



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Karen Souza Ferreira

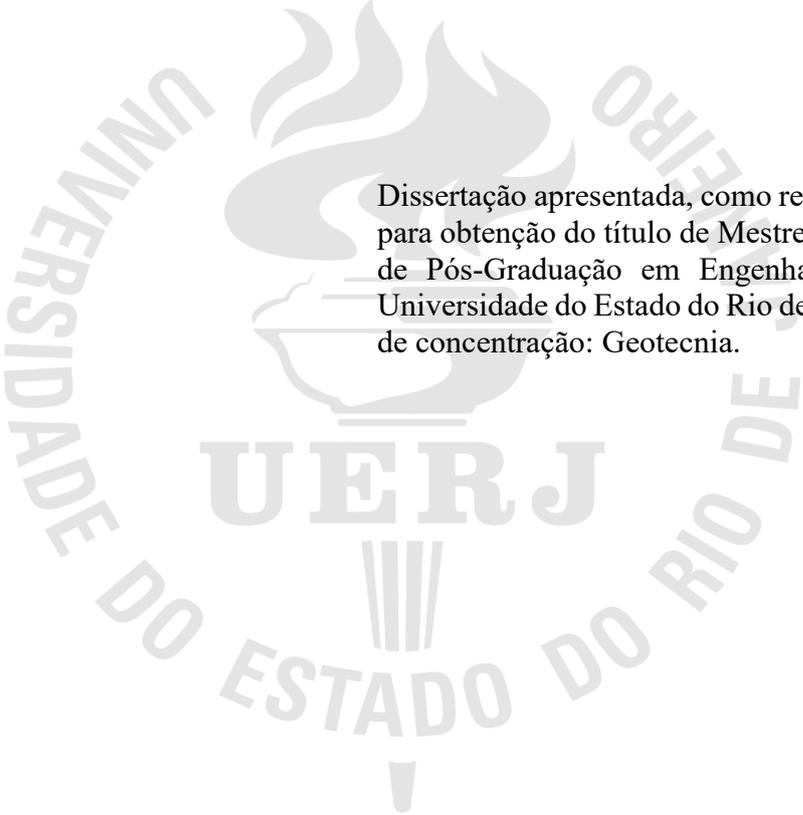
**Aplicação da Teoria do Caos a diferentes geometrias de taludes mistos**

Rio de Janeiro

2024

Karen Souza Ferreira

**Aplicação da Teoria do Caos a diferentes geometrias de taludes mistos**



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

Orientadores: Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho  
Prof. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Rio de Janeiro

2024

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

F383 Ferreira, Karen Souza.  
Aplicação da Teoria do Caos a diferentes geometrias de taludes mistos /  
Karen Souza Ferreira. – 2024.  
93 f.

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

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

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

CDU 624.131.21

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

21 de agosto de 2024  
Data

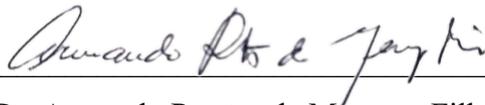
Karen Souza Ferreira

**Aplicação da Teoria do Caos a diferentes geometrias de taludes mistos**

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

Aprovado em:

Banca Examinadora:



---

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



---

Prof. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ



---

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



---

Prof. Dr. Antônio Claudio Soares  
Universidade Federal Fluminense - UFF

Rio de Janeiro

2024

## DEDICATÓRIA

Como J.K. Rowling cita em seu livro *Harry Potter e a Pedra Filosofal*: “Para a mente bem estruturada, a morte é apenas a próxima grande aventura”. Dedico esta tese à minha irmã Maria Eduarda, que embarcou em sua próxima aventura, mas cujo espírito ainda me acompanha, permanecendo viva em meu coração.

## AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial minha mãe, por sempre acreditarem na minha capacidade e me incentivarem nos momentos que achei que não conseguiria.

A meus amigos Laís, Natália, Mylena e Larissa por estarem sempre por perto, me proporcionando acolhimento e apoio incondicional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho pelos valiosos conselhos, ensinamentos e disponibilidade. A sua capacidade de transmitir segurança e inspiração, principalmente em meus momentos turbulentos, revelou a verdadeira essência da arte de lecionar. Agradeço também a Prof. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira por toda a ajuda.

Aos professores da PGECIV, pela dedicação e pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula. Em especial, ao Prof. Dr. Bruno Lima, pela ajuda com os *softwares* e pela constante disposição em prestar suporte.

Aos meus amigos de trabalho pela paciência com os meus estudos.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

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

À CAPES pelo apoio financeiro.

A realidade que percebemos não é um reflexo direto das pessoas ou circunstâncias que a compõem, e sim uma imagem borrada pelos efeitos randomizantes de forças externas imprevisíveis ou variáveis.

*Leonard Mlodinow*

## RESUMO

FERREIRA, Karen Souza. *Aplicação da Teoria do Caos a diferentes geometrias de taludes mistos*. 2024. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Movimentos de massa são fenômenos naturais que ocorrem frequentemente em encostas, especialmente em regiões montanhosas e densamente povoadas, exibindo comportamentos destrutivos, com a perda de vidas e destruição de bens materiais. Portanto, o estudo aprofundado da estabilidade de taludes reveste-se de extrema importância na engenharia geotécnica. A natureza intrincada destes fenômenos dificulta sobremaneira a sua previsão e a aplicação de modelos e análises convencionais. A Teoria Matemática do Caos surge como uma ferramenta promissora para compreender o comportamento supostamente imprevisível e, por vezes, ilógico, de certos fenômenos físicos, caracterizados pela interação de muitos agentes, num processo cooperativo, em que o comportamento do todo não se reduz ao de suas partes constituintes. Isto conduz a acentuadas não linearidades e sensibilidade às condições iniciais, o que torna a busca por soluções analíticas (fechadas) matemáticas difíceis, quando não impossíveis. Este trabalho visa aprofundar a aplicação da Teoria do Caos aos movimentos de massa em taludes rochosos de superfícies mistas (côncavas e convexas), objetivando a análise da estabilidade e queda de blocos de geometria irregular, sua evolução dinâmica, sensibilidade às condições iniciais, dentre outros aspectos correlatos, na esteira da pesquisa inaugurada por Ignácio (2019). Os resultados desta pesquisa mostraram que a disposição relativa das regiões côncavas e convexas na constituição do perfil de encostas naturais tem marcada influência na resposta dos blocos rochosos localizados encosta abaixo. Mais pormenorizadamente, regiões convexas próximas da de lançamento dos blocos (topo do talude) dão origem a dinâmicas de evolução adequadamente descritas por estatísticas não-gaussianas (q-exponenciais estendidas). Por outro lado, na situação em que aquelas regiões convexas estão mais próximas do nível de base dos taludes naturais, sua dinâmica passa a ser mais apropriadamente descrita por uma distribuição estatística constituída pela combinação linear das distribuições gaussiana e q-exponencial estendida.

Palavras-chave: Teoria do caos; Taludes rochosos; Sistemas não-lineares; Movimentos de massa.

## ABSTRACT

FERREIRA, Karen Souza. *Application of Chaos Theory to different geometries of combined slopes*. 2024. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Mass movements are natural phenomena that frequently occur on slopes, especially in mountainous and densely populated regions, exhibiting destructive behaviour, with loss of life and destruction of materials. Therefore, the in-depth study of slope stability in geotechnical materials is extremely important in geotechnical engineering. The intricate nature of these phenomena makes it extremely difficult to predict and apply conventional models and analyses. The Mathematical Theory of Chaos has emerged as a promising tool for understanding the supposedly unpredictable and sometimes illogical behaviour of certain physical phenomena, characterized by the interaction of many agents in a cooperative process in which the behaviour of the whole is not reduced to that of its constituent parts. This leads to pronounced nonlinearities and sensitivity to initial conditions, which makes the search for analytical (closed) mathematical solutions difficult, if not impossible. This work aims to deepen the application of Chaos Theory to mass movements on rocky slopes with mixed surfaces (concave and convex), with the aim of analyzing the stability and fall of irregular geometry blocks, their dynamic evolution, sensitivity to initial conditions, among other related aspects, in the wake of the research inaugurated by Ignácio (2019). The results of this research showed that the relative arrangement of concave and convex regions in the constitution of the profile of natural slopes has a marked influence on the response of rock blocks located downhill. In more detail, convex regions close to where the blocks are launched (top of the slope) give rise to evolution dynamics that are adequately described by non-Gaussian statistics (extended q-exponentials). On the other hand, in the situation where those convex regions are closer to the base level of the natural slopes, their dynamics are more appropriately described by a statistical distribution consisting of a linear combination of the Gaussian and extended q-exponential distributions.

Keywords: Chaos theory; Rocky slopes; Nonlinear systems; Mass movements; Slopes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características geométricas de descontinuidades (AZEVEDO e MARQUES, 2002, apud HUDSON, 1989) .....	20
Figura 2 - Exemplos de ruptura por queda (GERSCOVICH, 2016, apud Geo-Rio, 1999.) ....	24
Figura 3 - Sistemas de proteção contra queda de blocos, sugeridos por Ritchie, 1963 (AZEVEDO e MARQUES, 2002, apud Hoek et al., 1981) .....	26
Figura 4 - Ruptura planar ou translacional (GERSCOVICH, Capítulo 1 - Tipos de Talude- Movimentos de Massa, 2022).....	28
Figura 5 - Ruptura circular (GERSCOVICH, 2022) .....	28
Figura 6 - Ruptura em cunha (GERSCOVICH, 2022).....	29
Figura 7 - Ruptura mista (GERSCOVICH, 2022).....	30
Figura 8 - Exemplo de rastejo (GERSCOVICH, 2016, apud Sharpe, 1938) .....	31
Figura 9 - Talude em rocha, solução para eliminação do problema (Adaptado de GEO-RIO, 2000).....	37
Figura 10 - Talude em rocha, solução para estabilização (Adaptado de GEO-RIO, 2000) .....	37
Figura 11 - Talude em rocha, convivência com o problema (Adaptado de GEO-RIO, 2000).	38
Figura 12 - representação das mudanças entre as três variáveis em um espaço tridimensional (STROGATZ, 2018).....	41
Figura 13 - Triângulo de Sierpinski (MENEZES FILHO, 2003, apud PEAK e FRAME, 1994) .....	41
Figura 14 - Espectro de dimensões generalizadas (MENEZES FILHO, 2003) .....	43
Figura 15 - Características dos sistemas caóticos.....	44
Figura 16 - Características dos sistemas caóticos.....	45
Figura 17 - Características dos sistemas caóticos.....	46
Figura 18 - Geometrias adotadas por Ignácio (2019) .....	52
Figura 19 - Formatos dos blocos fornecidos por estudos anteriores (IGNACIO, 2019).....	54
Figura 20 - Encosta estudada no caso C2 por Ignácio (2019).....	55
Figura 21 - Cenário base: Encosta definida.....	56
Figura 22 - Método para variação da zona convexa.....	56
Figura 23 - Configurações de projeto .....	58
Figura 24 - Localização do semeador.....	59
Figura 25 - Especificações do hardware.....	60

Figura 26 - Mensagem de erro de processamento .....	60
Figura 27 - Cenário base: Encosta definida.....	63
Figura 28 - Gráfico $p(x)$ versus $x$ - Cenário Base.....	63
Figura 29 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário Base.....	64
Figura 30 - Encosta estudada no Cenário 01 .....	66
Figura 31 - Gráfico $p(x)$ versus $x$ - Cenário 01 .....	66
Figura 32 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 01.....	67
Figura 33 - Encosta estudada no Cenário 02 .....	68
Figura 34 - Gráfico $p(x)$ versus $x$ - Cenário 02 .....	69
Figura 35 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 02.....	69
Figura 36 - Encosta estudada no Cenário 03 .....	71
Figura 37 - Gráfico $p(x)$ versus $x$ - Cenário 03 .....	71
Figura 38 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 03.....	72
Figura 39 - Ajuste da distribuição q-exponencial estendida na região da cauda.....	73
Figura 40 - Encosta estudada no Cenário 04 .....	74
Figura 41 - Gráfico $p(x)$ versus $x$ - Cenário 04 .....	75
Figura 42 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 04.....	76
Figura 43 - Encosta estudada no Cenário 05 .....	78
Figura 44 - Gráfico $p(x)$ versus $x$ - Cenário 05 .....	78
Figura 45 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 05.....	79
Figura 46 - Variação do parâmetro entrópico $q$ com a altura $Y$ em relação ao nível de base..	81
Figura 47 - Variação do parâmetro entrópico $\delta$ com a altura $Y$ em relação ao nível de base..	81
Figura 48 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 03.....	86
Figura 49 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 04.....	87
Figura 50 - Gráfico $\log(p(x))$ versus $x$ - Cenário 05.....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Respostas geodinâmicas de encostas (Adaptado de GERSCOVICH, 2016, apud TROEH, 1965) .....	18
Tabela 2 - Determinação das características geométricas de discontinuidades (Adaptado de AZEVEDO e MARQUES, 2002, apud HUDSON, 1989) .....	21
Tabela 3 - Classificação dos movimentos de encostas segundo Varnes (1978) (GERSCOVICH, 2016, apud Varnes, 1978).....	22
Tabela 4 - Classificação da velocidade de deslocamento (GEO-RIO, 2000).....	23
Tabela 5 - Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de massa (Adaptado de GERSCOVICH, 2016) .....	32
Tabela 6 - Resumo dos tipos de problemas mais encontrados no Rio de Janeiro (Adaptado de GEO-RIO, 2000) .....	35
Tabela 7 - Parâmetros para a modelagem geotécnica das encostas de gnaiss facoidal (Adaptado de Ignácio, 2019).....	54
Tabela 8 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário Base ....	64
Tabela 9 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 01 .....	67
Tabela 10 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 02 .....	70
Tabela 11 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 03 .....	72
Tabela 12 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 04 .....	76
Tabela 13 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 05 .....	79
Tabela 14 - Comparação do Caso C2 e Cenário Base.....	83
Tabela 15 - Valores obtidos resultantes do somatório das distribuições.....	88

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIG	Bloco Irregular Grande
BIM	Bloco Irregular Médio
BIP	Bloco Irregular Pequeno
GEO-RIO	Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro
NBR	Norma Brasileira
FS	Fator de Segurança
SOC	Self-Organized Criticality
PGECIV	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Variável aleatória $a$ da distribuição de probabilidade Gaussiana
$a'$	Variável aleatória $a'$ da distribuição de probabilidade $q$ -Exponencial Estendida
$b$	Variável aleatória $b$ da distribuição de probabilidade Gaussiana
$b'$	Variável aleatória $b'$ da distribuição de probabilidade $q$ -Exponencial Estendida
$c$	Variável aleatória $b$ da distribuição de probabilidade Gaussiana
$c'$	Variável aleatória $c'$ da distribuição de probabilidade $q$ -Exponencial Estendida
$CR_n$	Coefficiente normal de restituição
$CR_t$	Coefficiente tangencial de restituição
$e$	Número de Euler (número exponencial)
$D_0$	Dimensão fractal
$D_q$	Dimensão fractal generalizada
$D_1$	Dimensão de informação
$D_2$	Dimensão de correlação
$K$	Constante positiva de Boltzmann
$K_B$	Constante de Boltzmann
$\ln$	Função logarítmica natural
$N$	Número de hipercubos
$N_i$	Número de pontos circunscritos
$p_i$	Probabilidade de o sistema estar no estado microscópico $i$
$q$	Parâmetro adimensional
$S$	Probabilidade termodinâmica
$S_1$	Probabilidade termodinâmica relacionada com a entropia
$S_{BG}$	Entropia de Boltzmann-Gibbs
$S_{BG}(A)$	Entropia de Boltzmann-Gibbs do subsistema (A)
$S_{BG}(A + B)$	Entropia de Boltzmann-Gibbs do sistema (A + B)
$S_{BG}(B)$	Entropia de Boltzmann-Gibbs do subsistema (B)
$S_q$	Entropia Generalizada de Tsallis

$W$	Número de sub-estados de um sistema
$y$	Equação da reta de ajuste
$\tau_j$	Tensão cisalhante na descontinuidade
$\Phi_j$	Ângulo de atrito da superfície da descontinuidade
$\tau_f$	Tensão cisalhante no solo
$\tau_{mob}$	Tensão cisalhante mobilizada no solo
$\delta$	Parâmetro entrópico de ajuste
$^\circ$	Graus
$\pi$	Número Pi

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
1.1 <b>Conceitos básicos de talude</b> .....	<b>18</b>
1.2 <b>Descontinuidades em maciços rochosos</b> .....	<b>19</b>
1.3 <b>Movimentos de massa</b> .....	<b>22</b>
1.3.1 <u>Queda de blocos</u> .....	<b>24</b>
1.3.2 <u>Escorregamento</u> .....	<b>27</b>
1.3.3 <u>Escoamentos</u> .....	<b>30</b>
1.4 <b>Fatores deflagradores dos movimentos de massa</b> .....	<b>31</b>
1.5 <b>Análise de estabilidade</b> .....	<b>34</b>
<b>2. TEORIA DO CAOS</b> .....	<b>39</b>
2.1 <b>Sistemas lineares e não-lineares</b> .....	<b>39</b>
2.2 <b>Sistemas caóticos</b> .....	<b>40</b>
2.3 <b>Conceitos básicos de entropia</b> .....	<b>46</b>
2.3.1 <u>Entropia clássica de Boltzmann- Gibbs</u> .....	<b>47</b>
2.3.2 <u>Entropia generalizada de Tsallis</u> .....	<b>49</b>
2.4 <b>Aplicação da Teoria do Caos ao fenômeno de queda de blocos – resultados da linha de pesquisa do PGECIV – UERJ</b> .....	<b>50</b>
<b>3. MÉTODO DE ANÁLISES</b> .....	<b>52</b>
3.1 <b>Definição de parâmetros dos materiais</b> .....	<b>53</b>
3.2 <b>Definição da geometria da encosta</b> .....	<b>54</b>
3.3 <i>Software RocFall2</i> .....	<b>57</b>
3.4 <b>Configurações adotadas</b> .....	<b>58</b>
3.5 <b>Considerações a respeito do <i>software RocFall2</i></b> .....	<b>59</b>
3.6 <b>Análise dos dados brutos</b> .....	<b>61</b>
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>62</b>
4.1 <b>Distribuições probabilísticas</b> .....	<b>62</b>
4.1.2 <u>Cenário 01</u> .....	<b>65</b>
4.1.3 <u>Cenário 02</u> .....	<b>68</b>
4.1.4 <u>Cenário 03</u> .....	<b>70</b>
4.1.5 <u>Cenário 04</u> .....	<b>74</b>

4.1.6	<u>Cenário 05</u> .....	77
4.2	<b>Variação dos parâmetros entrópicos <math>q</math> e <math>\delta</math> com a posição do ponto convexo mais proeminente <math>Y</math></b> .....	80
4.3	<b>Comparação dos resultados do Cenário Base com os do perfil C2 de Ignácio (2019)</b> .....	82
4.4	<b>Condições de vigência de estatísticas não-gaussianas no problema da queda de blocos</b> .....	84
4.5	<b>Condições de vigência de estatísticas gaussianas no problema da queda de blocos..</b> .....	84
4.6	<b>Condições de vigência de estatísticas resultantes da combinação linear entre distribuições gaussianas e <math>q</math>-exponenciais estendidas no problema da queda de blocos</b> .	85
5.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	89
5.1	<b>Sugestões para pesquisas futuras</b> .....	90
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	91

## INTRODUÇÃO

Estabilidade de taludes em encostas rochosas é um tema de extrema importância na engenharia geotécnica, uma vez que a ocorrência de movimentos de massa, como quedas e rolamento de blocos, apresenta um enorme potencial destrutivo. Em razão da complexidade e imprevisibilidade destes fenômenos, sua análise se torna bastante difícil, o que vem desafiando as abordagens tradicionais, entretanto, sua compreensão é fundamental na mitigação dos riscos associados e adoção de medidas de segurança.

Os maciços rochosos são constituídos por material rochoso intacto e superfícies de descontinuidades, apresentando, muitas vezes, elevada heterogeneidade. Seu comportamento é função de uma série de fatores – resistência e deformabilidade da matriz rochosa e das descontinuidades, comportamento do material intemperizados, etc. – o que dificulta a identificação de regularidades e reiterações em seus movimentos, muitas vezes imprevisíveis e de difícil identificação pelos métodos tradicionais. É neste contexto que a Teoria do Caos emerge como uma ferramenta promissora para investigar e compreender estes fenômenos complexos.

Esta teoria matemática lida com fenômenos físicos, caracterizados pela interação de diversos agentes, num processo mancomunado de cooperação, em que o comportamento do todo não se reduz ao comportamento de suas partes constituintes. Acentuadas não linearidades, extrema sensibilidade às condições iniciais, dentre outros fatores, tornam o fenômeno de difícil análise, em que, a busca por soluções analíticas matemáticas se torna difícil, quando mesmo impossível.

Aplicada a fenômenos geotécnicos, especialmente os relacionados à instabilidade de taludes naturais em solo e rocha, a teoria tem produzido resultados promissores, que se revelam extremamente importantes na compreensão e mitigação destes complexos fenômenos naturais.

Esta pesquisa visa aprofundar a aplicação da teoria do caos aos movimentos de massa em taludes rochosos com perfis geométricos côncavos e convexos, analisando a forma dos taludes e os diferentes tipos de quedas e rolamentos de blocos rochosos irregulares que podem ocorrer, bem como sua evolução dinâmica, sensibilidade às condições iniciais, dentre outros aspectos de interesse, na esteira da linha de pesquisa inaugurada por Ignácio (2019).

Ignácio (2019) observou uma enorme variabilidade de distribuições de probabilidade de trajetória-alcance para diferentes geometrias dos taludes côncavos e convexos, concluindo que,

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

Assim, este trabalho tem por objetivo contribuir para um conhecimento mais aprofundado destes complexos fenômenos, resultando em estratégias mais eficazes de prevenção e mitigação de riscos geotécnicos.

Esta dissertação está assim organizada: o Capítulo 1 está dedicado à revisão bibliográfica de assuntos que serão utilizados posteriormente, dentre os quais a fenomenologia dos mecanismos de instabilização de encostas. O Capítulo 2 está voltado à exposição da Teoria Matemática do Caos, as principais características dos sistemas caóticos e sua utilização na análise do fenômeno da queda de blocos rochosos. O Capítulo 3 aborda a metodologia de análise, com a definição dos parâmetros e dos perfis geométricos das encostas (cenários) a serem utilizados. Descreve também as potencialidades do Programa RockFall2, suas vantagens e desvantagens advindas da sua utilização no problema de instabilidade de encostas rochosas por queda de blocos. A apresentação e análise dos resultados é feita no Capítulo 4, em que os resultados empíricos são tratados pelas estatísticas gaussianas e não-gaussianas, na busca por certos padrões de comportamento, capazes de nortear os estudos e possíveis conclusões. As conclusões e sugestões para futuras pesquisas são apresentadas no Capítulo 5, e a dissertação se encerra com a bibliografia referenciada no texto.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

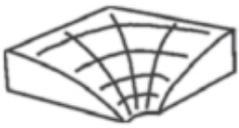
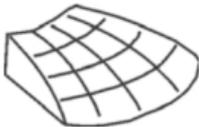
### 1.1 Conceitos básicos de talude

Talude se refere a qualquer superfície inclinada de um maciço rochoso ou de solo, podendo ser natural - denominado encosta -, ou construído pelo homem - denominado aterro ou corte.

Os taludes artificiais ocorrem em cortes, escavações ou lançamento de aterros na construção de barragens, estradas, ferrovias, túneis, dentre outros empreendimentos. Por ocasião destas intervenções, deve-se levar em conta as características geológicas e geotécnicas do local, fatores influentes na estabilidade dos taludes, resistência dos materiais envolvidos e drenagem.

Taludes naturais podem se apresentar com face plana ou curvilínea (côncava ou convexa), influenciando o fluxo preferencial da água de escoamento superficial, tal como retratado na Tabela 1.

Tabela 1 - Respostas geodinâmicas de encostas (Adaptado de GERSCOVICH, 2016, apud TROEH, 1965)

<b>Tipo de talude</b>	<b>Superfície</b>	<b>Condição da encosta com relação à água superficial</b>
	Plana	-
	Convexa	Coletora
		Difusora

Tipo de talude	Superfície	Condição da encosta com relação à água superficial
	Côncava	Coletora
		Difusora

Sua estabilidade está atrelada a fatores que alteram o estado de tensões do maciço, fazendo com que as tensões cisalhantes atuantes se equiparem à resistência ao cisalhamento do solo (GERSCOVICH, 2016).

De maneira mais elucidativa:

- Os taludes planos não possuem uma curvatura significativa, tendo uma superfície reta ou quase reta. Este tipo de talude é mais comum em obras civis, como em aterros, estruturas de contenção, entre outros.
- Os taludes de forma convexa possuem uma curvatura voltada para fora do terreno, assemelhando a uma “corcova”.
- Os taludes de forma côncava possuem uma curvatura voltada para dentro do terreno. Normalmente, este formato de talude é mais estável, devido a sua distribuição de peso e pressão tenderem a ser mais uniforme.

Para além de alguns fatores, como ambientais, geológicos e geotécnicos, o formato do talude é de suma importância para análise de estabilidade. Ao ponderar diversos aspectos, tais como ângulo de inclinação, perfil e geometria geral, engenheiros e geólogos podem realizar avaliações da estabilidade e conceber estratégias eficientes para a redução de riscos.

## 1.2 Descontinuidades em maciços rochosos

Os maciços rochosos são compostos por material rochoso intacto e por superfícies de descontinuidade (Figura 1), seu comportamento em respostas a esforços impostos dependendo

do número, orientação e natureza das discontinuidades, podendo ocorrer movimentos, rolamentos ou fragmentação do maciço (HOEK E. , Strength of jointed rock masses, 1983).

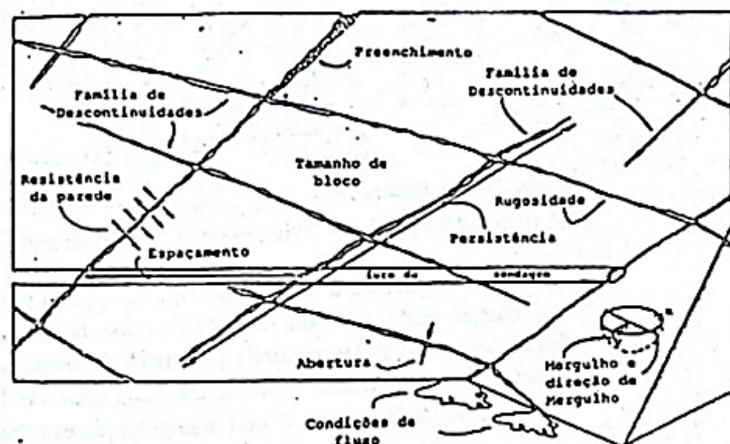


Figura 1 - Características geométricas de descontinuidades (AZEVEDO e MARQUES, 2002, apud HUDSON, 1989)

Embora as rochas intactas sejam definidas como sem fraturas, na verdade, em pequenas escalas, são formadas por uma rede de vários grãos minerais que, interligados, promovem a coesão e integridade do maciço. Ademais, características geológicas, como falhas, juntas, planos de acamamento e fissuras também regem o comportamento do maciço, definindo suas propriedades mecânicas e de transporte (HUDSON & HARRISON, 1997).

As descontinuidades podem ser formadas de diferentes maneiras: por tração ou compressão da rocha, por cisalhamento ou mesmo por resfriamento do magma em profundidade. Via de regra, as descontinuidades perpassam diferentes escalas, afetando a deformabilidade, resistência e permeabilidade dos maciços rochosos (HUDSON & HARRISON, 1997).

Habitualmente, maciços rochosos fraturados apresentam anisotropia de resistência, isto é, o valor de uma dada propriedade sendo dependente da direção em que é avaliada. São clássicos os trabalhos na comunidade geotécnica dedicados a esta importante questão (JAEGER, 1960; DONATH, 1964; GAZIEV E ERLIKHMAN, 1971; PERES-RODRIGUES, 1983; HOEK, 1983, dentre tantos outros).

Os diversos critérios de ruptura de rochas e maciços rochosos, dentre os quais o de Hoek e Brown (1980, 1990, 1992, 1998, 2002, 2007, 2018), possibilita a análise de massas rochosas

com diferentes disposições das descontinuidades. Sabe-se que sua resistência depende da resistência da rocha intacta e das descontinuidades, não se sabendo ao certo a proporção que estas parcelas participam na resistência dos maciços rochosos (AZEVEDO & MARQUES, 2002).

Via de regra, as descontinuidades ocorrem em famílias, ou seja, grupos de descontinuidades aproximadamente paralelas entre si, apresentando as seguintes características geotécnicas (Tabela 2).

Tabela 2 - Determinação das características geométricas de descontinuidades (Adaptado de AZEVEDO e MARQUES, 2002, apud HUDSON, 1989)

<b>Característica Geométricas das Descontinuidade</b>	<b>Técnica de medida</b>
Orientação	Bússola geológica
Espaçamento	Fita graduada (Métrica)
Persistência	Fita graduada (Métrica)
Rugosidade	Ábacos de referencia
Resistencia da parede	Martelo de Schmidt
Abertura	Escala
Preenchimento	Observação táctil-visual
Condições de fluxo	Observações no tempo
Número de famílias	Projeção estereográfica
Tamanho do bloco	Frequência de abertura 3D

Conforme assinalam Azevedo e Marques (2002),

As propriedades que governam a resistência e deformabilidade das descontinuidades podem ser estimadas por meio da descrição detalhada das suas características, por geólogos e, ou, engenheiros geotécnicos, ou serem medidas diretamente através de ensaios de campo e laboratório. É usual a execução de ensaios de laboratório para obtenção de parâmetros que serão utilizados na determinação empírica das propriedades de resistência das descontinuidades.

Na prática, a origem das descontinuidades pode ser muito diversa, sendo que, do ponto de vista mecânico, solicitações de flexão, cisalhamento, tração e compressão são bastante comuns (GOODMAN, 1989).

Portanto, compreender e analisar as famílias de descontinuidade é indispensável para identificar suas características geológico-geotécnicas, estimar sua resistência ao cisalhamento de modo a prever o seu comportamento, responsável por eventuais movimentos de massa que corpos rochosos possam estar submetidos ao longo de sua existência.

### 1.3 Movimentos de massa

Movimentos de massa envolvendo solos e rochas têm sido, por várias décadas, objeto de pesquisa em várias regiões do mundo, não só devido a sua influência na evolução do relevo, mas também nos efeitos que causa nos locais de ocorrência, acarretando perdas de vidas humanas e prejuízos econômicos. Para os geotécnicos, os estudos possibilitam uma compreensão maior dos mecanismos deflagradores de tais movimentos, sejam eles escorregamentos, queda de blocos, dentre outros, muito comuns em taludes em materiais rochosos e/ou terrosos (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

Para Gerscovich (2016), um movimento de massa se caracteriza por apresentar deslocamentos de volumes de solo/rocha, o que configura problemas de instabilidade em encostas. Estes movimentos são subdivididos em quedas, tombamentos, escorregamentos, expansão lateral, escoamentos e de configuração complexa.

Uma classificação internacionalmente aceita foi proposta por Varnes em 1978. Em sua maioria, estas classificações tem aplicabilidade regional, sendo influenciadas pelas condições geológicas e climáticas da região. No caso do Brasil, Augusto Filho fez uma adequação da classificação de Varnes, levando em conta nosso clima tropical, tendo classificado os movimentos em rastejo ou fluência, escorregamentos, quedas e corridas ou fluxos, tal como mostrado na Tabela 3 (GERSCOVICH, 2016, apud Varnes, 1978).

Tabela 3 - Classificação dos movimentos de encostas segundo Varnes (1978) (GERSCOVICH, 2016, apud Varnes, 1978)

TIPO DE MOVIMENTO	TIPO DE MATERIAL		
	Rocha	Solo (engenharia)	
		Grosso	Fino
Quedas	De rocha	De detritos	De terra

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grossoiro	Fino
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas unidades	De blocos rochosos De rocha	De blocos de detritos De detritos	De blocos de terra De terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				(Rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

Os movimentos de massa podem variar entre extremamente rápidos, com velocidades superiores a 3 m/s, a extremamente lentos, com velocidades inferiores a 0,3 m/5 anos. Abaixo é apresentada uma classificação em relação à velocidade (GEO-RIO, 2000):

Tabela 4 - Classificação da velocidade de deslocamento (GEO-RIO, 2000)

Classificação	Velocidade
Muito lento	de 0,3 m/5 anos a 1,5 m/ano
Lento	de 1,5 m/ano a 1,5 m/mês
Moderado	de 1,5 m/mês a 1,5 m/dia
Rápido	de 1,5 m/dia a 0,3 m/min
Muito rápido	de 0,3 m/min a 3 m/s

Segundo Geo-Rio (2000), algumas correlações envolvendo os tipos de movimento de massa e o tipo de solo podem ser estabelecidas, levando-se em conta que:

O tipo de movimento de massa a ser gerado em encostas constituídas por solos saprolíticos pode estar diretamente relacionado às características originais das fraturas reliquiares. Escorregamentos rotacionais podem predominar em encostas onde as fraturas no embasamento rochoso se encontram pouco espaçadas, fazendo com que o saprólito se comporte como um material granular. Escorregamentos translacionais podem predominar em encostas com juntas reliquiares originadas a partir da alteração de fraturas de alívio de tensão ou mesmo a partir de bandas composicionais.

### 1.3.1 Queda de blocos

O meio físico e ações antrópicas interferem de maneira significativa na estabilidade dos taludes, especialmente nos de alta declividade ou penhascos. Os blocos de rocha são ou intemperizados tendem, por gravidade, a se deslocar encosta abaixo (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

Quedas de blocos se dão em queda livre, ao se desprenderem do maciço rochoso íngreme, podendo apresentar diferentes tamanhos. Durante a queda, se combinada a outros movimentos, esses blocos tendem a se fragmentar, devido aos impactos de rolamento, queda e deslizamento, consistindo em movimentos bruscos em alta velocidade (AZEVEDO & MARQUES, 2002).

A formação destes blocos decorre da ação do intemperismo e pressões hidrostáticas nas fraturas, perda de confinamento lateral, vibrações, entre outros. A Figura 2 apresenta dois exemplos de mecanismos de queda de blocos que ocorrem por (A) descalçamento e (B) tombamento.

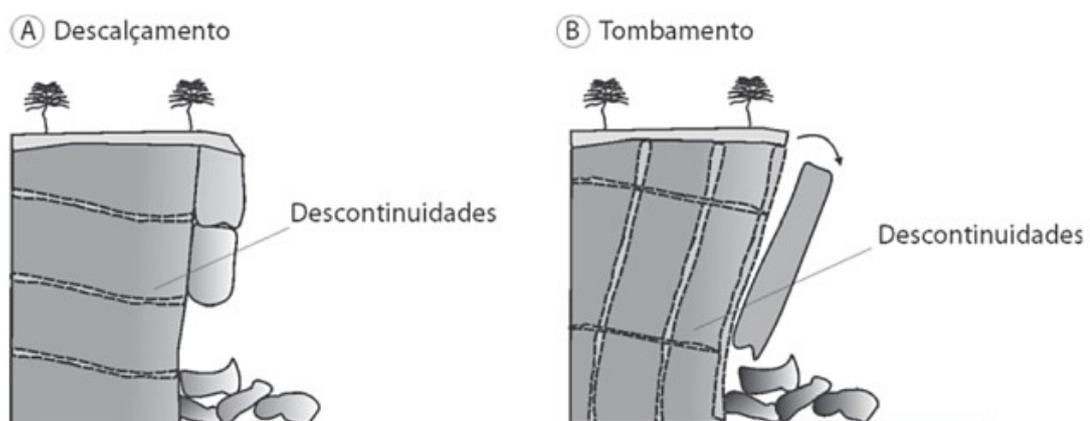


Figura 2 - Exemplos de ruptura por queda (GERSCOVICH, 2016, apud Geo-Rio, 1999.)

Azevedo e Marques (2002) descrevem tombamento como “[...] movimentos devidos a forças que causam momentos, originando rotação de colunas ou de blocos de rocha sobre uma base fixa. [...]”. Já o descalçamento é caracterizado pela remoção da base do talude ou da perda de sustentação, sendo causado por vários fatores, como erosão e solapamento da base, atividades humanas, dentre outros.

Para Guidicini e Nieble (2019), a queda de blocos pode ocorrer devido aos seguintes fatores:

[...] ação alternada de congelamento e degelo ao longo das fraturas e juntas; por ciclagem térmica em massas rochosas; por perda de apoio de blocos causada pela ação erosiva de veículo aquoso; por processo de desconfinamento lateral de maciços rochosos decorrente de linhas de entalhe recentes; por alívio de tensões de origem tectônica, mesmo em obras subterrâneas; por vibrações; por empuxo hidrostático ao longo de juntas verticais; ou, então, por composição desses processos.

Estes fenômenos são extremamente difíceis de prever e possuem um potencial destrutivo significativo. Geralmente, ocorrem de forma súbita, sem sinais prévios de movimentação, e atingem velocidades elevadas, desenvolvendo altas energias cinéticas durante o deslocamento, o que os torna especialmente perigosos e difíceis de serem antecipados ou controlados (IGNACIO, 2019).

As análises envolvendo queda de blocos são complexas, pois é necessário o estudo das trajetórias e energia durante o movimento. Neste sentido, visando auxiliar no projeto de sistemas de proteção a serem implantados, simulações numéricas são comumente realizadas utilizando-se *softwares* especializados, destacando-se o RocFall2, desenvolvido pela empresa Rocscience. O programa possibilita testar diferentes geometrias de encostas e forma dos blocos instáveis, bem como a adoção de diversos parâmetros de entrada, dentre outras facilidades (AZEVEDO & MARQUES, 2002).

O bloco instável pode, eventualmente, apresentar um dos três mecanismos distintos em sua dinâmica descendente: queda livre (ocorre em média a 90°); repique do bloco pela superfície do declive (ocorre em média a 70°); e rolamento sobre a superfície (ocorre em média de 30° a 45°), tal como ilustrado na Figura 3 (NETO, 2019).

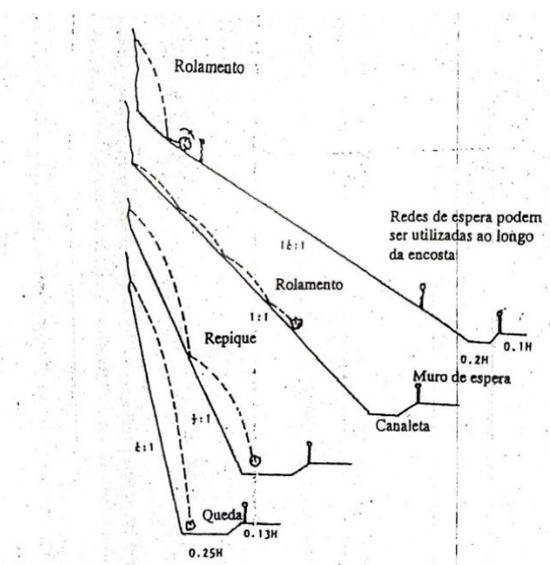


Figura 3 - Sistemas de proteção contra queda de blocos, sugeridos por Ritchie, 1963 (AZEVEDO e MARQUES, 2002, apud Hoek et al., 1981)

Na queda livre, pode haver dois movimentos, o de translação do centro do bloco e o de rotação em torno do seu eixo, sendo que, em sua maioria, os blocos desprendidos dos maciços apresentam superfícies irregulares, dificultando a estimativa da direção de queda do bloco após impacto (NETO, 2019, apud Azzoni et al., 1995)

Se, ao longo da trajetória de queda livre, houver a redução da declividade da superfície, se instalará o repique do bloco, levando-o a se fragmentar, como resultado dos impactos (IGNACIO, 2019). No entanto, caso haja uma maior redução da inclinação do maciço, o comportamento de rolamento do bloco será o vigente, realizando um movimento rotacional, em constante contato com a superfície (NETO, 2019).

Posto isto, em relação à gestão de riscos decorrentes do desprendimento do bloco do maciço rochoso, a previsão de queda poderá ser estimada por meios subjetivos ou objetivos. Os métodos subjetivos consistem em análises de acordo com a experiência do profissional, onde se busca correlacionar fatores presentes no local, como inspeções visuais, aliadas à sua experiência profissional, para, assim, obter-se uma conclusão inicial.

Por outro lado, os métodos objetivos requerem uma avaliação minuciosa, normalmente utilizando modelagem geotécnica, instrumentações e análises rigorosas, sendo muito comum uma insuficiente disponibilidade de dados (CANDIA, 2011, apud Duzgun e Einsten, 2004).

### 1.3.2 Escorregamento

Segundo Gerscovich (2016), os escorregamentos são movimentos de massa rápidos e de duração moderadamente curta, que ocorrem com uma superfície de ruptura bem definida.

Estes movimentos são desencadeados quando a resistência média ao cisalhamento na massa de solo ou rocha é igual ou inferior às tensões médias de cisalhamento na superfície de ruptura. Assim, a resistência interna do maciço não é suficiente para conter as forças de cisalhamento exercidas pelos carregamentos, podendo chegar à condição de Fator de Segurança (FS) igual ou inferior a 1 (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

A NBR11682 dispõe de exigências mínimas para o estudo e controle da estabilidade de encostas e taludes, descrevendo as classificações e o estudo dos movimentos de massa, auxiliando, desta forma, a análise e adoção de medidas mitigadoras (ABNT, 2009).

De acordo com as condições geomorfológicas do local, as superfícies de ruptura podem ser classificadas como planares, circulares, em cunha ou mista (circular e plana) (GERSCOVICH, 2016).

- Planar ou translacional: caracteriza-se pelas descontinuidades ou planos de fraqueza, sua ruptura ocorrendo ao longo de uma superfície plana ou quase plana. Ocorre em depósitos coluvionares de pequena espessura, bem como em perfis de alteração de rochas granito-gnáissicas, caracterizando escorregamentos rasos e de pouca espessura.

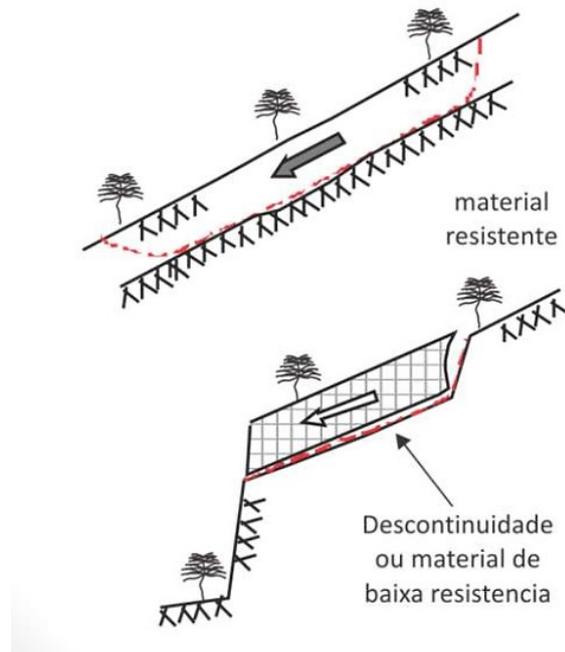
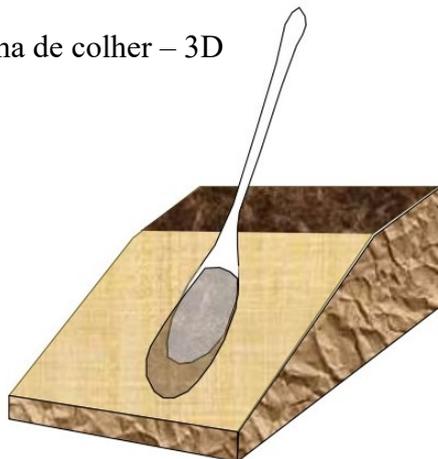


Figura 4 - Ruptura planar ou translacional (GERSCOVICH, Capítulo 1 - Tipos de Talude- Movimentos de Massa, 2022)

- Circular: ocorre em solo homogêneo, formando superfície cilíndrica ou em forma de colher.

Forma de colher – 3D



Cilíndrica – 2D

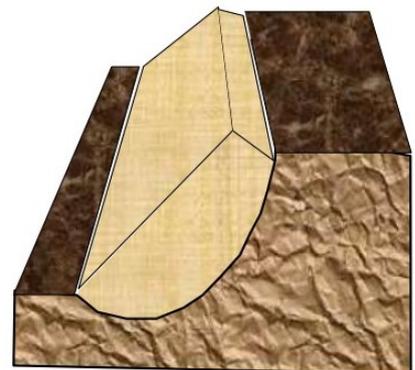


Figura 5 - Ruptura circular (GERSCOVICH, 2022)

- Cunha: ocorre quando os planos de fraqueza se cruzam, isolando blocos de rocha, ou quando há camadas com baixa resistência, não paralelas à superfície do talude.

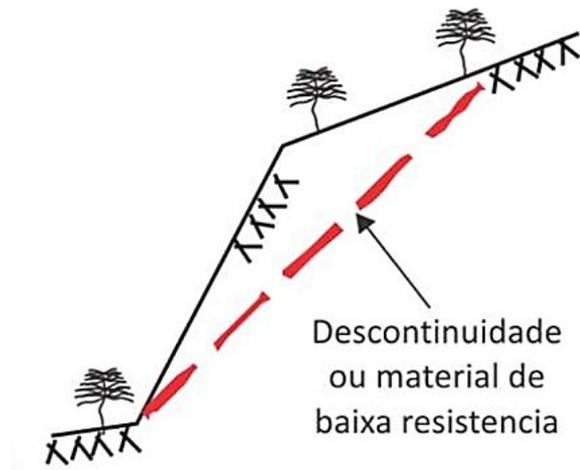


Figura 6 - Ruptura em cunha (GERSCOVICH, 2022)

- Mista: nos casos em que atuam dois ou mais mecanismos referidos anteriormente, normalmente relacionados à heterogeneidade dos materiais envolvidos.

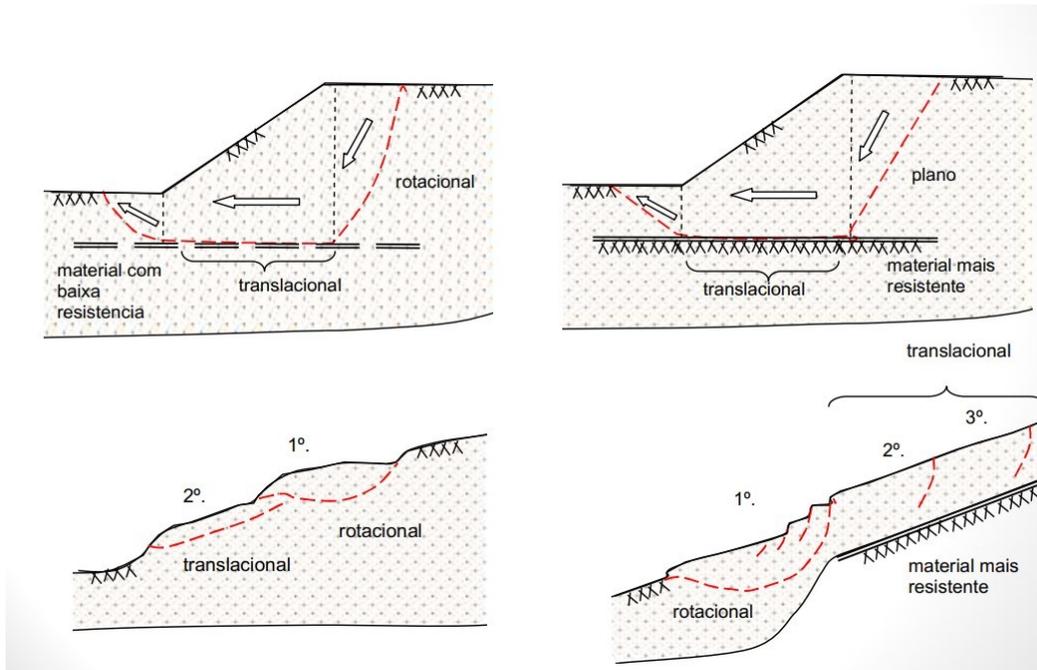


Figura 7 - Ruptura mista (GERSCOVICH, 2022)

Os escorregamentos rotacionais são designados como múltiplos quando mobilizam em paralelo mais de uma superfície de ruptura.

### 1.3.3 Escoamentos

Escoamentos são caracterizados por deformações ou movimentos contínuos, podendo apresentar ou não superfícies definidas. Os movimentos podem ser lentos (rastejo) ou rápidos (corridas) (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

Gerscovich (2016) denomina rastejo aos movimentos lentos e contínuos, de superfície não definida, podendo abranger grandes áreas, sem que haja uma clara diferenciação entre a massa em movimento e a área não afetada. O movimento se dá pela ação da gravidade, associada a efeitos oriundos de variação de temperatura e umidade. Se houver uma modificação brusca do estado de tensões, interferindo na resistência do material instável, torna-se um processo de escorregamento, com superfície definida.

A identificação deste tipo de movimento pode ser observada através de pontos de referência, como postes, cercas e árvores inclinadas, tal como ilustrado na Figura 8 (GERSCOVICH, 2016).

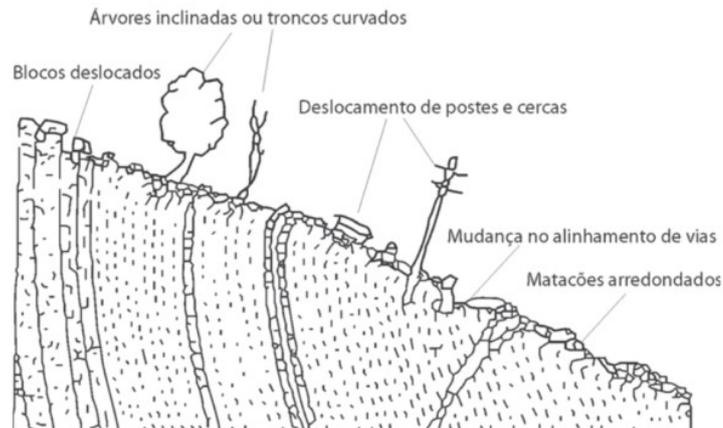


Figura 8 - Exemplo de rastejo (GERSCOVICH, 2016, apud Sharpe, 1938)

Já as corridas são caracterizadas como formas mais rápidas de escoamento, que ocorrem devido a perda de atrito interno e de caráter hidrodinâmico, em razão do excesso de água no solo (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

#### 1.4 Fatores deflagradores dos movimentos de massa

A instabilidade em taludes indica que as tensões cisalhantes mobilizadas se igualaram a resistência ao cisalhamento. Esta instabilizações podem ocorrer devido a diversos fatores, envolvendo ações isoladas ou combinadas, de um conjunto de agentes indutores (MARQUES & CARDOSO, 2013).

Estes agentes podem ser classificados em predisponentes e efetivos. Os agentes predisponentes caracterizam-se por um conjunto de condições ambientais, geológicas e geométricas, as quais são exclusivamente naturais, ou seja, sem ações antrópicas (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

Guidicini e Nieble (2019) apresentam alguns exemplos de agentes predisponentes:

- a) Complexo geológico – petrografia, alterações por intemperismo, acidentes tectônicos (falhamentos, dobramentos), atitude das camadas (orientação e mergulho), formas estratigráficas, intensidade de diaclasamento etc.;
- b) Complexo morfológico – inclinação superficial, massa, forma do relevo;
- c) Complexo climático-hidrológico – clima, regime de águas meteóricas e subterrâneas;
- d) Gravidade;
- e) Calor solar;
- f) Tipo de vegetação original.

Já os agentes efetivos caracterizam-se por um conjunto de elementos desencadeadores dos movimentos de massa – incluindo ações antrópicas -, subdivido em agentes efetivos preparatórios, que são pluviosidade, erosão pela água ou vento, variação de temperatura, etc.; e em agentes efetivos imediatos, que são efeitos provocados por agentes externos no interior do talude (GUIDICINI & NIEBLE, 2019).

Gerscovich (2016) divide os mecanismos deflagradores em dois grupos: aumento da sollicitação e redução da resistência ao cisalhamento, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de massa (Adaptado de GERSCOVICH, 2016)

<b>Ação</b>	<b>Fatores</b>	<b>Fenômenos Geológicos/ Antrópicos</b>
Aumento da sollicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão
		Escorregamentos
		Cortes
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, neve, granizo etc.
		Acúmulo natural de material (depósitos)
		Peso da vegetação
		Construção de estruturas, aterros etc.
	Sollicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões etc.
		Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas
		Congelamento
		Material expansivo

<b>Ação</b>	<b>Fatores</b>	<b>Fenômenos Geológicos/ Antrópicos</b>
Redução da resistência ao cisalhamento	Características inerentes ao material (geometria, estruturas etc.)	Características geomecânicas do material
	Mudanças ou fatores variáveis	Ação do intemperismo provocando alterações físico-químicas nos minerais originais, causando quebra das ligações e gerando novos minerais com menor resistência
		Processos de deformação em decorrência de variações cíclicas de umedecimento e secagem, reduzindo a resistência
		Variação das poropressões
		Elevação do lençol freático por mudanças no padrão natural de fluxo (construção de reservatórios, processos de urbanização etc.)
		Infiltração da água em meios não saturados, causando redução das pressões de água negativas (sucção)
		Geração de excesso de poropressão, como resultado de implantação de obras
		Fluxo preferencial através de trincas ou juntas, acelerando os processos de infiltração

Em áreas de encostas naturais, é comum haver movimentação de massa devido à infiltração de água das chuvas. No entanto, retroanálise de casos mostram que nem sempre a infiltração de água pode ocasionar a ruptura do maciço (GERSCOVICH, 2016).

Em relação a ações antrópicas, a ocupação e uso do solo, com o acelerado processo de urbanização, acaba reduzindo a cobertura florestal, alterando a estabilidade da área afetada. As principais modificações indutoras dos movimentos de massa são (GEO-RIO, 2000, apud Augusto-Filho, 1995):

- Remoção da cobertura vegetal.
- Lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas.

- Vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas.
- Execução deficiente de aterros (geometria, compactação e fundação).
- Lançamento de lixo nas encostas/taludes.

### 1.5 Análise de estabilidade

A estabilidade de taludes é um fenômeno temporário, visto que, ao longo dos anos, ficam à mercê de condições climáticas e hidrológicas, atividades humanas, entre outros fatores citados no item 1.4 (AZEVEDO & MARQUES, 2002).

A análise de estabilidade tem como finalidade verificar a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa em talude natural ou construído. De modo geral, as análises são feitas através da comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento, resultando desta análise um fator de segurança, representado pela Equação (1) (GERSCOVICH, 2016).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

sendo,

$\tau_f$  – tensão cisalhante

$\tau_{mob}$  – tensão cisalhante mobilizada

Nos casos em que:

- $FS > 1 \rightarrow$  obra relativamente estável
- $FS = 1 \rightarrow$  ruptura
- $FS < 1 \rightarrow$  sem significado físico

Durante a execução de um projeto, é necessário encontrar um valor admissível para o fator de segurança ( $FS_{adm}$ ) de um projeto, sendo ele um valor mínimo a ser atingindo, que irá variar de acordo com o tipo de obra e vida útil (GERSCOVICH, 2016).

Os maciços rochosos, como se observou anteriormente, são compostos por blocos de materiais rígidos (rocha sã) e descontinuidades, podendo estas últimas estarem preenchidas por

materiais intemperizados, sendo menos resistentes ou não. A resistência destes maciços, portanto, é função da resistência da rocha intacta e das discontinuidades (HOEK E. , 1983).

Geo-Rio (2000) apresenta um resumo dos problemas identificados frequentemente em taludes rochosos no estado do Rio de Janeiro, com os métodos de análise e critérios de aceitação, tal como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo dos tipos de problemas mais encontrados no Rio de Janeiro (Adaptado de GEO-RIO, 2000)

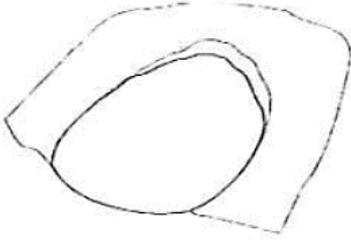
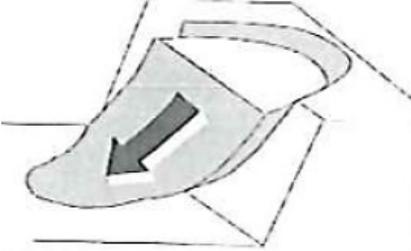
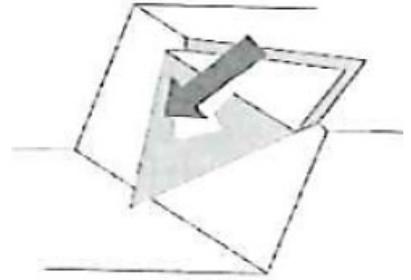
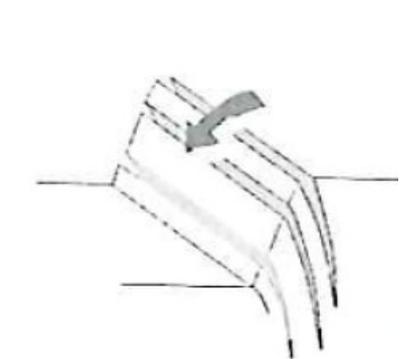
<b>Figura</b>	<b>Parâmetros críticos</b>	<b>Método de análise</b>	<b>Crítérios de aceitação</b>
<p>Deslizamentos</p> 	<p>Fraturas regionais; Resistência ao cisalhamento dos materiais ao longo das discontinuidades; Poropressão, particularmente sob chuvas intensas.</p>	<p>Equilíbrio limite com superfícies de ruptura circulares e poligonais</p>	<p>O FS absoluto tem pouco significado, mas a variação do mesmo permite julgar as soluções de estabilização; A monitoração dos movimentos e poropressões é único meio seguro e prático de julgar a eficiência da obra de estabilização</p>
<p>Maciço de solo ou rocha estruturado por severas discontinuidades</p>	<p>Altura e inclinação do talude;</p>	<p>Equilíbrio limite bidimensional com pesquisa</p>	<p>FS &gt; 1.5 para taludes com grande risco</p>

Figura	Parâmetros críticos	Método de análise	Critérios de aceitação
	Resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura; Poropressão.	automática da superfície crítica	
<p data-bbox="363 629 560 658">Rocha fraturada</p> 	Altura do talude, inclinação e orientação; Mergulho e orientação das descontinuidades; Poropressões.	Equilíbrio limite de cunhas	FS > 1.5 para taludes com grande risco
<p data-bbox="292 1032 632 1061">Rocha com fraturas verticais</p> 	Altura do talude, inclinação e orientação; Mergulho e orientação das descontinuidades; Poropressões.	Método simplificados de investigação de potencialidade de ruptura	Não há critério universalmente aceito, mas é fácil de identificar o potencial de ruptura. Recomenda-se monitorar deslocamentos
<p data-bbox="363 1536 560 1565">Queda de blocos</p> 	Geometria do talude; Ocorrência de blocos soltos; Coeficiente de restituição dos materiais.	Estimativa da trajetória de queda	O mapeamento superficial, fotos aéreas poderão permitir avaliação do risco e soluções de estabilização

Nos casos mais complexos, a utilização de *softwares* para simulação da trajetória de blocos é essencial, devido a complexibilidade de se prever o seu comportamento.

Para taludes rochosos, as soluções sugeridas para estabilização do maciço são agrupadas do seguinte modo: eliminação, estabilização e convivência. Na eliminação, como o próprio nome induz, o objetivo é eliminar o problema, podendo ser através do desmonte do bloco ou talude que está em possível colapso (Figura 9) (GEO-RIO, 2000).

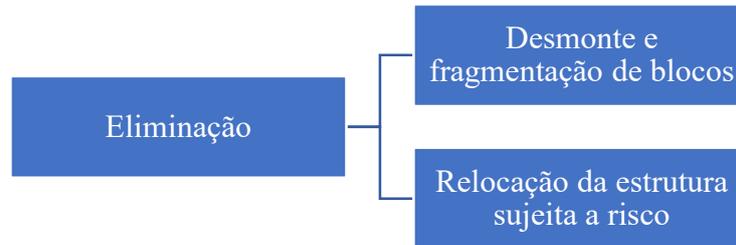


Figura 9 - Talude em rocha, solução para eliminação do problema (Adaptado de GEO-RIO, 2000)

Já a estabilização do talude envolve, como sugere a Figura 10, algumas alternativas técnicas.

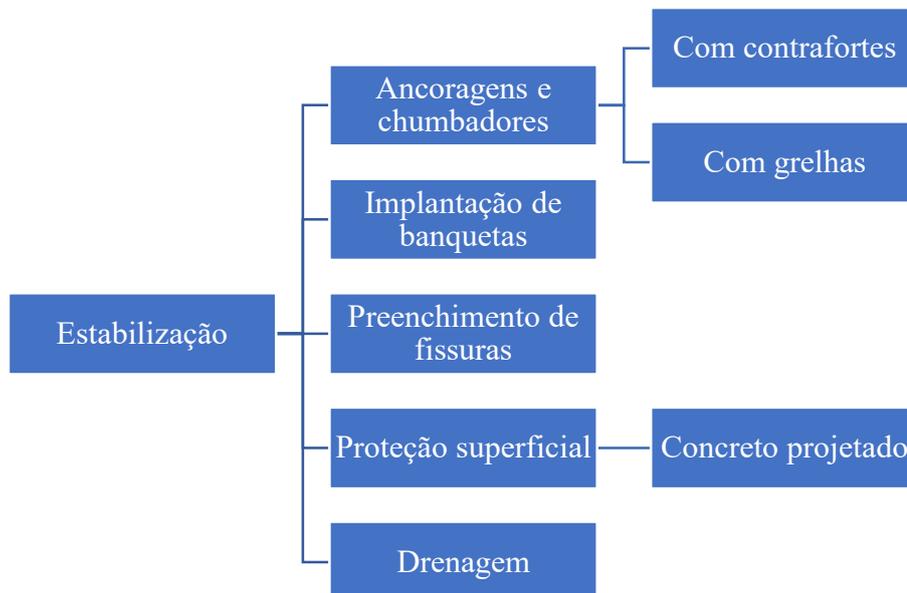


Figura 10 - Talude em rocha, solução para estabilização (Adaptado de GEO-RIO, 2000)

A terceira solução é a convivência com o problema. Neste caso, quando o talude é muito fraturado ou possui uma quantidade considerável de blocos soltos, sendo a estabilização uma opção inviável economicamente, a convivência se torna a melhor alternativa (Figura 11) (GEO-RIO, 2000).

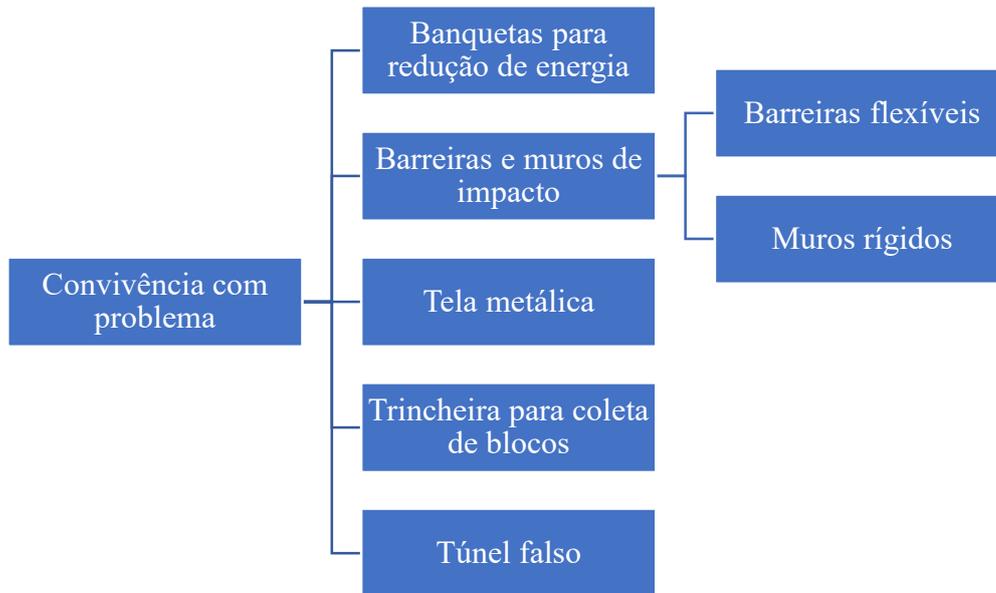


Figura 11 - Talude em rocha, convivência com o problema (Adaptado de GEO-RIO, 2000)

## 2. TEORIA DO CAOS

### 2.1 Sistemas lineares e não-lineares

Os sistemas lineares e não-lineares são conceitos indispensáveis para o entendimento de diversos fenômenos naturais. Através deles, é possível identificar singularidades e comportamentos, expressos através de equações, possibilitando análises e previsões.

Ao se analisar fenômenos naturais, comumente utiliza-se a metodologia de análise por etapas, sendo feita a repartição do que se deseja analisar e investigando-o separadamente em cada parte. Essa abordagem reducionista é usada para sistemas lineares, onde a funcionalidade decorre da sobreposição de efeitos individuais, satisfazendo uma análise abrangente. No entanto, ao lidar com sistemas de alta complexidade, não-lineares, esse método se mostra ineficiente, pois a análise do comportamento global difere significativamente da análise de um fragmento desse sistema. Sendo assim, seu comportamento deve ser analisado de forma conjunta, dada a sua intrincada complexidade (MENEZES FILHO, 2003).

De acordo com Gleick (1991), os sistemas lineares, normalmente, possuem fácil análise e resolução, tendo como atrativo ser um sistema modular, ou seja, podem ser desmontados e montados a todo momento. Portanto, ao se perturbar alguma variável, o seu efeito sobre o sistema será proporcional, e, portanto, relativamente de fácil previsão.

Por outro lado, alguns sistemas não-lineares possuem um comportamento peculiar, imprevisível, possuindo alta sensibilidade às condições iniciais, ou seja, perturbações iniciais atuantes sobre o sistema podem modificar por completo seus resultados posteriores (NUSSENZVEIG, 2003).

Prigogine e Stengers (1997) assinalam: “A não-linearidade é o motor da criatividade e da inovação. É através das interações não-lineares entre diferentes elementos que surgem novas ideias e soluções inesperadas.”

## 2.2 Sistemas caóticos

Onde começa o caos, a ciência clássica para. Desde que o mundo teve físicos que investigavam as leis da natureza, sofreu também um desconhecimento especial sobre a desordem na atmosfera, sobre o mar turbulento, as variações das populações animais, as oscilações do coração e do cérebro. O lado irregular da natureza, o lado descontínuo e incerto, têm sido enigmas para a ciência, ou pior: monstruosidade (GLEICK, 1991).

A história da ciência do caos iniciou-se entre os séculos XIX ao XX, quando o grande matemático Henri Poincaré se dedicou a entender a estabilidade do sistema solar. Durante sua pesquisa, Poincaré, esperava encontrar o movimento dos astros com trajetórias bem definidas. O que se sucedeu, porém, foram movimentos não-lineares e alta instabilidade do sistema em função de suas condições iniciais, ou seja, o caos (IBÁÑEZ, ALBA, & GARCÍA, 1995).

Menezes Filho (2003) disserta que, de uma forma mais simplificada, um sistema caótico é um sistema dinâmico que possui um comportamento demasiadamente sensível às condições iniciais, decorrendo daí a sua imprevisibilidade, caracterizada pela existência de atratores estranhos (caóticos) no espaço de fase. Mais especificamente, sua característica mais marcante é a sensibilidade às condições iniciais, ou seja, caso haja pequenas perturbações nas condições iniciais do sistema em estudo, seus resultados ao longo do tempo poderão variar consideravelmente, diferentemente do que ocorre num sistema linear comum.

É fácil perceber que, nestes sistemas fortemente caóticos, a previsão a longo prazo encontra-se seriamente comprometida (IBÁÑEZ, ALBA, & GARCÍA, 1995).

Neste sentido, a utilização de computadores é de fundamental importância nas análises de sistemas caóticos, pois calculam e sintetizam em forma gráfica, qualitativa, a resposta de diversas equações que, eventualmente, não apresentam soluções analíticas fechadas. Lorenz foi um dos que se beneficiou deste recurso durante suas análises sobre a previsão do tempo. Ele verificou que suas equações apresentavam um comportamento oscilatório de maneira irregular, e que pequenas alterações iniciais proporcionavam resultados bastante diferentes com o passar do tempo. Não obstante, quando Lorenz plotou, em três dimensões, as soluções de suas equações, para tempos bastante longos, observou que formavam um gráfico em forma de borboleta (Figura 12), chegando à conclusão que esses conjuntos seriam um “complexo infinito de superfícies”, sendo denominado atualmente como um exemplo de atrator fractal (STROGATZ, 2018).

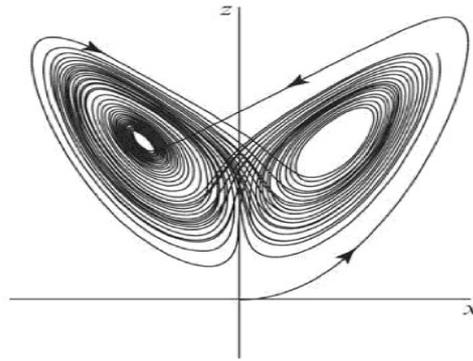


Figura 12 - representação das mudanças entre as três variáveis em um espaço tridimensional (STROGATZ, 2018)

Os sistemas caóticos proporcionam um panorama intrigante, possuindo atratores estranhos e padrões fractais, como os da figura anterior, fazendo-nos lembrar da natureza e sua complexibilidade (MANDELBROT, 1977).

Fractais são objetos matemáticos que se caracterizam por apresentarem invariância por expansão ou contração. Assim, suas partes constituintes são semelhantes ao seu todo e vice-versa. A Figura 13 mostra o fractal “Triângulo de Sierpinski”, em que se pode observar a mencionada autossimilaridade de escala, em que a parte e o todo se confundem (MENEZES FILHO, 2003).

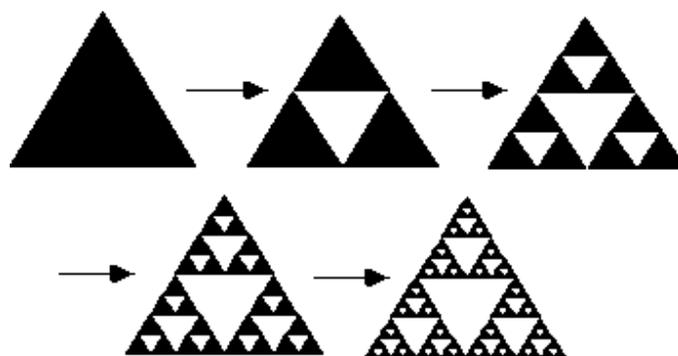


Figura 13 - Triângulo de Sierpinski (MENEZES FILHO, 2003, apud PEAK e FRAME, 1994)

Mais pormenorizadamente, a construção da fractalidade planar ou espacial, como mostra a figura anterior, começa com um elemento denominado “iniciador” (o mais superior à esquerda), sobre o qual atua um processo iterativo, segundo determinadas regras pré-

estabelecidas (no caso, dividir os lados do triângulo pela metade e retirar a parte triangular central). Neste sentido, o Triângulo de Sierpinski é um exemplo típico de um fractal determinístico, ou seja, construído segundo regras bem definidas.

Ademais, é perfeitamente claro da Figura 13 que as suas partes constituintes são cópias exatas de um todo maior, sendo que o processo iterativo assinalado acima pode se desenvolver indefinidamente, em direção a escalas maiores ou menores.

Portanto, em uma figura fractal, a parte está no todo, e o todo está na parte, sendo impossível efetuar esta separação de um modo claro.

A quantificação da fractalidade de um objeto pode ser efetuada pela Dimensão Fractal  $D_0$  (MENEZES FILHO, 2003), definida como:

$$D_0 = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log N(l)}{\log(1/l)} \quad (2)$$

Sendo  $N(l)$  o número de hipercubos (cubos, quadrados, referenciados como caixas) de lado  $l$  necessários para recobrir todo o objeto analisado.

Entretanto, a dimensão fractal propriamente dita  $D_0$  é, muitas vezes, insuficiente para descrever toda a complexidade e riqueza dos fractais, especialmente dos denominados fractais heterogêneos, constituídos por dimensões fractais diferentes. Assim, surgiu a necessidade de se introduzir as chamadas “Dimensões fractais generalizadas” (MENEZES FILHO, 2003, apud Fiedler-Ferrara e Prado, 1994), expressas por:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(l)} p_i^q}{\log(l)} \quad (q \in R, q \neq 1) \quad (3)$$

Em que a probabilidade  $p_i$  é definida por:

$$p_i = p_i(l) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N} \quad (4)$$

Onde  $N$  é o número total de caixas (número total de pontos a serem recobertos) e  $N_i$  o número de pontos circunscritos à  $i$ -ésima caixa.

Portanto, objetos fractais heterogêneos, também chamados de multifractais, são aqueles passíveis de serem descritos por um espectro infinito de dimensões fractais generalizados, como mostra a Figura 14 (MENEZES FILHO, 2003).

Neste sentido, a dimensão fractal propriamente dita  $D_0$  é representada unicamente por um ponto no gráfico das dimensões generalizadas. Cabe observar que, na caracterização matemática de um objeto fractal - ou monofractal -, a dimensão  $D_0$  basta para a sua caracterização, todas as outras dimensões generalizadas colapsando numa única.

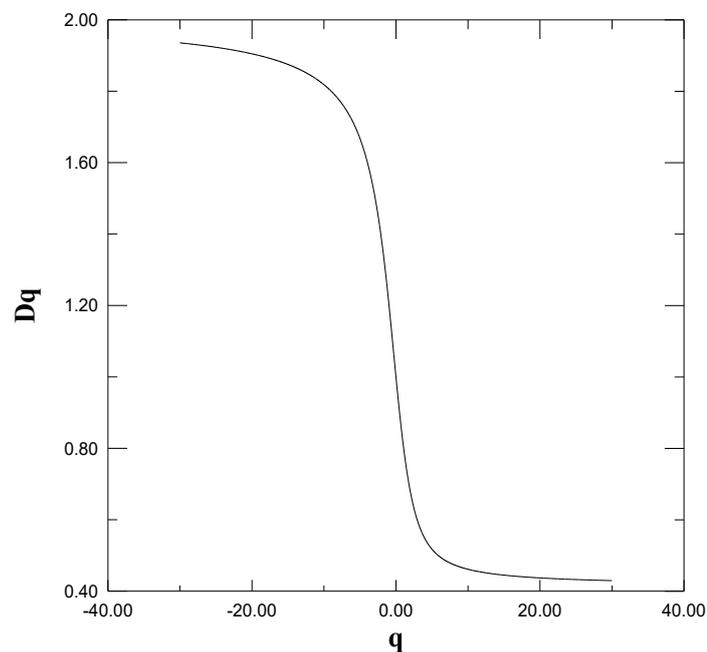


Figura 14 - Espectro de dimensões generalizadas (MENEZES FILHO, 2003)

Especialmente, além da dimensão  $D_0$ , duas outras dimensões fractais generalizadas são de particular interesse (MENEZES FILHO, 2003):

$$D_1 = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(l)} p_i \log p_i}{\log \left( \frac{1}{l} \right)} \quad (5)$$

E

$$D_2 = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(l)} p_i^2}{\log(l)} \quad (6)$$

Denominadas, respectivamente, dimensão de informação e dimensão de correlação. A primeira, derivada da expressão de  $D_q$  por uma passagem ao limite, exprime o tráfego de informações no interior do objeto fractal, e a segunda retrata o grau de correlação entre os elementos constituintes do objeto fractal em estudo (MENEZES FILHO, 2003).

Os sistemas caóticos podem ser classificados em dois grupos: fracamente caóticos e fortemente caóticos. Menezes Filho (2003) esclarece características importantes de ambos os sistemas, tal como apresentado na Figura 15, Figura 16 e Figura 17.

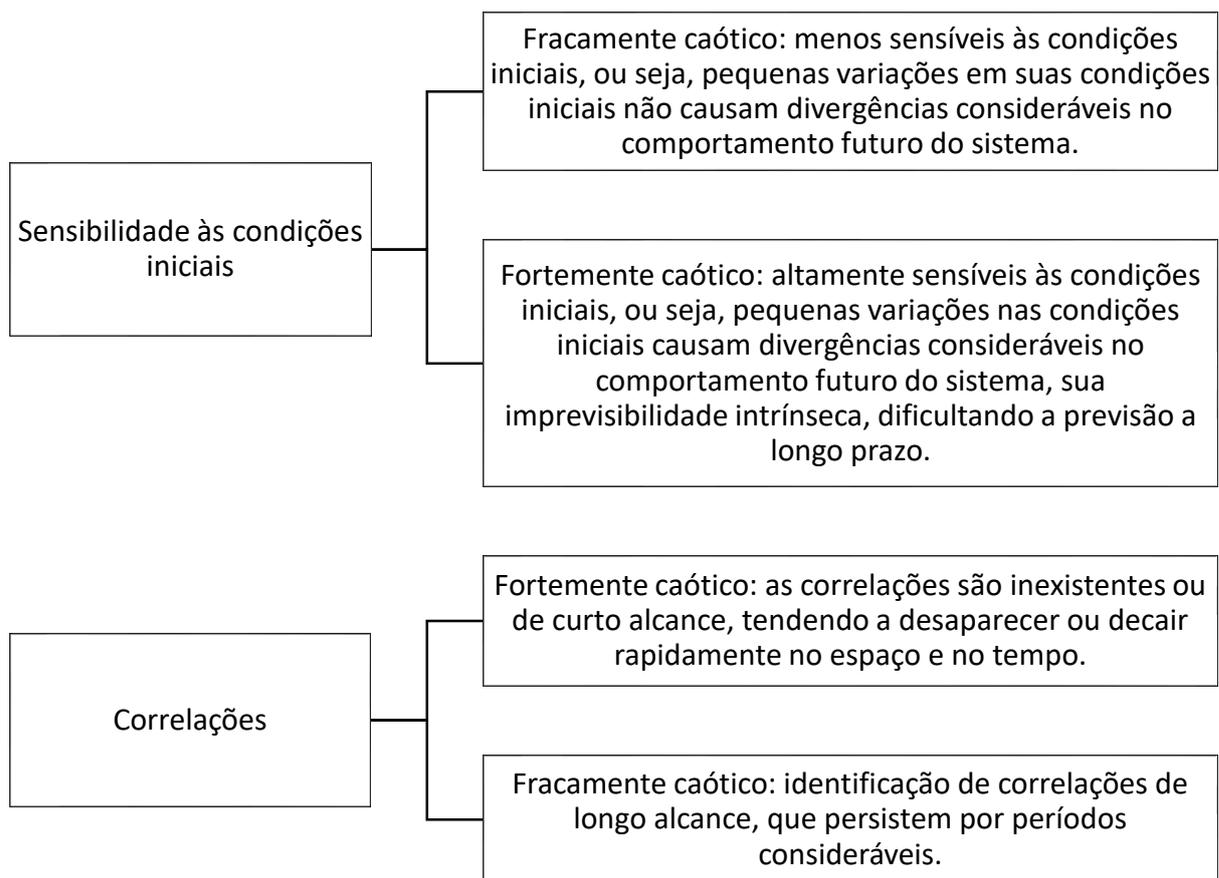


Figura 15 - Características dos sistemas caóticos

Vale salientar que as correlações de longo alcance a nível espacial ou temporal são as responsáveis pela formação de padrões fractais na natureza, caracterizados por estruturas em diferentes escalas, bem como a presença de sinais temporais auto semelhantes.

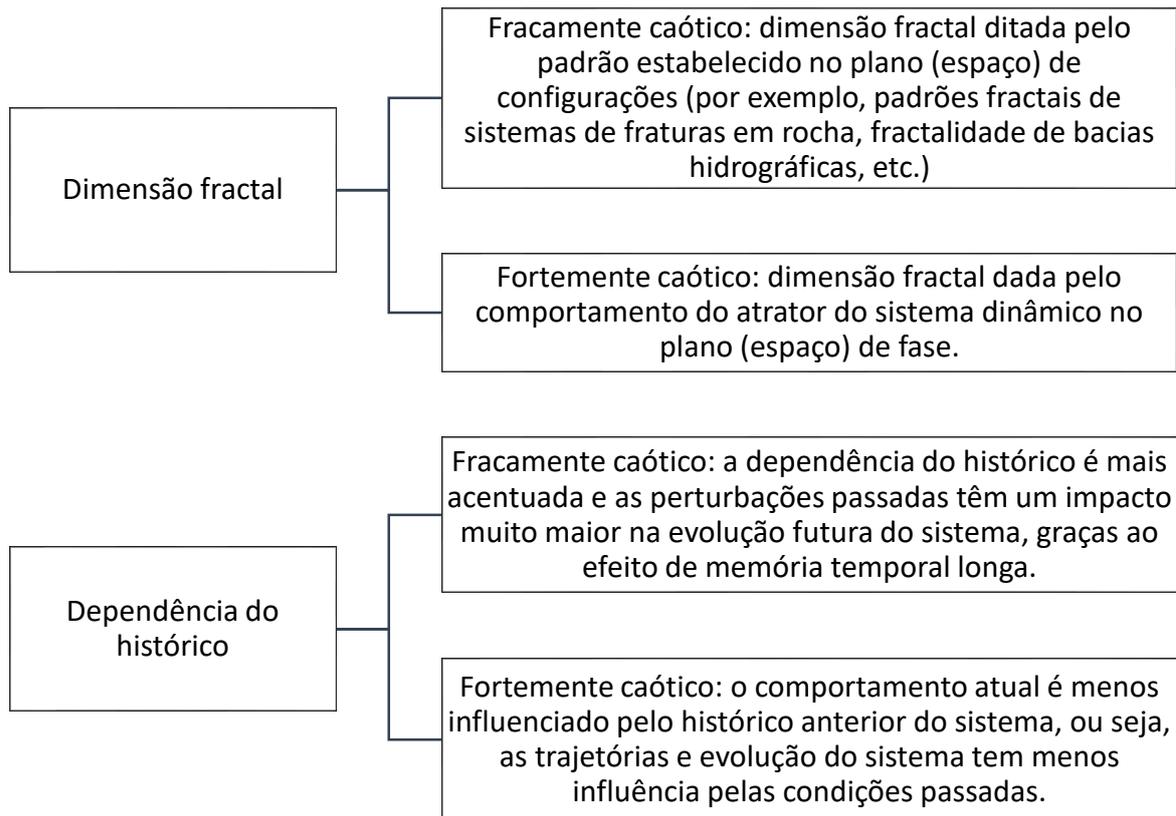


Figura 16 - Características dos sistemas caóticos

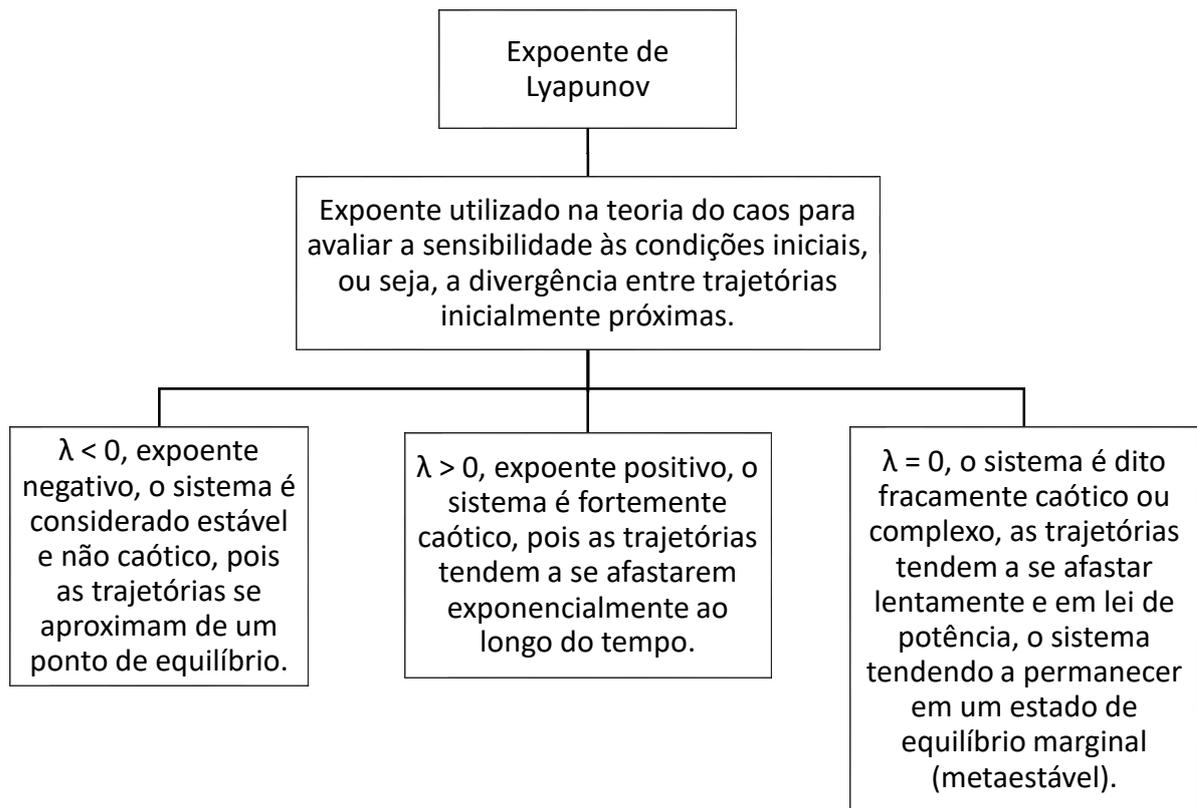


Figura 17 - Características dos sistemas caóticos

### 2.3 Conceitos básicos de entropia

No avanço da física no decorrer dos anos, as teorias da Mecânica Quântica e da Relatividade expandiram nossa compreensão do universo. A Mecânica de Newton era considerada absoluta, aplicável a qualquer sistema físico, porém esse desenvolvimento da física, iniciou uma investigação dos fenômenos com massas em microescala e velocidades próximas da luz, ficou claro que a física ia muito além do que conhecíamos, mostrando-se complexa (MENEZES FILHO, 2003).

O avanço da física não se limita às teorias citadas anteriormente. Outros campos da física vêm progredindo continuamente, como a termodinâmica clássica e a mecânica estatística usual. A mecânica estatística é um ramo da física teórica que pretende estudar as propriedades macroscópicas de um sistema físico, a partir de seu comportamento na microescala.

O conceito entropia desempenha um papel crucial no arcabouço teórico da termodinâmica clássica e da mecânica estatística (MENEZES FILHO, 2003).

A entropia surge como um medidor quantitativo macroscópico da desordem microscópica (MARQUES & SANTANA, 2020). Assim, um aumento da desordem em um sistema leva a um aumento da entropia, das incertezas, enquanto que uma diminuição da desordem retrata uma diminuição da entropia, e a organização do sistema aumenta.

Portanto, a entropia é uma excelente forma de mensurar e quantificar a complexidade dos sistemas, de forma que, relacionada à mecânica estatística, nos possibilita um estudo das propriedades macroscópicas e da termodinâmica dos sistemas físicos, ainda que algumas de suas propriedades mais básicas sejam discutidas ainda nos tempos atuais (DURÃO, 2015).

### 2.3.1 Entropia clássica de Boltzmann- Gibbs

Desenvolvida por Ludwig Boltzmann e, posteriormente, aprimorada por Josiah Willard Gibbs, a entropia clássica de Boltzmann-Gibbs é uma formulação fundamental na mecânica estatística. Segundo Durão (2015), Boltzmann compreendia que existia uma relação entre a entropia termodinâmica e a descrição microscópica de um sistema mecânico constituído por N partículas, enquanto Gibbs considerava que um estado macroscópico é a realização de muitos estados microscópicos.

A entropia de Boltzmann-Gibbs tem sido uma excelente ferramenta para predições em sistemas, principalmente para sistemas extensivos, quando vale a extensividade termodinâmica. Em outras palavras, quando é possível desconsiderar as interações microscópicas ou quando são de curto alcance (PEDRON, 1999).

A expressão matemática da entropia de Boltzmann-Gibbs é dada pela Equação (7):

$$S_1 = -K_B \sum_{i=1}^W p_i \ln(p_i) \quad (7)$$

Onde:

- $p_i$ : probabilidade de o sistema estar no estado microscópico  $i$ ;
- $K_B$ : constante de Boltzmann, que relaciona a escala macroscópica da temperatura com a energia cinética média das partículas no sistema;
- $W$ : microestados acessíveis ao sistema.

Observa-se que a forma entrópica (8) é aditiva, ou seja, dados dois sistemas independentes A e B, a entropia do sistema conjunto é:

$$S_{BG}(A + B) = S_{BG}(A) + S_{BG}(B) \quad (8)$$

A maximização da entropia de Boltzmann-Gibbs assinala o equilíbrio térmico do sistema, a entropia atingindo seu valor extremo. A distribuição de probabilidades que maximiza a forma entrópica de Boltzmann-Gibbs é a distribuição gaussiana, representada na Equação (9). Os parâmetros a, b e c são parâmetros de ajuste da distribuição.

$$p(x) = a \left[ e^{\left[ -\left(\frac{x-c}{b}\right)^2 \right]} \right] \quad (9)$$

Em concordância com Menezes Filho (2003), a forma entrópica de Boltzmann-Gibbs descreve satisfatoriamente os sistemas físicos 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 (sistemas ditos markovianos);
- Sistemas cuja evolução temporal no espaço de fase não é (multi)fractal.

Contudo, pesquisas recentes têm estudado sistemas físicos que se comportam de maneira diferente e discordante com o estabelecido pela expressão entrópica usual anterior. Mais precisamente, não parece haver nenhuma razão para que a entropia seja sempre uma propriedade aditiva, ou seja, que a entropia total de um sistema composto seja a soma das entropias dos seus sistemas individuais. Alguns sistemas físicos, ditos anômalos, não compartilham desta máxima, especialmente aqueles que apresentam efeitos não-locais, fruto das interações de longo alcance desenvolvidas no interior de um dado sistema em evolução (MENEZES FILHO, 2003).

### 2.3.2 Entropia generalizada de Tsallis

Como observado no item anterior, a mecânica estatística tradicional de Boltzmann-Gibbs e a termodinâmica clássica possuem suas limitações. Tsallis propôs uma generalização da entropia de Boltzmann-Gibbs, permitindo uma nova possibilidade de se lidar com sistemas anômalos, não aditivos, ditos fracamente caóticos ou complexos (LIMA, 2021, apud TSALLIS, 1988).

De acordo com Lima (2021), Tsallis estabeleceu uma conexão entre a fractalidade de um sistema específico e a entropia associada a ele, sendo representado pela Equação (10).

$$S_q = \frac{k}{q-1} \left( 1 - \sum_{i=1}^W p_i^q \right) \quad (10)$$

Sendo,

- k: constante de Boltzmann
- q: parâmetro entrópico adimensional

O índice q indica o grau de não-aditividade (ou não-localidade) de tal sistema, estando estreitamente ligado à sua dinâmica microscópica (MENEZES FILHO, 2003). A entropia de Tsallis apresenta características interessantes, pois quando  $q \rightarrow 1$ , a entropia generalizada restitui a entropia aditiva de Boltzmann-Gibbs, ao passo que, para  $q \neq 1$ , a entropia é não-aditiva.

A forma entrópica de Tsallis tem sido aplicada vários sistemas físicos que compartilham das seguintes características:

- Interações de longo alcance entre seus elementos constituintes, e/ou
- Memória temporal de longo alcance, e/ou
- A evolução no espaço de fase é (multi)fractal, e/ou
- Existe algum tipo de dissipação no sistema físico.

A distribuição de probabilidades que maximiza a entropia generalizada de Tsallis é a q-gaussiana, distribuição gaussiana generalizada (MENEZES FILHO, 2003), dada pela seguinte expressão:

$$p(x) = [1 + (1 - q)x^2]^{\frac{1}{1-q}} \quad (11)$$

A distribuição q-gaussiana é um caso particular de uma distribuição estatística mais geral (MENEZES FILHO, 2003), denominada distribuição q-exponencial estendida.

$$p(x) = [1 + (1 - q)x^\beta]^{\frac{1}{1-q}} \quad (12)$$

Mais detalhadamente, esta última pode ser escrita como mostra a Equação (13), em que  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ,  $q$  e  $\delta$  são parâmetros entrópicos de ajuste.

$$p(x) = a' \left[ 1 - (1 - q) \left( \frac{x' - c'}{b'} \right)^{\frac{2}{\delta}} \right]^{\frac{1}{1-q}} \quad (13)$$

Esta distribuição tem sido aplicada com sucesso na descrição estatística do fenômeno de queda de blocos rochosos, especialmente os que alcançam o pé dos taludes naturais encosta abaixo (IGNÁCIO, 2019; RIBEIRO, 2020; ARAÚJO, 2021).

Assim, a entropia generalizada de Tsallis e as distribuições probabilísticas q-gaussiana e q-exponencial estendida são ferramentas matemáticas importantes no estudo de sistemas físicos complexos, caracterizados por interações espaço-temporais de longo alcance, típicas das que ocorrem em fenômenos de instabilidade de encostas naturais por queda de blocos.

#### **2.4 Aplicação da Teoria do Caos ao fenômeno de queda de blocos – resultados da linha de pesquisa do PGECIV – UERJ**

A linha de pesquisa relacionada a aplicação da Teoria do Caos a fenômenos de instabilização do tipo queda de blocos tem produzido diversas dissertações de mestrado (IGNÁCIO, 2019; RIBEIRO, 2020; ARAÚJO, 2021), bem como artigos em congressos e revistas. Eles possibilitaram uma melhor compreensão deste fenômeno extremamente complicado, permitindo que diversas conclusões fossem elaboradas.

- A forma geométrica das encostas rochosas e dos blocos instáveis tem influência decisiva no desenvolvimento do fenômeno (IGNACIO, 2019). Mais precisamente, encostas com geometria convexa tem a tendência de promoverem, no pé dos taludes, distribuições de probabilidade gaussianas, envolvendo o número de blocos e sua respectiva localização. A razão se deve a que encostas convexas apresentam uma forte tendência a dispersar as trajetórias dos blocos instáveis, levando a separações acentuadas entre trajetórias, aspecto muito relacionado a sistemas caóticos fortes, em que a dispersão entre trajetórias inicialmente muito próximas, se faz de forma exponencialmente rápida, como acima já se observou. Neste sentido, sistemas fortemente caóticos apresentam estatísticas gaussianas.
- Por outro lado, encostas de formato côncavo apresentaram concentração de trajetórias, levando a distribuições de probabilidades normalmente utilizadas em sistemas complexos, ou seja, q-exponenciais estendidas. Portanto, sistemas fracamente caóticos apresentam estatísticas não-gaussianas.
- O formato dos blocos instáveis foi investigado na pesquisa de (RIBEIRO, 2020) Blocos de formato regular – quadrangulares e hexagonais, com bordas arredondadas e vivas – foram lançados sobre os mesmos perfis de encostas utilizados por Ignácio (2019). Os resultados mostraram que a geometria dos blocos influenciou consideravelmente nas distribuições finais no pé dos taludes. No entanto, encostas de formato convexo continuaram a produzir, majoritariamente, distribuições gaussianas, ao passo que as de formato côncavo forneceram, em sua maioria, distribuições q-exponenciais estendidas.
- A influência dos coeficientes de restituição normal e tangencial, mantendo-se a geometria das encostas rochosas e o tipo irregular de bloco, tal como em Ignácio (2019), foi investigada por Araújo (2021). Os resultados sugeriram que aqueles coeficientes desempenham um papel primordial na resposta do fenômeno físico. Especificamente, valores menores dos coeficientes de restituição (choques parcialmente inelásticos) – e, portanto, conduzindo a uma maior dissipação de energia - forneceram resultados condizentes com a distribuição q-exponencial estendida, independentemente da geometria dos perfis, convexa ou côncava. Portanto, este trabalho confirmou a influência capital da dissipação de energia na resposta dos sistemas complexos.

### 3. MÉTODO DE ANÁLISES

Na linha da pesquisa de Ignácio (2019), Ribeiro (2020) e Araújo (2021), o presente estudo visa entender o fenômeno da queda de blocos em taludes mistos (côncavo e convexo), utilizando *software* específico e a teoria dos sistemas fracamente ou fortemente caóticos, no que concerne às distribuições da quantidade de blocos e sua posição encosta abaixo dos taludes rochosos.

Os estudos iniciados por Ignácio (2019) envolveram a escolha de diferentes geometrias para entender o comportamento do bloco antes de sua aplicação no estudo de caso em uma seção do Morro Cantagalo. As geometrias foram classificadas como C1, C2, C3 e C4 (Figura 18).

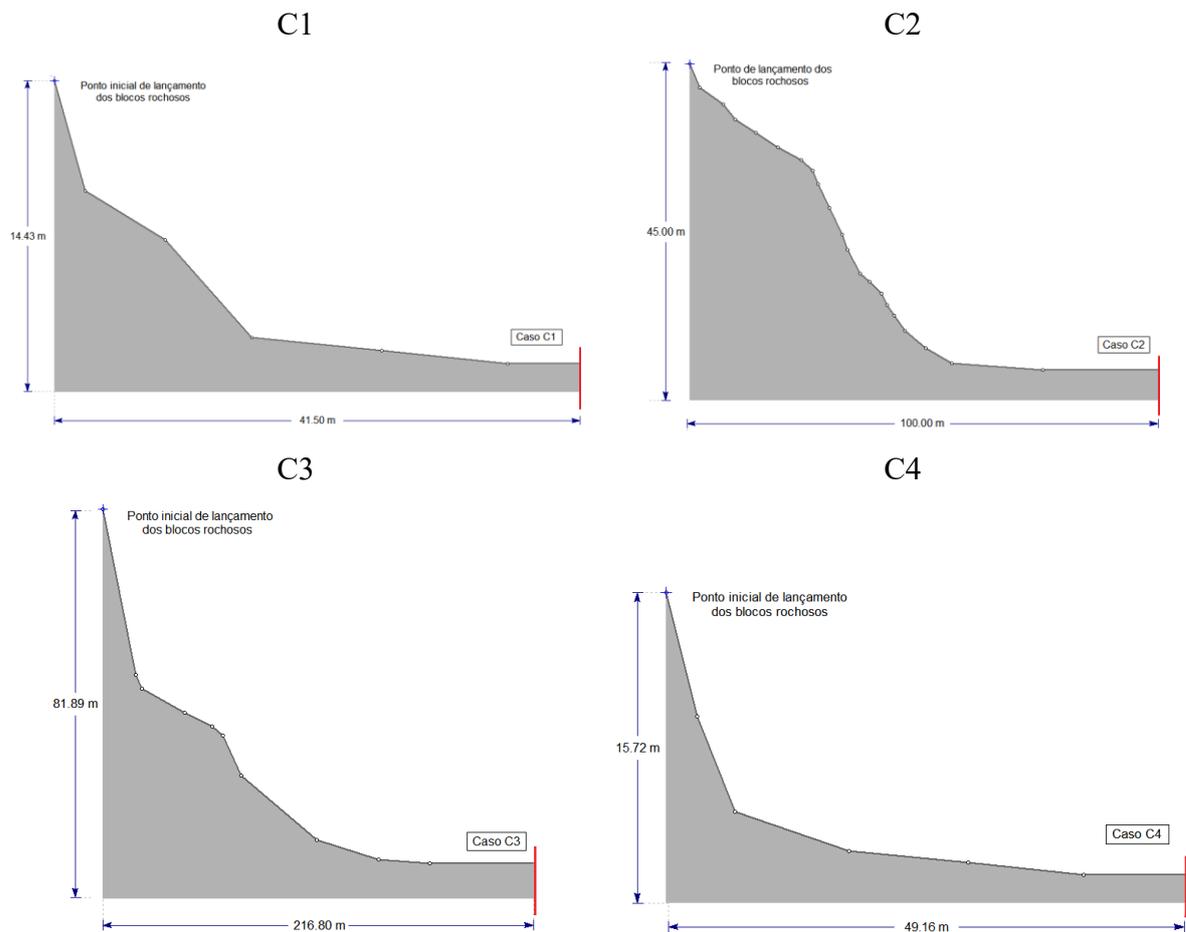


Figura 18 - Geometrias adotadas por Ignácio (2019)

As análises foram conduzidas utilizando o *software* RocFall2, definindo como ponto de partida o caso C2 fornecido na pesquisa de Ignácio (2019), tendo sua geometria modificada de

forma sistemática, ou seja, variando-se a posição das superfícies convexa e côncava constituintes da geometria do talude ao longo da encosta.

A encosta rochosa foi inteiramente modelada por gnaisse facoidal, e as configurações dos blocos foram, também, fornecidas por Ignacio (2019), sendo definido o uso dos Blocos Irregulares Grandes (BIG) em todas as análises. Neste sentido, Ignácio (2019) e Ribeiro (2020) mostraram que as distribuições probabilísticas dos blocos instáveis situados no pé dos taludes, ao final do processo de queda, não dependiam do tamanho dos blocos (pequeno, médio ou grande).

Os resultados da distribuição de blocos em cada ponto da superfície são obtidos pelo *software* por meio de histograma e os dados podendo ser exportados em planilhas. Embora o *software* disponibilize outras funções, estas não serão contempladas no atual estudo.

Os estudos desenvolvidos pelos pesquisadores do PGECIV/UERJ acima referidos, voltados para a análise da queda de blocos rochosos, comprovaram a eficácia das simulações numéricas e análises probabilísticas efetuadas sobre os dados experimentais, tendo por base a teoria dos sistemas forte e fracamente caóticos, facilitando o entendimento e predição deste complicado fenômeno.

### **3.1 Definição de parâmetros dos materiais**

Os parâmetros do gnaisse facoidal constituinte da encosta e dos blocos foram definidos em Menezes Filho (1993). Mais pormenorizadamente, ensaios de compressão axissimétrica uniaxial de laboratório realizados em diversas amostras de gnaisse facoidal, com níveis de intemperização, variando desde sã a altamente alterado. Parâmetros de resistência e deformabilidade foram determinados e utilizados para uma melhor caracterização da rocha em estudo.

Os dados relativos aos coeficientes de restituição normal e tangencial, bem como os relacionados aos atritos dinâmicos e de rolamento, foram os utilizados por Ignácio (2019), conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros para a modelagem geotécnica das encostas de gnaiss facoidal (Adaptado de Ignácio, 2019)

<b>Material rochoso</b>	<b>Coefficiente de Restituição Normal (CRn)</b>	<b>Coefficiente de Restituição Tangencial (CRt)</b>	<b>Atrito dinâmico</b>	<b>Atrito de rolamento</b>
Gnaiss facoidal	0,35	0,85	0,5	0,15

Ignacio (2019) também definiu o tamanho e a geometria irregular, disponibilizada pelo programa Rockfall2, dos três tipos de blocos utilizado em suas análises, nomeados como: Blocos Irregulares Grandes (BIG), Blocos Irregulares Médios (BIM) e Blocos Irregulares Pequenos (BIP). A Figura 19 representa de forma mais detalhada estes blocos.

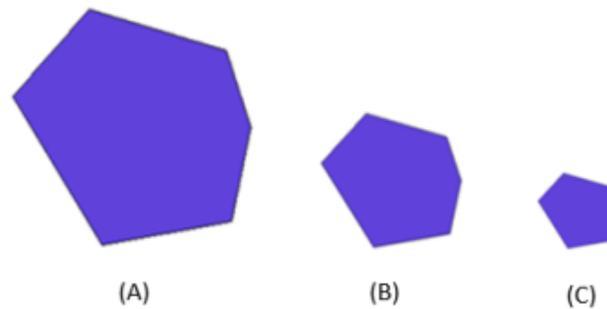


Figura 19 - Formatos dos blocos fornecidos por estudos anteriores (IGNACIO, 2019)

Com base nas informações apresentadas, foi escolhido o bloco BIG de geometria irregular, tal como em Ignácio (2019), com as seguintes características: massa de 7.408,8 kg, peso específico de 27 kN/m<sup>3</sup> e tamanho aproximado de 1,40 m.

### 3.2 Definição da geometria da encosta

Esta pesquisa utilizou o Caso C2 de Ignácio (2019) (Figura 20) em função de sua melhor adequabilidade aos propósitos da pesquisa, i. é., sua geometria refinada e superfícies convexa e côncava mais próximas da realidade.

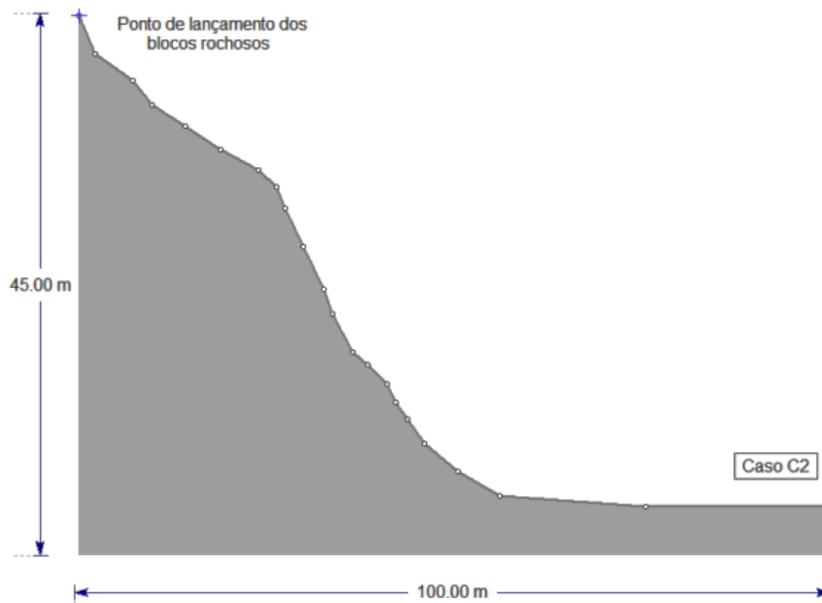


Figura 20 - Encosta estudada no caso C2 por Ignácio (2019)

De modo a investigar a influência mútua das geometrias convexa e côncava no perfil da encosta rochosa, decidiu-se monitorar o ponto mais saliente na parte convexa, denominado como Y (Figura 21), localizado a 30,76 m acima da base do modelo. Doravante, esta superfície será nomeada como Cenário Base.

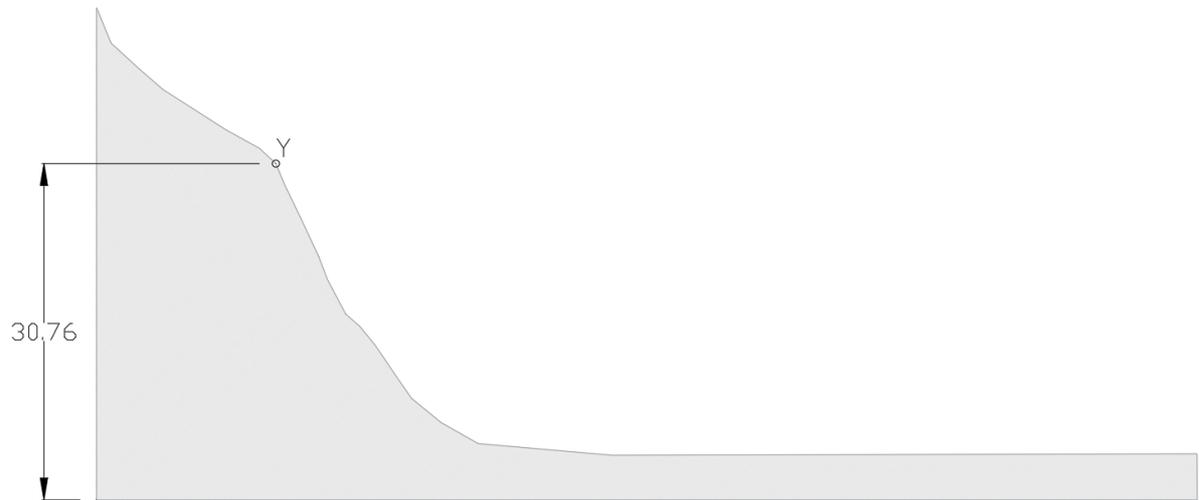


Figura 21 - Cenário base: Encosta definida

O monitoramento deste ponto serviu para alterar a localização da parte convexa ao longo da superfície do talude. Mais exatamente, a variação do ponto Y deu-se ao longo de uma reta com inclinação média da superfície do talude, com ângulo de  $48^\circ$  (Figura 22). Esta reta foi dividida a cada metro, sendo a 19ª repartição correspondente ao ponto Y relacionado à configuração de base.

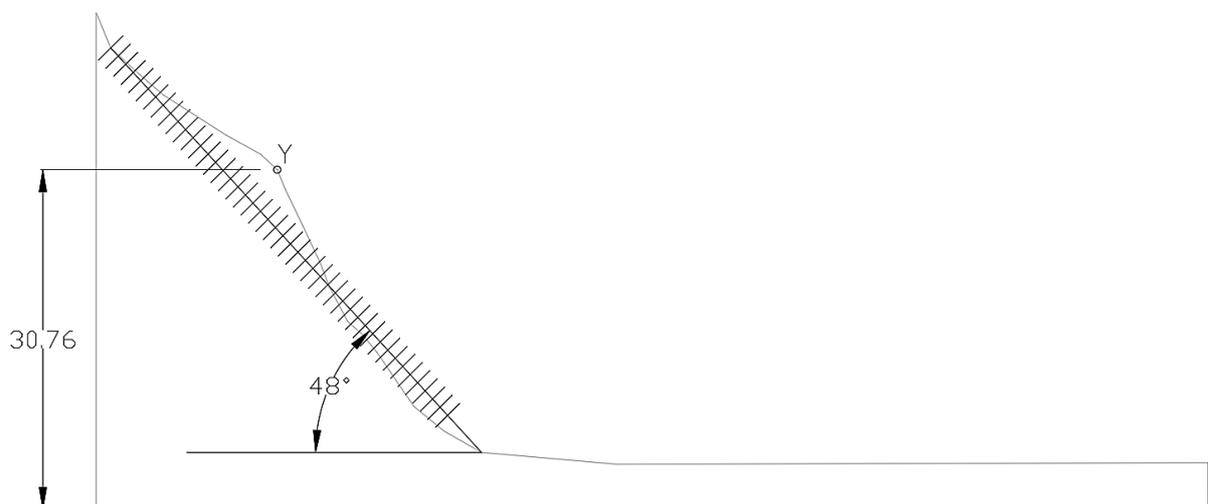


Figura 22 - Método para variação da zona convexa

Os demais cenários foram modelados conforme a divisão adotada e apresentados mais adiante.

### 3.3 Software RocFall2

O *software* RocFall2, versão 8.023, disponibilizada em outubro de 2023 pela Rocscience, tem como finalidade realizar análises da instabilidade de taludes rochosos por queda de blocos visando o projeto de estruturas de estabilização (redes de proteção, etc.). Em especial, nesta pesquisa, o programa foi utilizado para análises estatísticas 2D da queda de blocos em encostas rochosas. Apesar do programa fornecer os dados relativos à energia, velocidade e altura de salto dos blocos de rocha em queda, a pesquisa se limitará a analisar as distribuições estatísticas do número de blocos localizados no pé dos taludes, após o seu desprendimento ao longo da encosta.

Além disso, o programa fornece dois métodos de análise da dinâmica de queda dos blocos: *Lumped Mass* e *Rigid Body*. O método *Lumped Mass*, ou também conhecido como Massa Concentrada, considera que a modelagem do bloco é adimensional, ou seja, o bloco se comporta como uma massa pontual e sem tamanho físico.

Por outro lado, o método *Rigid Body*, considera o bloco como um corpo rígido, com uma dada geometria e os parâmetros relevantes nas simulações. Embora este método tenha sido utilizado nesta pesquisa para a produção dos dados empíricos destinados às análises estatísticas, ele assume que os blocos apresentam uma elevada rigidez e que a área de contato com a encosta rochosa não é alterada, ou seja, não se deforma (ASHAYER, 2007).

Em resumo, o *software* admite simplificações para melhor representar o problema em campo e a adoção de variados parâmetros para aumentar a precisão da análise, como:

- Coeficiente de Rugosidade;
- Coeficiente de Restituição;
- Coeficiente de Resistencia ao Rolamento;
- Atrito dinâmico;
- Rugosidade;
- Ângulo de atrito.

A visualização das trajetórias dos blocos, bem como outros resultados relevantes das análises foram por meio de gráficos gerados pelo próprio *software*. Neste sentido, o programa também oferece a função *Animate Result*, permitindo a visualização, no formato de vídeo, da trajetória de cada bloco estudado.

### 3.4 Configurações adotadas

As configurações adotadas na presente pesquisa foram semelhantes às utilizadas por Ignácio (2019), e estão apresentadas na Figura 23.

## Project Settings

---

### General Settings

Engine	Rigid Body
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode	Number of rocks controlled by seeder
Use tangential CRSP damping	Yes

### Engine Conditions

Maximum steps per rock	20000
Normal velocity cutoff (m/s)	0.1
Stopped velocity cutoff (m/s)	0.1
Maximum timestep (s)	0.01
Switch velocity (m/s)	-1e-09

### Random Number Generation

Sampling method	Monte-Carlo
Material Properties Sampling	Per segment
Random seed	Pseudo-random seed: 12345234

Figura 23 - Configurações de projeto

Os blocos instáveis foram considerados como corpos rígidos e, na configuração de probabilidade, optou-se por utilizar o método de amostragem de Monte Carlo, devido à sua melhor adaptação para a estimativa dos resultados de funções complexas, lidando de forma probabilística.

Na aba de Condições do Mecanismo, os parâmetros de velocidade foram utilizados conforme sugerido pelo *software*. O número de lançamento dos blocos foi de 100.000, semelhante ao das pesquisas anteriores.

Ocorre que, em muitas das simulações efetuadas, o número efetivo de lançamentos aproveitados nas análises foi de 20.000, bem inferior, portanto, aos 100.000 estipulado inicialmente, o que conduziu a estatísticas menos robustas. No entanto, mostrou-se mais preciso do que os 10.000 lançamentos processados por Ignácio (2019).

O ponto de lançamento dos blocos, chamado de semeador, foi inserido no local mais elevado do talude, circulado em vermelho na Figura 24.



Figura 24 - Localização do semeador

### 3.5 Considerações a respeito do *software* RocFall2

Durante a inserção dos dados, quando estabelecida uma grande quantidade de blocos e etapas no programa, além de aumentar o tempo de processamento, o consumo de memória do computador ficava comprometido, impossibilitando o seu uso durante o tempo de execução.

Ao se fazer uma medição do tempo gasto em cada processamento com os atuais dados de entrada, foram contabilizados aproximadamente quatro horas. Quanto mais elevado os

valores, maior o tempo de processamento, a depender dos valores inseridos e das especificações do computador, podendo se dar a não viabilidade das análises correspondentes a um cenário específico.

As configurações de *hardware* do computador utilizado para a pesquisa são apresentadas na Figura 25, estando dentro das características solicitadas pelo *software*.

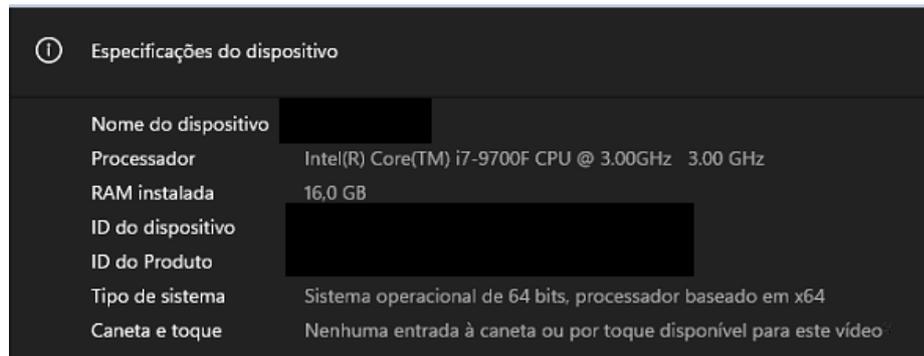


Figura 25 - Especificações do *hardware*

Além disso, ao finalizar o processamento, era exibida uma mensagem de erro, informando as dificuldades em executar todos os casos programados, tal como mostrado na Figura 26.

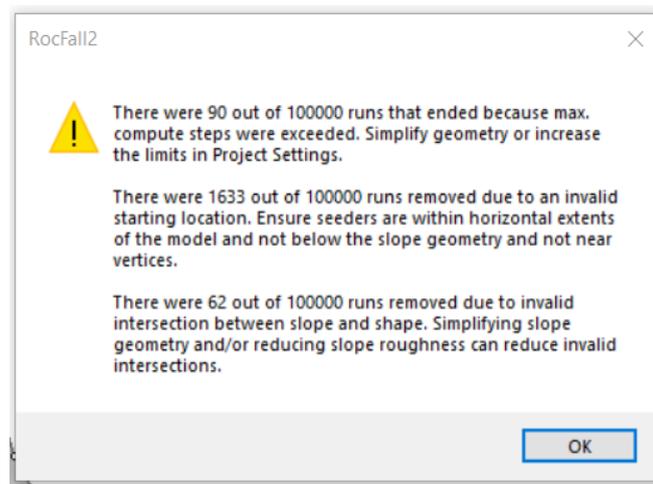


Figura 26 - Mensagem de erro de processamento

No caso específico da Figura 26, a mensagem informa três erros ocorridos durante a análise, sendo que todos estão relacionados à geometria dos blocos e talude, parâmetros de rugosidade das superfícies, etc., e solicita a sua simplificação, o que dificulta a análise em casos mais complexos.

Adicionalmente, a interface no *Output* apresenta eventualmente *delay* na resposta aos comandos solicitados.

Considerando as limitações identificadas no *software* RocFall2 para análises estatísticas e de forma a melhorar a precisão dos resultados, foram utilizadas verificações de *outliers* aos dados brutos fornecidos pelo *software*, filtrando valores discrepantes.

### **3.6 Análise dos dados brutos**

O *software* Grapher, versão 16.2.354, disponibilizada em maio de 2020 pela empresa Golden *Software*, foi utilizado na geração de gráficos 2D, de maneira simplificada e ágil.

Esta pesquisa utilizou, no ajuste aos dados experimentais, distribuições de probabilidade gaussiana e q-exponencial estendida, dadas pelas Equações (9) e (13), respectivamente, cuja a qualidade dos ajustes foi avaliada pelo coeficiente de correlação R.

Em razão das limitações encontradas no *software* RocFall2, avaliou-se a possibilidade do surgimento de valores discrepantes (*outliers*) nos dados experimentais, ocasionando distorções nas análises.

Assim, procedeu-se a uma identificação dos valores discrepantes e inconsistentes, no que resultou uma maior precisão e confiança nos resultados.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Distribuições probabilísticas

Duas principais distribuições de probabilidade foram empregadas no tratamento dos dados experimentais relativos à posição e número de blocos localizados no pé dos taludes. A primeira foi a distribuição gaussiana, apresentada na Equação (9), utilizada para análise dos sistemas fortemente caóticos, com dispersão exponencialmente rápida entre trajetórias inicialmente muito próximas.

A segunda foi a q-exponencial estendida, aplicada a sistemas fracamente caóticos ou complexos, apresentada na Equação (13), com dispersão mais lenta entre trajetórias inicialmente próximas.

O item 3.2 apresenta em detalhes como foi definido e modelado cada cenário de análise. Os dados serão apresentados em dois gráficos, sendo:

- Em escala ln (natural): Os valores são representados proporcionalmente ao seu valor real, facilitando a visualização de tendências e comparações diretas.
- Em escala log (logarítmica): a escala é multiplicativa, e não aditiva, o que permite representar uma ampla gama de valores em uma faixa, apresentando de forma elucidativa os eventos raros que ocorrem na cauda (extremidades) das curvas.

#### 4.1.1 Cenário base

Este cenário, nomeado como caso C2 em Ignácio (2019), deu origem aos demais cenários estudados nesta pesquisa. O ponto mais saliente no trecho convexo está localizado a 30,76 m da base do modelo (Figura 27).

Sua seção transversal possui 45 m de altura e 100 m de comprimento, permitindo que sua base extensa possa acomodar livremente os blocos.

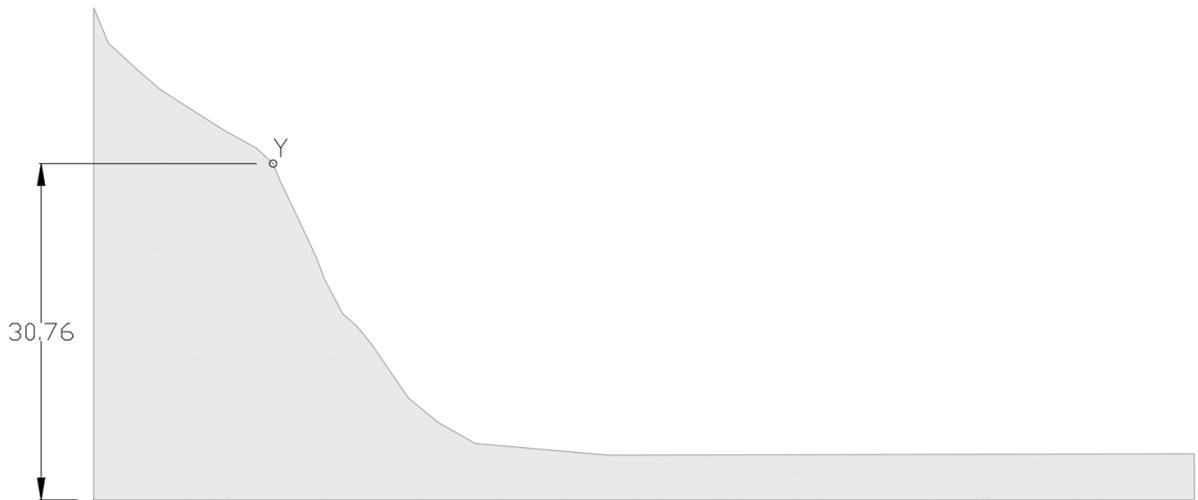


Figura 27 - Cenário base: Encosta definida

A Figura 28 e Figura 29 mostram os resultados encontrados após 20.000 lançamentos. Doravante, as distribuições gaussiana e q-exponencial estendida serão assinaladas pelas cores azul e vermelho, respectivamente.

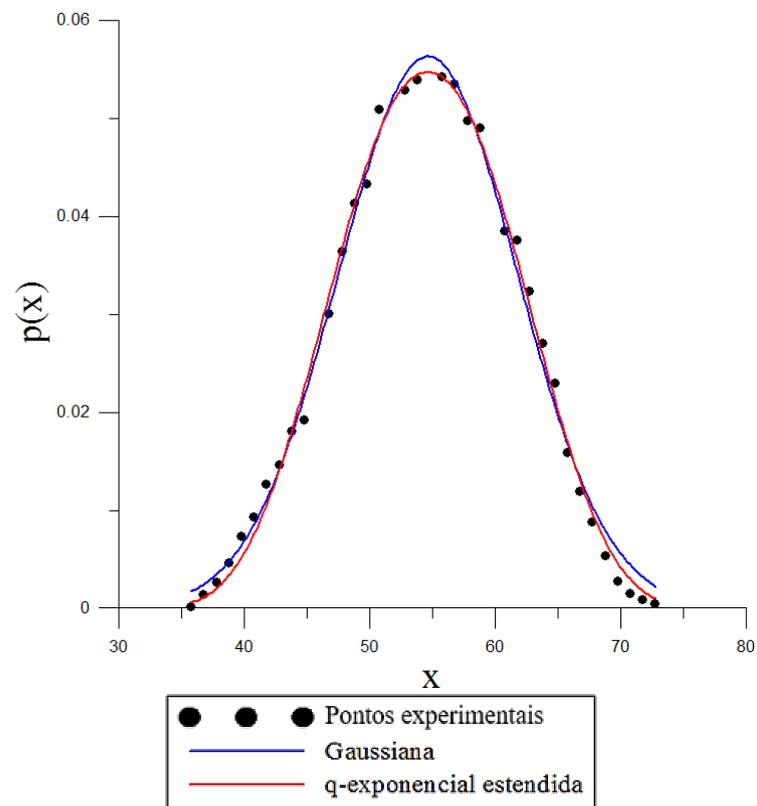


Figura 28 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário Base

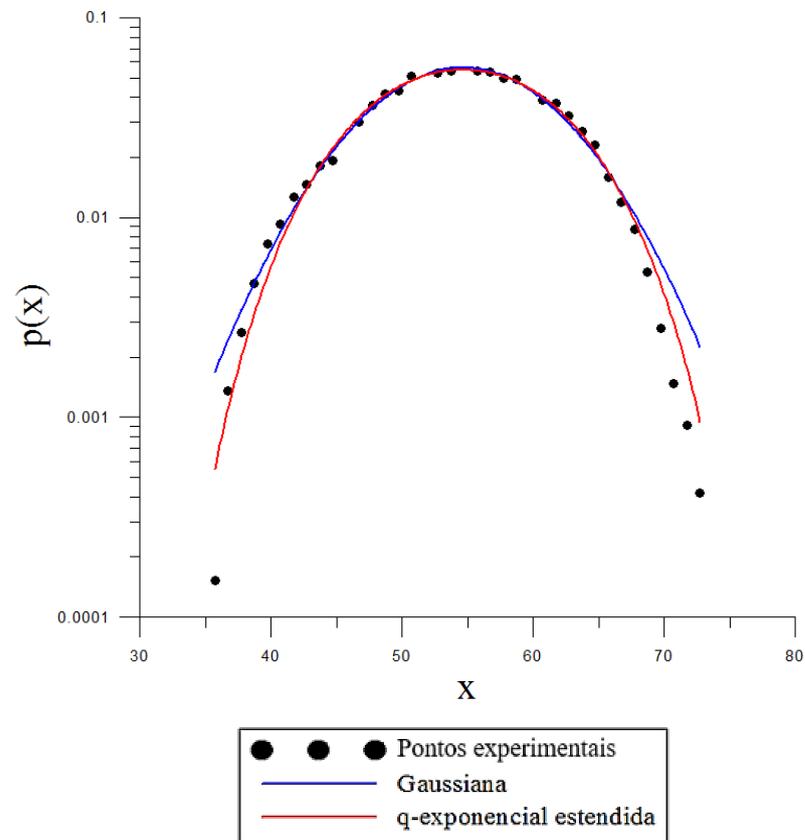


Figura 29 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário Base

A Tabela 8 apresenta os resultados numéricos, obtidos para cada uma das distribuições, com os valores de cada parâmetro.

Tabela 8 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário Base

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
$a'$	0,0547043	$a$	0,0563514
$b'$	10,799346	$b$	10,076701
$c'$	54,624439	$c$	54,632173
$q$	0,8352076		

<b><u>q-exponencial estendida</u></b>		<b><u>Gaussiana</u></b>	
<b>Parâmetros</b>	<b>Valores obtidos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valores obtidos</b>
$\delta$	0,9501157		
Coefficiente de correlação (R)	0,9976617	Coefficiente de correlação (R)	0,9961701

A observação dos resultados permite concluir que a distribuição de probabilidade que melhor se adequou aos dados experimentais foi a q-exponencial estendida - especialmente na região da cauda (Figura 29) - com Coeficiente de correlação (R) de 0,9976617, quando comparado ao valor ligeiramente inferior 0,9961701, referente à distribuição gaussiana.

Apesar da diferença ínfima, a precisão da adequação das distribuições probabilísticas é de extrema importância, pois valores de R próximos a 1 indicam que os coeficientes de ajuste são mais confiáveis. Adicionalmente, os coeficientes entrópicos costumam situar-se em torno de 1, minimizando a variação excessiva entre os valores.

Os parâmetros  $q$  e  $\delta$  apresentaram valores de 0,8352076 e 0,9501157, respectivamente, o que assinala a sua proximidade do valor 1, especialmente o parâmetro  $\delta$ , constituindo uma distribuição próxima da q-gaussiana, cuja estatística é bastante comum nos sistemas complexos.

#### 4.1.2 Cenário 01

Desta feita, o ponto Y mais proeminente, localizado na parte convexa, encontra-se na 14ª repartição a 34,46 m acima da base do modelo (Figura 30). Neste caso, a superfície convexa está localizada adjacente ao topo e a superfície côncava predomina no restante do talude.



Figura 30 - Encosta estudada no Cenário 01

A Figura 31 e Figura 32 mostram os resultados encontrados após 20.000 lançamentos.

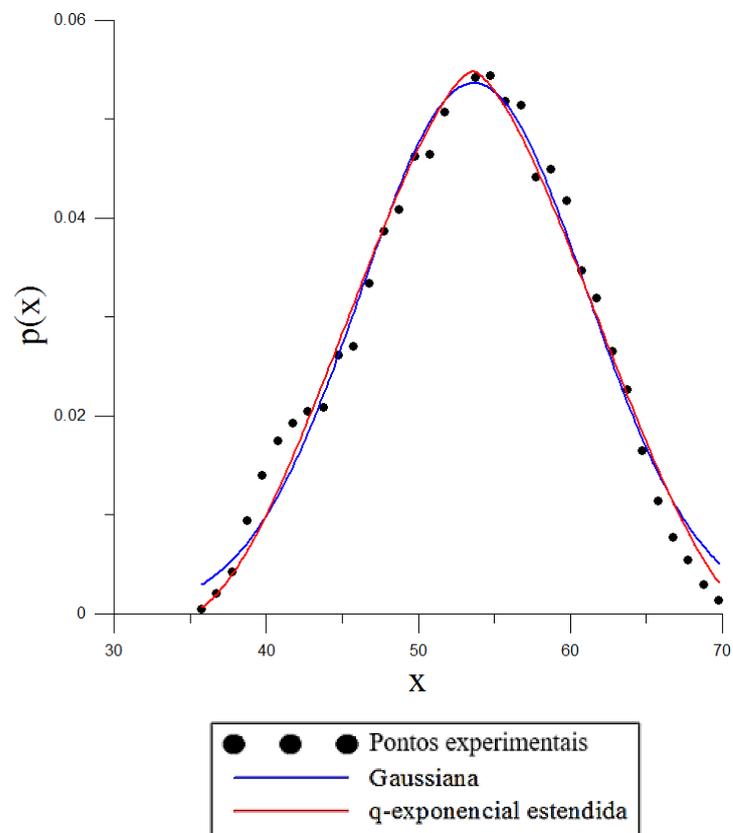


Figura 31 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário 01

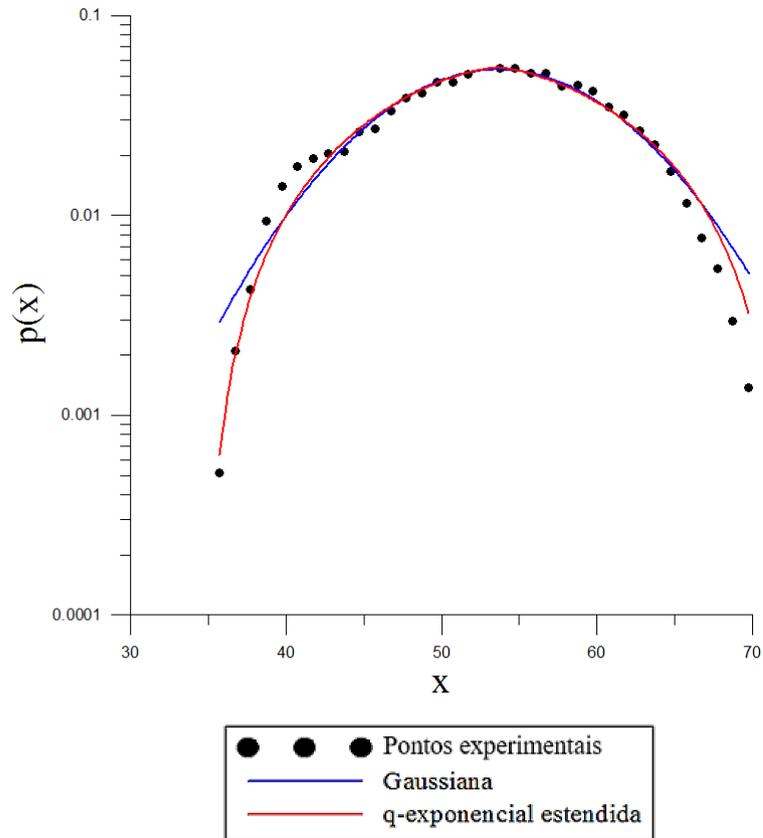


Figura 32 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário 01

A Tabela 9 apresenta os resultados numéricos, obtidos para cada uma das distribuições, com os valores de cada parâmetro.

Tabela 9 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 01

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
$a'$	0,0548021	$a$	0,053766
$b'$	12,5835050	$b$	10,478792
$c'$	53,5811090	$c$	53,652365
$q$	0,4733892		
$\delta$	1,3069695		
Coefficiente de correlação (R)	0,9912835	Coefficiente de correlação (R)	0,9898382

Nota-se que a distribuição de probabilidade que melhor se adequou aos dados foi, novamente, a q-exponencial estendida - especialmente na região da cauda (Figura 32) - com Coeficiente de correlação (R) de 0,9912835, quando comparado ao valor 0,9898382, referente à distribuição gaussiana.

Os parâmetros  $q$  e  $\delta$  apresentaram valores de 0,4733892 e 1,3069695, respectivamente, sugerindo um comportamento fracamente caótico da dinâmica de instabilização dos blocos de rocha.

#### 4.1.3 Cenário 02

O ponto Y mais proeminente e localizado na parte convexa encontra-se agora na 16ª repartição a 32,61 m acima da base do modelo (Figura 33). Neste caso, a superfície convexa fica próxima ao topo do talude, e a superfície côncava predomina no restante da encosta.



Figura 33 - Encosta estudada no Cenário 02

A Figura 34 e Figura 35 mostram os resultados encontrados após 20.000 lançamentos.

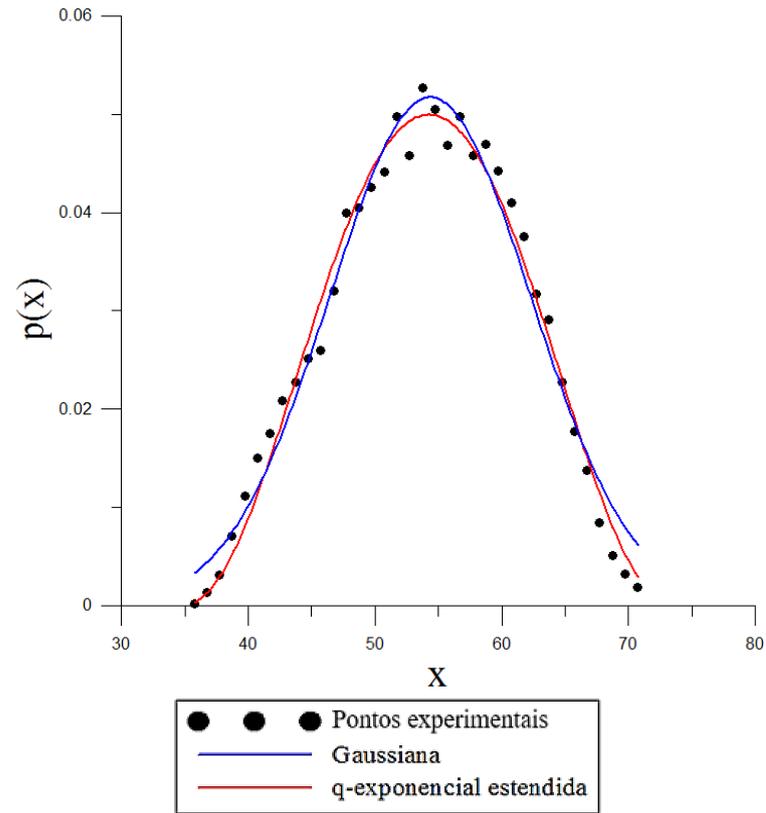


Figura 34 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário 02

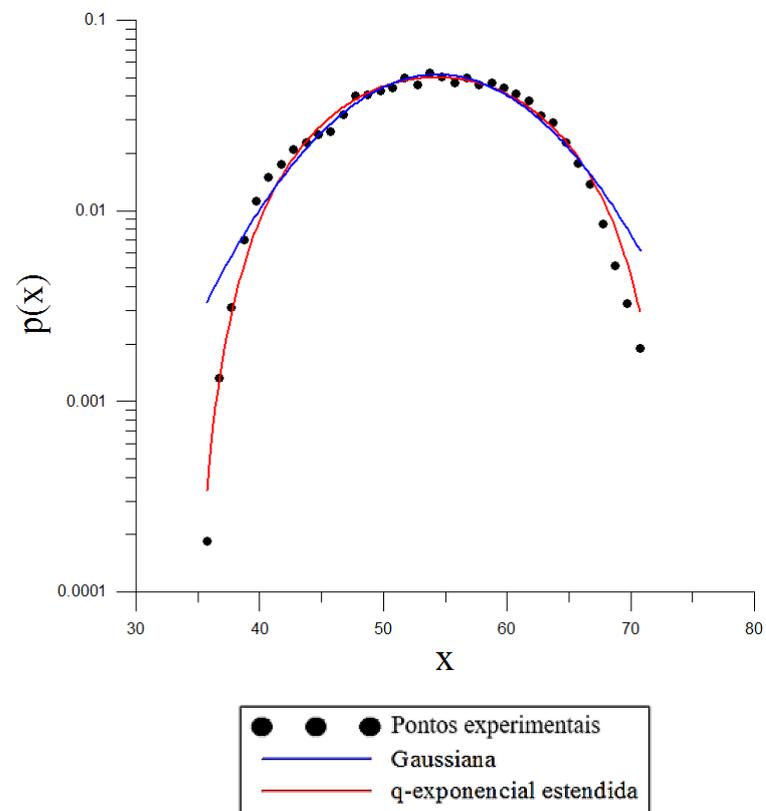


Figura 35 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário 02

A Tabela 10 apresenta os resultados numéricos, obtidos para cada uma das distribuições, com os valores de cada parâmetro.

Tabela 10 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 02

<b><u>q-exponencial estendida</u></b>		<b><u>Gaussiana</u></b>	
<b>Parâmetros</b>	<b>Valores obtidos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valores obtidos</b>
a'	0,0499458	a	0,051876
b'	12,8680620	b	11,157035
c'	54,2492330	c	54,340106
q	0,5817001		
$\delta$	0,9778995		
Coeficiente de correlação (R)	0,9929233	Coeficiente de correlação (R)	0,9876744

Observa-se que a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados foi, novamente, a q-exponencial estendida - especialmente na região da cauda (Figura 35) - com Coeficiente de correlação (R) de 0,9929233, quando comparado ao valor 0,9876744, referente à distribuição gaussiana.

Os parâmetros q e  $\delta$  apresentaram valores de 0,5817001 e 0,9778995, respectivamente, o que indica um comportamento fracamente caótico da dinâmica de instabilização dos blocos de rocha. Cabe assinalar, a proximidade do parâmetro  $\delta$  da unidade, fato comum na estatística de sistemas complexos.

#### 4.1.4 Cenário 03

O ponto convexo acentuado Y está localizado na 29ª repartição a 23,37 m acima da base do modelo (Figura 36). Neste caso, a superfície convexa fica localizada aproximadamente à meia altura do talude, e a superfície côncava predomina acima do ponto Y e junto ao pé do talude.

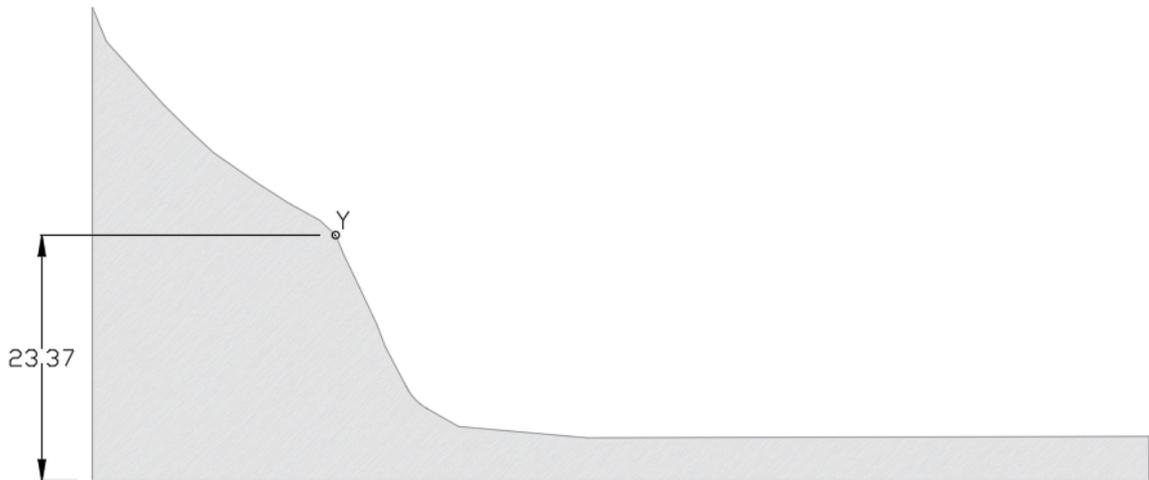


Figura 36 - Encosta estudada no Cenário 03

A Figura 37 e Figura 38 mostram os resultados encontrados após 20.000 lançamentos.

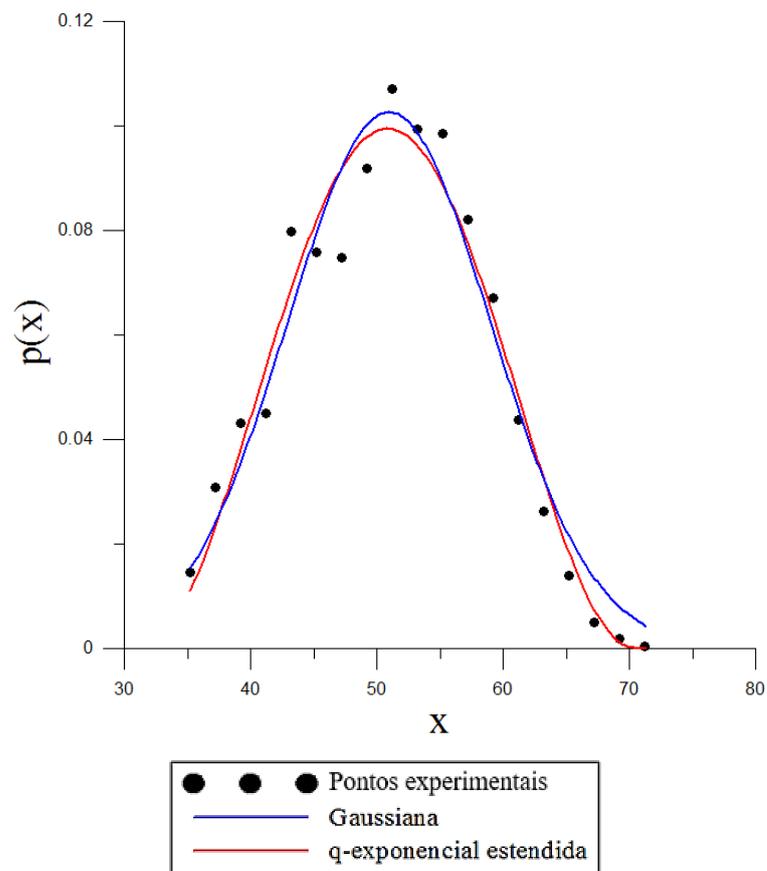


Figura 37 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário 03

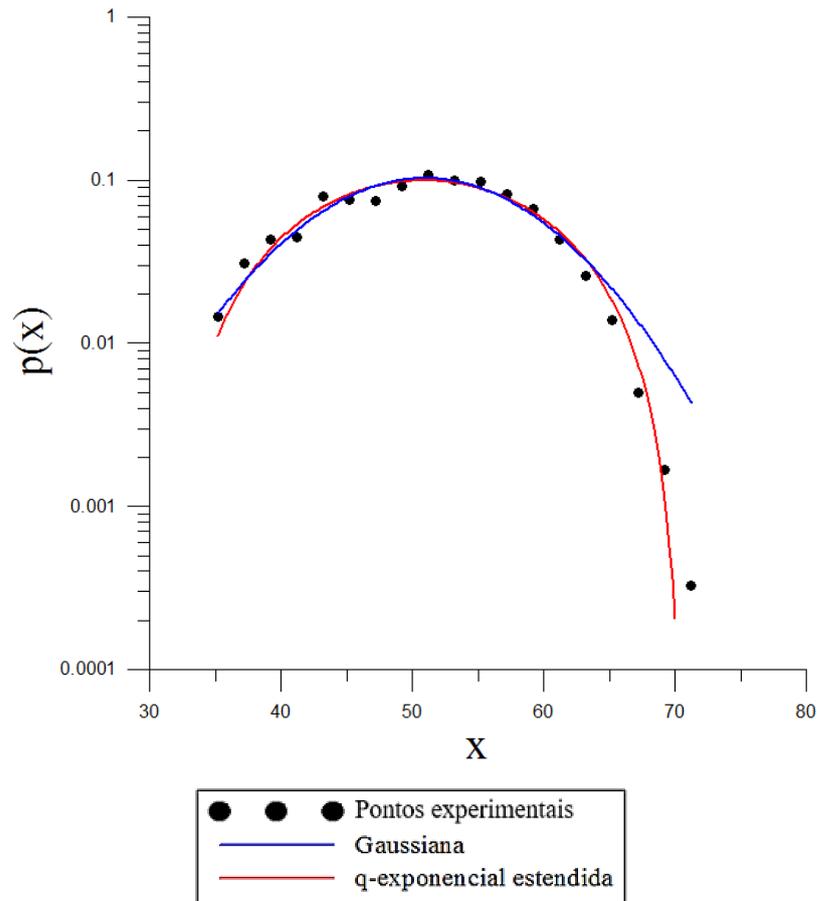


Figura 38 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário 03

Observa-se que, desta feita, o ajuste da região da cauda pela distribuição q-exponencial estendida se dá apenas aproximadamente.

A Tabela 11 apresenta os resultados numéricos, obtidos para cada uma das distribuições, com os valores de cada parâmetro.

Tabela 11 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 03

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
$a'$	0,0993191	A	0,102636
$b'$	13,1442840	B	11,390115
$c'$	50,8439820	C	50,960844
$q$	0,5620416		

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
$\delta$	0,9993509		
Coefficiente de correlação (R)	0,9818190	Coefficiente de correlação (R)	0,9777841

Nota-se que, mais uma vez, a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados experimentais foi a q-exponencial estendida com Coeficiente de correlação (R) de 0,9818190, quando comparado ao valor 0,9777841, referente à distribuição gaussiana.

Os parâmetros  $q$  e  $\delta$  apresentaram valores de 0,5620416 e 0,9993509, respectivamente, o que indica um comportamento fracamente caótico da dinâmica de instabilização dos blocos de rocha.

Cabe assinalar, contudo, a forte aproximação do parâmetro  $\delta$  da unidade. Esta aproximação se deve em razão do ajuste da distribuição q-exponencial estendida na região da cauda, indicada pela seta na Figura 39. No entanto, este assunto será abordado em mais detalhes no item 4.6, que trata da distribuição conjunta entre a q-exponencial estendida e a gaussiana.

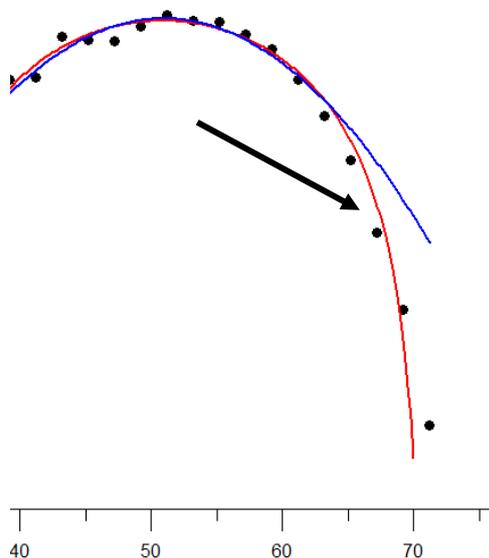


Figura 39 - Ajuste da distribuição q-exponencial estendida na região da cauda

#### 4.1.5 Cenário 04

O ponto convexo acentuado está localizado na 32ª repartição a 21,15 m acima da base do modelo (Figura 40). Neste caso, a superfície convexa está localizada próxima à base do talude e a superfície côncava predomina acima do ponto Y.

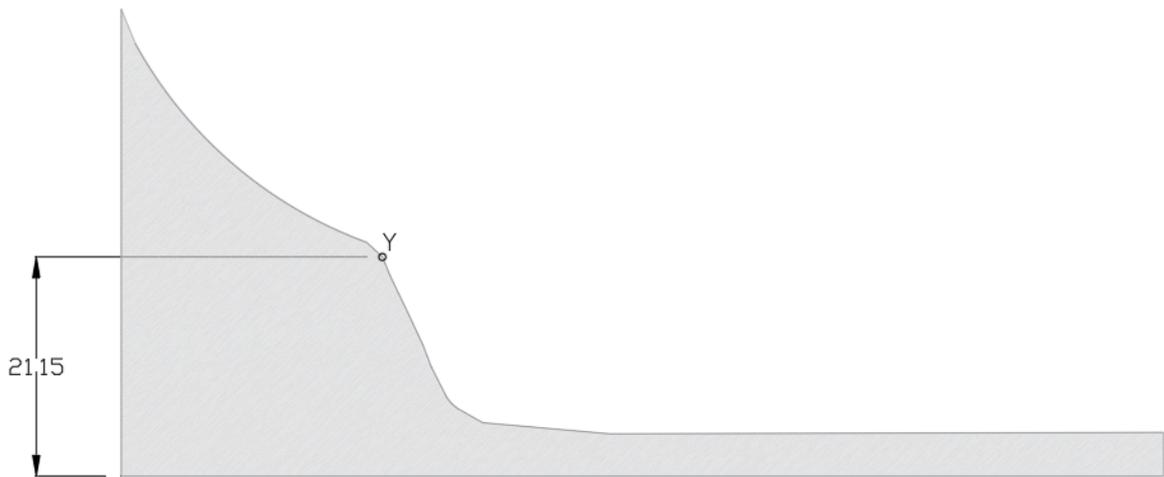
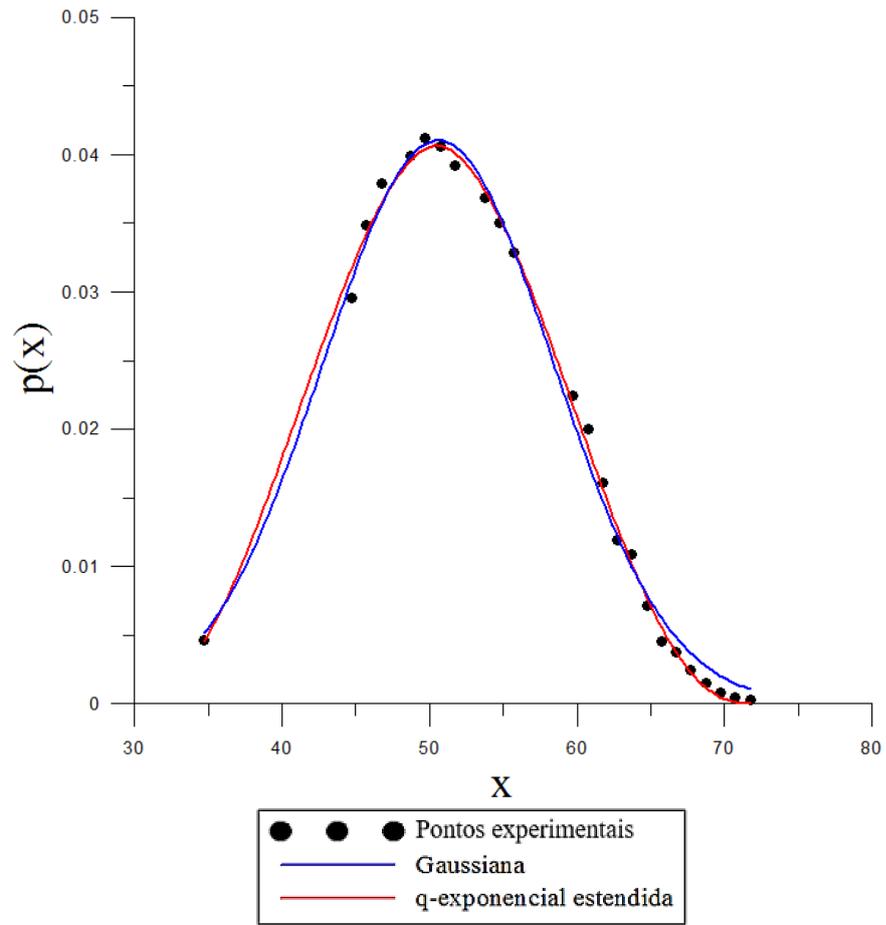


Figura 40 - Encosta estudada no Cenário 04

A Figura 41 e Figura 42 apresentam os resultados encontrados após 20.000 lançamentos.

Figura 41 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário 04

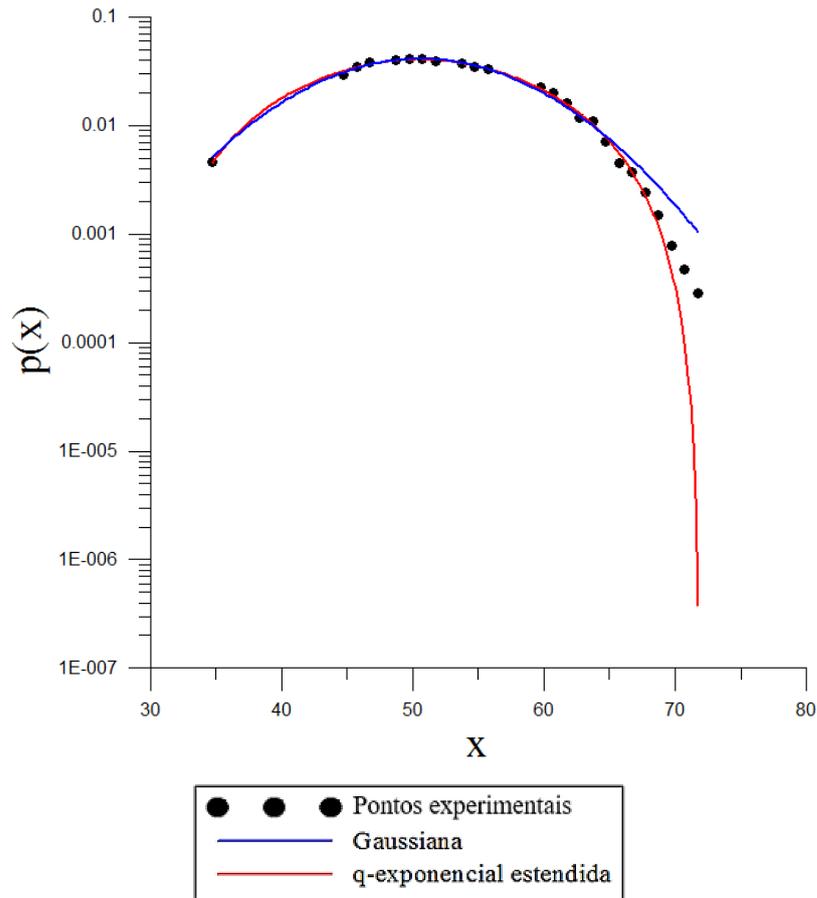


Figura 42 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário 04

Nota-se que o ajuste da região da cauda pela distribuição q-exponencial estendida se dá apenas aproximadamente, tal como no Cenário 03.

A Tabela 12 apresenta os resultados numéricos, obtidos para cada uma das distribuições, com os valores de cada parâmetro.

Tabela 12 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 04

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
$a'$	0,04	$a$	0,04
$b'$	12,82	$b$	11,02
$c'$	50,50	$c$	50,61
$q$	0,59		
$\delta$	1,11		

<b><u>q-exponencial estendida</u></b>		<b><u>Gaussiana</u></b>	
<b>Parâmetros</b>	<b>Valores obtidos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valores obtidos</b>
Coefficiente de correlação (R)	0,998707	Coefficiente de correlação (R)	0,997230

Observa-se que a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados experimentais foi, novamente, a q-exponencial estendida, com Coeficiente de correlação (R) de 0,998707, quando comparado ao valor ligeiramente inferior 0,997230, referente à distribuição gaussiana.

Os parâmetros  $q$  e  $\delta$  apresentaram valores de 0,59 e 1,11, respectivamente, o que indica um comportamento fracamente caótico da dinâmica de instabilização dos blocos de rocha.

Cabe ressaltar novamente a aproximação do parâmetro  $\delta$  da unidade. Esta parece ser a razão do ajuste apenas aproximado da distribuição q-exponencial estendida na região da cauda, apresentada na Figura 42. Isto voltará a ser abordado no item 4.6, que tem a ver com a distribuição conjunta q-exponencial estendida e gaussiana.

#### 4.1.6 Cenário 05

O ponto convexo acentuado está localizado na 46ª repartição a 10,80 m acima da base do modelo (Figura 43). Neste caso, a superfície convexa fica localizada adjacente à base do talude e a superfície côncava predomina acima do ponto Y.

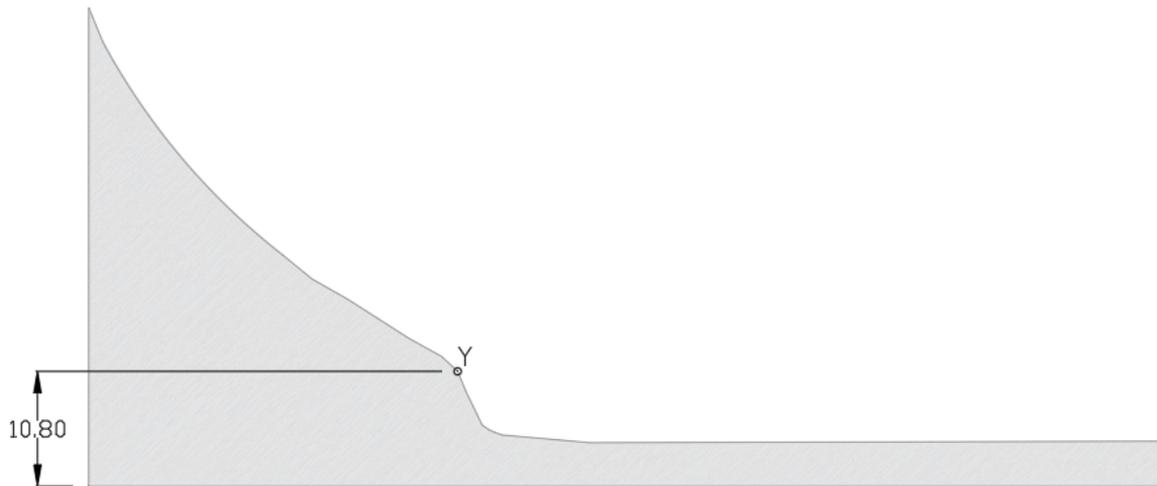


Figura 43 - Encosta estudada no Cenário 05

A Figura 44 e Figura 45 apresentam os resultados encontrados após 20.000 lançamentos.

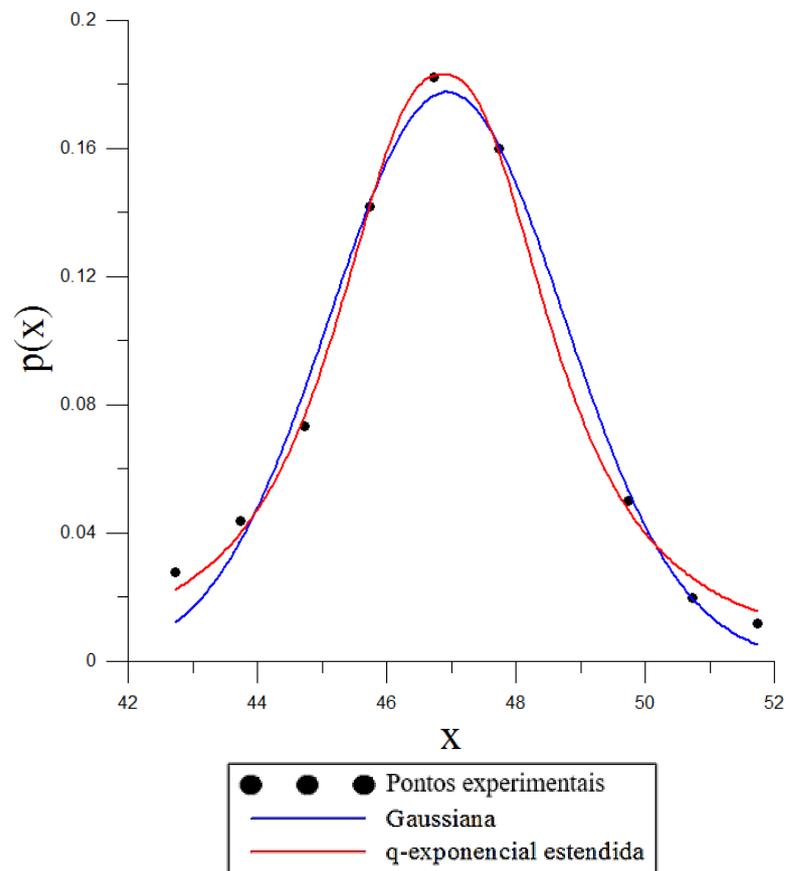


Figura 44 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário 05

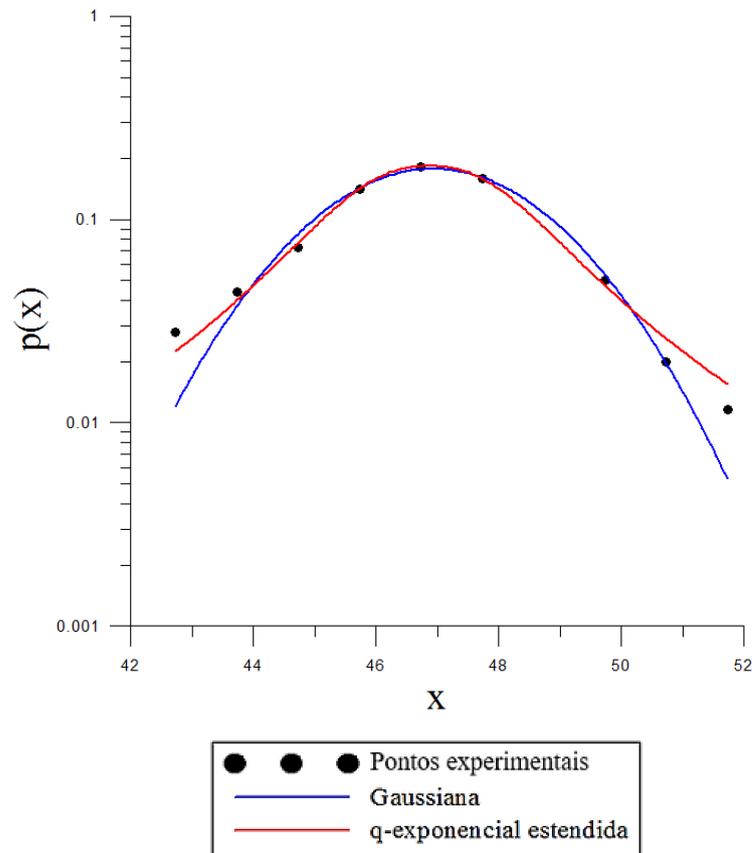


Figura 45 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário 05

Nota-se que o ajuste da região da cauda pela distribuição q-exponencial estendida se dá apenas aproximadamente, tal como nos Cenários 3 e 4.

A Tabela 13 apresenta os resultados numéricos, obtidos para cada uma das distribuições, com os valores de cada parâmetro.

Tabela 13 - Resultados obtidos dos parâmetros utilizados nas distribuições - Cenário 05

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
$a'$	0,18	$a$	0,18
$b'$	1,87	$b$	2,57
$c'$	46,87	$c$	46,93
$q$	1,99		
$\delta$	0,81		

<u>q-exponencial estendida</u>		<u>Gaussiana</u>	
Parâmetros	Valores obtidos	Parâmetros	Valores obtidos
Coefficiente de correlação (R)	0,9984824	Coefficiente de correlação (R)	0,9928663

Nota-se que a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados experimentais foi a q-exponencial estendida com Coeficiente de correlação (R) de 0,9984824, quando comparado ao valor ligeiramente inferior 0,9928663, referente à distribuição gaussiana.

Os parâmetros  $q$  e  $\delta$  apresentaram valores de 1,99 e 0,81, respectivamente, o que indica um comportamento fracamente caótico da dinâmica de instabilização dos blocos de rocha.

Ressalte-se novamente o ajuste apenas aproximado da região da cauda pela distribuição q-exponencial estendida. Isto voltará a ser abordado no item 4.6, que tem a ver com a distribuição conjunta q-exponencial estendida e gaussiana.

#### **4.2 Variação dos parâmetros entrópicos $q$ e $\delta$ com a posição do ponto convexo mais proeminente Y**

A Figura 46 e Figura 47 mostram a variação dos parâmetros  $q$  e  $\delta$  com a altura da base do talude em relação ao ponto mais saliente do trecho convexo.

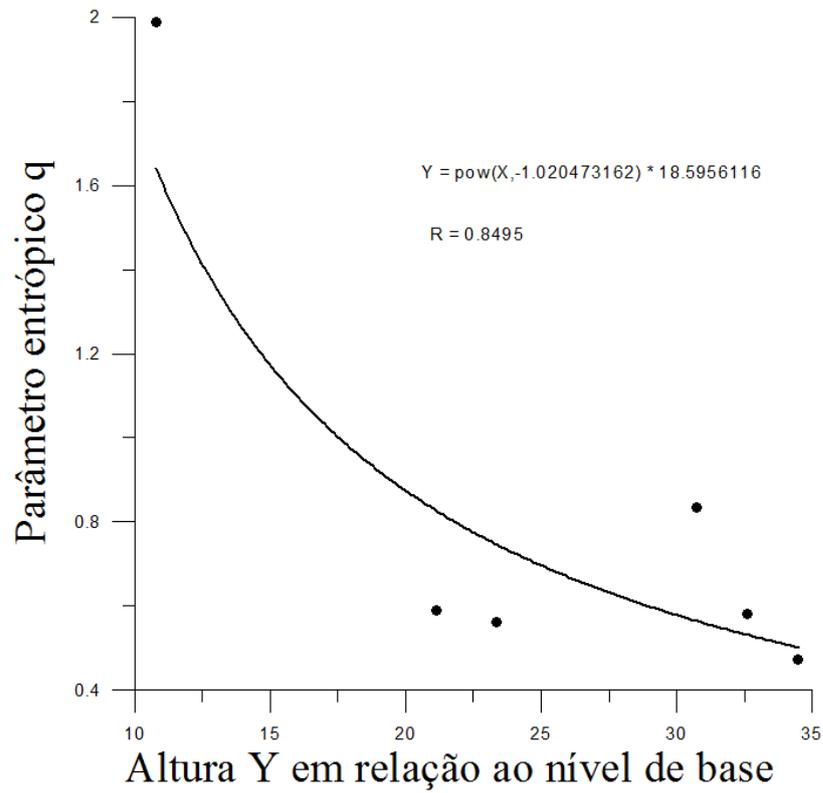


Figura 46 - Variação do parâmetro entrópico  $q$  com a altura  $Y$  em relação ao nível de base

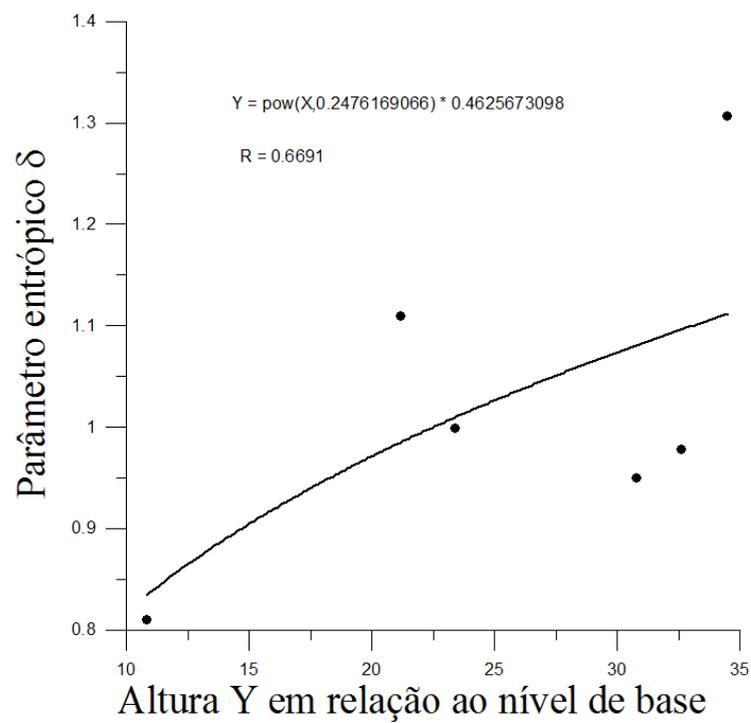


Figura 47 - Variação do parâmetro entrópico  $\delta$  com a altura  $Y$  em relação ao nível de base

Observa-se que o parâmetro  $q$  apresenta uma tendência de diminuição com o aumento da altura do ponto  $Y$ , mais proeminente da parte convexa, ao passo que o parâmetro  $\delta$  mostra tendência oposta, ou seja, de aumento com o aumento de  $Y$ .

Os gráficos sugerem ainda que a estatística gaussiana teria vigência para valores da altura  $Y$  distintos, quer se trate de  $q$  ou  $\delta$ . Assim, para o primeiro,  $Y$  deveria estar entre 17 a 20 m, enquanto que, para o segundo, entre 20 e 25 m, pois nestas regiões  $q$  e  $\delta$  estariam com valores próximos da unidade.

Ademais, os gráficos sugerem marcadamente a vigência de estatísticas não-gaussianas no fenômeno estudado, com todas as implicações decorrentes desta constatação (p/ex., a cessação da validade do Teorema do Limite Central clássico – TSALLIS; UMAROV, 2022 e TSALLIS, 2023).

### **4.3 Comparação dos resultados do Cenário Base com os do perfil C2 de Ignácio (2019)**

A comparação dos resultados do caso C2 da pesquisa de Ignácio (2019), com os resultados obtidos no Cenário Base desta pesquisa, estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Comparação do Caso C2 e Cenário Base

	Parâmetros	Valores apresentados por Ignácio (2019)	Cenário base
q-exponencial estendida	a'	0,1041	0,0547043
	b'	10,9006	10,799346
	c'	54,6392	54,624439
	q	0,9803	0,8352076
	$\delta$	0,8826	0,9501157
	Coeficiente de correlação (R)	0,9982	0,9976617
	Gaussiana	A	0,1073
B		10,6303	10,076701
C		54,6382	54,632173
Coeficiente de correlação (R)		0,9965	0,9961701

A observação da Tabela 14 sugere que, apesar de pequenas variações, os valores estão muito próximos.

Esta pequena variação pode ser explicada principalmente pelo fato das considerações feitas na modelagem, como a quantidade de etapas por rochas, nomeados no *software* como *maximum steps per rock*. Ignácio em sua tese utilizou 10.000 steps, enquanto neste foram utilizadas 20.000 steps.

Além disso, a versão do *software* utilizada nesta pesquisa é mais recente, ou seja, os resultados podem apontar para pequenas diferenças devidas a eventuais correções, novas funcionalidades, recursos e desempenho. No entanto, ambos os conjuntos de valores sugerem comportamentos fracamente caóticos.

Apresentando valores de  $q$  e  $\delta$  próximos da unidade, que apesar de se aproximar da distribuição gaussiana, não se pode afirmar que o sistema se configura como fortemente caótico.

#### 4.4 Condições de vigência de estatísticas não-gaussianas no problema da queda de blocos

Conforme se assinalou anteriormente, estatísticas em lei de potência são observadas em fenômenos físicos caracterizados por memória espacial e temporal de longo alcance, com a presença de algum tipo de dissipação de energia presente no fenômeno em questão.

Os resultados apresentados anteriormente corroboram plenamente estas afirmações. Mais especificamente, distribuições q-exponenciais estendidas foram observadas nas situações em que os blocos se mantiveram muito tempo em contato com a encosta rochosa, numa troca permanente de informação.

Além disso, a energia total que governa o fenômeno (potencial mais cinética) mostrou-se insuficiente, na região localizada acima do ponto Y, para arremessar os blocos instáveis para longe da encosta rochosa, mantendo-os em contato com o paredão rochoso por todo o movimento.

Isto sugere a possibilidade da ocorrência de choques parcialmente elásticos dos blocos instáveis com a encosta, ditados pelos coeficientes de restituição normal e tangencial inferiores à unidade, tal como mostrado em Araújo (2021), conduzindo ao amortecimento da energia disponível do sistema, e reduzindo efeitos de inércia no movimento dos blocos, mantendo-os como que ligados à encosta a maior parte do tempo.

A Figura 28

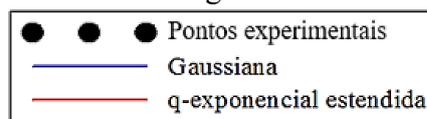


Figura 28 - Gráfico  $p(x)$  versus  $x$  - Cenário Base

, Figura 29, Figura 31, Figura 32, Figura 34 e Figura 35 relativas aos Cenários Base, 1 e 2, ilustram que a distribuição q-exponencial estendida ajusta-se bem aos pontos experimentais, especialmente em sua cauda. Nestes casos, é patente a total impropriedade da distribuição gaussiana.

#### 4.5 Condições de vigência de estatísticas gaussianas no problema da queda de blocos

Por outro lado, como já assinalado, estatísticas gaussianas são observadas em fenômenos físicos caracterizados por memória espacial e temporal de curto alcance – ou total ausência delas.

Especificamente, no fenômeno da queda de blocos, isto se traduz pelo pouco tempo de contato com a encosta rochosa dos blocos em queda, havendo, por conseguinte, pouca troca de informação entre os blocos e a encosta.

Além disso, a energia total que governa o fenômeno (potencial mais cinética) é suficiente para arremessar os blocos instáveis para longe da encosta rochosa, o ponto Y constituindo-se num trampolim.

Isto sugere a atuação de efeitos de inércia de grande magnitude, com choques aproximadamente elásticos e esporádicos entre os blocos e o paredão rochoso (Araújo, 2021).

#### **4.6 Condições de vigência de estatísticas resultantes da combinação linear entre distribuições gaussianas e q-exponenciais estendidas no problema da queda de blocos**

Desta feita, o fenômeno de queda é governado pelos efeitos conjuntos descritos nos dois itens anteriores, tanto pela dinâmica a montante (acima) do ponto de lançamento Y (o mencionado “efeito trampolim”), como pela dinâmica de jusante deste mesmo ponto. Mais pormenorizadamente, nas situações em que a dinâmica de montante mantém os blocos em contato com a encosta (condição de vigência de estatísticas não-gaussianas), e a de jusante arremessa-os para longe do paredão rochoso (condição de vigência de estatísticas gaussianas), o resultado final encosta abaixo traduz-se como uma combinação destes efeitos conjuntos. Dado pela expressão 14.

$$p(x) = a \left[ 1 - (1 - q) \left( \frac{x' - c'}{b'} \right)^{\frac{2}{\delta}} \right]^{\frac{1}{1-q}} + a \left[ e^{-\left( \frac{x-c}{b} \right)^2} \right] \quad (14)$$

A Figura 48, Figura 49 e Figura 50, relativas aos Cenários 3, 4 e 5 ilustram bem esta perspectiva, em que a distribuição combinada é mostrada, para efeitos de comparação com as distribuições gaussiana e q-exponencial estendida, todas em escala semi-log.

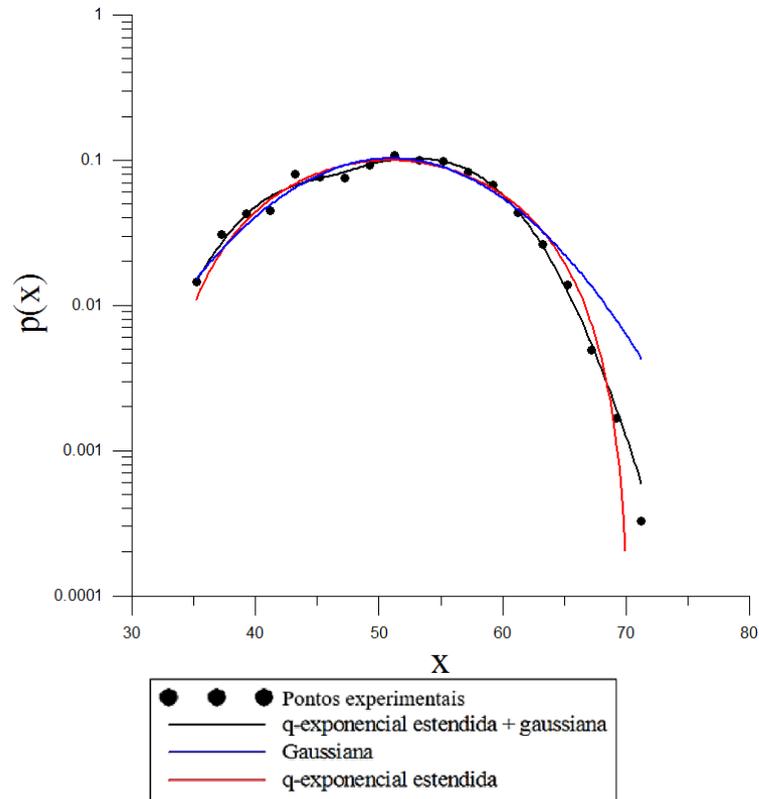


Figura 48 - Gráfico  $\log(p(x))$  versus  $x$  - Cenário 03

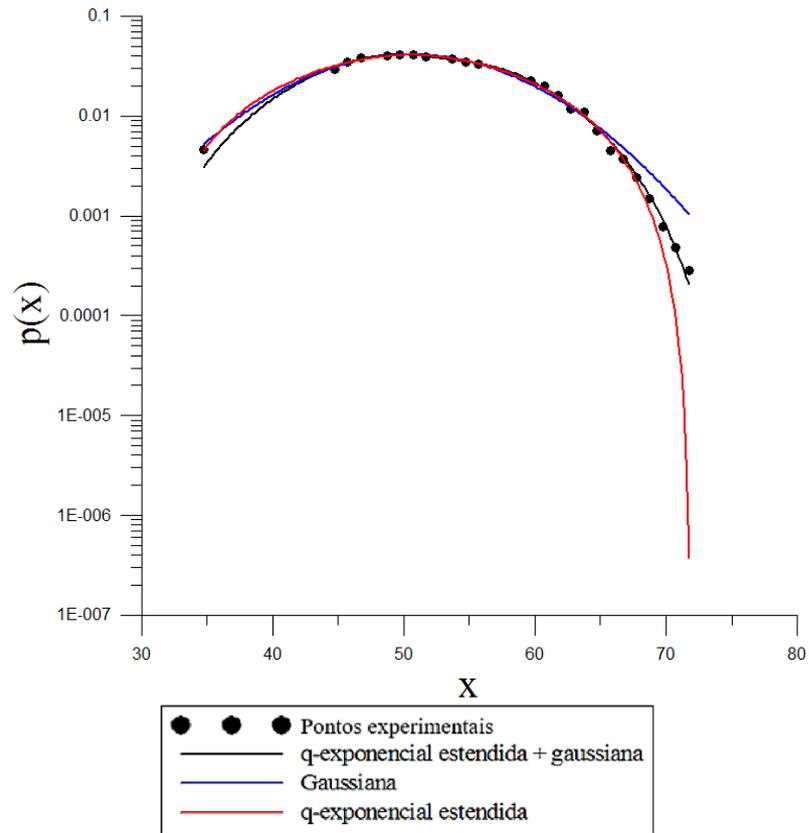


Figura 49 - Gráfico log(p(x)) versus x - Cenário 04

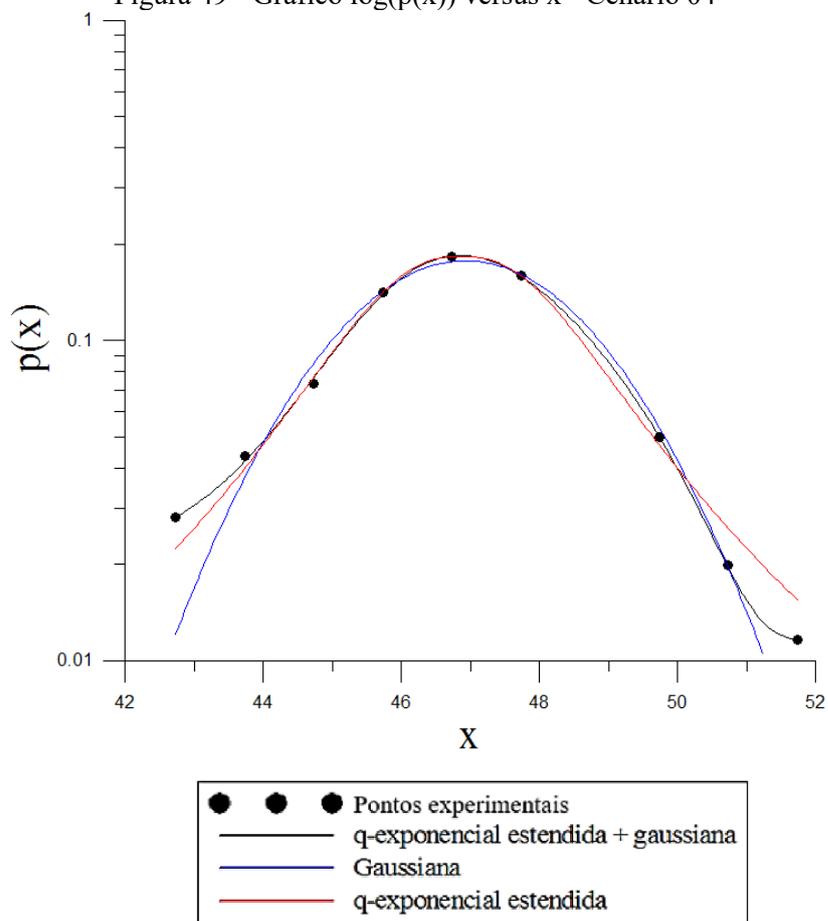


Figura 50 - Gráfico log(p(x)) versus x - Cenário 05

As Figuras anteriores sugerem que a distribuição combinada retrata mais fielmente os dados experimentais oriundos dos Cenários 3, 4 e 5, razão pela qual acredita-se que ambas as distribuições gaussiana e q-exponencial estendida estejam atuando conjuntamente no fenômeno de queda de blocos.

Os parâmetros de ajuste para cada caso são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores obtidos resultantes do somatório das distribuições

<b>Parâmetros</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>	<b>Cenário 5</b>
a'	4,9872	0,0457	0,4707
b'	7,4325	11,0690	4,5152
c'	49,8414	51,0351	49,8603
q	1,0067	0,7659	2,8460
$\delta$	1,0025	1,1171	0,3414
a	-4,8910	-0,0062	-0,5475
b	-7,3655	4,0094	5,8351
c	49,8191	52,5424	51,4294
Coefficiente de correlação (R) - R	0,9905	0,9991	0,9996

Como se pode constatar, os ajustes são muito mais precisos, especialmente na região das caudas das distribuições, retratados pelos coeficientes de correlação mais elevados.

Ressalte-se que os resultados das análises dos dados experimentais levados a cabo nesta pesquisa sugerem fortemente que a posição relativa das regiões côncavas e convexas, integrantes de uma dada geometria de uma encosta natural, tem importância acentuada na resposta dos blocos encosta abaixo e suas respectivas estatísticas. Ou seja, a ordem em que se apresentam na constituição de uma dada geometria de uma encosta natural tem influência na estatística que governa o fenômeno.

## 5. CONCLUSÕES

As principais conclusões a que se chega ao final desta pesquisa são as seguintes:

- A análise estatística do fenômeno de queda de blocos constitui-se numa ferramenta importante para a análise deste intrincado fenômeno, uma vez que possibilita descrever certas regularidades e reiteraões que uma análise determinística não estaria em condições de realizar, especialmente num fenômeno que depende de tantos parâmetros;
- Além disso, a análise estatística possibilitou esclarecer os regimes de vigência de estatísticas gaussianas e não-gaussianas. Especificamente, estatísticas não-gaussianas ocorrem com frequência em fenômenos de memória espacial e temporal de longo alcance, em que os blocos rochosos instáveis se mantêm em contato com a encosta, efetuando uma troca contínua de informações e tendo a possibilidade de dissipar a energia total responsável pela sua dinâmica;
- Por outro lado, estatísticas gaussianas caracterizam-se por descreverem sistemas físicos governados por memória espacial e temporal de curto alcance, em que os blocos passam muito pouco tempo em contato com a encosta rochosa, reduzindo consideravelmente a possibilidade da troca de informações entre os blocos e o paredão rochoso;
- Esta pesquisa também abordou o desempenho da distribuição estatística resultante da combinação linear das distribuições gaussiana e q-exponencial estendida, mostrando-se mais apropriada para descrever fenômenos raros, situados na cauda das distribuições;
- As dificuldades envolvendo as simulações no Programa RockFall2 também foram assinaladas, particularmente quando se requer um número muito grande de lançamentos de blocos, visando a uma estatística dos dados experimentais mais robusta. Neste sentido, percebe-se que o referido programa foi concebido para análises determinísticas voltadas para o projeto de estruturas de contenção (impacto) ditadas pela boa prática da engenharia;
- As situações analisadas nos diferentes cenários possibilitaram avaliar o bom desempenho das estatísticas não-gaussianas, bem como das gaussianas, estas últimas especialmente na região das ogivas das distribuições. Em especial, os Cenários Base, 1 e 2 permitiram observar o bom desempenho das distribuições q-exponenciais estendidas, o que configura fenômenos de instabilização classificados como fracamente caóticos (complexos);

- As situações analisadas nos Cenários 3, 4 e 5 também sugeriram respostas concordantes com estatísticas de sistemas complexos, exceto na região de suas caudas, caracterizadas pelos eventos raros, em que a distribuição combinada se mostrou mais eficiente;
- A variação dos parâmetros entrópicos  $q$  e  $\delta$  sugere que o primeiro tende a ter seus valores reduzidos quando a altura do ponto mais proeminente da região convexa  $Y$  tende a aumentar, enquanto o oposto se passa com aquele segundo parâmetro, tendendo a ter seus valores aumentados quando do aumento da altura do ponto  $Y$ ;
- Por último, vale ressaltar que os resultados das análises dos dados experimentais levados a cabo nesta pesquisa sugerem fortemente que a posição relativa das regiões côncavas e convexas, integrantes de uma dada geometria de uma encosta natural, tem importância acentuada na resposta dos blocos encosta abaixo e em suas respectivas estatísticas. Ou seja, a ordem em que se apresentam na constituição de uma dada geometria de uma encosta natural tem influência na estatística que governa o fenômeno.

### **5.1 Sugestões para pesquisas futuras**

Alguns temas voltados para futuras pesquisas podem ser sugeridos, dentre os quais:

- Investigação do aumento significativo (da ordem de 500.000 a 1.000.000) do número de lançamento nas distribuições estatísticas utilizadas e observar eventuais discrepâncias nos resultados, quando comparados aos já estabelecidos por esta linha de pesquisa;
- Utilização de outras distribuições estatísticas (beta, p/ex.) na descrição dos dados experimentais;
- Esclarecer mais detalhadamente o papel dos perfis convexos e côncavos na dinâmica dos blocos instáveis;
- Investigar a divergência entre trajetórias de lançamento inicialmente muito próximas e sua evolução de sua separação com o tempo;
- Incorporar a influência da fragmentação dos blocos instáveis na resposta estatística do fenômeno;
- Incorporar a análise em três dimensões do fenômeno de queda de blocos e investigar o surgimento de eventuais novos comportamentos não captados pela análise bidimensional.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. (2009). NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.
- ARAUJO, L. D. (2021). Estudo da cariação do coeficiente de restituição na resposta das encostas às quedas de blocos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*, p. 157.
- ASHAYER, P. (2007). Application of rigid body impact mechanics and discrete element modeling to RockFall simulation. *Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto*.
- AZEVEDO, I. C., & MARQUES, E. A. (2002). *Introdução à Mecânica das Rochas*. Viçosa: UFV.
- CANDIA, R. C. (2011). Uma contribuição ao estudo de acidentes fatais por queda de rochas: o caso da mineração peruana. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*. Acesso em 08 de 09 de 2023, disponível em <https://pdfs.semanticscholar.org/c512/2c1b8878f9ff44f1dd6a20c12a8649e68a43.pdf>
- DONATH, F. A. (1964). Strength variation and deformational behavior in anisotropic rocks. (W. R. Judd, Ed.) *State of Stress in the Earth's Crust*, 281-300.
- DURÃO, L. M. (2015). Entropia Estatística de Sistemas Abertos. *Instituto de Física "Gleb Wataghin"*, p. 99.
- DUTT-ROSS, S. (2020). *Manual de Análise de Dados*. Rio de Janeiro: mimeo.
- GAZIEV, E., & ERLIKHMAN, S. (1971). Stresses and strains in anisotropic foundations. *Proceedings Symposium on Rock Fracture*.
- GEO-RIO. (2000). *Manual Técnico de Encostas - Análise e Investigação* (2ª ed., Vol. 1). Rio de Janeiro: Insitutek.
- GERSCOVICH, D. M. (2016). *Estabilidade de Taludes* (2ª ed.). São Paulo: Oficina de Textos.
- GERSCOVICH, D. M. (2022). *Capítulo 1 - Tipos de Talude- Movimentos de Massa*. Rio de Janeiro.
- GLEICK, J. (1991). *Caos: A criação de uma nova ciência* (4ª ed.). (W. Dutra, Trad.) Rio de Janeiro: Campus.
- GOLDEN SOFTWARE. (1986). *Grapher, V. 16.2.354*. (Golden Software) Acesso em 04 de 06 de 2024, disponível em <https://www.goldensoftware.com/products/grapher/>
- GOODMAN, R. E. (1989). *Introductions to Rock Mechanics* (2ª ed.). Canada: Wiley.
- GUIDICINI, G., & NIEBLE, C. M. (2019). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação* (2ª ed.). São Paulo: Blucher.
- HOEK, E. (1983). Strength of jointed rock masses. *Géotechnique*, 23, pp. 187-223.

- HOEK, E. (1990). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. 27. Acesso em 24 de 06 de 2024, disponível em <https://www.sciencedirect.com/sdfe/pdf/download/eid/1-s2.0-0148906290943330/first-page-pdf>
- HOEK, E. (1990). Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion.
- HOEK, E. (1998). Reliability of Hoek-Brown Estimates of Rock Mass Properties and their Impact on Design. *IN. J. Rock Mech. Min. Scr.*, 35.
- HOEK, E., & BROWN, E. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*.
- HOEK, E., & BROWN, E. (2018). *Hoek and Brown Failure Criterion and GSI* (Vol. 11). Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- HOEK, E., & BROWN, E. (2018). The Hoek-Brown failure criterion and GSI.
- HOEK, E., & MARINOS, P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and Rocks*. Acesso em 24 de 06 de 2024, disponível em <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/2007-The-Development-of-the-Hoek-Brown-Failure-Criterion.pdf>
- HOEK, E., CARRANZA-Torres, c., & CORKUM, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. *Proc. NARMS-TAC Conference*.
- HOEK, E., MARINOS, P., & BENISSI, M. (1998). *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation*. (B. o. Environment, Editor) Acesso em 24 de 06 de 2024, disponível em Scopus: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0001368592&origin=inward&txGid=20b3e6fa960e02a7e69312cbd575c817>
- HOEK, E., WOOD, D., & SHAH, S. (1992). A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. *International ISRM Symposium on Rock Characterization*.
- HUDSON, J. A., & HARRISON, j. P. (1997). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. London: Elsevier Science.
- IBÁÑEZ, J. J., ALBA, S. d., & GARCÍA, A. A. (1995). Aportaciones del Caos a las Ciencias de la Terra ( Estructura, Evolución y Dinámica del Modelados Terrestre). *Centro de Ciencias Medioambientales*, p. 80.
- IGNACIO, F. V. (2019). Aplicação da Teoria do Caos no estudo da queda de blocos rochosos no Morro do Cantagalo, Rio de Janeiro – RJ. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*, p. 127.
- JAEGER, J. C. (Fevereiro de 1960). Shear failure of anisotropic rocks. *Geological Magazine*, 97, 65-72.
- LIMA, I. P. (março de 2021). Entropia de Tsallis Aplicada à Inversão Sísmica. *PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE PETRÓLEO – PPGCEP*, p. 77.

- MANDELBROT, B. B. (1977). *The fractal geometry of nature*. São Francisco: W. H. Freeman and Company.
- MARQUES, J. C., & CARDOSO, A. S. (2013). Estabilização de taludes - Casos de Obra em Portugal. *VI Conferência Brasileira de Encostas*. Angra dos Reis.
- MARQUES, M. S., & SANTANA, W. S. (2020). What is entropy? -reflections for science teaching. *Research, Society and Development*, p. 20.
- Menezes Filho , A. P. (1993). Aspectos Geológico-Geotécnicos de um Perfil de Alteração de Gnaisse Facoidal. *Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio*.
- MENEZES FILHO, A. P. (2003). Não-Extensividade Termodinâmica, Invariância Discreta de Escala e Elasto-Plasticidade: Estudo Numérico de um Modelo Geomecânico Auto-Organizado Criticamente. *Tese de Doutorado em Engenharia Civil - PUC- RIO, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, p. 189.
- NETO, P. P. (2019). Análise de evento de queda de bloco seguido de explosão da rocha no distrito de Banquete, Bom Jardim-RJ. *Universidade Estadual do Rio de Janeiro*.
- NUSSENZVEIG, H. M. (2003). *Complexidade e Caos* (2ª ed.). Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA.
- PEDRON, I. T. (1999). Integrais, Equações Diferenciais e Entropia de Tsallis. *UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ- DEPARTAMENTO DE FÍSICA*, p. 78.
- PERES-RODRIGUES, F. (1983). Anisotropia, in F. Peres-Rodrigues. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- PRIGOGINE, I., & STENGERS, I. (1997). *The end of certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. Free Press.
- RIBEIRO, A. d. (2020). Influência da geometria dos blocos e das encostas rochosas na dinâmica de queda de blocos - Uma aplicação da Teoria do Caos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*, p. 142.
- STROGATZ, S. H. (2018). *Nonlinear Dynamics and Chaos with Student Solutions Manual: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering* (2 ed.). Cambridge: Westview Press.
- TSALLIS, C. (2023). *Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics: Approaching a Complex World*. Springer.
- TSALLIS, C., & UMAROV, S. (2022). *Mathematical Foundations of Nonextensive Statistical Mechanics*. World Scientific.