrições quanto a quantidade ou a localização desses. Assim, os coletores registram informações como velocidade, energia cinética e localização na vertical e na horizontal de todos os blocos que por eles passarem, sem afetarem o movimento destes de forma alguma.

Um exemplo do posicionamento e do efeito dos coletores e das barreiras pode ser conferido na Figura 34.

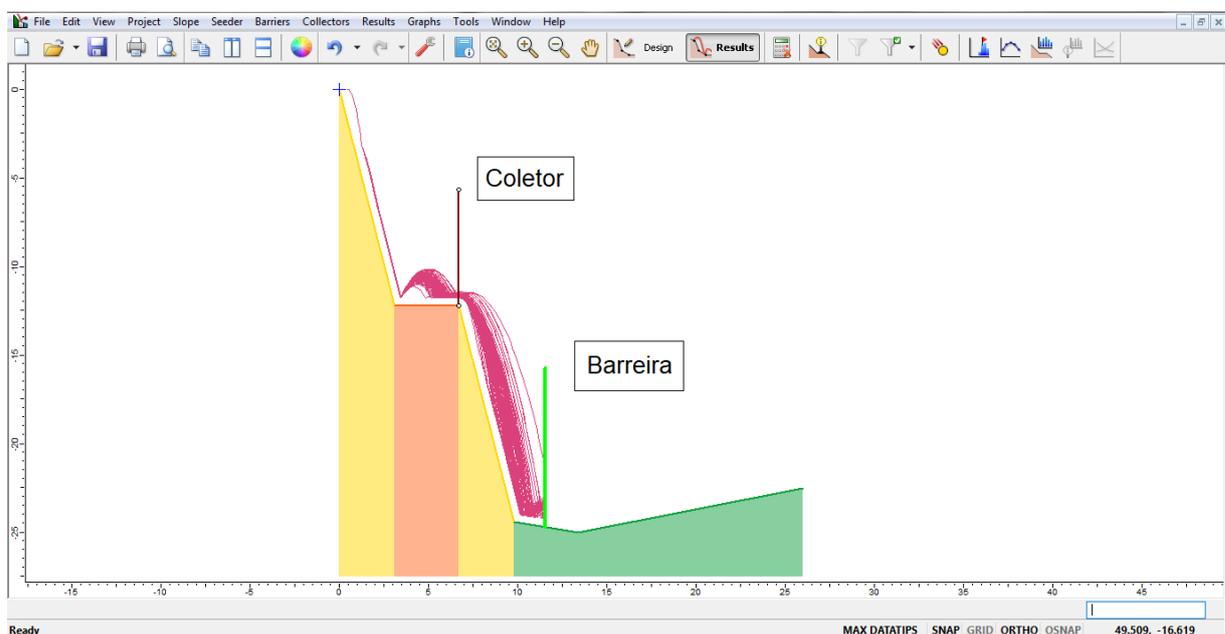


Figura 34 – Exemplo de posicionamento de barreira e coletor

### 3.1.7 Resultados

Uma série de trajetórias desenvolvidas pelos blocos ao longo da encosta é o primeiro resultado a ser exibido após o processamento das análises. Estes caminhos se apresentam de forma estática, mas podem ser acompanhados de forma dinâmica, proporcionando uma ideia melhor de como o bloco se comporta ao longo do movimento. Outro recurso oferecido é a identificação dos pontos de contato entre o bloco e a encosta em cada uma das trajetórias, possibilitando análises mais específicas destes pontos de interesse.

Os resultados das análises também são disponibilizados em forma de gráficos, os quais podem ser referentes à localização final dos blocos, altura de salto, energia cinética (total, rotacional e translacional) e velocidade (rotacional e translacional). Todos os tipos de gráficos podem ser exportados do programa por meio de extensão em *Excel*.

O gráfico que representa a localização final dos blocos é apresentado em forma de histograma (Figura 35), já os outros parâmetros tanto podem ser representados por gráficos de envoltórias (Figura 36), como pelos de distribuição. Neste último, uma linha vertical marca no perfil a localização que o usuário pretende estudar, sendo os dados exibidos para este local específico, como por exemplo, na Figura 37, que mostra um gráfico de distribuição de altura de salto.

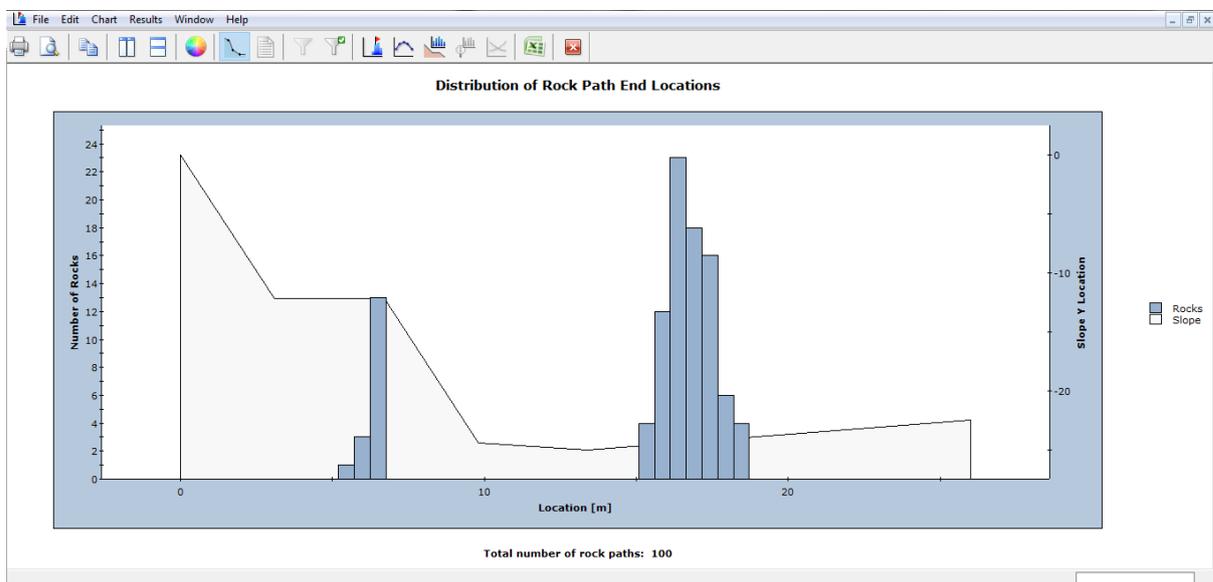


Figura 35 - Histograma de localização final dos blocos

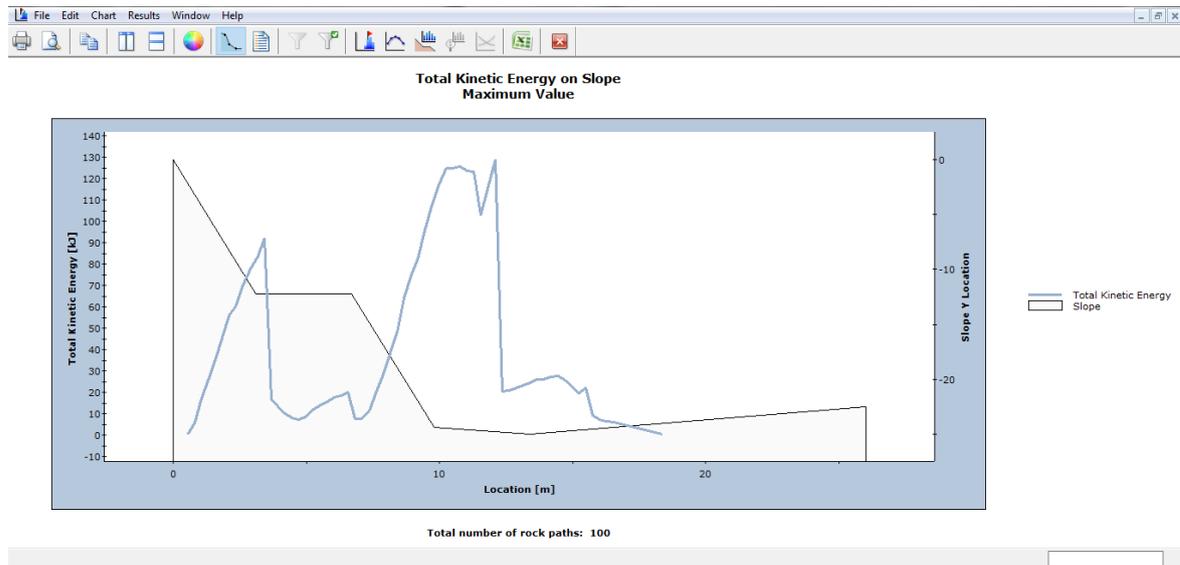


Figura 36 - Envoltória de Energia Cinética Total

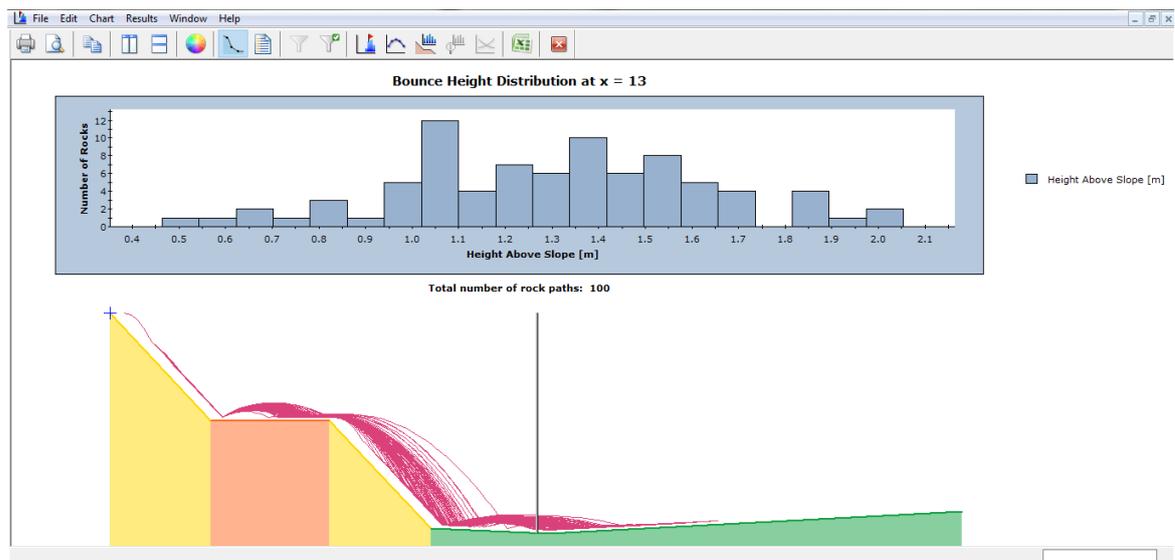


Figura 37 - Gráfico de Distribuição de altura de salto dos blocos

Gráficos semelhantes podem ser gerados para as barreiras e coletores a fim de se obter as seguintes informações: localizações de impactos ao longo da altura, ângulo de impacto, energias cinéticas (total, rotacional e translacional) e velocidades (rotacionais e translacionais). Ao se utilizarem barreiras comerciais, o programa oferece como recurso a geração de relatórios que disponibilizam informações tais como, resumo das propriedades e dados estatísticos sobre a altura de impacto dos

blocos, velocidade linear e energia cinética. Além disso, fornece uma verificação do dimensionamento da barreira em relação a energia, altura e alongamento.

## 4 ESTUDO DE CENÁRIO

Dando sequência ao estudo do fenômeno de queda de blocos rochosos mediante a aplicação da teoria do caos, iniciado por Ignacio (2019), o presente trabalho visa observar a influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda, verificando se os sistemas formados satisfazem as principais características de um sistema não-linear e buscando uma possível descrição do comportamento destes fenômeno por meio das proposições da teoria do caos.

Assim sendo, para efeito de comparação, foram utilizados nesta pesquisa os perfis transversais do estudo preliminar de Ignacio (2019), mantendo-se as características geométricas dos perfis e os parâmetros do material e do projeto, porém inserindo-se nas análises blocos com diferentes geometrias.

Desta forma, este capítulo apresenta os modelos iniciais e suas presentes alterações, além dos resultados obtidos nas novas análises a partir das mudanças propostas. É realizado também um comparativo com os resultados encontrados no estudo preliminar de Ignacio (2019) e, por fim, são feitas considerações quanto à atual pesquisa.

### 4.1 Modelos adotados para as análises

Os perfis empregados no estudo preliminar de Ignacio (2019) são apresentados na forma de quatro seções transversais distintas, baseadas nos tutoriais do *RocFall* 6.0 e em um caso real, os quais se dividem entre geometrias simples e refinadas, além de superfícies côncavas e convexas. Como material constituinte foi utilizado o gnaiss facoidal, que originalmente foi escolhido a partir de estudo geológico e geomorfológico da cidade do Rio de Janeiro.

No atual estudo, todas as características dos modelos acima citados foram mantidas, porém, de forma a se avaliar toda a trajetória desenvolvida pelos blocos e seus respectivos alcances, percebeu-se a necessidade de alongar a base de dois destes perfis para além do considerado no estudo de Ignacio (2019), em decorrência do grande alcance apresentado pelos blocos de bordas arredondadas.

Em relação aos blocos, utilizou-se a composição por rochas de mesmo material constituinte da encosta, possuindo todos o mesmo tamanho e, conforme objetivo principal desse estudo, optou-se por variar os formatos entre quadrados e hexagonais regulares, modelando-os com bordas arredondadas e vivas.

Os parâmetros geotécnicos utilizados nesta modelagem para o material constituinte da encosta e dos blocos foram estabelecidos por Ignacio (2019) e são apresentados a seguir:

- coeficientes de restituição normal – 0,35
- coeficientes de restituição tangencial – 0,85
- atrito dinâmico – 0,50
- atrito de rolamento (ou resistência ao rolamento) – 0,15

Segundo Ignacio (2019), “a diferença de tamanho entre os blocos não influencia suficientemente os resultados das distribuições de probabilidade”, fato este verificado para todos os casos estudados, portanto, para a atual pesquisa, foi considerado um tamanho padronizado independente da geometria.

Sendo assim, ao se modelarem os blocos, foram determinadas a massa e a densidade, definidas em 1.000 Kg e 2.700 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente, apresentando um diâmetro final de aproximadamente 0,72m. Na Figura 38 são apresentados os tipos de blocos utilizados com suas respectivas nomenclaturas e geometrias consideradas.

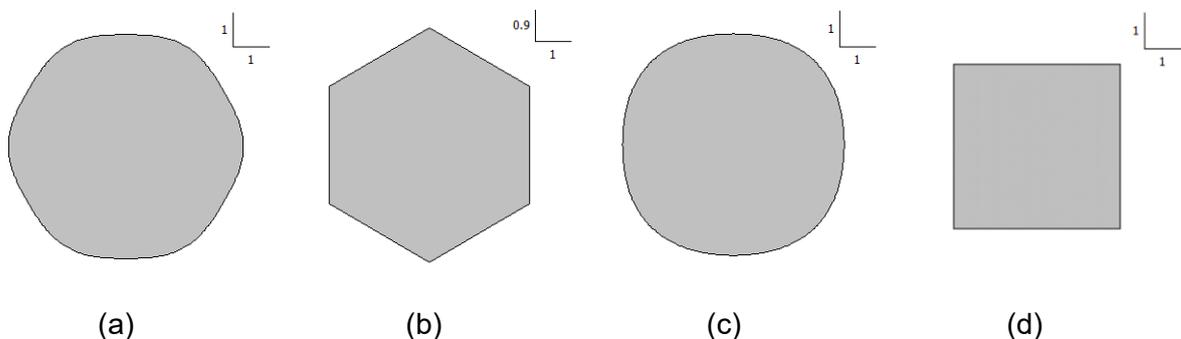


Figura 38 - Tipos dos Blocos: (a) Bloco Hexagonal Arredondado (BHA), (b) Bloco Hexagonal Vivo (BHV), (c) Bloco Quadrado Arredondado (BQA) e (d) Bloco Quadrado Vivo (BQV)

O local de partida dos blocos foi fixado como um ponto, na parte mais alta de cada perfil, e como condição inicial foi considerada somente velocidade horizontal, fixada em 1m/s e considerando distribuição normal e desvio padrão de 0,4.

O método de análise escolhido foi o de Corpo Rígido, por permitir adicionar à modelagem o tamanho e o formato dos blocos. Em se tratando do método de amostragem, foi eleito o de Monte Carlo, por ser o mais utilizado e o de melhor reputação para estudos relacionados à queda de bloco. Deste modo, a fim de se obter distribuições probabilísticas mais confiáveis, buscou-se utilizar o maior número de blocos por simulação, ficando delimitado em 100.000 blocos por tentativa.

Vale ressaltar que ao executar simulações com quantidades menores de blocos, como por exemplo 30.000, 40.000 e 50.000, as aparências das distribuições mostraram-se muito semelhantes entre si, assim demonstrando que a quantidade de 100.000 blocos por simulações representa o limite desta distribuição e pode ser utilizada satisfatoriamente para o estudo em questão.

## 4.2 Análises e Resultados obtidos

Inicialmente, para cada perfil, foram executadas quatro simulações, uma para cada tipo de bloco. Após o processamento dos dados, obtiveram-se as distribuições de probabilidade, que fornecem grande parte das informações pertinentes à análise de quedas de bloco, como energia cinética (total, rotacional e translacional), altura de salto, localização final e velocidades (rotacional e translacional).

Contudo, assim como na pesquisa desenvolvida por Ignacio (2019), somente foram estudadas as distribuições probabilísticas de localização final, ou seja, o comportamento dos blocos ao final do movimento, por se tratar de uma das informações mais importantes desse fenômeno, influenciando diretamente no projeto de mitigação.

De posse das distribuições probabilísticas de localização final, estas foram tratadas no programa *Grapher*, com base nas formulações de entropia clássica e entropia generalizada discutidas no capítulo 2, ajustando os resultados às distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida e verificando a qual destas adequam-se melhor.

Os resultados obtidos após este tratamento são apresentados na forma de dois gráficos, a saber: o primeiro, apresentado na forma padrão da distribuição, com seus eixos em escala linear; o segundo, utilizado para mostrar, com maior clareza, como se comportam as distribuições na região da cauda, utilizando-se para isso a escala logarítmica no eixo vertical e mantendo-se a escala linear no eixo horizontal.

A seguir, são apresentados cada perfil individualmente, assim como seus resultados pós-tratamento e as conclusões após análise dos mesmos.

#### 4.2.1 Caso C1

O primeiro caso é descrito como uma geometria simplificada com superfície globalmente côncava, porém com um trecho central levemente convexo, mas mantendo uma transição suave entre o perfil da encosta e o nível da base alongada. Este perfil possui 14,43m de altura por 41,50m de comprimento, e pode ser conferido na Figura 39.

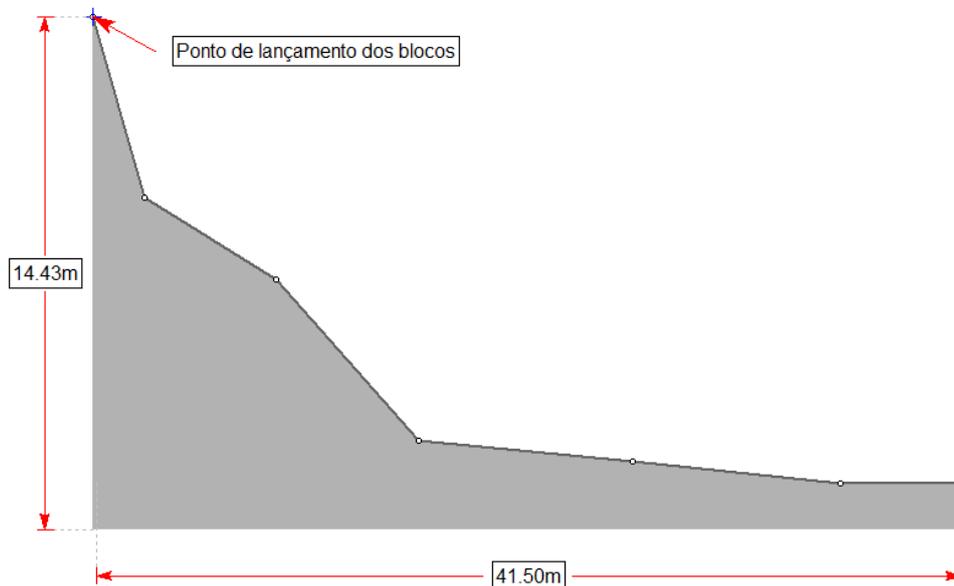


Figura 39 - Perfil transversal do caso C1 (Sem escala)

Da Figura 40 a Figura 47 são apresentados os resultados alcançados nos ajustes estatísticos das distribuições probabilísticas de localização final por meio das distribuições gaussiana e q-exponencial estendida.

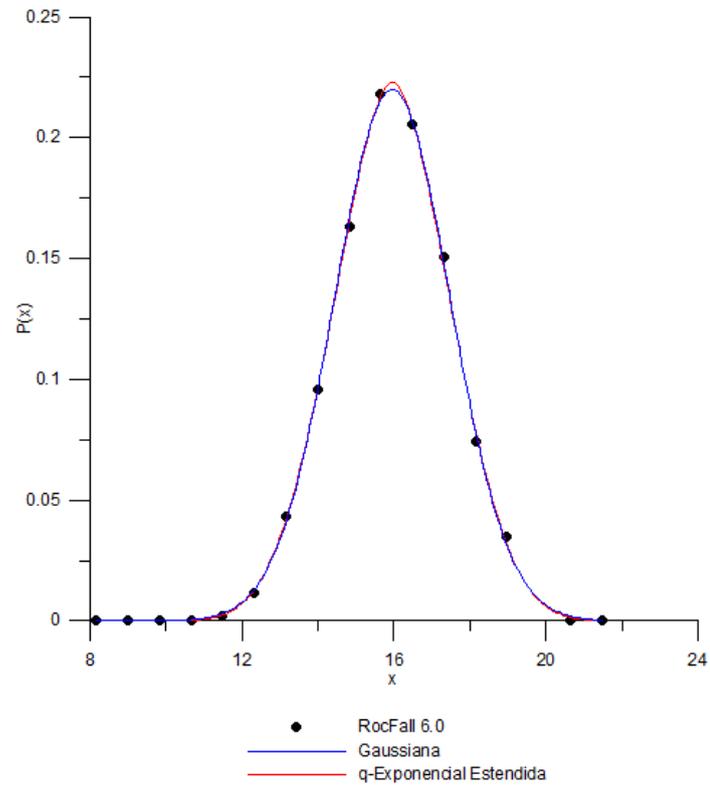


Figura 40 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C1 – Bloco BHA

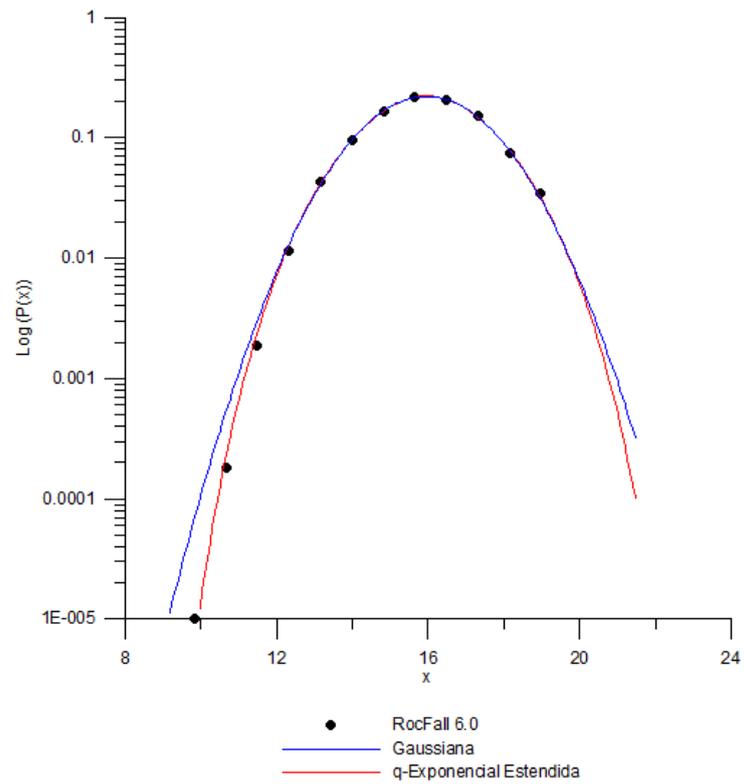


Figura 41 - Gráfico Log (P(x)) versus x – Caso C1 – Bloco BHA

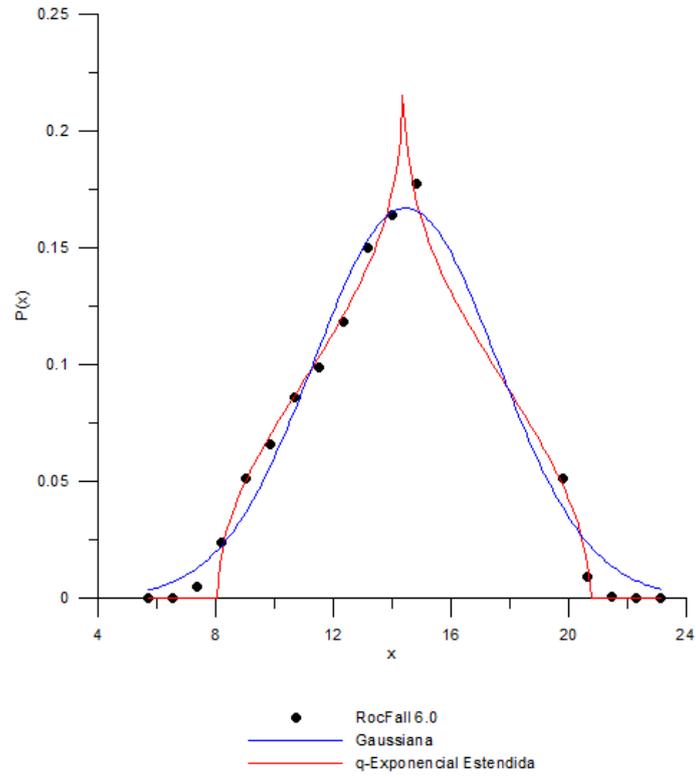


Figura 42 - Gráfico P(x) versus x – Caso C1 – Bloco BHV

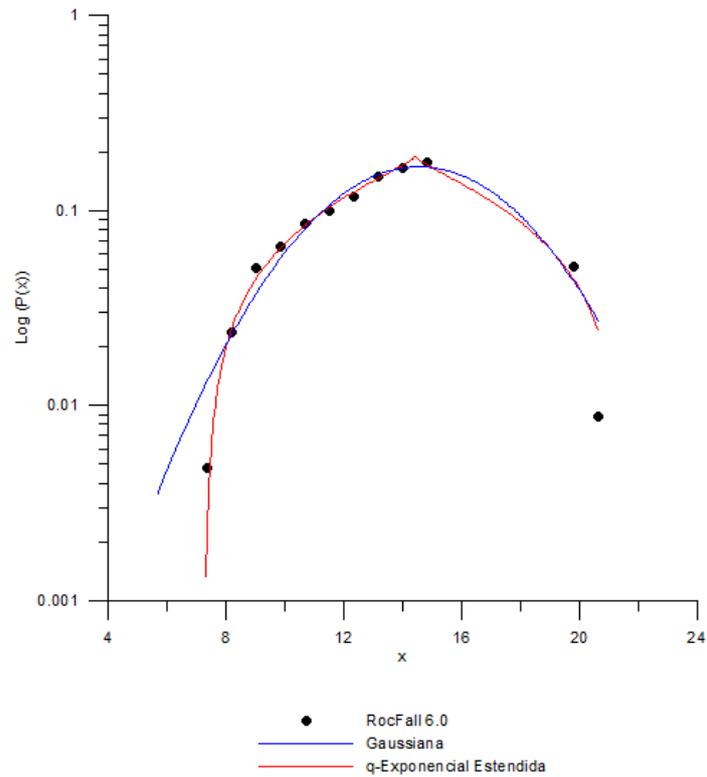


Figura 43 - Gráfico Log (P(x)) versus x – Caso C1 – Bloco BHV

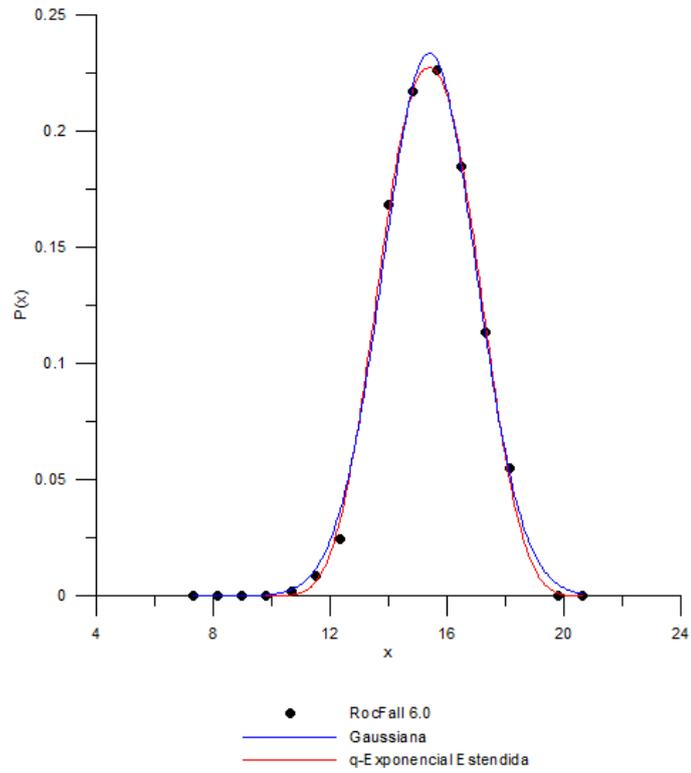


Figura 44 - Gráfico P(x) versus x – Caso C1 – Bloco BQA

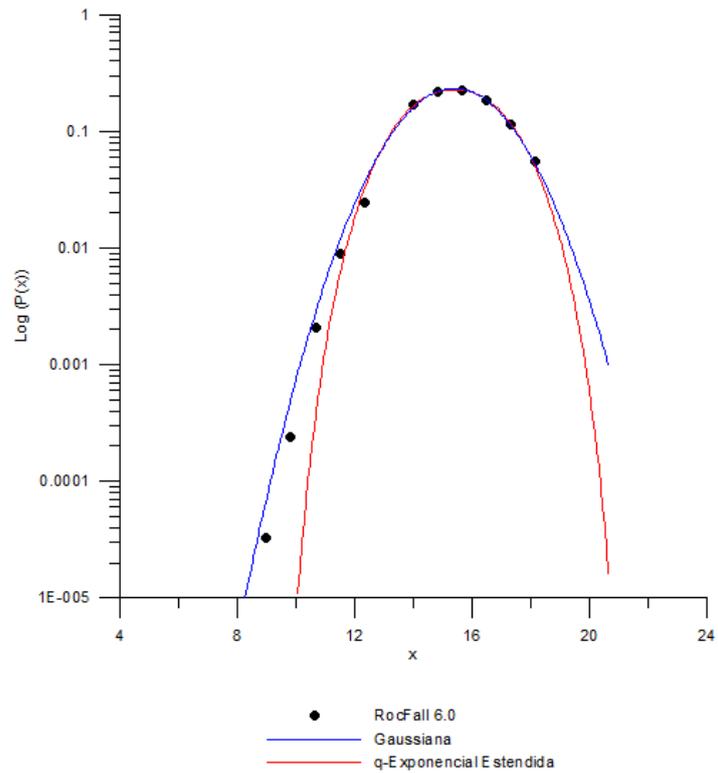


Figura 45 - Gráfico Log (P(x)) versus x – Caso C1 – Bloco BQA

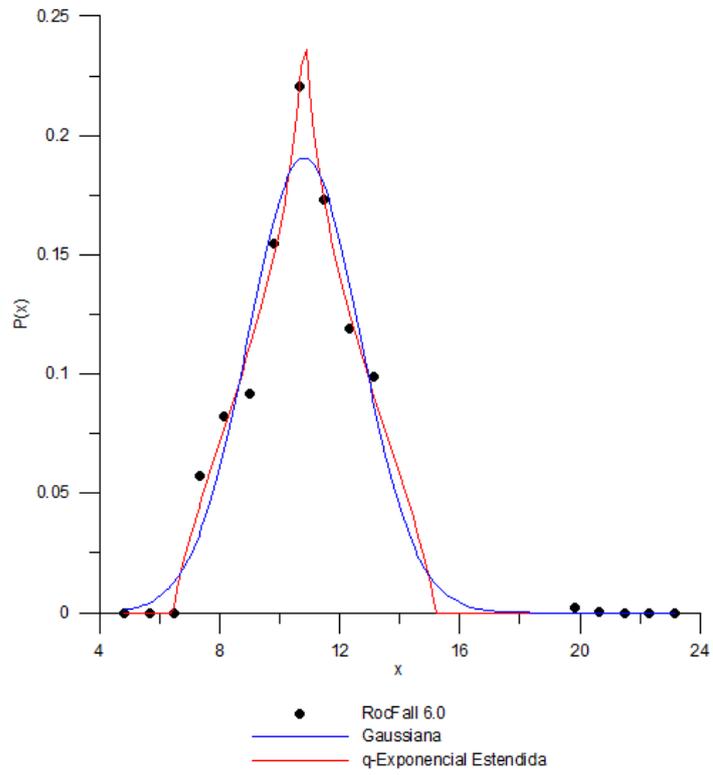


Figura 46 - Gráfico P(x) versus x – Caso C1 – Bloco BQV

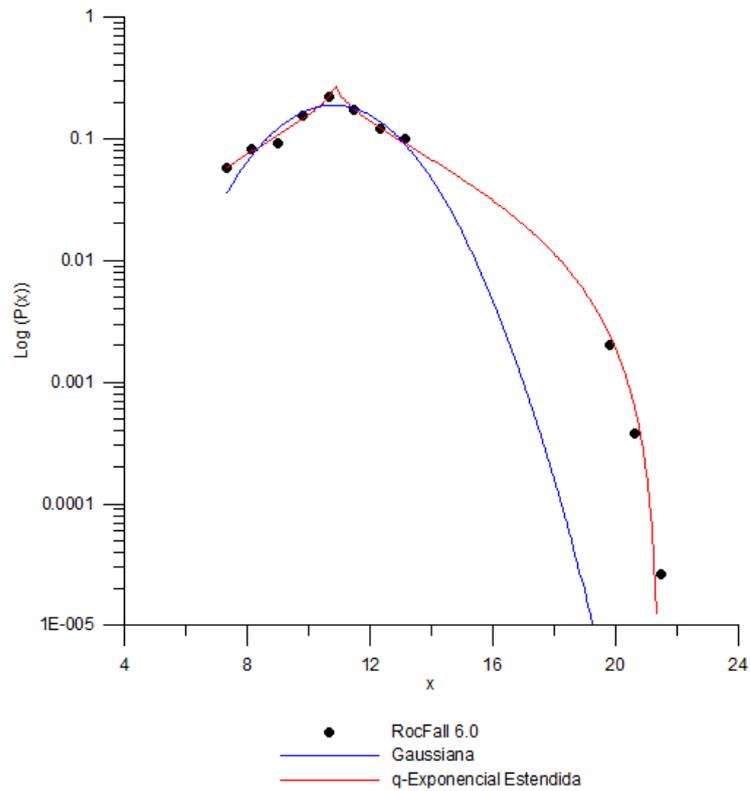


Figura 47 - Gráfico Log (P(x)) versus x – Caso C1 – Bloco BQV

Em favor de uma melhor visualização, foram reunidos, na Tabela 4 e na Tabela 5, os valores dos parâmetros de ajuste das distribuições de probabilidade e dos coeficientes de correlação obtidos nos ajustes estatísticos para cada tipo de bloco.

Tabela 4 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C1

Gaussiana	Caso C1				
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade			Coefficiente de correlação
		a	b	c	R <sup>2</sup>
	<b>BHA</b>	0,2198	2,1599	15,9586	0,9992
	<b>BHV</b>	0,1670	4,4194	14,4605	0,9766
	<b>BQA</b>	0,2335	2,2463	15,3895	0,9972
	<b>BQV</b>	0,1906	2,6351	10,8230	0,9607

Tabela 5 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C1

q-Exponencial Estendida	Caso C1						
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade					Coefficiente de correlação
		q	$\delta$	a'	b'	c'	R <sup>2</sup>
	<b>BHA</b>	0,8957	1,0959	0,2229	2,2139	15,9584	0,9993
	<b>BHV</b>	-1,0509	9,2709	0,2552	176,9423	14,3808	0,9950
	<b>BQA</b>	0,8788	0,9218	0,2270	2,3650	15,3824	0,9988
	<b>BQV</b>	-0,3909	5,5090	0,2846	10,8019	10,8301	0,9915

Mediante os gráficos de ajuste estatístico de cada bloco e dos coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, é possível verificar a formação de uma tendência relacionada ao tipo de borda dos blocos.

Para os blocos de borda arredondada, verificou-se uma proximidade muito grande entre os ajustes das duas distribuições de probabilidade e, ao se observarem os parâmetros  $q$  e  $\delta$ , percebe-se uma proximidade ao valor 1, o que demonstra que a distribuição  $q$ -exponencial estendida está convergindo para uma distribuição gaussiana. Sendo assim, esta distribuição é a que melhor representa a estatística das quedas de bloco para a interação entre o perfil C1 e os blocos de borda arredondada (BHA e BQA), indicando um comportamento fortemente caótico para este cenário.

Já nos blocos de borda viva, tanto os gráficos de ajuste estatístico como os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade mostram que a distribuição  $q$ -exponencial estendida apresenta melhores resultados de ajuste. Demonstrando que esta distribuição é a que melhor representa a estatística das quedas de bloco para a interação entre o perfil C1 e os blocos de borda viva (BHV e BQV), indicando um comportamento fracamente caótico para este outro cenário.

#### 4.2.2 Caso C2

O segundo caso é descrito como uma geometria refinada, quando comparada ao caso C1, com superfície acentuadamente convexa, mas mantendo uma transição suave entre o perfil da encosta e o nível da base alongada. Este perfil possui 45,00m de altura por 100,00m de comprimento, e pode ser conferido na Figura 48.

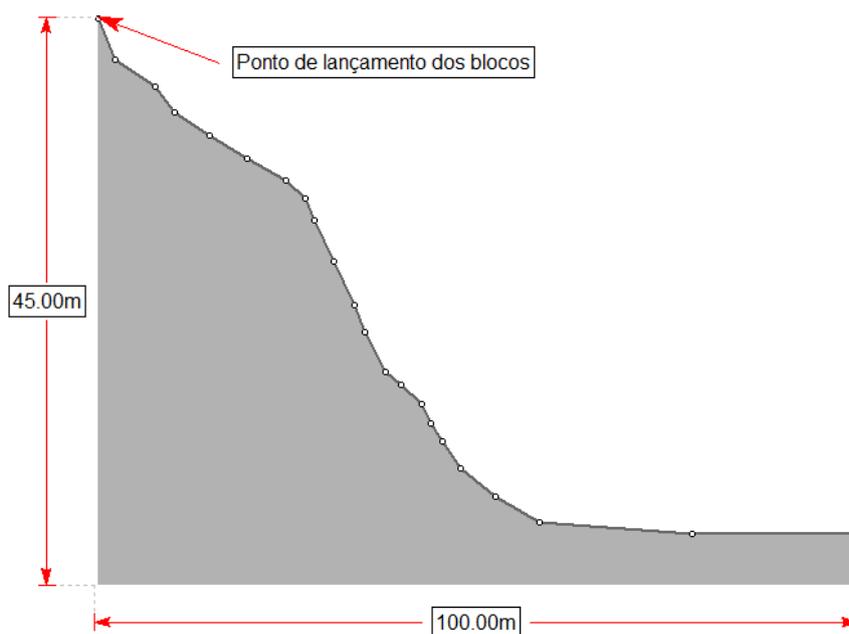


Figura 48 - Perfil transversal do caso C2 (Sem escala)

Da Figura 49 a Figura 56 são apresentados os resultados alcançados nos ajustes estatísticos das distribuições probabilísticas de localização final.

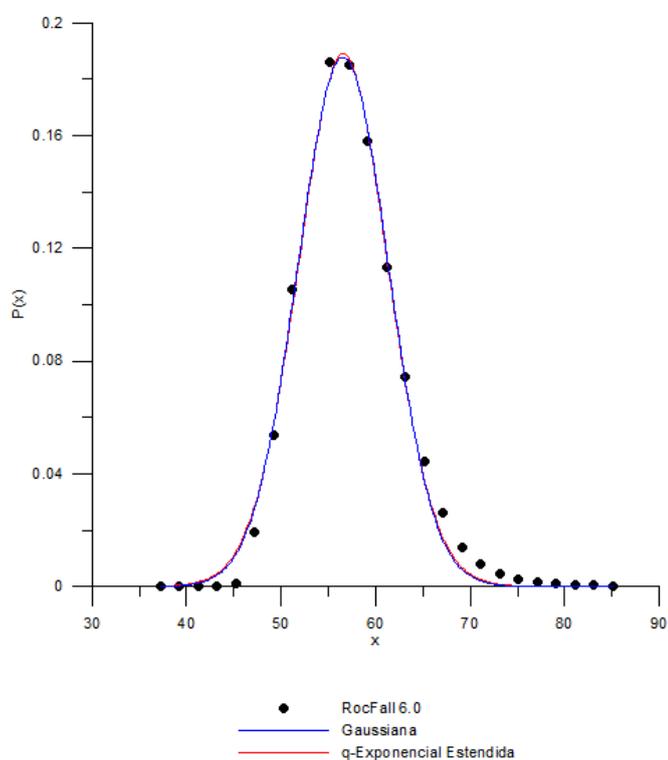


Figura 49 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BHA

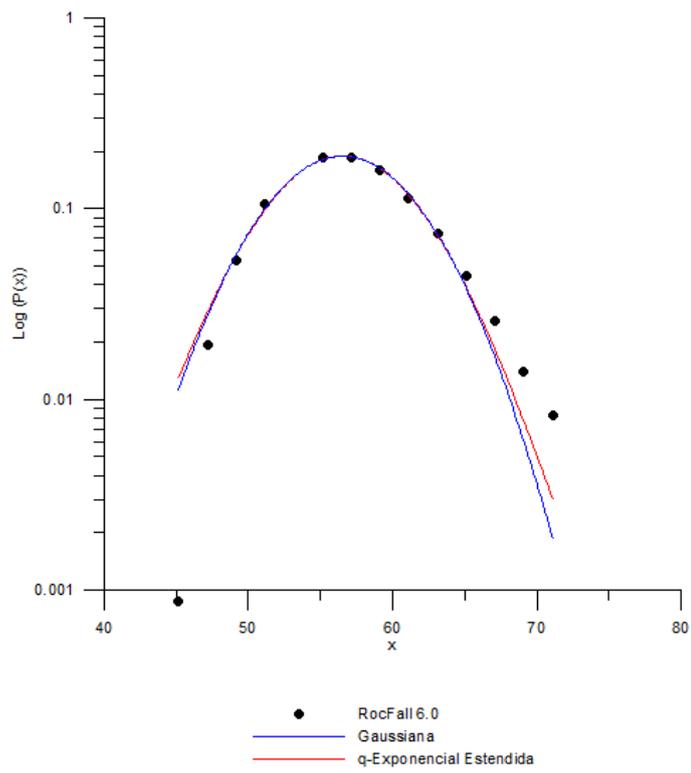


Figura 50 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BHA

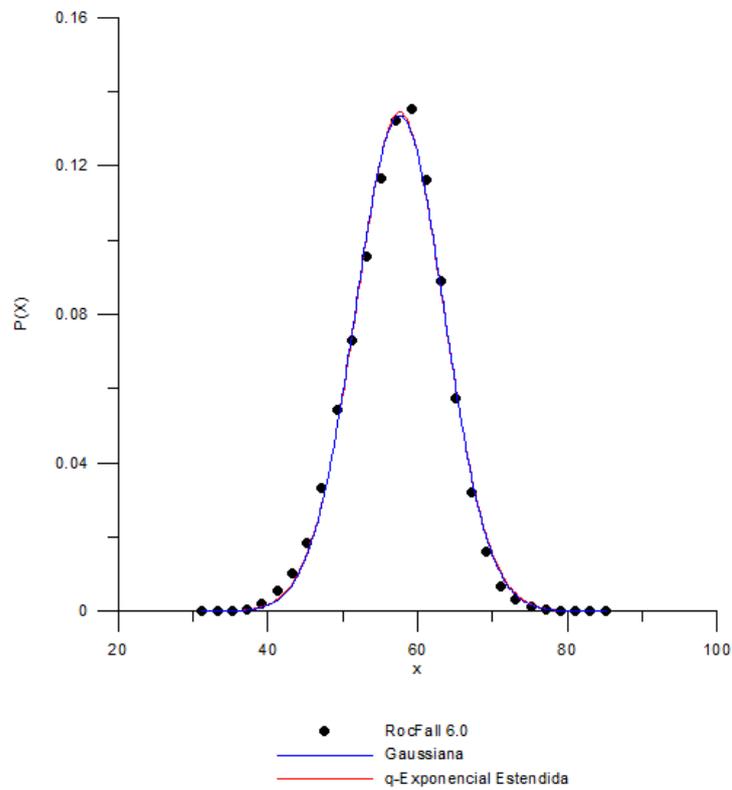


Figura 51 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BHV

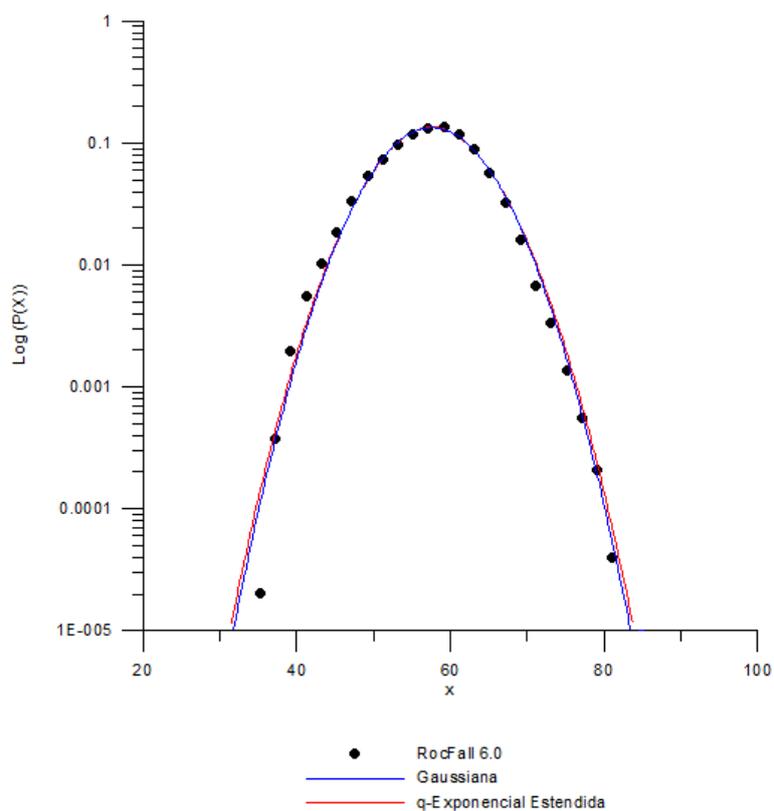


Figura 52 - Gráfico Log(P(x)) versus x – Caso C2 – Bloco BHV

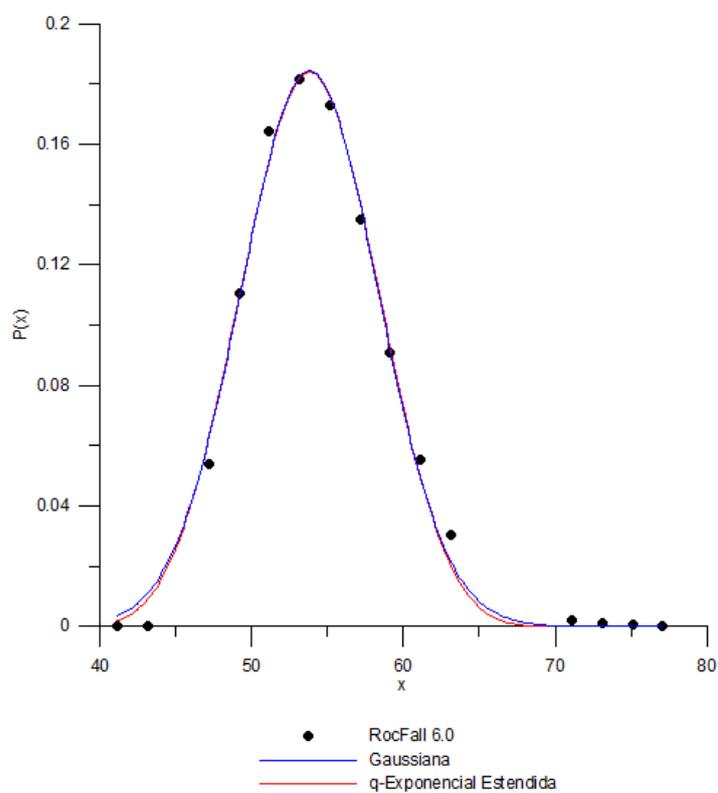


Figura 53 - Gráfico P(x) versus x – Caso C2 – Bloco BQA

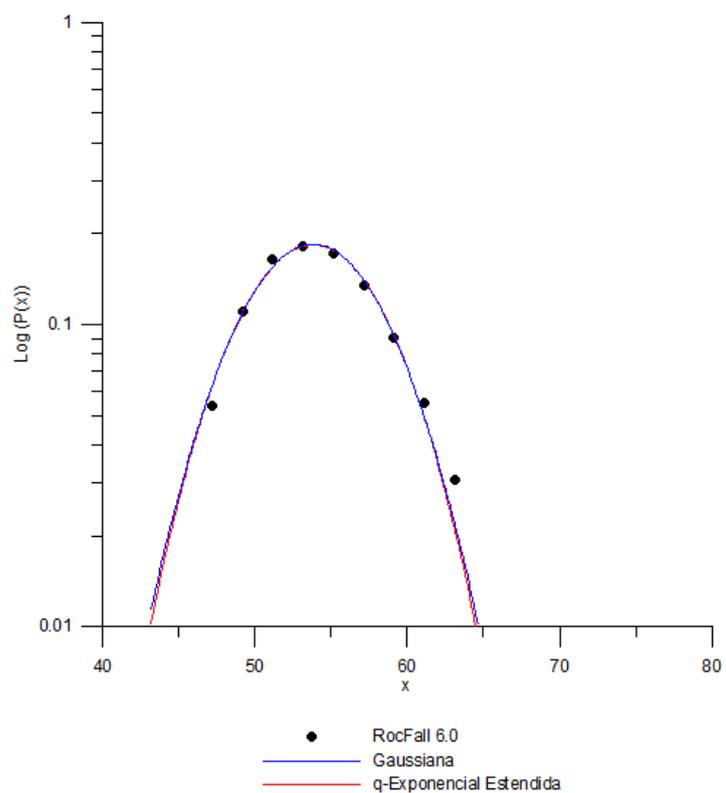


Figura 54 - Gráfico Log ( $P(x)$ ) versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BQA

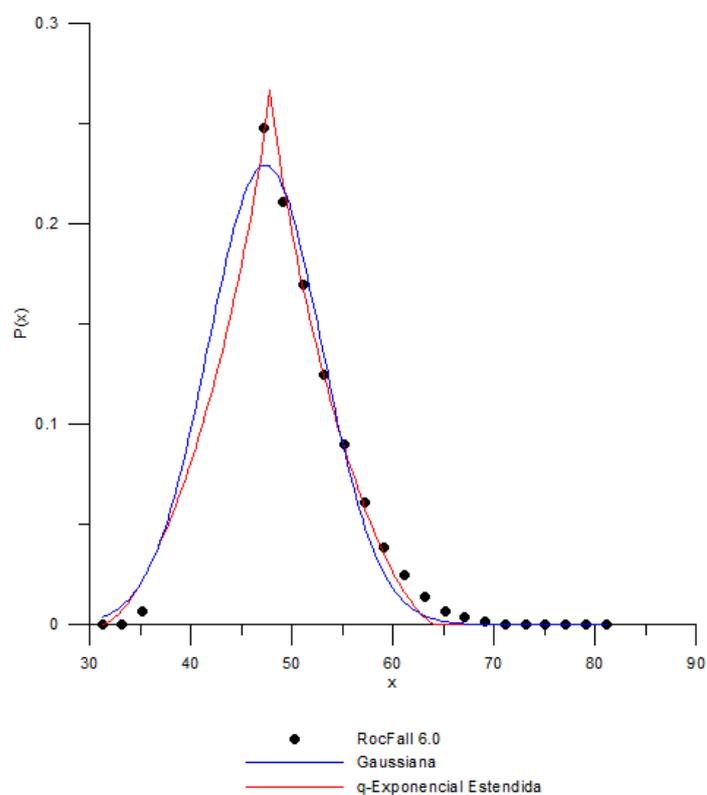


Figura 55 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C2 – Bloco BQV

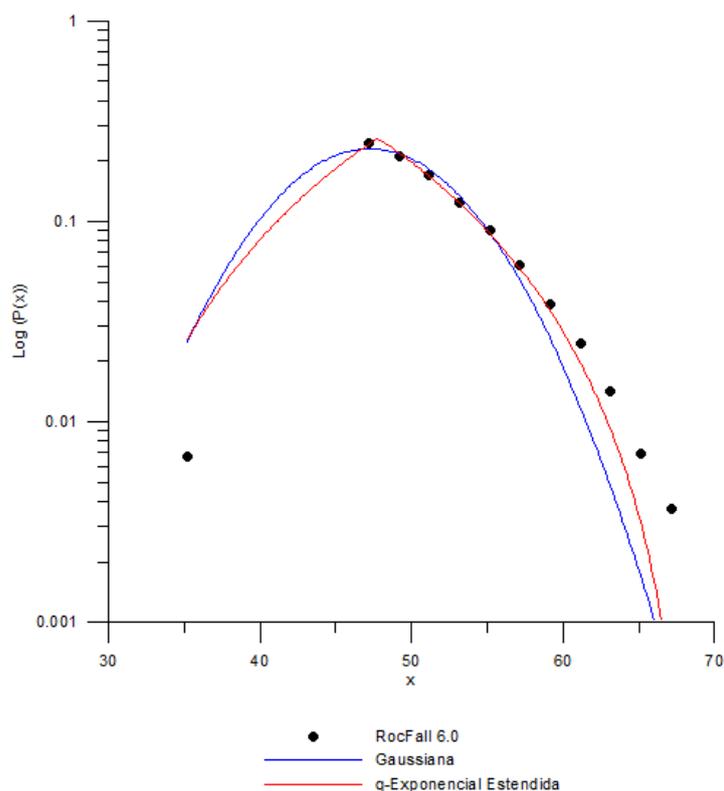


Figura 56 - Gráfico Log (P(x)) versus x – Caso C2 – Bloco BQV

A Tabela 6 e a Tabela 7 reúnem os valores dos parâmetros de ajuste das distribuições de probabilidade e dos coeficientes de correlação obtidos nos ajustes estatísticos para cada tipo de bloco.

Tabela 6 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C2

Gaussiana	Caso C2				
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade			Coeficiente de correlação $R^2$
		a	b	c	
	<b>BHA</b>	0,1879	6,7703	56,5909	0,9939
	<b>BHV</b>	0,1336	8,3962	57,5927	0,9954
	<b>BQA</b>	0,1842	6,3624	53,8211	0,9951
	<b>BQV</b>	0,2293	7,9374	47,3551	0,9865

Tabela 7 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C2

q- Exponencial Estendida	Caso C2						
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade					Coefficiente de correlação
		q	$\delta$	a'	b'	c'	R <sup>2</sup>
	<b>BHA</b>	1,0195	1,0235	0,1891	6,6927	56,5641	0,9940
	<b>BHV</b>	0,9938	1,0314	0,1346	8,3675	57,6019	0,9954
	<b>BQA</b>	0,8809	1,0328	0,1838	6,6038	53,8298	0,9952
	<b>BQV</b>	0,3557	2,4427	0,2714	9,6721	47,8284	0,9948

Ao se analisarem os gráficos de ajuste estatístico e os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida para os blocos BHA, BHV e BQA, verificou-se uma proximidade muito grande entre os ajustes das duas distribuições de probabilidade. Assim, ao se observarem os parâmetros q e  $\delta$ , percebe-se uma proximidade ao valor 1, o que demonstra que a distribuição q-exponencial estendida está convergindo para uma distribuição gaussiana. Desta forma, esta distribuição é a que melhor representa a estatística das quedas de bloco para a interação entre o perfil C2 e os blocos BHA, BHV e BQA, indicando um comportamento fortemente caótico.

Na interação entre o perfil C2 e os blocos BQV, a distribuição q-exponencial estendida apresenta melhores resultados de ajuste, indicando para este cenário um comportamento fracamente caótico.

#### 4.2.3 Caso C3

O terceiro caso é descrito como uma geometria refinada com superfície acentuadamente convexa, mas mantendo uma transição suave entre o perfil da encosta e o nível da base alongada. Este perfil originalmente possuía 81,89m de altura por 216,80m de comprimento, porém foi necessário fazer um alongamento na base, conforme já explanado, passando a apresentar 585,00m de comprimento, tal como ilustrado na Figura 57 a seguir.

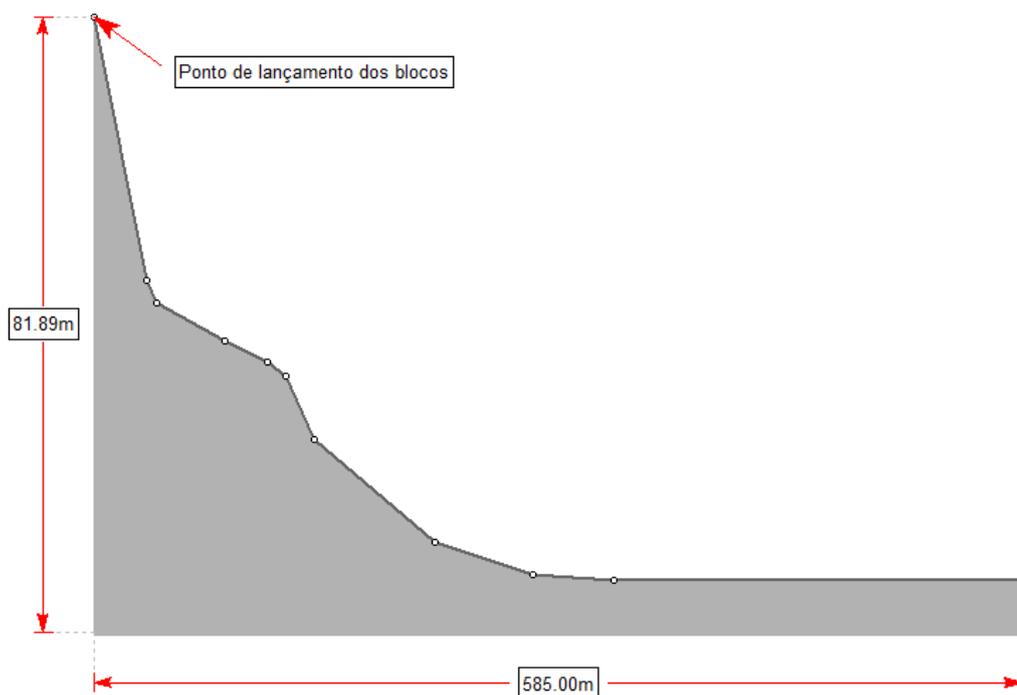


Figura 57 - Perfil transversal do caso C3 (Sem escala)

Da Figura 58 a Figura 65 são apresentados os resultados alcançados nos ajustes estatísticos das distribuições probabilísticas de localização final por meio das distribuições gaussiana e q-exponencial estendida.

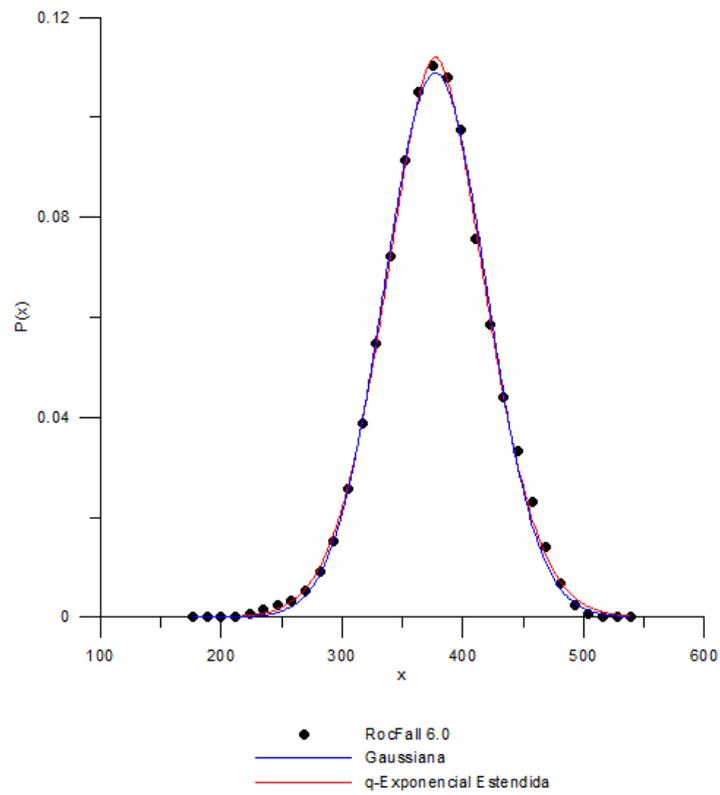


Figura 58 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BHA

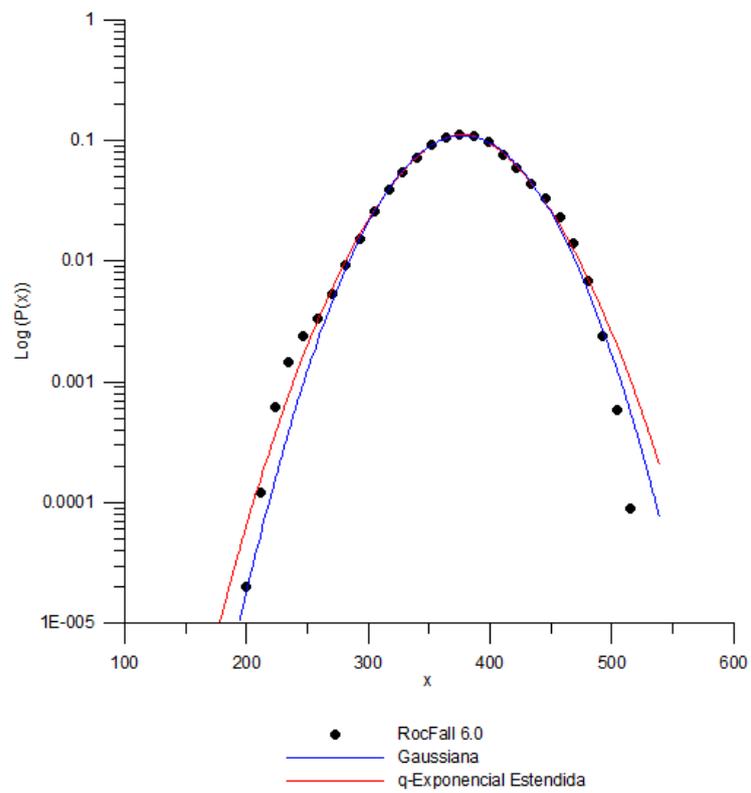


Figura 59 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BHA

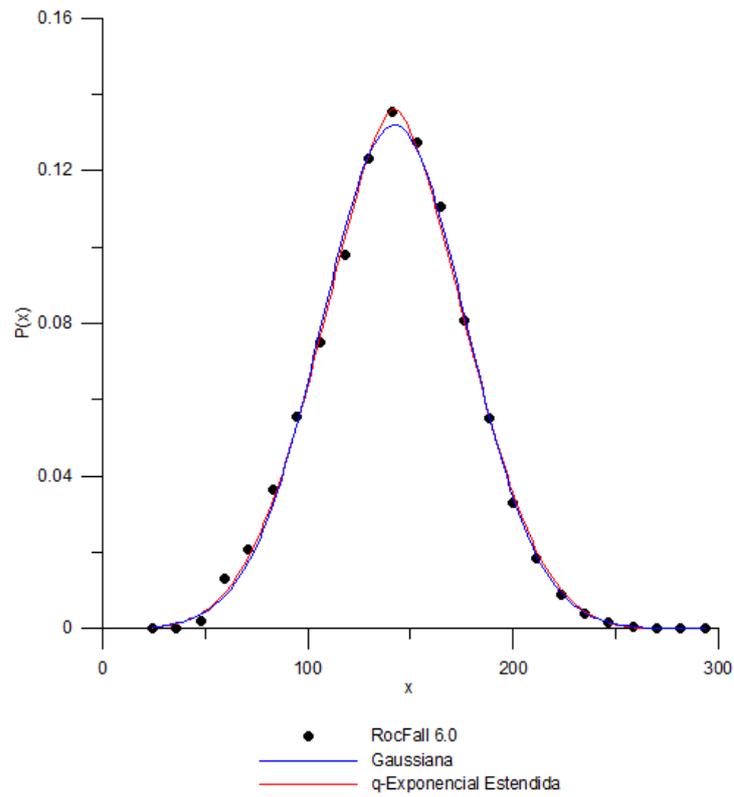


Figura 60 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BHV

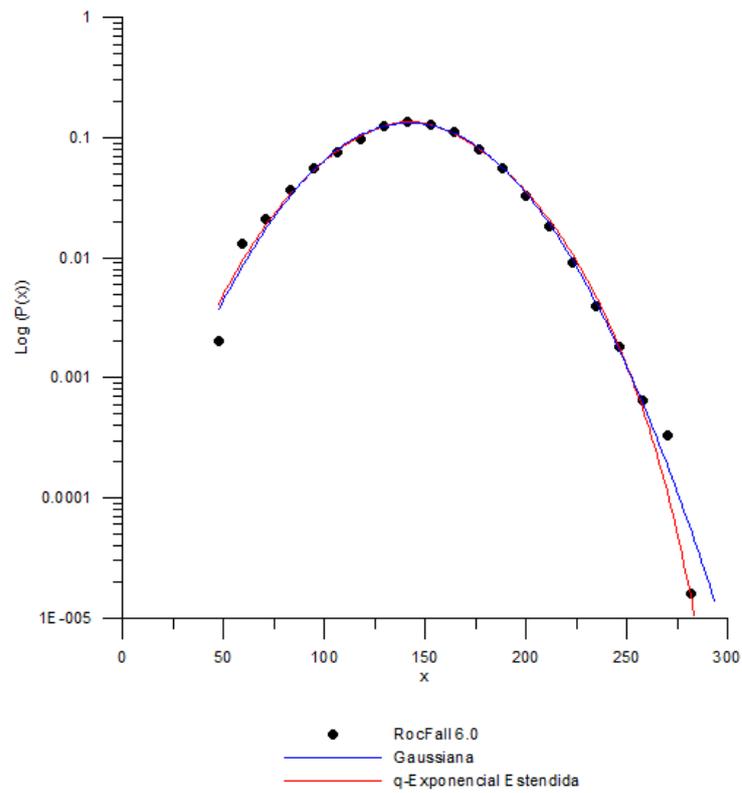


Figura 61 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BHV

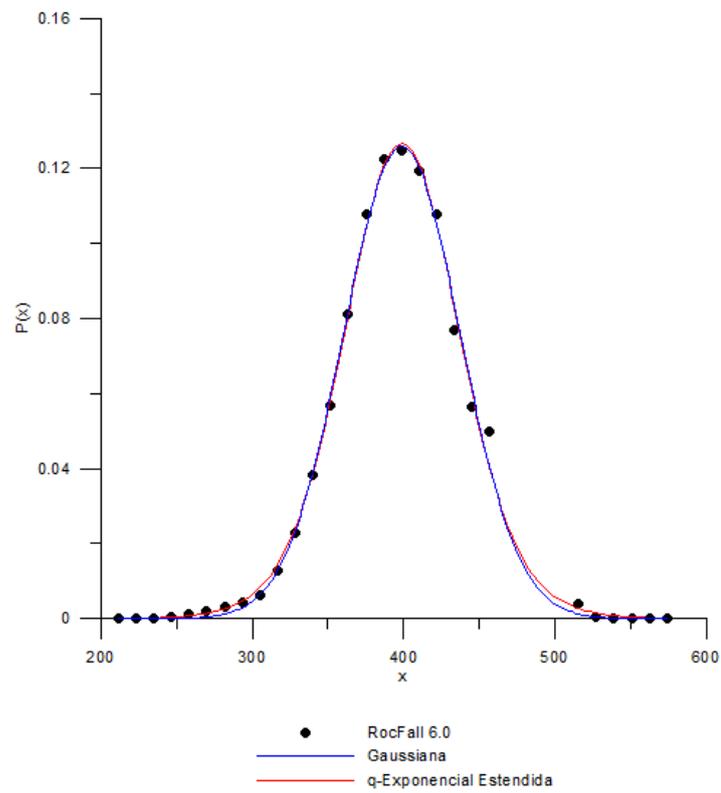


Figura 62 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BQA

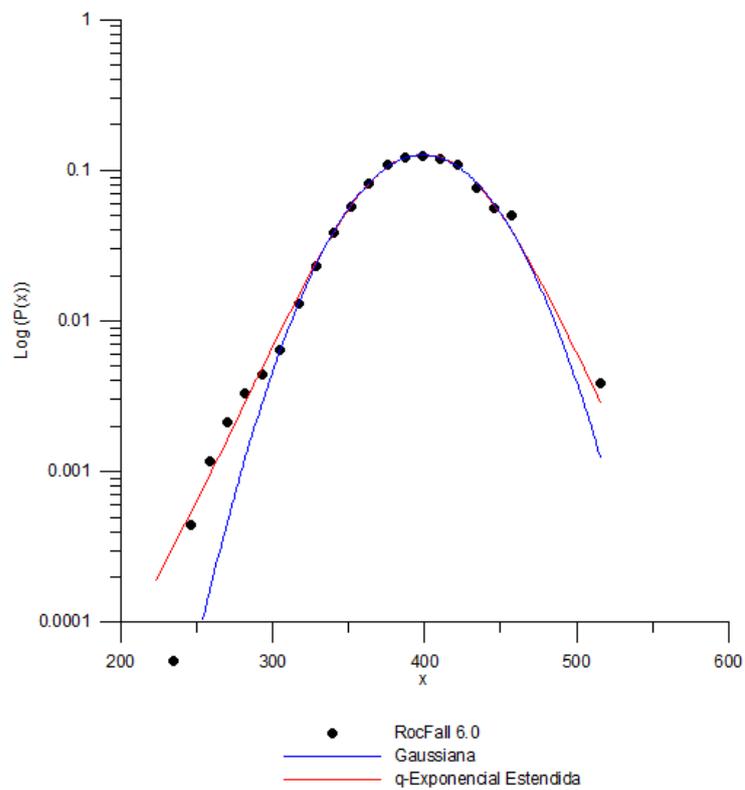


Figura 63 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BQA

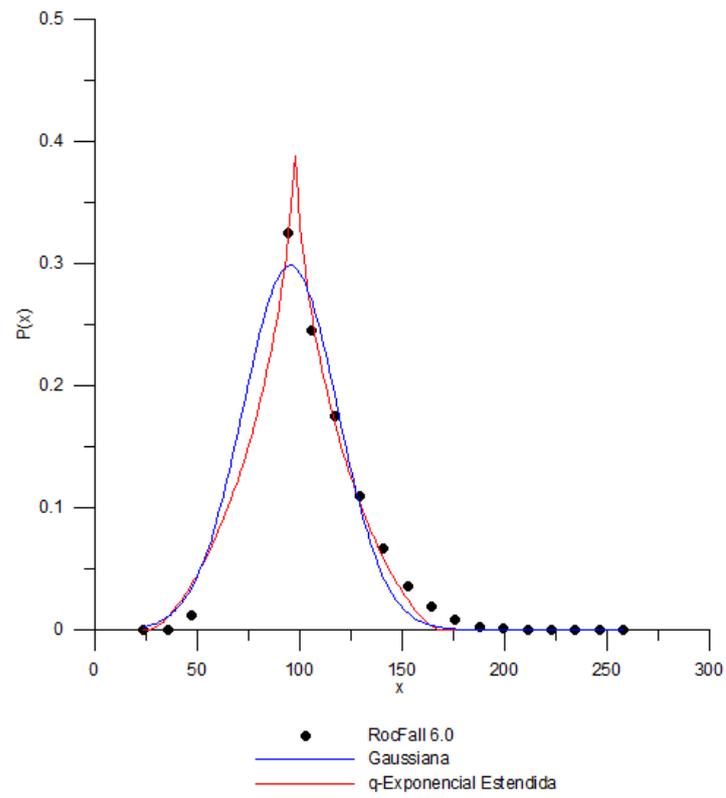


Figura 64 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BQV

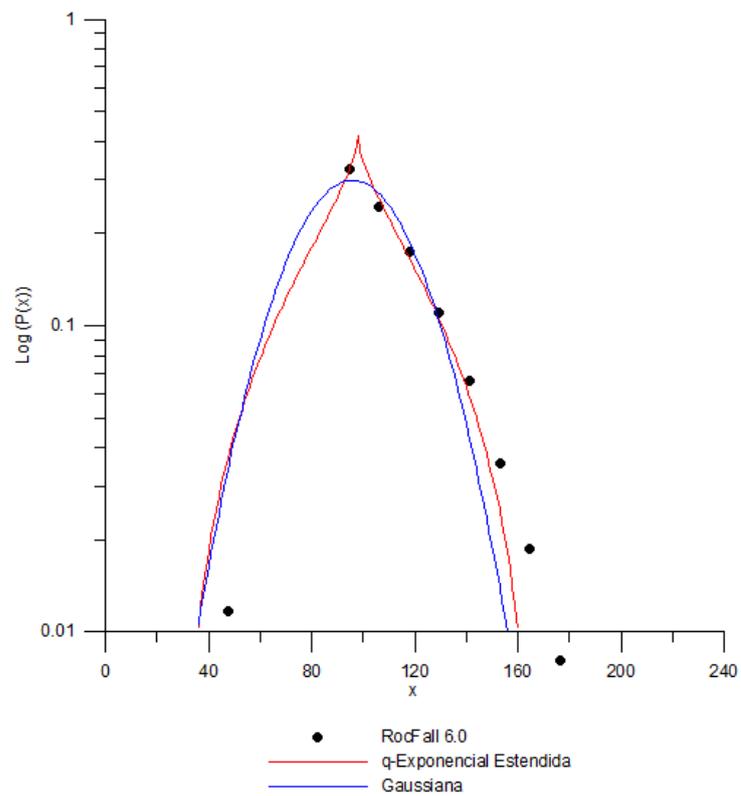


Figura 65 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C3 – Bloco BQV

Bem como nos casos C1 e C2, a Tabela 8 e a Tabela 9 resumem os valores dos parâmetros de ajuste das distribuições de probabilidade e dos coeficientes de correlação obtidos nos ajustes estatísticos para cada tipo de bloco.

Tabela 8 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C3

Gaussiana	Caso C3				
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade			Coeficiente de correlação
		a	b	c	R <sup>2</sup>
BHA	0,1089	60,1058	377,3207	0,9977	
BHV	0,1318	49,9870	142,1190	0,9972	
BQA	0,1258	54,4078	398,8954	0,9962	
BQV	0,2984	32,7110	95,7454	0,9780	

Tabela 9 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C3

q-Exponencial Estendida	Caso C3						
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade					Coeficiente de correlação
		q	$\delta$	a'	b'	c'	R <sup>2</sup>
BHA	0,9852	1,1242	0,1122	59,0917	377,3014	0,9988	
BHV	0,8583	1,1875	0,1360	51,3942	142,1718	0,9980	
BQA	1,1659	0,9668	0,1265	51,7431	398,9522	0,9966	
BQV	0,2749	3,4920	0,4181	40,0167	97,9099	0,9906	

Conforme observado no caso C2, para os blocos BHA, BHV e BQA os gráficos de ajuste estatístico e os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida apresentam uma proximidade muito grande entre seus ajustes. A presença da proximidade dos parâmetros q e  $\delta$  ao valor 1, denota mais uma vez que a distribuição q-exponencial estendida converge para uma distribuição gaussiana, tornando esta distribuição a que melhor representa a estatística das quedas de bloco para a interação entre o perfil C3 e os

blocos BHA, BHV e BQA. Assim, indicando para esse cenário um comportamento fortemente caótico.

Do mesmo modo, na interação entre o perfil C3 e os Blocos BQV a distribuição q-exponencial estendida apresenta melhores resultados de ajuste, indicando para este cenário um comportamento fracamente caótico.

#### 4.2.4 Caso C4

O quarto e último caso, é descrito como uma geometria simples e superfície globalmente côncava, mas mantendo uma transição suave entre o perfil da encosta e o nível da base alongada. Este perfil originalmente possuía 15,72m de altura por 49,16m de comprimento, porém foi necessário um alongamento da base, conforme já explicado, passando a apresentar 122,35m de comprimento. Tal como ilustrado na Figura 66 a seguir.

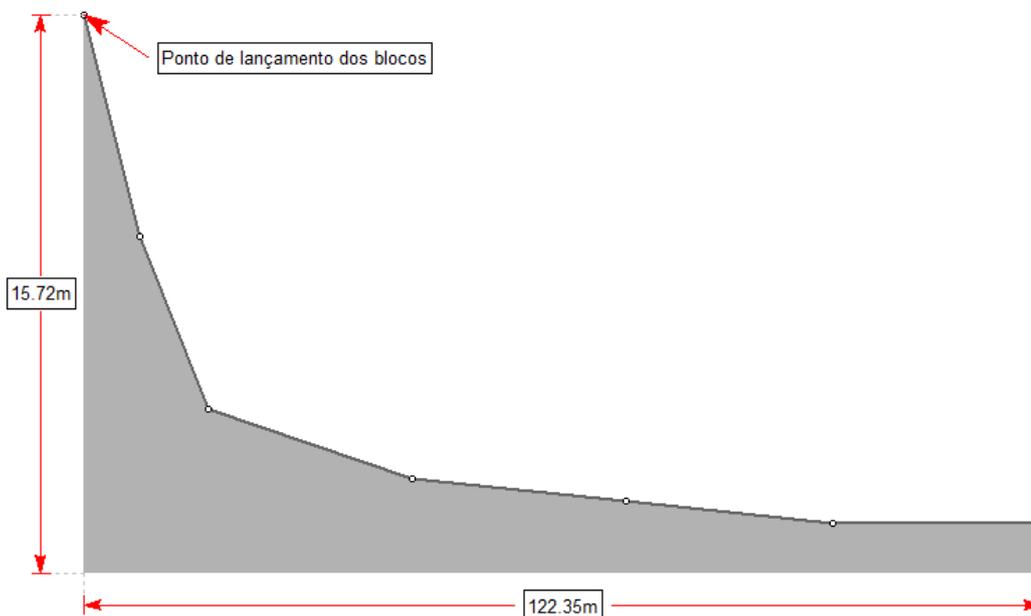


Figura 66 - Perfil transversal do caso C4 (Sem escala)

Da Figura 67 a Figura 74 são apresentados os resultados alcançados nos ajustes estatísticos das distribuições probabilísticas de localização final.

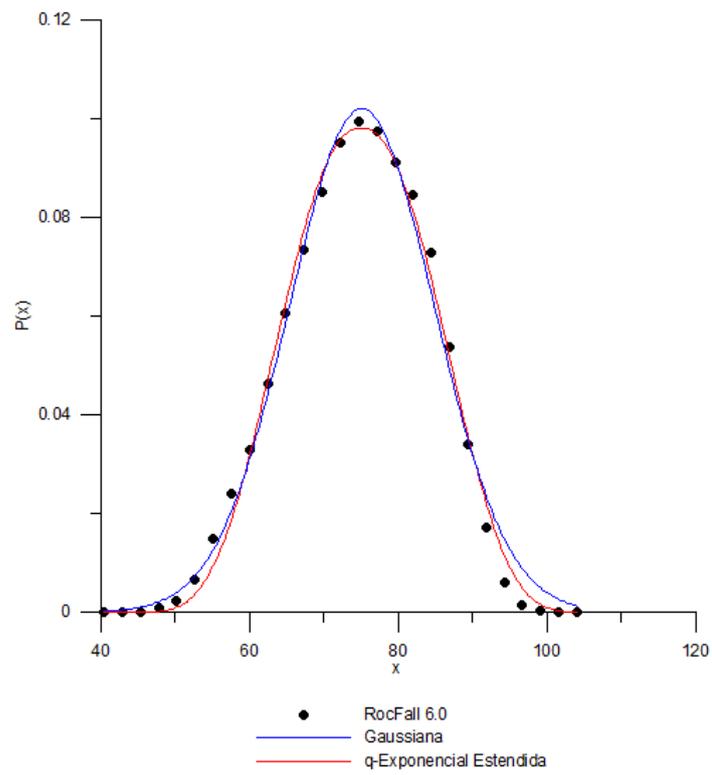


Figura 67 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BHA

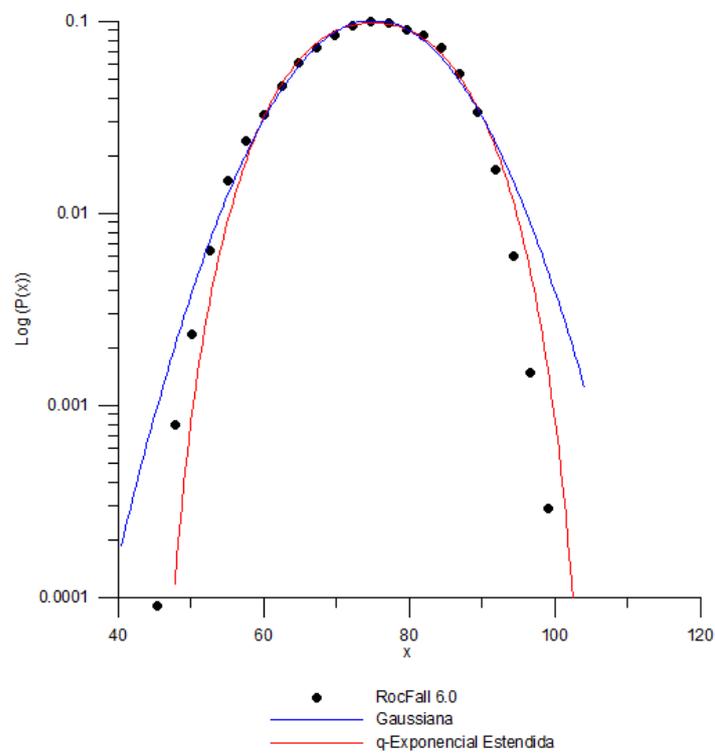


Figura 68 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BHA

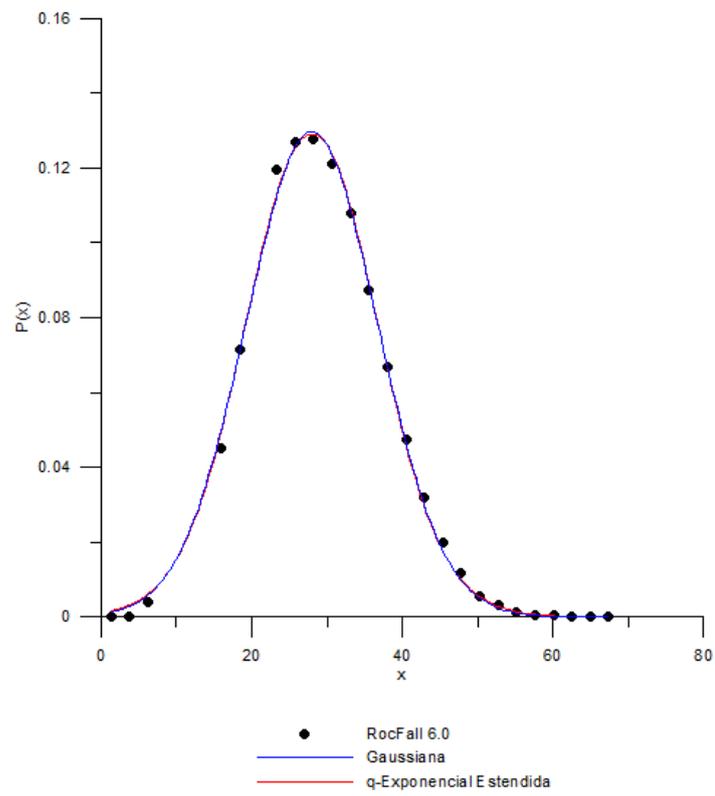


Figura 69 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BHV

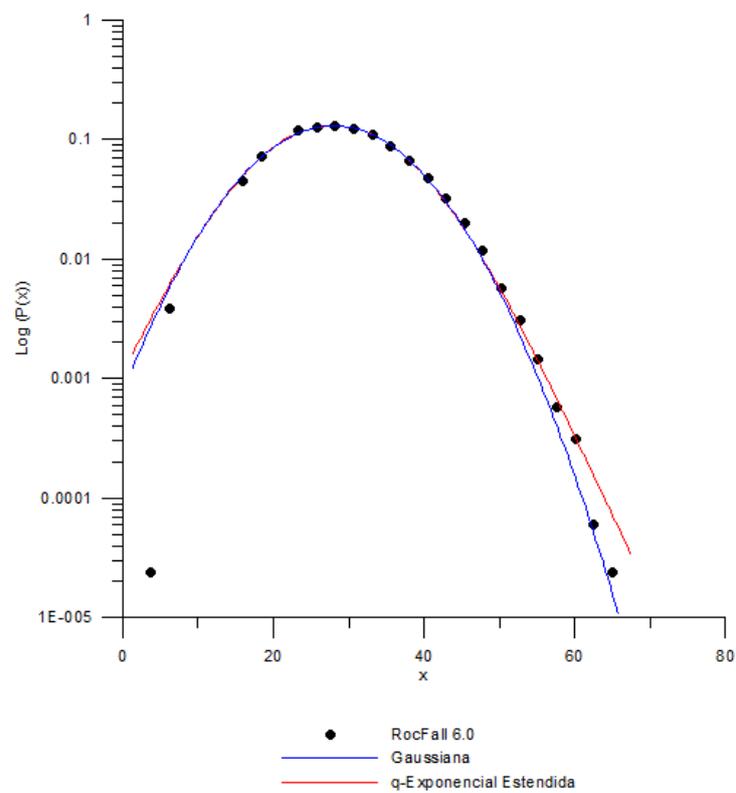


Figura 70 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BHV

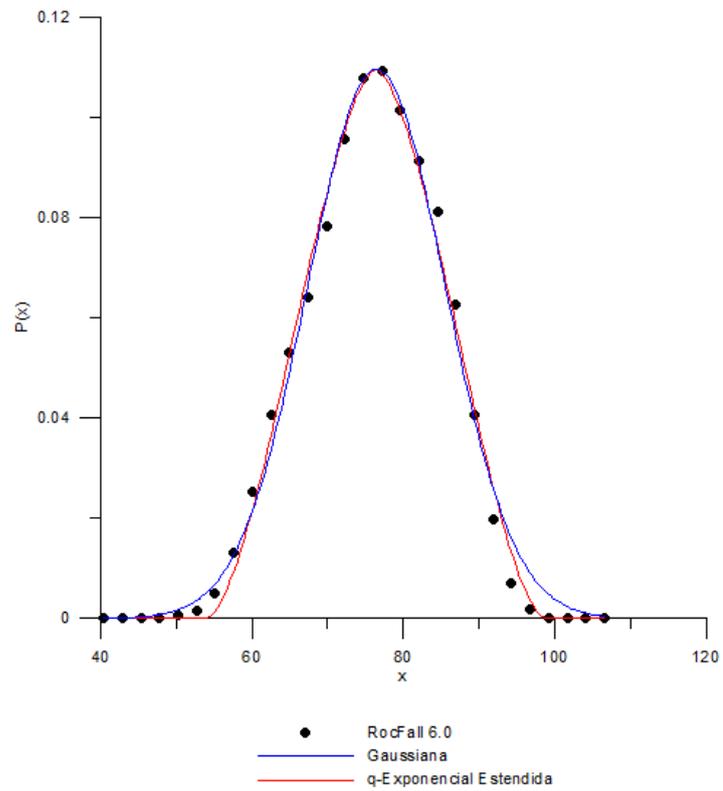


Figura 71 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BQA

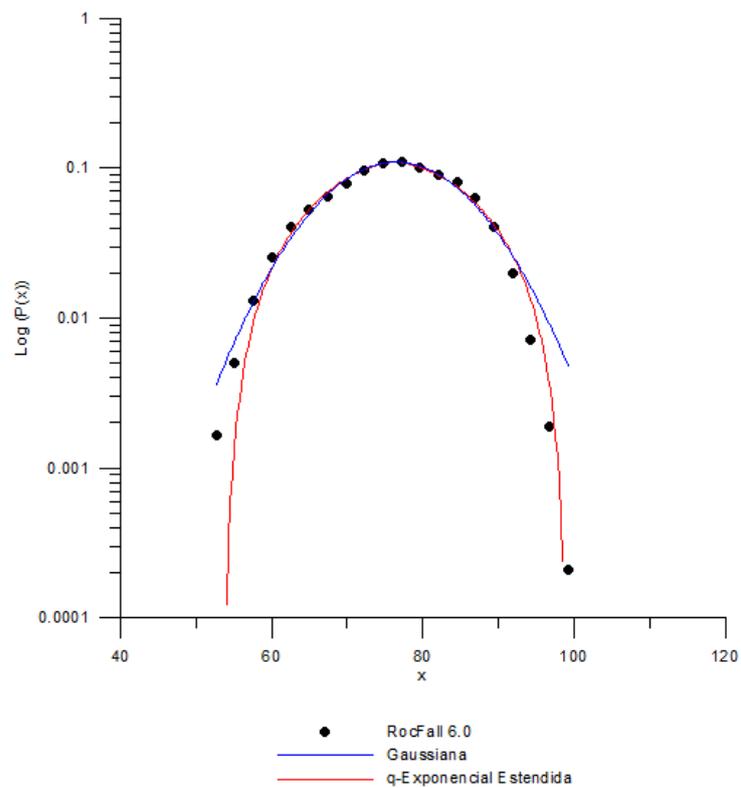


Figura 72 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BQA

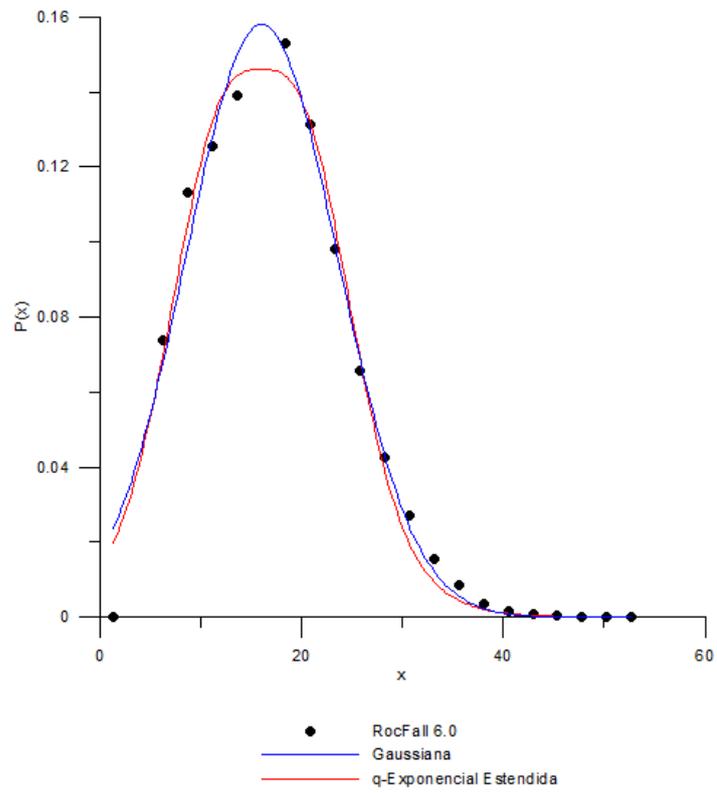


Figura 73 - Gráfico  $P(x)$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BQV

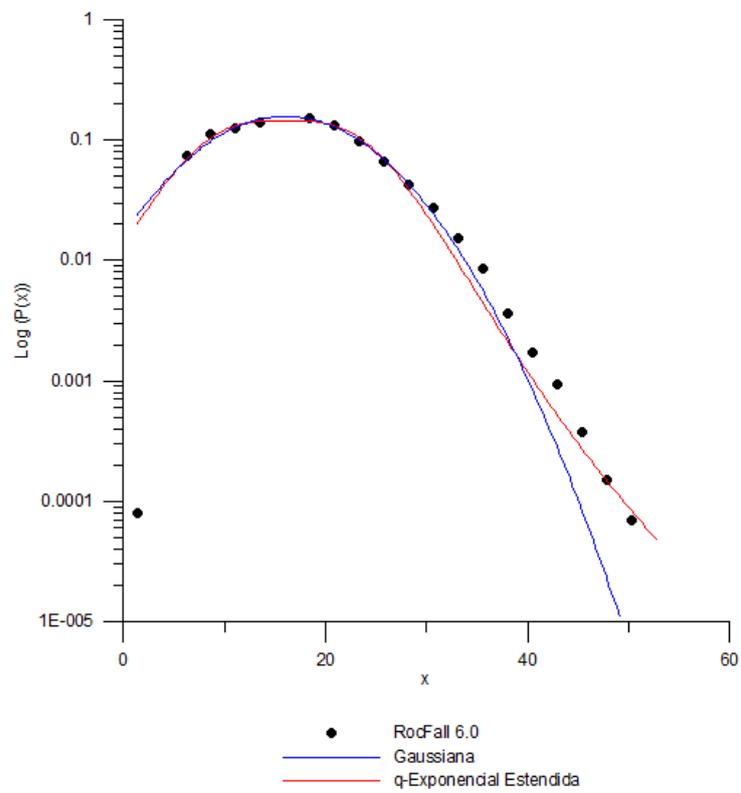


Figura 74 - Gráfico  $\text{Log}(P(x))$  versus  $x$  – Caso C4 – Bloco BQV

A Tabela 10 e a Tabela 11 reúnem os valores dos parâmetros de ajuste das distribuições de probabilidade e dos coeficientes de correlação obtidos nos ajustes estatísticos para cada tipo de bloco.

Tabela 10 - Distribuições de Probabilidade Gaussiana - Resultados obtidos para o Caso C4

Gaussiana	Caso C4				
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade			Coeficiente de correlação
		a	b	c	R <sup>2</sup>
	<b>BHA</b>	0,1020	13,8116	75,1561	0,9894
	<b>BHV</b>	0,1297	12,3335	27,9778	0,9979
	<b>BQA</b>	0,1095	12,8502	76,4749	0,9902
	<b>BQV</b>	0,1579	10,6882	16,0505	0,9836

Tabela 11 - Distribuição de Probabilidade q-Exponencial Estendida – Resultados obtidos para o Caso C4

q- Exponencial Estendida	Caso C4						
	Geometria do bloco	Parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidade					Coeficiente de correlação
		q	$\delta$	a'	b'	c'	R <sup>2</sup>
	<b>BHA</b>	0,8116	0,9019	0,0981	14,9105	75,0903	0,9938
	<b>BHV</b>	1,0968	0,9377	0,1289	12,0276	27,9796	0,9979
	<b>BQA</b>	0,4568	1,2237	0,1095	15,5713	76,3773	0,9937
	<b>BQV</b>	1,3599	0,6610	0,1459	10,3052	15,9786	0,9868

Assim como no Caso C1, a interação entre os blocos e o perfil C4 mostra a formação de uma tendência, no entanto, nesta ocasião, relacionada ao tipo de formato dos blocos, independentemente do tipo de borda apresentada.

Para os blocos de formato hexagonal, ao se analisarem os gráficos de ajuste estatístico e os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, verificou-se uma proximidade muito grande entre as duas distribuições. Assim, ao se observarem os parâmetros q e  $\delta$ , percebe-

se a proximidade ao valor 1, o que demonstra a convergência da distribuição q-exponencial estendida para uma distribuição gaussiana. Sendo assim, esta distribuição é a que melhor representa a estatística das quedas de bloco para a interação entre o perfil C4 e os blocos de formato hexagonal (BHA e BHV), indicando um comportamento fortemente caótico para este cenário.

Já os blocos de formato quadrado, tanto nos gráficos de ajuste estatístico como os coeficientes de correlação das distribuições de probabilidade, mostram que a distribuição q-exponencial estendida apresenta melhores resultados de ajuste. Isto demonstra que esta distribuição é a que melhor representa a estatística das quedas de bloco para a interação entre o perfil C4 e os blocos de formato quadrado (BQA e BQV), indicando um comportamento fracamente caótico para este cenário.

#### 4.3 Comparativo entre resultados

Em Ignacio (2019), os blocos utilizados possuíam todos a mesma geometria, que foi criada de maneira personalizada com formato irregular e borda viva, e três tamanhos diferenciados, classificados como: pequeno (BIP – 337,50Kg), médio (BIM – 2.700Kg) e grande (BIG – 7.408,80Kg). Contudo, constatou-se que o tamanho dos blocos não influenciava significativamente a análise final pela teoria do caos, pois apresentavam ajustes estatísticos muito semelhantes entre si para todos os casos.

Em função disso, o foco do estudo ficou por conta da interação entre os quatro perfis transversais distintos e os blocos de mesma geometria irregular, o que proporcionou resultados satisfatórios para a aplicabilidade da teoria do caos, além de apresentar o surgimento de uma tendência no comportamento dos eventos de queda de blocos relacionada ao tipo de superfície presente na encosta.

A pesquisa de Ignacio (2019) concluiu que os perfis de encosta com superfície convexa, como os casos C2 e C3, apresentam comportamento fortemente caótico e atribui isto ao fato deste tipo de superfície possibilitar a ejeção dos blocos em diferentes trajetórias divergentes entre si, promovendo uma difusão ao longo da encosta. Por outro lado, os perfis com superfície côncava, como os casos C1 e C4, apresentam comportamento fracamente caótico, justificado pela convergência das

trajetórias e pelo fato dos blocos se manterem mais tempo em contato com a encosta, facilitando a troca de informação e a dissipação de energia.

Deste modo, os resultados obtidos por Ignacio (2019) apontam que o comportamento da dinâmica de queda decorrente da interação entre bloco e encostas está intimamente ligado ao tipo de superfície presente na encosta. A seguir, é possível conferir na Tabela 12 esta relação entre o tipo de superfície da encosta, o tipo de distribuição probabilística que melhor se ajusta e, conseqüentemente, o tipo de comportamento presente.

Tabela 12 - Compilação dos resultados obtidos por meio do estudo preliminar (Ignacio, 2019)

<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

Todavia, a inserção de blocos de geometrias distintas no modelo criado por Ignacio (2019) apresentou resultados mais complexos, indicando que não somente o tipo de superfície da encosta determinaria o tipo de comportamento desenvolvido pelo sistema, mas também a interação encosta/bloco e a influência de um sobre o outro ao longo do movimento. Esses resultados podem ser conferidos na Tabela 13.

A partir da constatação que o tamanho do bloco não influencia no ajuste estatístico, foi definido um único tamanho para todos os blocos utilizados neste estudo, de modo a concentrar a atenção na influência que a variação da geometria dos blocos faria nos resultados das análises, neste caso, com os formatos quadrado e hexagonal e as bordas arredondadas e vivas.

Tabela 13 - Compilação dos resultados obtidos por meio do presente estudo

Perfil da encosta	Superfície da encosta	Tipo de bloco	Distribuição de probabilidade de ajuste	Comportamento caótico
Caso C1	Côncava	BHA	Gaussiana	Forte
		BHV	q - Exponencial Estendida	Fraco
		BQA	Gaussiana	Forte
		BQV	q - Exponencial Estendida	Fraco
Caso C2	Convexa	BHA	Gaussiana	Forte
		BHV	Gaussiana	Forte
		BQA	Gaussiana	Forte
		BQV	q - Exponencial Estendida	Fraco
Caso C3	Convexa	BHA	Gaussiana	Forte
		BHV	Gaussiana	Forte
		BQA	Gaussiana	Forte
		BQV	q - Exponencial Estendida	Fraco
Caso C4	Côncava	BHA	Gaussiana	Forte
		BHV	Gaussiana	Forte
		BQA	q - Exponencial Estendida	Fraco
		BQV	q - Exponencial Estendida	Fraco

Ante o exposto, não foi possível determinar um padrão de comportamento que englobasse todos os cenários propostos, porém, a seguir, são feitas algumas considerações sobre os novos resultados obtidos em comparação aos anteriores:

- Ao se analisarem os resultados obtidos no atual estudo, percebe-se uma certa predominância da distribuição de probabilidade gaussiana em perfis com superfície convexa, ocorrendo em 3 dos 4 cenários propostos, independentemente da geometria dos blocos. Esse fato corrobora o que foi concluído por Ignacio (2019), evidenciando que o comportamento fortemente caótico está muito presente neste tipo de superfície.
- Nos perfis com superfície côncava observa-se a formação de uma tendência de comportamento relacionada a geometria dos blocos, sendo o Caso C1

influenciado pelo tipo de borda e o caso C4, pelo formato do bloco. Este fato reforça que superfícies côncavas apresentam-se no limiar entre ordem e caos, característica esta do comportamento fracamente caótico.

Portanto, o atual estudo não só ratifica as conclusões do estudo preliminar desenvolvido por Ignacio (2019), como também evidencia que o fenômeno da queda de bloco é o resultado da interação dos vários fatores que compõem o sistema e que seu comportamento não é regido somente por um desses fatores.

#### 4.4 Considerações quanto ao estudo de cenário

Analisando-se individualmente cada resultado obtido no atual estudo, são apresentadas, a seguir, algumas constatações relativas às tendências de comportamento observadas nas interações entre as geometrias distintas dos blocos e os tipos de superfície dos perfis transversais:

- Os resultados obtidos nos testes com Blocos Hexagonais Arredondados (BHA) ajustam-se melhor à distribuição de probabilidade gaussiana, independentemente do tipo de superfície com a qual esteja interagindo. Pode-se dizer, neste caso, que o tipo de bloco prevalece ao tipo de superfície adotada, ou seja, BHA induzem um comportamento fortemente caótico ao sistema.
- No caso dos testes com Blocos Quadrados Vivos (BQV), os resultados obtidos ajustam-se melhor à distribuição de probabilidade q-exponencial estendida, também independentemente do tipo de superfície com a qual esteja interagindo. Pode-se dizer, igualmente para este caso, que o tipo de bloco prevalece ao tipo de superfície adotada, porém induzindo um comportamento fracamente caótico ao sistema.
- Os resultados obtidos da interação dos Blocos Hexagonais Vivos (BHV) e Quadrados Arredondados (BQA) com as superfícies convexas ajustam-se

melhor à distribuição de probabilidade gaussiana, caracterizando um comportamento fortemente caótico. Nestes dois casos, pode-se dizer que o tipo de superfície prevalece ao tipo de bloco adotado.

- A interação dos Blocos Hexagonais Vivos (BHV) e Quadrados Arredondados (BQA) com superfícies côncavas não apresentam um padrão em seus resultados. Por se tratar de uma superfície que tende a um comportamento fracamente caótico, o formato e a borda dos blocos caracterizam pequenas variações que influenciam muito na interação, modificando o comportamento do conjunto que apresenta-se ora fortemente, ora fracamente caótico.

De um modo geral, pode-se concluir que o comportamento do fenômeno da queda de blocos pode ser descrito pelo uso da teoria do caos, por apresentar características de um sistema não linear, como alta sensibilidade às condições iniciais e evolução no tempo com um comportamento instável e aperiódico, conforme conceitos explicitados no capítulo 2.

Ademais, seus resultados ajustam-se bem às distribuições de probabilidade gaussiana, que caracteriza a entropia estatística de Boltzmann-Gibbs ( $S$ ) a qual reflete o comportamento fortemente caóticos, e  $q$ -exponencial estendida, que caracteriza a entropia estatística generalizada ( $S_{q,\delta}$ ), uma das muitas entropias que refletem o comportamento fracamente caóticos.

Outro ponto que merece destaque no estudo em questão está relacionado ao tipo de movimento desenvolvido pelos blocos ao longo da trajetória de queda. Conforme já explicado no capítulo 1, esses movimentos sofrem influência de uma série de fatores. A classificação proposta por Ritchie (1963), posteriormente desenvolvida por outros autores, relaciona o tipo de movimento com o grau de inclinação da encosta, possibilitando que se tenha uma noção de como estes blocos vão se comportar ao longo da sua trajetória.

Para os perfis utilizados nesta pesquisa, de acordo com essa classificação, predominariam os seguintes movimentos:

- Para os Casos C1 e C3 - todos os tipos de movimento se desenvolveriam pelo menos em um trecho ao longo do perfil. (Queda livre, salto, rolamento e deslizamento)

- Para o Caso C2 – movimentos do tipo salto, rolamento, deslizamento.
- Para o Caso C4 – movimentos do tipo queda livre, salto e deslizamento.

Todavia, ao se analisarem as trajetórias fornecidas pelo *RocFall* 6.0 como resultado das simulações propostas, foi possível observar que em todos os perfis ocorreram todos os tipos de movimento, independentemente da inclinação de cada trecho, e que em cada trajetória se desenvolveu mais de um tipo de movimento. Isto sugere que a classificação de Ritchie (1963) pode ser utilizada para se ter uma ideia dos tipos de movimento que ocorrerão, porém, para um estudo mais aprofundado, devem ser levados em consideração todos os fatores envolvidos no momento da queda.

Conforme já mencionado anteriormente, nos Casos C3 e C4, foi necessário um aumento da base dos perfis em função das distâncias alcançadas pelos blocos de borda arredondada. Este fato fica bem evidenciado quando analisados os histogramas de localização final dos blocos, fornecidos pelo *RocFall* 6.0. De forma a exemplificar, na Figura 75 e na Figura 76 são apresentados os histogramas dos blocos hexagonais arredondados e vivos para o caso C3, respectivamente.

Buscando-se entender este efeito, a partir de uma análise qualitativa das trajetórias desenvolvidas pelos blocos, pode-se notar que a borda arredondada é mais favorável ao movimento, desenvolvendo-se de forma mais suave ao longo de toda a trajetória, enquanto a borda viva tende a encaixar ao longo do perfil, mostrando-se mais resistente ao desenvolvimento do movimento.

Mesmo não se tratando do foco do trabalho em questão, jugou-se importante o comentário sobre este fato observado, pois a distância alcançada pelos blocos se mostra de suma importância para os projetos de mitigação e segurança de edificações próximas, deixando-o, assim, como sugestão para futuras pesquisas na área.

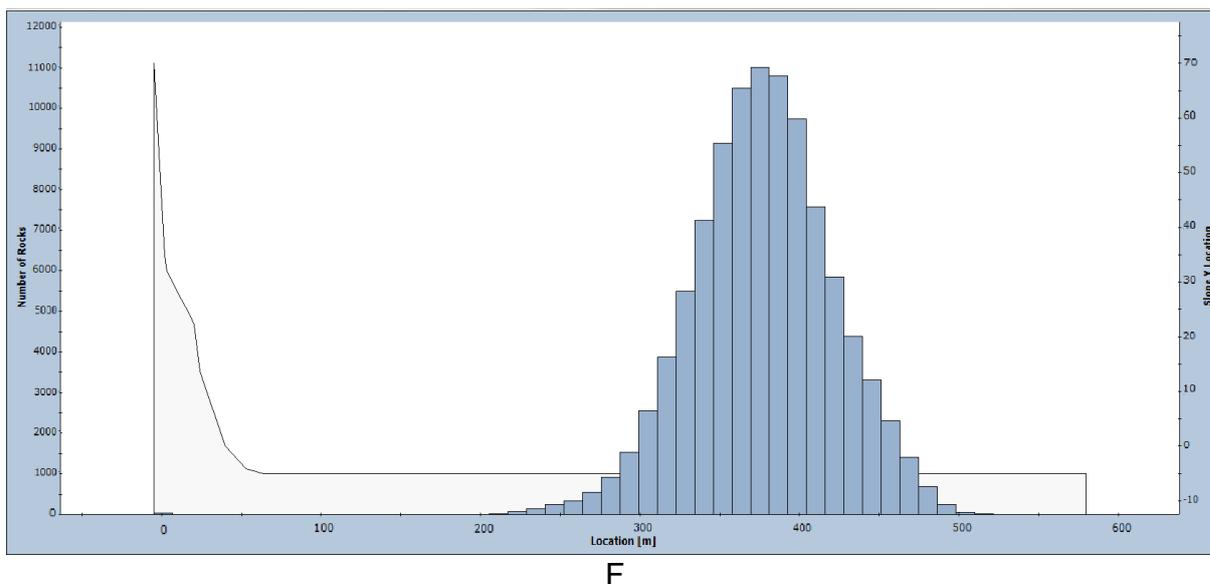


Figura 75 - Caso C3 - Histograma de localização final Blocos Hexagonais Arredondados

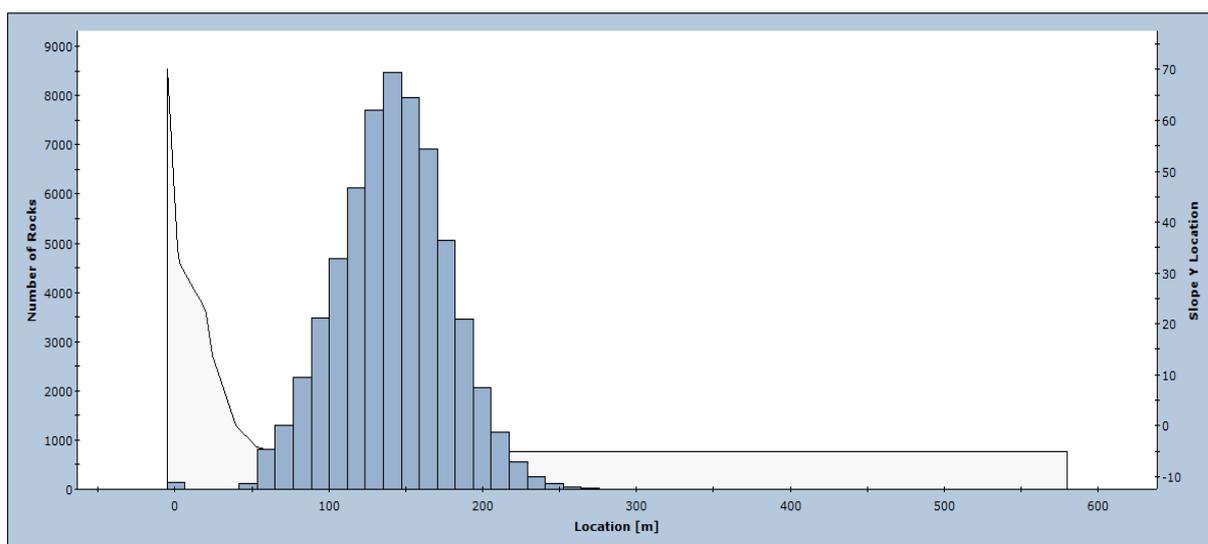


Figura 76 - Caso C3 - Histograma de localização final Blocos Hexagonais Vivos

Assim como no estudo preliminar de Ignacio (2019), o valor de 100.000 blocos por simulação apresentou resultados de ajustes estatísticos consistentes e suficientes para este estudo. Porém, reafirmando o que foi dito por Ignacio (2019), simulações com quantidades elevadas de blocos proporcionam estatísticas mais realistas, gerando distribuições de probabilidade com ajustes mais confiáveis.

Contudo, na tentativa de se utilizar o maior número de blocos possível por simulação, o programa apresentou dificuldades ao processar uma quantidade maior

que 100.000 blocos por simulação de lançamento, ficando, por vezes, inoperante ou não fornecendo os resultados ao final da fase de cálculo.

Além disso, em algumas simulações, ao final da fase de processamento, o programa exibiu mensagens de alerta, apontando que uma certa quantidade de simulações foi interrompida por problemas relacionados à interface, sugerindo modificações na geometria da encosta e/ou na rugosidade do material constituinte adotado, e às dificuldades na identificação do ponto de lançamento dos blocos.

Ainda que considerado um programa robusto, ser declarado como ilimitado para a quantidade de blocos a serem testados e apresentar, até a versão 6.0, melhorias significativas para retratar situações mais realistas, estes fatos demonstram que a capacidade de processamento do programa *RocFall* 6.0 se mostrou limitada para a presente pesquisa, ficando as questões acima relatadas como uma ressalva para futuras atualizações do programa.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 5.1 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo principal dar continuidade ao estudo do fenômeno de queda de blocos rochosos mediante a aplicação da teoria do caos iniciado por Ignacio (2019). Para tal, foi proposta a análise da influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda, verificando se o sistema formado satisfaz as características de um sistema não linear e buscando descrever o comportamento deste fenômeno por intermédio das proposições desta teoria.

Para esta pesquisa, foram propostos dezesseis cenários distintos, cada um formado pela combinação entre quatro perfis transversais diferenciados, divididos entre superfícies côncavas e convexas, e quatro geometrias de blocos diferentes, variando em formatos quadrados e hexagonais, com bordas arredondadas e vivas; porém mantendo-se em cada cenário os mesmos valores para os parâmetros do material e do projeto.

O foco do trabalho foram as distribuições de probabilidade de localização final dos blocos, por se tratar de uma informação relevante para projetos de mitigação. Estas distribuições foram obtidas por meio de simulações realizadas no programa *RocFall* 6.0 e posteriormente tratadas no programa *Grapher*, de modo a ajustá-las às formulações das distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, para, desta forma, inseri-las no contexto da teoria do caos.

Analisando todos os cenários propostos, o fenômeno de queda de blocos apresentou-se como um sistema não linear, exibindo características como grande sensibilidade a pequenas variações nas condições iniciais, comportamento global distinto do encontrado ao se analisarem partes isoladas e imprevisibilidade a longo prazo.

Além disso, as distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, utilizadas na descrição de fenômenos críticos e caóticos, foram capazes de representar estatisticamente o comportamento do fenômeno de queda de blocos

em todos os cenários propostos, complementando assim todos os aspectos necessários para tornar esse fenômeno apto à aplicação da teoria do caos.

Na presente pesquisa, foi possível observar que os resultados das simulações com Blocos Hexagonais Arredondados ajustaram-se melhor às distribuições de probabilidade gaussiana, independentemente do tipo de superfície do perfil com o qual estivessem interagindo. Este fato se repete para os Blocos Quadrados Vivos, cujos resultados das simulações se ajustaram melhor às distribuições de probabilidade  $q$ -exponencial estendida. Nestes dois casos, pode-se dizer que a geometria do bloco teve grande influência no comportamento geral do sistema.

No caso das simulações com Blocos Hexagonais Vivos e Quadrados Arredondados os resultados variaram, indicando que as superfícies dos perfis exercem maior influência sobre o comportamento geral do sistema. Para as interações entre estes blocos e perfis com superfícies convexas, a distribuição que apresentou melhor ajuste foi a gaussiana. Porém, ao se analisarem as interações daqueles com superfícies côncavas, não se formou uma tendência, apresentando melhores ajustes ora a distribuição gaussiana, ora a  $q$ -exponencial estendida.

Esta influência por parte dos blocos e das encostas no comportamento geral do sistema pode ser justificada pelo efeito causado no movimento de queda pelas características geométricas destes dois elementos. Nos testes realizados por esse estudo, alguns destes efeitos ficaram bem evidentes, destacando-se, a seguir, os principais.

Para perfis com superfície convexa, observou-se uma grande dispersão na trajetória dos blocos, acarretando um espalhamento destes ao longo do perfil da encosta. Em contra partida, nos perfis com superfície côncava, os blocos tendiam a convergir suas trajetórias, além de manter mais contato com a superfície da encosta, favorecendo a troca de informação e a dissipação de energia.

Em relação à geometria dos blocos, observou-se que tanto a forma quanto o tipo de borda influenciavam no desenvolvimento do movimento ao longo da trajetória de queda. Para blocos com bordas arredondadas, o movimento era suave durante sua trajetória, perdendo velocidade de forma gradual ao longo do percurso; ao passo que blocos com bordas vivas desenvolviam sua trajetória de forma conturbada e perdiam velocidade de forma irregular.

A forma dos blocos também se apresenta mais ou menos favorável ao movimento de acordo sua regularidade e proporções. Os blocos quadrados possuem

arestas maiores em relação aos blocos hexagonais, fazendo com que seu contato com a encosta seja maior, o que acarreta uma maior dissipação de energia. Assim, formas hexagonais vão se apresentar mais favoráveis ao movimento quando comparadas as formas quadradas, que tenderão a encalhar.

De modo geral, os resultados obtidos por esta pesquisa mostraram que o comportamento dos blocos em queda deve ser analisado como um conjunto de fatores que compõem um sistema e como estes interagem entre si, acarretando um comportamento global que vai depender da configuração com que o sistema se apresente. Desta forma, ao se analisarem os resultados podemos identificar tendências e não padrões de comportamento.

Diante do exposto, pode-se dizer que a teoria do caos tem feito contribuições consideráveis ao estudo do fenômeno de queda de blocos proporcionando um outro nível de entendimento acerca do tema. Ao se analisar este fenômeno como um sistema não linear, apresentam-se novas formas de tratamento possibilitando uma melhor compreensão das interações entre os fatores condicionantes, dos seus efeitos e da maneira como tratar esses eventos.

Como nota final, é importante salientar que somente o conhecimento claro do problema, a precisão dos parâmetros utilizados e a atenção na escolha do modelo de tratamento poderão proporcionar resultados mais realistas e, conseqüentemente, projetos de mitigação mais efetivos.

## 5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Com relação a aplicabilidade da teoria do caos no estudo dos fenômenos de queda de bloco, são apresentadas, a seguir, algumas sugestões para futuras pesquisas que poderiam contribuir com mais informações acerca do tema:

- a) Realização de pesquisa em que se avalia a influência dos parâmetros do material que compõe a encosta na satisfação das características de um sistema não linear sob a ótica da teoria do caos;

- b) Elaboração de estudo sobre a influência da fragmentação dos blocos no fenômeno de queda sob a ótica da teoria do caos;
- c) Produção de pesquisa em que se avalia a influência de diferentes velocidades iniciais de partida dos blocos para o fenômeno de queda; e
- d) Desenvolvimento de estudos tridimensionais do fenômeno de queda de blocos sob a ótica da teoria do caos.

## REFERÊNCIAS

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

AZZONI, A.; LA BARBERA, G.; ZANINETTI, A. Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 32, No. 7, pp. 709-724, 1995.

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 Rock Falls down a Valley Side. *Acta Mechanica*, Vol. 63, pp. 113-130, 1986.

BRESSANI, L. A. Instrumentação em obras geotécnicas – taludes e escavações. V Conferência Brasileira de Estabilidade de encostas, São Paulo, Vol. 1, pp. 3-18, 2009.

BUZZI, O.; GIACOMINI, A.; SPADARI, M. Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 45, pp. 35-43, 2011.

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

CALVÃO, A. M. Estudos de Sistemas Dinâmicos Não Lineares: Pêndulo duplo, Batimentos cardíacos e Coletivos de animais. Tese de Doutorado em Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 147p., 2014.

CHAU, K. T.; WONG, R. H. C.; WU, J. J. Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rockfall Impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, No. 39, pp. 69-77, 2002.

CHIOSSI, N. J. Geologia Aplicada à Engenharia. 3ª Ed., Editora Universidade de São Paulo, São Paulo, 427p., 1983.

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, pp. 36-75, 1996.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. 'Slope Stability in Residual Soils', Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Juan, Puerto Rico, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 1, pp 87–170, 1971.

DEFLORES BIOENGENHARIA. Material publicitário de drenagem. Disponível em: <http://deflor.com.br/drenagem/>

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

DIAS, G. P.; BARROSO, E. V. Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas: Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas. Anuário do Instituto de Geociência, UFRJ, Vol. 29, pp. 149-167, 2006.

DIAZ, J. S. Temas principales - Especiales. 2005. Disponível em: <http://www.erosion.com.co/2013/temas-principales/especiales/88-tuneles-falsos.html>

DORREN, L. K. A. A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approches. Progress in Physical Geography, USA, No. 27, pp. 69-87, 2003.

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

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: Uma abordagem geológica-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia e Meio Ambiente. 1º Ed., Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 394p., 1996.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: Uma proposta metodológica. 1º Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, COBRAE 1992, Rio de Janeiro, p. 721-733, 1992.

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, 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, 166p., 2012.

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

GEOBRUGG. Material publicitário de proteção contra desprendimentos. Disponível em: <https://www.geobrugg.com/pt/Proteccao-contradesprendimentos77481,7860.html>

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, No. 46, pp. 708-715, 2009.

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. No. 37, pp. 369-389, 2004.

GLEICK, J. Caos: A Criação de uma Nova Ciência. Tradução de Waltensir Dutra. 4ª Ed., Editora Campus, Rio de Janeiro, 310p., 1991.

GOMES, M. A. F. Criticalidade Auto-Organizada. In: NUSSENZVEIG, H. M. Complexidade e Caos. 3ª Ed., Editora UFRJ/COPEA, Rio de Janeiro, 276p., 2008.

GUIDICINI, G; NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. 1ª Ed., Editora Blucher, São Paulo, 170 p., 1976.

HEIDENREICH, B. Small and Half Scale Experimental Studies of Rockfall impacts on sandy slopes. Docteur ès Sciences Techniques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, France, 231p., 2004.

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

HOEK, E. Practical Rock Engineering.- Chapter 9 - Analysis of Rockfall Hazards, 25p., disponível em: <https://www.rocscience.com/learning/hoeks-corner/course-notes-books>, 2007.

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). In: IBÁÑEZ, J. J.; MACHADO, C. Análisis de la Variabilidad Espacio-Temporal y Procesos Caóticos en Ciencias Medioambientales. 1º Ed., Geoforma-CSIC, Madrid, España, pp. 43-80, 1995.

IGNACIO, F. V. Aplicação da Teoria do Caos no Estudo da Queda de Blocos Rochosos no Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ. Dissertação de Mestrado em

Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 128p., 2019.

International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Testes. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 15, pp. 319-368, 1978.

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

NASCIMENTO, R. G. Palestra de estabilização de taludes. Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo, disponível em:<https://defesacivil.es.gov.br/>, 2015.

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

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

NUSSENZVEIG, H. M. Introdução à Complexidade. In: NUSSENZVEIG, H. M. Complexidade e Caos. 3ª Ed. Editora UFRJ/COPEA, Rio de Janeiro, 276p., 2008.

PELIZONI, A. B. Análise de fluxo de detritos na região serrana fluminense. Dissertação de mestrado em engenharia civil. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 153p., 2014.

PENG, B. Rockfall Trajectory Analysis – Parameter Determination and Application. Tesis Master of Science in Engineering Geology, University of Canterbury, Christchurch, Nova Zelândia, 211p., 2000.

PINHEIRO, A. L. Influência das Descontinuidades no Comportamento Geomecânico e nos Modos de Ruptura em Taludes Escavados em Rochas Brandas. Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 191p., 2014.

PREFEITURA DE PETRÓPOLIS [homepage na Internet]. Petrópolis, Reportagem de 23 de janeiro de 2019. Disponível em: <http://www.petropolis.rj.gov.br/pmp/index.php/imprensa/noticias/item/12014-ge%C3%B3logos-da-prefeitura-e-do-estado-vistoriam-o-ing%C3%A1.html>

RAYUDU, D. N. P. Computer Simulation of Rockfalls – Application to Rockfall at Fox Glacier, West Coast, New Zealand. Thesis Master of Engineering, Lincoln University, Christchurch, Nova Zelândia, 191p., 1997.

RISSO, F. V. A.; RISSO, V. F. Aplicação da Técnica do Hipercubo Latino na Análise de Risco. Unisim OnLine, Grupo de Pesquisa em Simulação e Gerenciamento de Reservatórios, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, n° 33, 2p., nov. 2008. Disponível em: < <https://www.unisim.cepetro.unicamp.br/publicacoes/unisim-on-line>>

RITCHIE, A. M. Evaluation of Rockfall and its Control. Highway Research Record. National Academy of Sciences. Washington, USA, No. 17, pp. 13-28, 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, 161p., 2009.

ROCSCIENCE. Online Support. Disponível em: <[https://www.rocscience.com/help/rockfall/#t=rockfall%2FGetting\\_Started.htm](https://www.rocscience.com/help/rockfall/#t=rockfall%2FGetting_Started.htm)>.

ROCSCIENCE. RocFall Tutorials. Disponível em: <[https://www.rocscience.com/help/rockfall/index.htm#t=rockfall%2FRocFall\\_Tutorials.htm](https://www.rocscience.com/help/rockfall/index.htm#t=rockfall%2FRocFall_Tutorials.htm)>.

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, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 169p., 2017.

SOLOTRAT. Material publicitário de proteção superficial. Disponível em: <http://www.solotrat.com.br/concreto-projetado-ao-longo-de-ferrovia>

TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K.; TASA, D. Earth: An Introduction to Physical Geology. 11th. Edition., Pearson Education, 904p., 2014.

TAVARES, L. M. M. S. C. Análise Paramétrica no Estudo da Queda de Blocos em Encostas Rochosas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 132 p., 2015.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Da Rocha ao Solo: Intemperismo e Pedogênese. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. 2º Ed., Companhia Editora Nacional, São Paulo, 623p., 2009.

TSALLIS, C. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. Journal of Statistical Physics, Vol. 52, pp. 479-487, 1988.

TSALLIS, C. As Distribuições de Lévy. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, nº 2, p. 156-162, jun. 2000.

TSALLIS, C.; CIRTO, L. J. L. Black Hole thermodynamical Entropy. The European Physical Journal C, 73:2487, 7p., 2013.

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

VALLEJO, L. L. G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. Ingeniería Geológica. 1º Ed., Pearson Educación. Madrid, España, 744p., 2002

VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. Special Report. 29: Landslides and Engineering Practice. Highway Research Board - National Research Council. Washington, USA, pp. 11-33, 1958.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board – National Research Council. Washington, USA, pp. 20-47, 1978.

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.