



UFRJ

**Samara Cristina Cordeiro dos Santos**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PREDITIVA DO ALCANCE DE BLOCOS DE  
ROCHA EM ENCOSTAS INSTÁVEIS SEGUNDO MÉTODO DE PERIGO DO  
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB-CPRM)**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**(Bacharelado em Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2019

**Samara Cristina Cordeiro dos Santos**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PREDITIVA DO ALCANCE DE BLOCOS DE ROCHA  
EM ENCOSTAS INSTÁVEIS SEGUNDO MÉTODO DE PERIGO DO SERVIÇO  
GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB-CPRM)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Emilio Velloso Barroso

Raquel Batista Medeiros da Fonseca

Rio de Janeiro

2019

S237 a Santos, Samara Cristina Cordeiro dos  
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PREDITIVA DO ALCANCE DE  
BLOCOS DE ROCHA EM ENCOSTAS INSTÁVEIS SEGUNDO MÉTODO  
DE PERIGO DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB-CPRM)  
/ Samara Cristina Cordeiro dos Santos. -- Rio de  
Janeiro, 2019.  
96 f.

Orientador: Emilio Velloso Barroso.  
Coorientador: Raquel Batista Medeiros da Fonseca.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto  
de Geociências, Bacharel em Geologia, 2019.

1. Geologia de Engenharia e Ambiental. 2.  
Queda/Rolamento de blocos rochosos. 3. Trajetória e  
Alcance dos blocos. 4. Modelagem numérica. I.  
Barroso, Emilio Velloso, orient. II. Fonseca,  
Raquel Batista Medeiros da, coorient. III. Título.

Samara Cristina Cordeiro dos Santos

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PREDITIVA DO ALCANCE DE BLOCOS DE ROCHA  
EM ENCOSTAS INSTÁVEIS SEGUNDO MÉTODO DE PERIGO DO SERVIÇO  
GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB-CPRM)**

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Graduação em Geologia do Instituto de  
Geociências, Universidade Federal do  
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado  
como requisito necessário para obtenção  
do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Emilio Velloso Barroso  
Raquel Batista Medeiros da Fonseca

Aprovada em: 22 de Fevereiro de 2019

Por:

---

Orientador: Emilio Velloso Barroso (UFRJ)

---

Coorientadora: Raquel Batista Medeiros da Fonseca (Fundação Geo-Rio)

---

Andrea Ferreira Borges (UFRJ)

---

Rafael Silva Ribeiro (CPRM)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2019

Dedico este trabalho aos meus pais Maria Helena e Carlos Gomes, meus irmãos Suelen Regina e Carlos Eduardo, que com muito amor, carinho, atenção e apoio me ajudaram a chegar até esta etapa de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre me escutando, me abençoando e me dando força para superar todas as dificuldades. Por tudo que conquistei, porém, peço sabedoria para conquistar muito mais.

Aos meus orientadores, professor Emilio Barroso e Raquel da Fonseca, pelo apoio, orientação, atenção, ensinamento, disposição para ajudar e conduzir cada etapa do trabalho, pela compreensão, paciência durante a elaboração da monografia e pela amizade. Agradeço, principalmente, a confiança e a oportunidade que me proporcionaram para receber e contribuir com o projeto de iniciação científica.

À minha família, principalmente, meus pais, Carlos Gomes e Maria Helena, por estarem sempre presentes em todos os momentos de minha vida, me apoiando, ensinando, orientando e dando força para realizar os meus sonhos. Tudo que conquistei devo a eles, por acreditarem em mim, me proporcionarem uma educação de qualidade e sabedoria. Agradeço aos meus irmãos, Suelen Regina e Carlos Eduardo, por serem pacientes comigo, pela ajuda, preocupação, incentivo e compreensão.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela bolsa de iniciação científica no período de Maio/2016 a Abril/2018 (processo E-26/200.769/2016).

Agradeço aos amigos que fiz ao decorrer da faculdade, em especial a equipe do LEMETRO, que sempre me auxiliou com sugestões e estiveram ao meu lado. Obrigada por tornar os meus dias e o ambiente de trabalho sempre alegre e tranquilo. Pela amizade, incentivo, apoio, compreensão e ajuda. Vocês foram muito importantes para mim durante todo esse período acadêmico.

“Não deixe as frustrações dominarem você, domine-as. Faça dos erros uma oportunidade para crescer. Na vida, erra quem não sabe lidar com seus fracassos”

*Augusto Cury*

## RESUMO

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

A ocupação não planejada das encostas em muitas cidades brasileiras ligada a combinações críticas de fatores geológicos, geomorfológicos e geotécnicos, tem ocasionado acidentes relacionados aos mais variados tipos de movimentos de massa, os quais correspondem aos mecanismos de transporte de solos, rochas e/ou sedimentos, gerando significativos prejuízos econômicos e sociais. O movimento de massa do tipo queda/rolamento de blocos é aquele que envolve blocos rochosos, com variados volumes e litologias, em condições de alta velocidade, portanto, possui maior dificuldade na previsão do início do processo, da trajetória e do alcance dos blocos. O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise computacional do processo de queda de blocos avaliando os alcances e trajetórias mais prováveis em função da geologia local e da geomorfologia da encosta. Pretende-se colaborar com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) na proposição de método que permita estabelecer critérios seguros para o afastamento mínimo de construções e equipamentos urbanos em encostas suscetíveis aos processos de queda de blocos. Características geológicas e geomorfológicas de muitas encostas no Brasil foram reproduzidas em simulações computacionais dos alcances de blocos em encostas instáveis utilizando o software RocFall, que considera o problema a duas dimensões. Este programa utiliza como base as equações balísticas para o cálculo dos alcances. O coeficiente de restituição atualiza as velocidades de lançamento após cada impacto do bloco com as diferentes unidades geológico-geotécnicas presentes no terreno. O processamento se encerra quando a velocidade linear do bloco é nula. Os resultados mostram os afastamentos mínimos seguros mais prováveis para as ocupações, levando em conta a variação da velocidade angular e do coeficiente de restituição, de acordo com o domínio litológico do maciço rochoso. Os casos críticos ocorrem para o domínio de gnaíse, granito e basalto, segundo as encostas com o ângulo de inclinação maior que  $70^\circ$ , pois atingem distâncias maiores do que o limite estabelecido pela literatura. Conclui-se que os alcances dos blocos obtidos possam contribuir para balizar os projetos de mitigação de risco em encostas brasileiras e dessa forma, auxiliar o poder público no planejamento urbano do município.

Palavras-chave: Queda de Blocos; Alcance; Encostas.



## ABSTRACT

SANTOS, Samara Cristina Cordeiro dos. **Evaluation of the predictive efficiency of the reach of rock blocks on unstable slopes according to the danger method of the Brazilian Geological Survey (SGB-CPRM)**. 2019. 96p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The unplanned occupation of the slopes in many Brazilian cities linked to critical combinations of geological, geomorphological and geotechnical factors has caused accidents related to the most varied types of mass movements, which correspond to the mechanisms of transportation of soils, rocks and/or sediments, generating significant economic and social damages. The mass movement of the falling/rolling type of block is that involving rocky blocks, with varying volumes and lithologies, under high speed conditions, therefore, it has greater difficulty in predicting the beginning of the process, the trajectory and the reach of the blocks. The objective of this research is to perform a computational analysis of the process of falling of blocks, evaluating the most likely ranges and trajectories in function of the local geology and the geomorphology of the slope. It is intended to collaborate with the Brazilian Geological Survey (CPRM) in proposing a method to establish safe criteria for the minimum spacing of buildings and urban equipment on slopes susceptible to falling blocks processes. Geological and geomorphological characteristics of many slopes in Brazil were reproduced in computational simulations of the reaches of blocks in unstable slopes using RocFall software, which considers the problem in two dimensions. This program uses ballistic equations to calculate scopes. The coefficient of restitution updates the launch velocities after each impact of the block with the different geological-geotechnical units present in the terrain. Processing terminates when the linear velocity of the block is zero. The results show the most probable safe minimum spacings for the occupations, taking into account the variation of the angular velocity and the coefficient of restitution, according to the lithological domain of the rock mass. The critical cases occur for the domain of gneiss, granite and basalt, according to the slopes with the angle of inclination greater than  $70^\circ$ , since they reach distances greater than the limit established in the literature. It is concluded that the reach of the blocks obtained can contribute to the risk mitigation projects in the Brazilian slopes and, thus, to assist the public power in the urban planning of the municipality.

Key-Words: Rockfall; Reach; Slopes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Bloco-diagrama representando área com queda de blocos (CPRM, 2018).....	1
Figura 2- As três zonas típicas de uma encosta onde a queda de blocos no talude é ativa (Dorren <i>et al.</i> , 2011). .....	2
Figura 3– Classificação de Movimentos de Massa (Modificado de Varnes, 1958, <i>apud</i> Rahn, 1986). .....	7
Figura 4– (a) Esquema de queda de blocos (Lopes, 2006). (b) Exemplo de queda de bloco (Lopes, 2006). .....	9
Figura 5– Tipos de movimento em função da inclinação (Ritchie, 1963 - modificado). .....	10
Figura 6– Variação da predominância dos modos de movimentação dos blocos rochosos em função do ângulo da encosta (Modificado de Dorren <i>et al.</i> , 2011, <i>apud</i> Ribeiro, 2013).....	10
Figura 7 – Trajetória de queda dos blocos em um talude (Pierson <i>et al.</i> , 2001, <i>apud</i> Gomes, 2009). .....	11
Figura 8 – Acidentes no RJ relacionados a queda de blocos: (a) Condomínio da rua engenheiro Gama Lobo, 650 (Brandão da Silva <i>et al.</i> , 2011). (b) Vila Isabel (Ribeiro, 2013).....	13
Figura 9– Queda de blocos em frente ao Túnel de Santa Teresa, Rio de Janeiro (G1, 2011). ...	13
Figura 10– Exemplo de barreira de contenção com tela metálica (Peila <i>et al.</i> , 1998, <i>apud</i> Dias & Barroso, 2006). .....	14
Figura 11– Proteção ativa: (a) Estabilização por redes metálicas e chumbadores (Geobrugg, 2012, <i>apud</i> Flórez-Gálvez, 2012). (b) Uso de contrafortes e grelhas ancoradas (Geo-Rio <i>apud</i> Flórez-Gálvez, 2012). .....	15
Figura 12– Proteção passiva: (a) Barreiras de proteção rígidas (Geobrugg, 2012, <i>apud</i> Flórez-Gálvez, 2012). (b) Corte rochoso em banquetas (Flórez-Gálvez, 2012). .....	15
Figura 13– Critério topográfico de seleção de encostas potenciais referentes ao processo de queda de blocos (CPRM, 2018). .....	17
Figura 14– Grupos de análise referentes ao processo de queda de blocos (CPRM, 2018).....	17
Figura 15– Encosta com presença de rampa - Grupo I (CPRM, 2018). .....	18
Figura 16– Encostas sem presença de rampa (CPRM, 2018). .....	18
Figura 17– Identificação de rampa com utilização de Google Earth (CPRM, 2018). .....	19
Figura 18 - Tipos de Colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica (Dias & Barroso, 2006); (C) Colisão Parcialmente Inelástica (Ribeiro, 2013). .....	20
Figura 19 - Componentes da colisão de uma partícula em um plano inclinado (Giani <i>et al.</i> , 2004). .....	21
Figura 20 - Relação entre colisão de uma partícula em um plano inclinado (Modificado de Carnevale, 1991, <i>apud</i> Ribeiro, 2013). .....	22

Figura 21 - Relação entre velocidade angular e altura de queda para quedas de blocos no local de testes de Ehime, Japão para blocos de rocha (Ushiro <i>et al.</i> , 2006, <i>apud</i> Wyllie, 2014). .....	25
Figura 22 - Página inicial do programa RocFall 4.0 (Rocscience). .....	27
Figura 23 - Algoritmo do software RocFall. ....	28
Figura 24 - Geometria do talude. ....	28
Figura 25 - Desenho do talude: (A) sem rampa. (B) com rampa. ....	29
Figura 26 - Posicionamento dos vértices; Propriedade do material; Localização inicial do bloco. ....	29
Figura 27 - Parâmetros do material: Coeficiente de Restituição; Ângulo de atrito e Rugosidade. ....	30
Figura 28 - Parâmetros do material: Velocidade horizontal e vertical; Massa do bloco e Velocidade angular. ....	30
Figura 29 - Projeto da modelagem. ....	31
Figura 30 - Resultado final com a trajetória e alcance do bloco. ....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Limite estabelecido para o alcance máximo dos blocos na área crítica e na área de dispersão (CPRM, 2018).....	17
Tabela 2 - Parâmetros para a definição dos taludes.....	20
Tabela 3 - Valores do Coeficiente de Restituição Normal e Tangencial para encostas SEM rampa.....	22
Tabela 4 - Valores do Coeficiente de Restituição Normal e Tangencial para encostas COM rampa.....	22
Tabela 5 - Dados do parâmetro de ângulo de atrito e seu respectivo desvio padrão. ....	23
Tabela 6 - Valores da massa específica com seu desvio padrão e massas dos blocos para os respectivos materiais de estudo da encosta. ....	24
Tabela 7 - Volume dos blocos em histórias de casos de queda de blocos no Rio de Janeiro (Vargas, Jr. <i>et al.</i> , 2004).....	24
Tabela 8 - Volumes dos blocos utilizados nas simulações. ....	25
Tabela 9 - Dados do parâmetro de velocidade angular.....	26
Tabela 10 - Parâmetros do projeto de modelagem para o cálculo das trajetórias.....	26
Tabela 11 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GNAISSE e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	33
Tabela 12 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GNAISSE e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	34
Tabela 13 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GNAISSE e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	35
Tabela 14 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GNAISSE e $\omega = 5$ rad/s. ....	36
Tabela 15 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GNAISSE e $\omega = 5$ rad/s. ....	37
Tabela 16 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GNAISSE e $\omega = 5$ rad/s. ....	38
Tabela 17 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GNAISSE e $\omega = 20$ rad/s. ....	39
Tabela 18 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GNAISSE e $\omega = 20$ rad/s. ....	39
Tabela 19 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GNAISSE e $\omega = 20$ rad/s. ....	40
Tabela 20 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GRANITO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	41

Tabela 21 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GRANITO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	42
Tabela 22 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GRANITO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	43
Tabela 23 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GRANITO e $\omega = 5$ rad/s. ....	44
Tabela 24 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GRANITO e $\omega = 5$ rad/s. ....	45
Tabela 25 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GRANITO e $\omega = 5$ rad/s. ....	46
Tabela 26 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GRANITO e $\omega = 20$ rad/s. ....	47
Tabela 27 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GRANITO e $\omega = 20$ rad/s. ....	47
Tabela 28 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GRANITO e $\omega = 20$ rad/s. ....	48
Tabela 29 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de ARENITO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	49
Tabela 30 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de ARENITO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	50
Tabela 31 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de ARENITO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	51
Tabela 32 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de ARENITO e $\omega = 5$ rad/s. ....	52
Tabela 33 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de ARENITO e $\omega = 5$ rad/s. ....	53
Tabela 34 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de ARENITO e $\omega = 5$ rad/s. ....	54
Tabela 35 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de ARENITO e $\omega = 20$ rad/s. ....	55
Tabela 36 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de ARENITO e $\omega = 20$ rad/s. ....	55
Tabela 37 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de ARENITO e $\omega = 20$ rad/s. ....	56
Tabela 38 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de BASALTO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	57
Tabela 39 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de BASALTO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	58

Tabela 40 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de BASALTO e $\omega = 0.39$ rad/s. ....	59
Tabela 41 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de BASALTO e $\omega = 5$ rad/s. ....	60
Tabela 42 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de BASALTO e $\omega = 5$ rad/s. ....	61
Tabela 43 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de BASALTO e $\omega = 5$ rad/s. ....	62
Tabela 44 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de BASALTO e $\omega = 20$ rad/s. ....	63
Tabela 45 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de BASALTO e $\omega = 20$ rad/s. ....	64
Tabela 46 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de BASALTO e $\omega = 20$ rad/s. ....	65

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de Tipologia (Varnes, D.J., 1978 – modificado).....	6
Quadro 2 - Características dos principais movimentos de massa (Adaptado de Augusto Filho, 1992). .....	8
Quadro 3 - Escala de velocidade para os movimentos de massa (Cruden & Varnes, 1996, apud Ribeiro, 2013). .....	12

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COR N e T	Coeficiente de Restituição Normal e Tangencial.
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil).
CTI	Cooperação Técnica Internacional.
GIDES	Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais.
JICA	Agência de Cooperação Internacional do Japão.
MDE	Modelo Digital de Elevação.
ROCFALL	Risk analysis of Falling Rocks on steep slopes.
$e$	Coeficiente de restituição.
$e_n$	Coeficiente normal de restituição.
$e_t$	Coeficiente tangencial de restituição.
$h$	Altura de queda.
$kg$	Kilograma.
$kg/m^3$	Kilograma por metros cúbicos.
$m$	Metros.
$m^3$	Metros cúbico.
$rad/s$	Radiano por segundo.
$V_{n+1}$ ou $V_{post}$	Velocidade de afastamento.
$V_n$ ou $V_{pre}$	Velocidade de aproximação.
$V_n$	Velocidade normal.
$V_t$	Velocidade tangencial.
$\omega$	Velocidade angular.
$^\circ$	Graus.
$\pi$	Símbolo Pi.
$\rho$	Massa específica do bloco.



## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	xv
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xvi
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA .....	5
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	6
2.1. MOVIMENTOS DE MASSA .....	6
2.2. QUEDA DE BLOCOS ROCHOSOS .....	8
2.2.1. MECANISMOS CAUSADORES DE QUEDA DE BLOCOS .....	12
2.2.2. MEDIDAS MITIGADORAS PARA QUEDA DE BLOCOS .....	13
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	16
3.1. PROJETO GIDES .....	16
3.2. PARÂMETROS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL .....	19
3.3. PROGRAMA NUMÉRICO ROCFALL .....	26
3.3.1. ALGORITMO DO SOFTWARE ROCFALL .....	27
3.3.2. SEQUÊNCIA DE TRABALHO NO ROCFALL .....	28
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
<b>4.1. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE GNAISSE</b> .....	32
4.1.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s) .....	32
4.1.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s) .....	35
4.1.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s) .....	38
<b>4.2. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE GRANITO</b> .....	41
4.2.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s) .....	41
4.2.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s) .....	43

4.2.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s) .....	46
<b>4.3. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE ARENITO .....</b>	<b>49</b>
4.3.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s) .....	49
4.3.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s) .....	52
4.3.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s) .....	54
<b>4.4. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE BASALTO.....</b>	<b>57</b>
4.4.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s) .....	57
4.4.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s) .....	60
4.4.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s) .....	62
<b>5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O movimento gravitacional de massa do tipo queda de blocos ou RockFalls é aquele que envolve fragmentos de rocha, com variados volumes (matacões ou blocos) e litologias, com condições de alta velocidade. Trata-se do movimento de massa onde o bloco ou uma série de blocos soltos ou desconexos do maciço rochoso se deslocam ao longo de um declive por queda livre, cujas características da superfície topográfica, sobretudo a inclinação e a rugosidade, além da geologia local, exercem um papel fundamental na definição do processo de deslocamento do bloco de rocha (Ribeiro, 2008). Portanto, pode-se dizer que esse processo é complexo e altamente destrutivo.

As ocorrências de quedas de blocos rochosos vem crescendo significativamente em várias cidades brasileiras, principalmente na cidade do Rio de Janeiro e em municípios da região serrana do estado, podendo destacar a pequena influência ou mesmo a ausência da precipitação pluviométrica, em alguns casos, na deflagração do movimento dos blocos. Tal característica deste processo de movimento de massa lhe confere grande dificuldade na previsão de seu início ou deflagração, que pode estar relacionada com a propagação de fraturas nas rochas até a liberação dos blocos do maciço rochoso, além das intervenções antrópicas, cada vez mais frequentes (Vargas, Jr. *et al.*, 2004; Ribeiro, 2008). Na Figura 1 pode-se observar a percolação de água e de raízes de plantas através dos fraturamentos do maciço, que pode originar ou instabilizar blocos. Também é exibida a possibilidade de queda de blocos soltos ao longo da encosta.

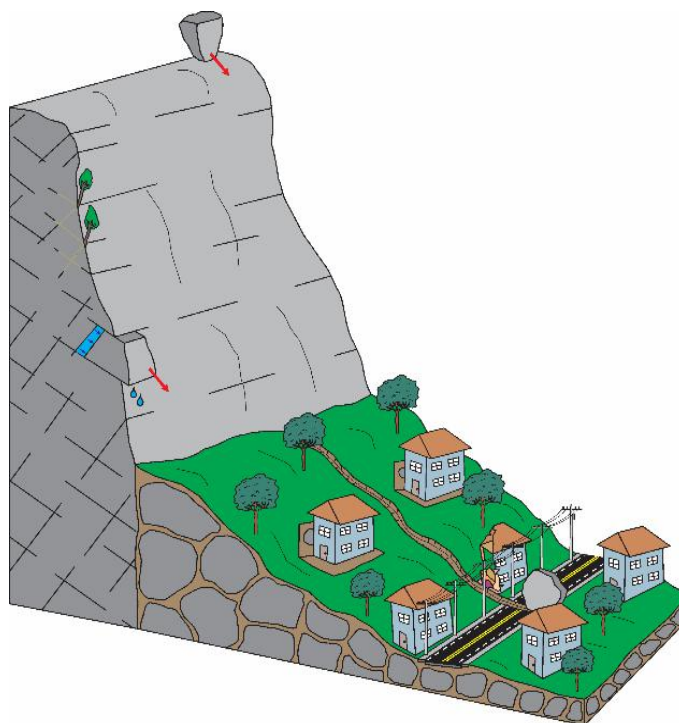


Figura 1– Bloco-diagrama representando área com queda de blocos (CPRM, 2018).

De acordo com Silveira (2017) e Rocha (2009), fatores geológicos como forte presença de descontinuidades estruturais (falhas, diáclases, fraturas, juntas, fissuras e microfissuras), fatores geotécnicos, fatores geométricos como a altura ou a inclinação do taludee fatores hidrogeológicos (presença de água), além de facilitar processos erosivos, favorecem a ação do intemperismo, que contribui para a alteração dos maciços rochosos. Suas propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade estão relacionadas ao resultado da complexa combinação entre as propriedades da rocha intacta e das descontinuidades. Essas características, quando combinadas, podem determinar a condição de ruptura da superfície e resultar a instabilidade, como movimentos de massa em encostas, em destaque, a queda de blocos.

Como a queda de blocos é um processo natural rápido e espontâneo, para prever a ameaça potencial desse tipo de movimento de massa é preciso estimar o ponto de parada dos blocos, altura do salto e quantificar sua energia. Para isso, um estudo da trajetória e do alcance de queda de blocos requer o uso de um modelo de simulação de rochas utilizando programa computacional, com base em análises probabilísticas para melhor pesquisa de suscetibilidade. Antes de realizar o estudo da trajetória de queda de blocos, na fase de preparação, todas as informações existentes devem ser coletadas, um estudo de campo deve ser realizado e os dados das simulações devem ser preparados (Dorren *et al.*, 2011).

A fim de realizar o modelo de simulação é preciso fazer um levantamento das características das encostas e dos blocos, determinadas através da investigação geológica-geotécnica e a seleção de parâmetros de entrada capazes de simular o movimento de queda dos blocos instáveis, tais como o ângulo de atrito entre bloco e superfície da encosta, velocidade inicial, até mesmo os coeficientes de restituição de energia, que são os parâmetros de entrada mais cruciais para o controle do risco de queda de rochas (Rocha, 2009; Chau *et al.*, 2002; Giani *et al.*, 2004).

A Figura 2 representa três zonas importantes onde a queda de bloco ocorre,os quais interpretam a trajetóriados blocos para uma melhor compreensão da distância segura de ocupação nas encostas.

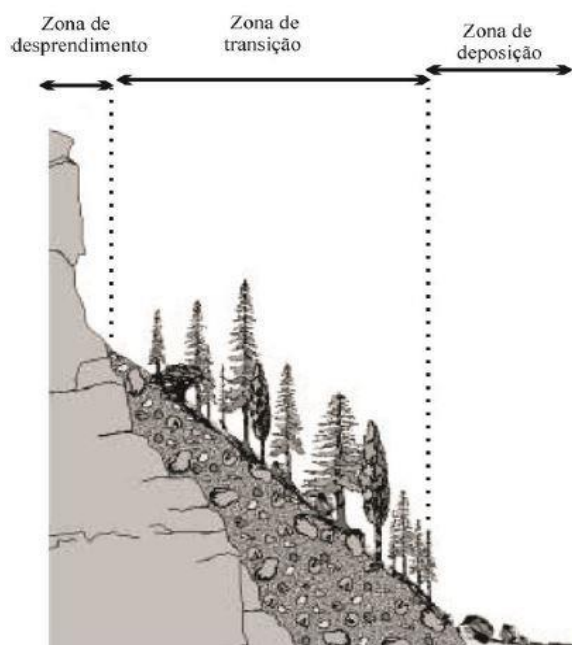


Figura 2- As três zonas típicas de uma encosta onde a queda de bloco no talude é ativa (Dorren *et al.*, 2011).

A zona mais alta é a área de liberação (zona de desprendimento) no qual as quedas rochosas se iniciam e descem a encosta. É onde se encontra a região aflorante do maciço rochoso, e que corresponde a uma determinada inclinação e altura da encosta.

A segunda é a zona de transição, que representa a área onde os blocos estão em queda livre e se chocam com a encosta. É a zona que apresenta maior número de impactos e movimentos de saltação/rolamento. Por fim, a zona de deposição, diz respeito a área onde os blocos não apresentam mais energia e param de se mover.

Com o crescimento constante da urbanização e suas consequências, é preciso se concentrar na pesquisa relacionada a queda de blocos para melhor entendê-la e assim, conseguir realizar ações preventivas.

## 1.2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

A motivação desta monografia é realizar uma análise computacional das condicionantes cinemáticas do processo de quedas de blocos. No método de análise, simulações de quedas de blocos serão realizadas numericamente utilizando o software RocFall 4.0 da Rocsciense, que se baseia em equações balísticas e lançamentos de projéteis, para avaliar os alcances e trajetórias de blocos rochosos mais prováveis em função das configurações geológicas e geomorfológicas das encostas. Os fatores analisados são:

- Atributos geológicos:
  - ✓ Distribuição espacial de solos;
  - ✓ Rochas nas encostas;
- Parâmetros geomecânicos:
  - ✓ Coeficiente de Restituição Normal e Tangencial da superfície da encosta;
  - ✓ Ângulo de fricção;
  - ✓ Velocidade angular;
  - ✓ Massa dos blocos;
  - ✓ Volume dos blocos;
  - ✓ Velocidade inicial horizontal e vertical do movimento do bloco;
- Características geomorfológicas:
  - ✓ Rampa;
  - ✓ Perfil geométrico da encosta;
  - ✓ Rugosidade da superfície do terreno.

A criação dos modelos de encostas deverá reproduzir condições de suscetibilidade a este tipo de movimento de massa. Os estudos de análise de risco relatados na literatura científica ou em registros de casos reais brasileiros, divulgados por diversos órgãos envolvidos com redução de desastres naturais, principalmente, a CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil), serão pesquisados e usados para apoiar a construção de cenários reais a serem analisados. Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho é testar e avaliar a eficiência da predição do alcance de blocos rochosos da proposta da CPRM, contida em seu Manual de Mapeamento de Risco e Perigo (CPRM, 2018).

A expansão urbana levou a ocupação não planejada das encostas em muitas cidades brasileiras, fazendo com que áreas residenciais crescessem ao redor de encostas sem qualquer tipo de fiscalização e mediação. Assim sendo, blocos rochosos podem se desprender do talude e provocar acidentes dos variados tipos de movimento de massa, em destaque para quedas de blocos, gerando significativos prejuízos sociais e econômicos como perdas de vidas humanas, perdas materiais diversas, e até término de serviços públicos.

Pensando nos acidentes ocasionados por quedas de blocos não somente em áreas urbanas, mas também em taludes de mineração e rodovias, tem-se como relevância determinar o risco instalado e auxiliar o poder público na decisão de medidas mitigadoras do risco. Segundo Pacheco & Coutinho (2006), risco pode ser definido como o produto entre a consequência e probabilidade, no qual a consequência é qualquer resultado indesejável derivado de um movimento de massa, que possui uma certa probabilidade de ocorrência, acompanhadas por perdas e/ou danos.

Conforme Tavares (2015), as rodovias são rodeadas por taludes rochosos no qual, até mesmo uma pequena queda de blocos pode ocasionar sérios estragos a veículos, ferir pessoas ou até mesmo causar fatalidade. Portanto, para melhor compreensão sobre o risco geológico-geotécnico, segue-se uma breve descrição dos conceitos relacionados ao assunto (Fell *et al.*, 2008 *apud* Silveira, 2017):

- Suscetibilidade: “Avaliação quantitativa e/ou qualitativa da classificação, volume e distribuição espacial dos movimentos de massa que podem ocorrer ou que ocorrem em uma determinada área”.
- Probabilidade: “Uma medida do grau de certeza de um determinado evento acontecer. Tem-se um valor entre zero e 1, no qual o valor máximo representa a certeza de ocorrer o evento”.
- Risco: “É uma medida de probabilidade de um evento ocorrer e de sua gravidade”.
- Análise de risco: “Uso da informação disponível para estimar o risco à população, bens ou o ambiente, a partir do perigo”.
- Elementos em risco: “Construções e obras de infraestrutura, população, atividades econômicas e o meio ambiente localizadas em áreas de perigo”.
- Perigo: “Condição elevada para causar uma consequência indesejável. O perigo está relacionado a movimento de massa que aborda a localização, o volume, a intensidade do potencial evento e a probabilidade do evento ocorrer em um determinado período de tempo”.
- Intensidade: “Está relacionado ao poder destrutivo de um movimento de massa no qual inclui a velocidade do movimento, deslocamento total, profundidade do movimento de massa e energia cinética por unidade de área”.

Em um evento de queda de bloco, o maior desafio é inferir o quanto que um bloco está próximo para se desprender da encosta e cair. Com isso, a probabilidade é o parâmetro em destaque que deve ser avaliado para análise de perigo. Dessa forma, é muito importante sempre ter à disposição um banco de dados relacionado ao histórico de queda de blocos de um determinado local, e ter conhecimento das trajetórias e alcances prováveis dos blocos rochosos (Silveira, 2017). Um estudo que deve ser levado em conta é o indício de atividade no local em condição de queda de blocos. Assim sendo, é interessante destacar áreas com cicatrizes recentes no talude, novas fraturas no maciço, presença de vegetação entre as descontinuidades, processos erosivos e blocos já caídos.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A monografia foi dividida em 6 capítulos, além de apêndices. Inicialmente, neste capítulo, são apresentados a introdução ao tema, objetivos e relevância da pesquisa desenvolvida.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre conceitos e classificações dos movimentos gravitacionais de massa, principalmente, queda de blocos rochosos, que será o foco desta pesquisa. Será abordado o conceito, classificação de risco instalado, medida mitigadora e mecanismo causadora de queda de blocos.

O capítulo 3 apresenta as etapas da metodologia para a realização das modelagens. Essas etapas são representadas por: estudo bibliográfico do manual técnico de risco e perigo da CPRM; definição dos cenários mais frequentes das encostas brasileiras (geológica e geomorfológica); parâmetros da modelagem computacional; simulações no programa numérico RocFall. Será explicado em detalhe como funciona o software RocFall e a ideia do projeto GIDES.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos alcances máximos de blocos rochosos obtidos a partir da modelagem computacional no software RocFall, ilustrados na forma de tabelas. Esses resultados são representados em 4 tipos de domínio litológico: Gnaisse, Granito, Arenito e Basalto. Apresenta também uma discussão sucinta dos resultados dos estudos com relação as sugestões de análise de risco relatados na literatura.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões da pesquisa. Serão abordadas sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 6 contém as referências bibliográficas que contribuíram no trabalho.

Por fim, são apresentados na monografia os apêndices.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa apresentam diversas formas de classificação que envolvem diversificados processos (geológico, hidrogeológico, químico e mecânico), fatores condicionantes e materiais. Podem ser entendidos como mecanismos de transporte de material (rochas, sedimentos e solos) ao longo da vertente, induzidos pela força da gravidade e por ação simultânea ou isolada de fatores naturais e ações antrópicas tais como, presença de água ou gelo, aterro e desmatamento (Dias & Barroso, 2006). Água e gelo quase sempre são envolvidos em movimentos de massa pela diminuição da resistência dos materiais e por contribuir no comportamento plástico e fluido dos solos (Tominaga, 2007).

Esses movimentos de massa podem manifestar-se lentamente a moderado como o caso de escorregamento rotacional, até mesmo atingindo altas velocidades, como deslizamento de terra, formando rupturas complexas. Deste modo, esses processos são recorrentes no Brasil e causam prejuízos e perdas de vidas.

A classificação de movimentos de massa de Varnes (1958, 1978) segue os seguintes critérios: primeiro corresponde ao tipo de movimento, em seguida, corresponde ao tipo de material. Os tipos de movimento são divididos em quedas, tombamentos, deslizamentos, espalhamentos e fluxos. O tipo de movimento complexo inclui combinações de dois ou mais dos outros movimentos. Já os tipos de materiais são divididos em rocha e solo (detritos e terra). O Quadro 1 apresenta a classificação de Tipologia.

Quadro 1 - Classificação de Tipologia (Varnes, D.J., 1978 – modificado).

TIPO DE MOVIMENTO	TIPO DE MATERIAL		
	Rocha	Material Detritico Grosseiro	Solos
Queda (falls)	Queda de blocos	Queda de detritos	Queda de solos
Tombamento (topples)	Tombamento de blocos	Tombamento de detritos	Tombamento de solos
Escorregamento: Rotacional (slump) e Translacional (slides)	Escorregamento de rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento de solo
Corrida (flows)	Avalanche de blocos	Corrida de detritos	Corrida de solo (ou lama)
Complexo	Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		



Além desses critérios citados no Quadro 1, outros podem ser utilizados para identificação e classificação de movimentos de massa, tais como: taxa de movimento, geometria da área de falha e o depósito resultante, idade, causas, grau de ruptura da massa deslocada, localização geográfica de exemplos-tipo, relação ou falta de relação da geometria de deslizamento com a estrutura geológica, grau de desenvolvimento e estado de atividade (Varnes., 1978). Por conseguinte, outra forma de classificação de movimentos de massa de Varnes, com destaque para queda de blocos, está representada de acordo com o tipo de material e a taxa aproximada de movimentação (Figura 3). A classificação de Varnes é o destaque desse trabalho por ainda ser uma das mais utilizadas internacionalmente, devido a sua simplicidade.

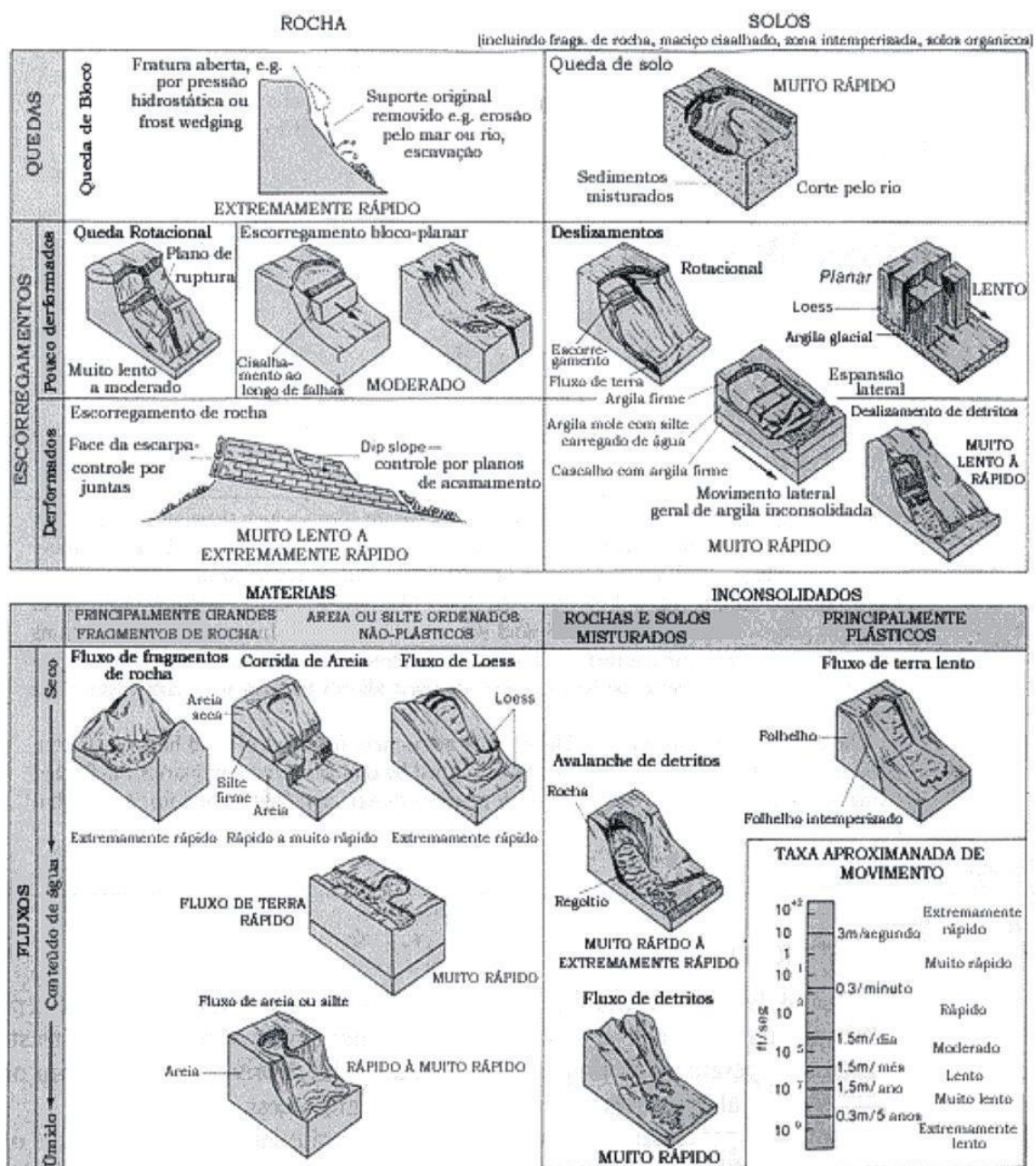


Figura 3— Classificação de Movimentos de Massa (Modificado de Varnes, 1958, *apud* Rahn, 1986).

As principais características dos movimentos de massa com ocorrência mais comum nas encostas do território nacional serão disponibilizadas no Quadro 2 (Augusto Filho, 1992).

Quadro 2 - Características dos principais movimentos de massa (Adaptado de Augusto Filho, 1992).

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

## 2.2. QUEDA DE BLOCOS ROCHOSOS

Segundo Dias & Barroso (2006), de todos os tipos de movimentos de massa, os de queda de blocos é o menos estudado e os mais difíceis de se prever, tanto o início do movimento como a trajetória e o alcance dos blocos, devido ao seu alto valor de aleatoriedade. Próximo do total dos estudos científicos sobre esse evento, as instituições de países europeus (Itália, Suíça, Áustria, França, Espanha) e países asiáticos (China, Japão, Turquia) ganham destaque (Chau *et al.*, 2003).

Esse processo pode iniciar-se por movimentos do tipo queda livre, dando continuidade através de rolamentos, caso a encosta apresente uma declividade crítica. Por outro lado, o processo pode iniciar-se por movimentos do tipo rolamento, no qual os blocos destacados do maciço rochoso se instabilizam devido à perda de apoio, podendo estar em conjunto com movimentos de saltação (Figura 4). Assim sendo, os fatores mais importantes que controlam a trajetória e alcance de queda dos blocos são a geometria e a configuração da encosta.

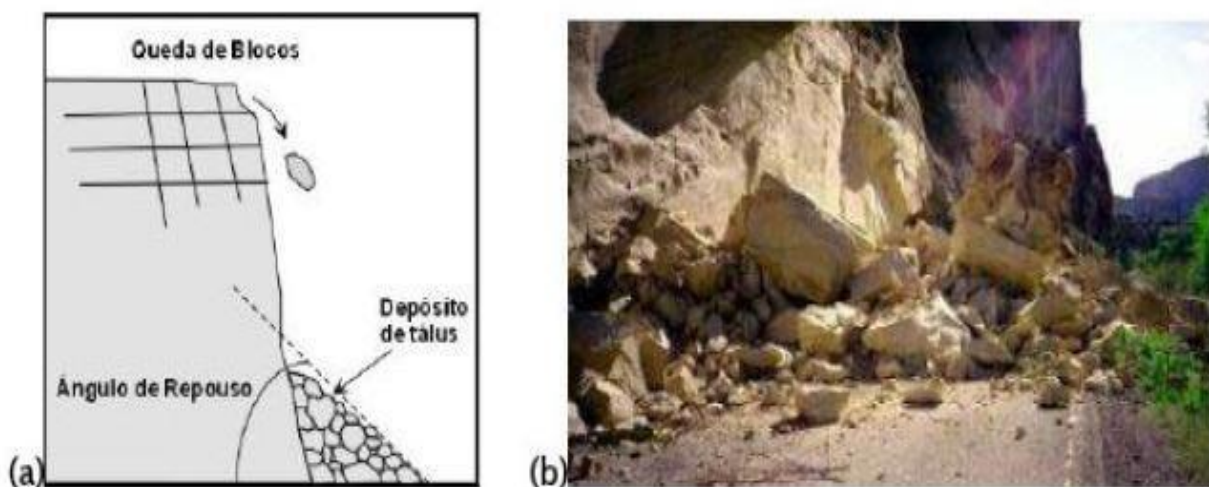


Figura 4– (a) Esquema de queda de blocos (Lopes, 2006). (b) Exemplo de queda de bloco (Lopes, 2006).

Em conformidade com o que já foi mencionado, os quatro tipos mais importantes de movimentos são: queda livre, saltação, rolamento e deslizamento (Figura 5). A respeito de encostas com elevada inclinação, o movimento predominante é a queda livre. Considera-se queda livre quando a inclinação da encosta supera  $76^\circ$  (Ritchie, 1963). No entanto, esse valor pode variar dependendo das circunstâncias em campo.

O bloco em queda livre pode reproduzir movimentos de rotação e/ou translação, no qual pode influenciar na sua trajetória e alcance. De acordo com Rocha (2009), o bloco em rotação ao se chocar com a superfície, pode saltar em um sentido ocasional em relação aos movimentos anteriores.

Quando a inclinação da encosta diminui ao longo da seção, o bloco rochoso irá desenvolver o movimento de queda livre inicial para movimento em saltação, assim que colidir com a superfície. Todavia, quando a inclinação da encosta é menor do que  $45^\circ$ , o bloco em saltação passa a desenvolver o movimento para rolamento. Nesse caso, os blocos estão quase constantemente em contato com a superfície. Portanto, se a inclinação aumenta, o bloco desenvolve movimentos de saltação ou queda livre. Caso contrário, o bloco continua a desenvolver movimentos de rolamento até perder totalmente sua energia, devido a fricção com a superfície (Rocha, 2009; Tavares, 2015). A Figura 6 apresenta o modo de movimentação do bloco em função de diferentes inclinações do talude.



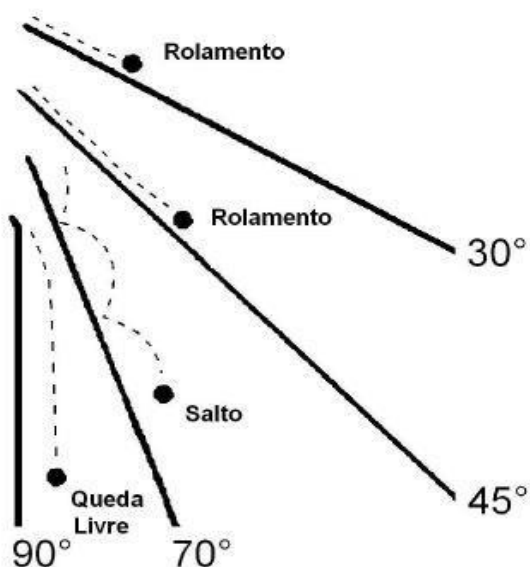


Figura 5– Tipos de movimento em função da inclinação (Ritchie, 1963 - modificado).

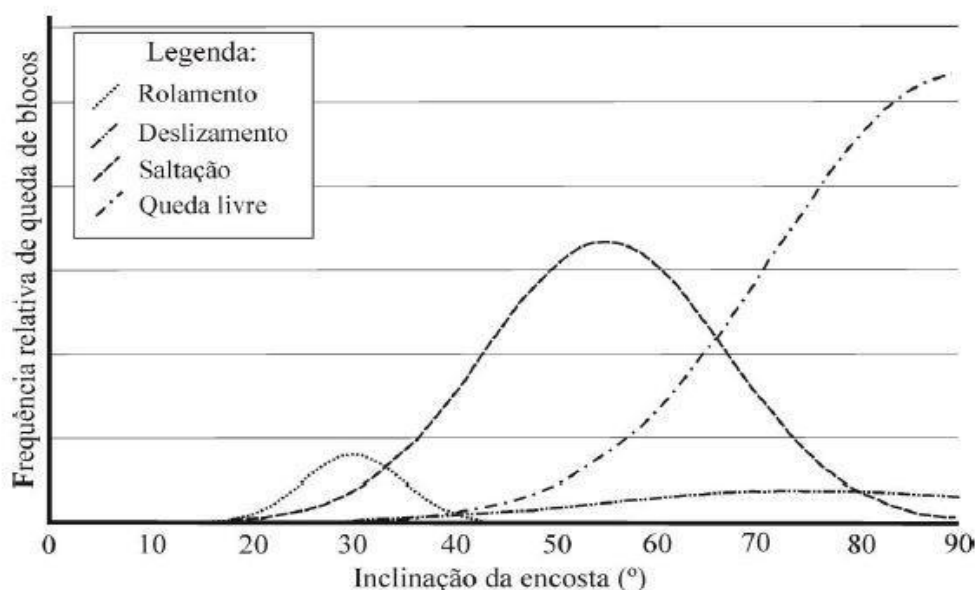


Figura 6– Variação da predominância dos modos de movimentação dos blocos rochosos em função do ângulo da encosta (Modificado de Dorren *et al.*, 2011, *apud* Ribeiro, 2013).

Além do movimento dos blocos rochosos com relação a inclinação, outros fatores podem influenciar na trajetória e alcance desses blocos, tais como: o material de cobertura da encosta (solo, vegetação, rocha), a geometria e o tamanho do bloco. No caso dos tamanhos dos blocos, que podem ser variados, os de menores proporções atingem distâncias menores comparado aos blocos de maiores proporções, mas nem sempre isto ocorre. Já no caso do material de cobertura da encosta, a vegetação de grande porte reduz a energia de impacto dos blocos com a superfície, seja por fricção, ou em ocasiões de contato dos blocos com troncos de árvores, que servem como barreira natural. Em casos de pedreiras desativadas, muito regulares e de superfícies lisas, comum no Rio de Janeiro, os blocos ao se chocarem com a superfície rochosa, sem a presença de vegetação ou solo, não interrompem seu movimento e portanto, atingem maiores distâncias (Rocha, 2009).

O poder que um certo material tem de retardar o movimento é conhecido como coeficiente de restituição (Tavares, 2015).

Conforme Gomes (2009), o bloco que adquire a trajetória (A), não toca na face da encosta até o impacto, ocasionando em pequenas distâncias observadas na base da encosta. Para a trajetória (B), o bloco entra em contato com a encosta, mas não em forma de lançamento, o que resulta na diminuição da distância do impacto após a queda. Os blocos que apresentam feições de lançamento, apresentam distâncias maiores, para longe da encosta, como podem ser observados nas trajetórias (C) e (D). A Figura 7 exemplifica as trajetórias de blocos rochosos em queda.

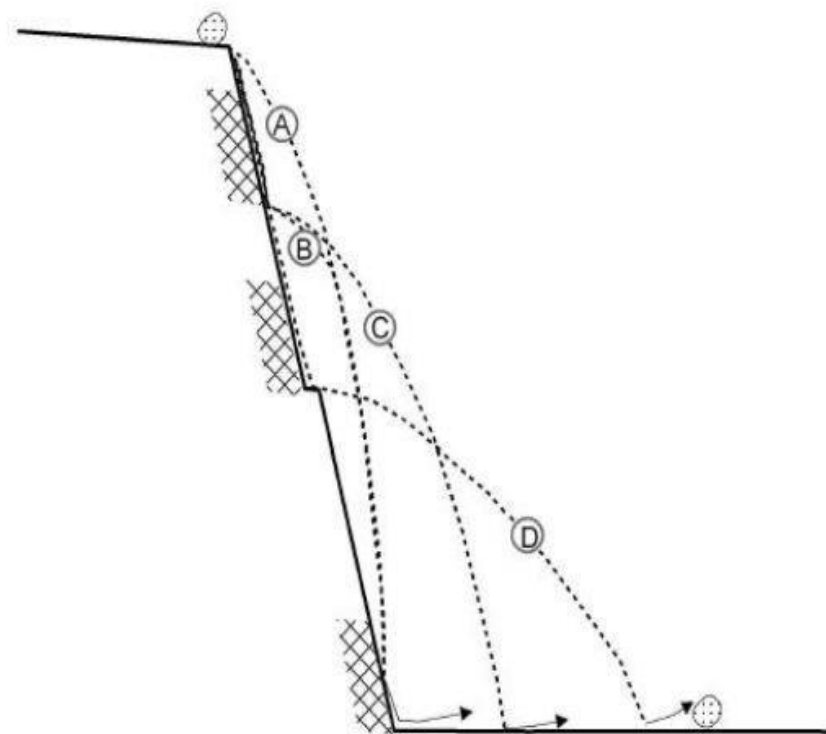


Figura 7 – Trajetória de queda dos blocos em um talude (Pierson *et al.*, 2001, *apud* Gomes, 2009).

Sabe-se que o evento de queda de blocos apresenta condições de alta velocidade, podendo variar de poucos metros por segundo até cerca de 30 m/seg (Peila & Ronco, 2009). Dessa forma, a partir do Quadro 3, pode-se observar que a queda de blocos é capaz de se enquadrar nas classes V, VI e VII, baseado na classificação de velocidade de movimentos de massa proposta por Cruden & Varnes, 1996, (*apud* Ribeiro, 2013).

O volume dos blocos envolvidos no processo pode variar muito podendo ocorrer a queda de um único bloco ou até mesmo, queda em massa de blocos. Normalmente, não há contato dos blocos durante o evento. De acordo com Woltjer *et al.* (2008), em muitos casos, o volume do bloco não ultrapassa 5 m<sup>3</sup>, porém, Copons *et al.* (2009) afirmam que nesses eventos o volume envolvido não ultrapassa de 100 m<sup>3</sup>.

Richards *et al.* (2001), *apud* Ribeiro (2013) indicaram os seguintes parâmetros como os responsáveis pelo comportamento dos blocos rochosos: geometria do talude e dos blocos; ângulo de atrito; característica de restituição da rocha; rugosidade; resistência ao rolamento e massa específica da rocha.

Quadro 3 - Escala de velocidade para os movimentos de massa (Cruden & Varnes, 1996, apud Ribeiro, 2013).

Classe	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Limites de Velocidade	Algumas características destrutivas
VII	Extremamente Rápido	$5 \cdot 10^3$	5m/seg	Catástrofe de grande violência; edifícios destruídos pelo impacto do material deslocado; muitas mortes; improvável escape de indivíduos do local
VI	Muito Rápido	$5 \cdot 10^1$	3m/min	Algumas vidas perdidas; velocidade muito grande para permitir que todas as pessoas saiam do local
V	Rápido	$5 \cdot 10^{-1}$	1,8 m/h	Possível escape de indivíduos; estruturas, posses e equipamentos destruídos
IV	Moderado	$5 \cdot 10^{-3}$	13 m/mês	Algumas estruturas podem ser mantidas temporariamente
III	Lento	$5 \cdot 10^{-5}$	1,6 m/ano	Reparação de construções podem ser realizadas durante o movimento; determinadas estruturas podem ser mantidas com manutenção frequente se não houver uma grande mobilização de material transportado
II	Muito Lento	$5 \cdot 10^{-7}$	15 mm/ano	Algumas estruturas permanentes não são afetadas pelo movimento
I	Extremamente Lento			Imperceptível sem instrumentos; construção possível com precauções

### 2.2.1. MECANISMOS CAUSADORES DE QUEDA DE BLOCOS

A queda de blocos geralmente está relacionada a alteração do maciço rochoso formadas por eventos biológicos e climáticos. Suas causas são diversas e não estão necessariamente relacionados a períodos de chuva. A seguir, serão apresentadas algumas causas conforme Guidicini & Nieble (1984) e Highland & Bobrowsky (2008):

- Alternância de congelamento e degelo ao longo de fraturas e juntas em regiões frias;
- Perda de sustentação dos blocos por ação erosiva da água;
- Chuvas intensas;
- Aumento de pressão neutra devido à infiltração de água no solo;
- Vibrações (terremotos, explosões);
- Erupções vulcânicas;
- Tráfego pesado perto do local;
- Variação térmica do maciço rochoso;
- Desconfinamento lateral do maciço rochoso devido a fissuras recentes;
- Alívio de tensões de origem tectônica;
- Crescimento de raízes no solo;
- Remoção da vegetação;
- Entre outros.

Os efeitos do evento de queda de blocos podem ser devastadores e afetar áreas residenciais, redes de esgoto, abastecimento de água, linhas elétricas, rodovias, ferrovias e áreas comerciais, mas principalmente, provocar perdas de vida.

Em casos reais no Brasil, como podem ser observados nas Figuras 8 e 9, o ambiente de construção de residências perto do local do maciço rochoso pode aumentar o risco em cerca de duas vezes da probabilidade do evento ocorrer (Tavares, 2015).



Figura 8 – Acidentes no RJ relacionados a queda de blocos: (a) Condomínio da rua engenheiro Gama Lobo, 650 (Brandão da Silva *et al.*, 2011). (b) Vila Isabel (Ribeiro, 2013).



Figura 9– Queda de blocos em frente ao Túnel de Santa Teresa, Rio de Janeiro (G1, 2011).

### 2.2.2. MEDIDAS MITIGADORAS PARA QUEDA DE BLOCOS

De acordo com Rocha (2009), ocorrências de queda de blocos que não são protegidas por barreiras naturais (vegetação) ou construídas (artificiais), atingem áreas residenciais ou equipamentos públicos, bloqueiam rodovias e ferrovias, proporcionando risco e/ou danos humanos e materiais (Figura 10). A estabilidade da encosta será benéfica caso seja identificado o processo de controle mais importante que afeta sua segurança e determinado a técnica apropriada que precisa ser aplicada para reduzir a atuação desse processo. Por isso, são estudadas algumas medidas mitigadoras para este tipo de evento, tais como (Highland & Bobrowsky, 2008):

- Muros/barreiras de contenção;
- Paredes de pedras, cortinas, malha, redes ou outras coberturas de taludes;
- Corte para estabilização do talude;
- Valas de retenção;
- Destruição por detonação de áreas de risco para remoção de materiais instáveis;
- Cobertura de proteção por cima de rodovias;
- Drenagem;
- Âncoras, parafusos e buchas;
- Remoção de rochas ou outros materiais que estejam em rodovias ou ferrovias;
- Sinais de alerta em áreas de risco;
- Revegetação;
- Impedir construção de moradias ou estacionamento em locais sobre encostas.



Figura 10– Exemplo de barreira de contenção com tela metálica (Peila *et al.*, 1998, *apud* Dias & Barroso, 2006).

A seguir, serão apresentados exemplos de proteção ativa (Figura 11), representado por uma forma de eliminar qualquer sinal de deslocamento dos blocos, estabilizando o maciço rochoso (Flórez-Gálvez, 2012). A medida mitigadora identificada por instalação de redes metálicas ancoradas é empregada com mais frequência e não precisa de drenagem para o seu funcionamento. Já o uso de grelhas e contrafortes são indicados para taludes rochosos fraturados e com presença de blocos grandes. Grelhas são estruturas representadas por vigas horizontais e verticais em concreto reforçado com presença de ancoragens, já os contrafortes, são estruturas de concretos reforçado, associadas ou não a ancoragens, chumbadores ou grampos (Rocha, 2009).



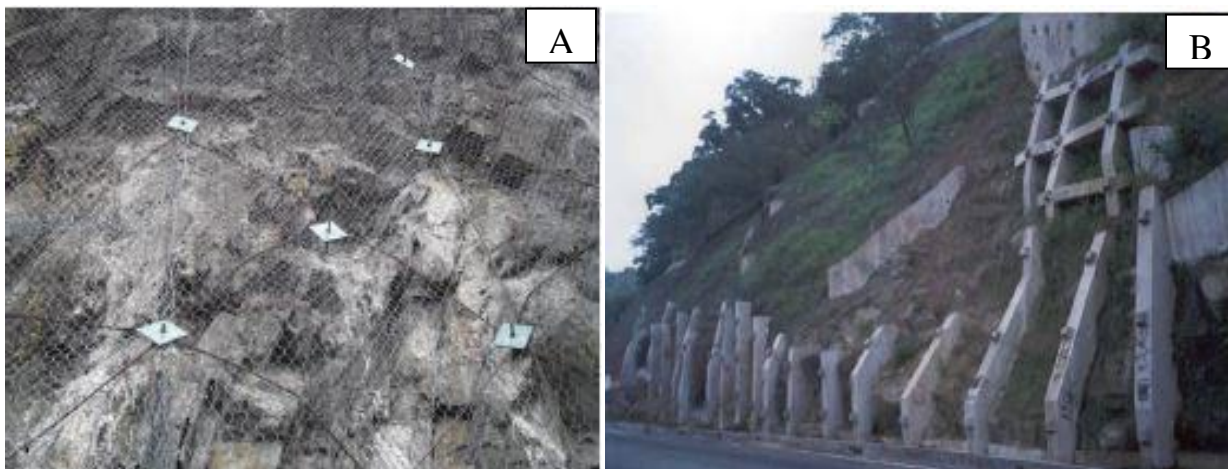


Figura 11– Proteção ativa: (a) Estabilização por redes metálicas e chumbadores (Geobrug, 2012, *apud* Flórez-Gálvez, 2012). (b) Uso de contrafortes e grelhas ancoradas (Geo-Rio *apud* Flórez-Gálvez, 2012).

As medidas de mitigação de proteção passiva não impedem o deslocamento dos blocos, tendo que conviver com o problema, porém, essas proteções apresentam baixo custo, resistência máxima ante os impactos e durabilidade (Flórez-Gálvez, 2012). Abaixo, encontram-se os exemplos de barreira rígida vertical e cortes em banquetas de taludes (Figura 12).



Figura 12– Proteção passiva: (a) Barreiras de proteção rígidas (Geobrug, 2012, *apud* Flórez-Gálvez, 2012). (b) Corte rochoso em banquetas (Flórez-Gálvez, 2012).

Uma desvantagem do corte em banquetas é a trajetória do blocos no processo de saltação, no qual conseguem atingir grandes distâncias. No caso da barreira de proteção, o amortecimento do impacto ajuda a conter a maioria dos blocos, porém, em algumas situações, existem dificuldades para esse tipo de medida de mitigação como exemplo, grande altura da barreira de proteção para obter alta acumulação de blocos.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada buscou analisar numericamente o alcance das quedas de blocos utilizando o software *RocFall 4.0*, a partir de simulações de encostas mais realistas. A seguir, serão apresentadas as etapas metodológicas referentes à pesquisas bibliográficas e trabalhos em laboratório:

- Estudo bibliográfico do Manual de perigo e risco;
- Definição dos cenários mais frequentes das encostas brasileiras (geológica e geomorfológica);
- Parâmetros da modelagem computacional;
- Simulações no software RocFall.

#### 3.1. PROJETO GIDES

No início, realizou-se uma pesquisa bibliográfica de casos reais de queda de blocos já ocorridos e relatados na literatura científica, divulgados por órgãos responsáveis pela mitigação de desastres naturais. Foram coletadas informações em periódicos, teses, artigos científicos para os parâmetros da modelagem computacional, que serão abordados mais a frente, e principalmente, informações de eventos reais brasileiros de queda de blocos no Manual técnico de Mapeamento de Perigo e Riscos a Movimentos Gravitacionais de Massa elaborado no projeto GIDES/JICA.

Frente aos desastres naturais que têm sido cada vez mais recorrente no Brasil, especialmente após o acidente da Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, o governo brasileiro com a participação de diversos órgãos do Brasil, em destaque a CPRM, propôs junto ao governo Japonês um acordo de cooperação técnica internacional (CTI), com reuniões, workshops e treinamento internacional, para a gestão integrada de riscos em desastre. Dessa forma, iniciou-se em 2013 o Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais (GIDES) em parceria com os Japoneses.

Com este manual foram analisados a altura e inclinação dos taludes e encostas, e o elemento geomorfológico (rampa).

O estudo abordado no manual para as características de encostas utilizadas nas simulações deste trabalho, refere-se à delimitação das áreas críticas e de dispersão por meio da aplicação de critérios topográficos, analisados através das curvas de nível e/ou da carta de inclinação, ou em campo. Sobre o modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo gera-se uma carta de inclinação. A carta é utilizada para as análises dos processos de queda de blocos, com o objetivo de obter os registros de movimentos e as inclinações preferenciais de deflagração (CPRM, 2018).

De acordo com a CPRM (2018), no processo de queda de blocos são selecionadas encostas com inclinação mínima de 50°, constituídas total ou parcialmente por maciço rochoso, cuja amplitude mínima é de 5 metros (Figura 13). Ademais, o processo de queda de blocos foi subdividido em três grupos, definidos em função da existência ou não de rampa, e da inclinação do maciço rochoso (Figura 14). Desse modo, tais condições foram adotadas para a modelagem das encostas desta pesquisa, considerando-as como medidas conservadoras.

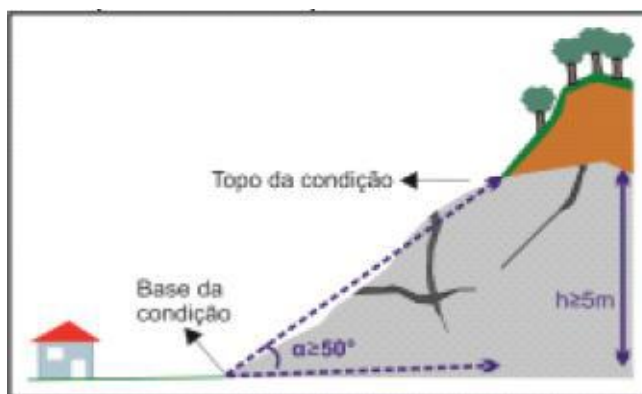


Figura 13– Critério topográfico de seleção de encostas potenciais referentes ao processo de queda de blocos (CPRM, 2018).

Observação: A letra (h) corresponde à distância, em metros, entre o topo do maciço rochoso e a quebra de inclinação de 50° da encosta.

A presença do elemento geomorfológico (rampa) influencia significativamente no alcance e na trajetória do bloco rochoso. Portanto, definiu-se o Grupo I como encostas com rampa (Figura 15). A inclinação da rampa varia de 20° a 50° no máximo, que pode ser acompanhada ou não de escarpa rochosa. Ela pode ser reconhecida por meio de carta de inclinação, espaçamento das curvas de nível ou levantamento de campo (CPRM, 2018).

As encostas sem a presença de rampa foram divididas em dois grupos. O Grupo II refere-se aos maciços rochosos com inclinação de 50° a 70°, onde ocorre o predomínio de saltação. O Grupo III condiz às encostas com inclinação superior a 70° (Figura 16). Destaca-se que pelo limite estabelecido pela CPRM para o alcance dos blocos em cada grupo foi considerado os valores finais da área crítica (Tabela 1).

Tabela 1- Limite estabelecido para o alcance máximo dos blocos na área crítica e na área de dispersão (CPRM, 2018).

LIMITE ESTABELECIDO		
GRUPOS	ALCANCE (m)	
	ÁREA DE DISPERSÃO	ÁREA CRÍTICA
I	200	200
II	200	100
III	100	50

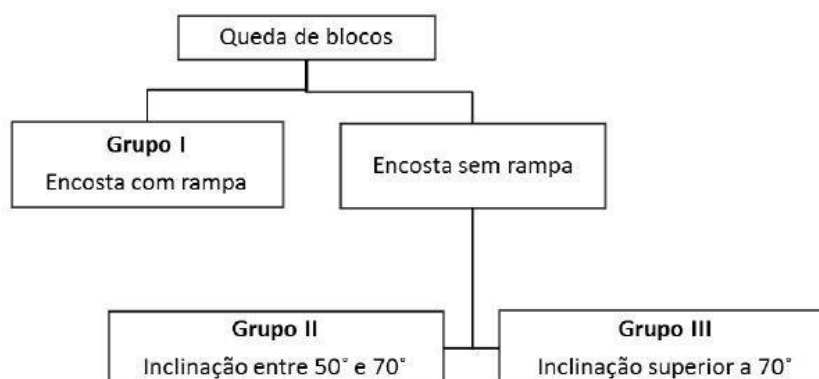


Figura 14– Grupos de análise referentes ao processo de queda de blocos (CPRM, 2018).

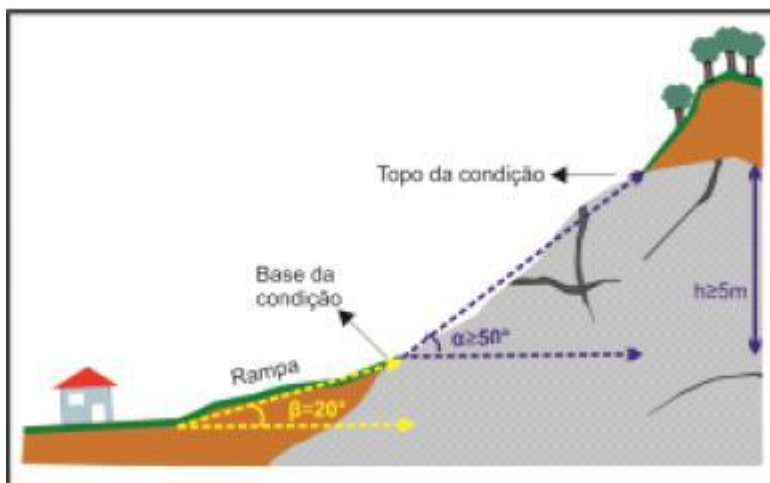


Figura 15– Encosta com presença de rampa - Grupo I (CPRM, 2018).

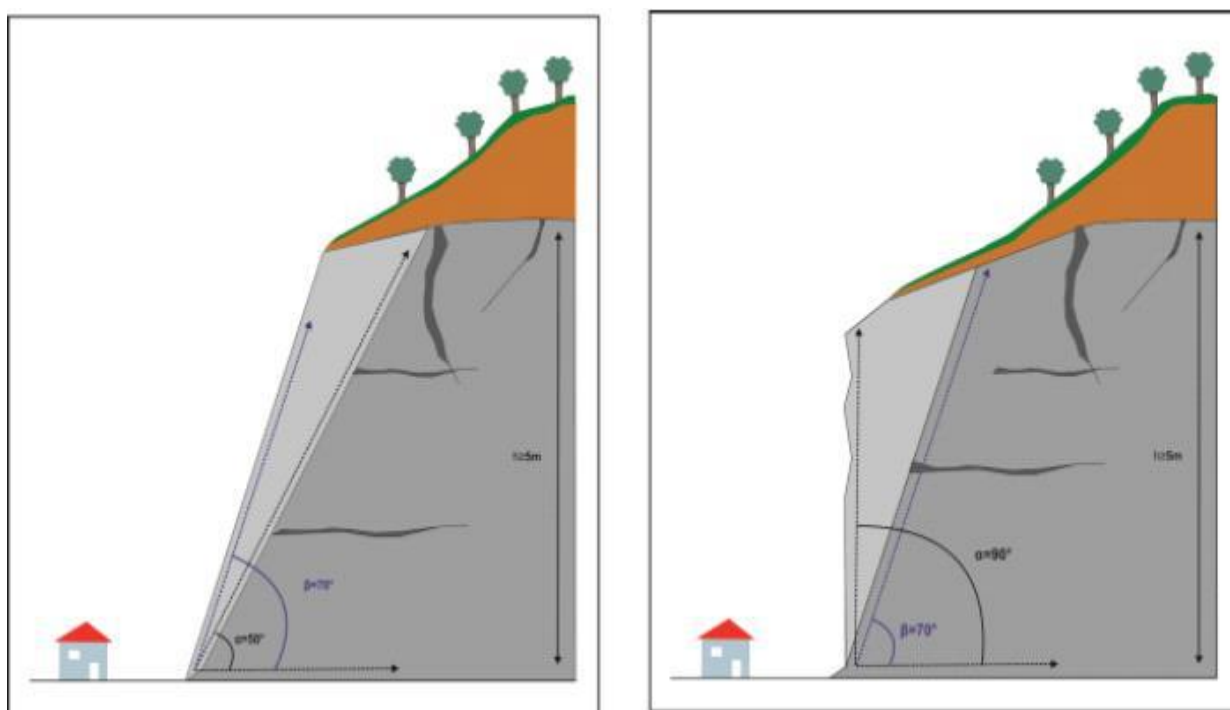


Figura 16– Encostas sem presença de rampa (CPRM, 2018).

Observação: À esquerda, configuração do Grupo II, com inclinação variando de 50° a 70°. À direita, configuração do Grupo III, com inclinação superior a 70°.

Segundo CPRM (2018), entende-se como área crítica, a área com maior probabilidade à deflagração de movimentos gravitacionais de massa. Já a área de dispersão, entende-se como sendo a área sujeita a deposição do material mobilizado durante um movimento gravitacional de massa.

Para auxiliar na explicação da existência da rampa, a Figura 17 apresenta um perfil topográfico da imagem de satélite (Google Earth) da cidade de Quitandinha – Petrópolis, Rio de Janeiro. Essa encosta representa os tipos de modelagens realizadas neste trabalho.



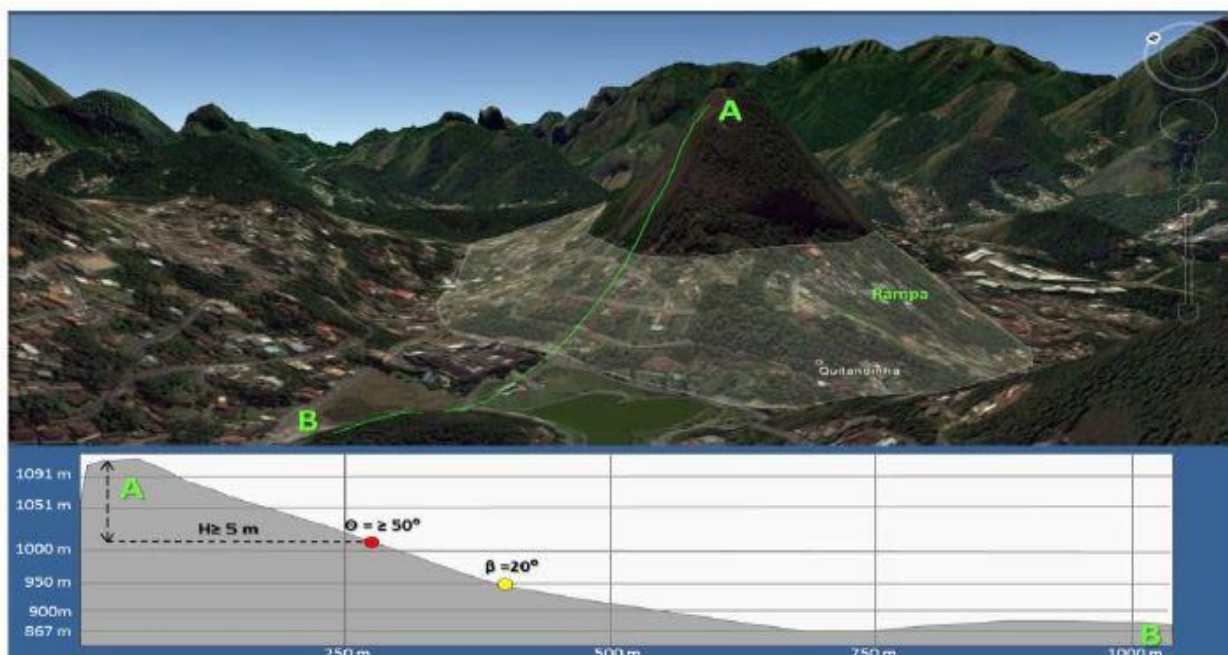


Figura 17– Identificação de rampa com utilização de Google Earth (CPRM, 2018).

### 3.2. PARÂMETROS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

A próxima etapa da metodologia, após o estudo bibliográfico, foi fazer o levantamento de todos os elementos dos parâmetros do programa RocFall, para em seguida, passar pelas etapas de entrada dos dados e por fim, realizar as simulações, como será detalhado na subseção 3.3.2.

Os parâmetros físicos considerados nas análises do RocFall são: coeficiente de restituição normal e tangencial com seus respectivos desvios padrões; ângulo de atrito com seu desvio padrão; rugosidade; velocidade horizontal e vertical; massa do bloco calculadas em função do volume e da massa específica, com seu desvio padrão; e velocidade angular. Também foram considerados nas análises a altura e inclinação do talude; o elemento geomorfológico (rampa); e materiais presentes na trajetória dos blocos.

Neste trabalho considerou-se que ao longo da trajetória os blocos encontram afloramentos de rocha sã, e nas rampas, depósito de tálus e solo residual. O efeito da variação destes parâmetros é analisado através da trajetória de movimento, alcance e energia de impacto dos blocos nos experimentos numéricos.

A seguir, na Tabela 2, será apresentada os dados dos parâmetros utilizados para a definição da geometria dos taludes com os respectivos materiais presentes no maciço rochoso. Essas características foram empregadas em todas as simulações e para todas as litologias.

As alturas e as inclinações selecionadas são baseadas nos estudos de encostas brasileiras, tomando como base a altura mínima de 5 metros e a inclinação mínima de 50° (CPRM, 2018).

Tabela 2 - Parâmetros para a definição dos taludes.

PARÂMETROS					
DOMÍNIO	ALTURA (m)	INCLINAÇÃO DO TALUDE (graus) SEM RAMPA	INCLINAÇÃO DO TALUDE (graus) COM RAMPA	ALTURA DA RAMPA (m)	DOMÍNIO RAMPA COM SUA RESPECTIVA INCLINAÇÃO (graus)
Gnaise	5, 10, 20, 40, 80 e 100	50, 60, 70, 80 e 90	50 e 90	10	Depósito de Tálus = 40° e Solo Residual = 30°
Granito					
Arenito					
Basalto					

- COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO:

O coeficiente de restituição ( $e$ ) está relacionado à energia cinética dissipada dos blocos durante o choque com a superfície de contato. Os valores para estes coeficientes são obtidos a partir da relação entre a velocidade de afastamento ( $v_{n+1}$  ou  $v_{post}$ ) e a velocidade de aproximação ( $v_n$  ou  $v_{pre}$ ), onde no final, atualiza a velocidade (Equação 1). Eles variam em função do material que compõe a superfície da encosta simulada (Rocha, 2009).

$$e = \frac{v_{n+1}}{v_n} \quad (1)$$

De acordo com Peng (2000), existem diversos procedimentos para a obtenção destes valores, desde retroanálise a partir de lançamentos de blocos *in situ*, testes em laboratório, ou correlação com algumas propriedades dos materiais envolvidos.

O coeficiente é dividido em três tipos de colisões. O primeiro é a colisão perfeitamente elástica, no qual o bloco ao se chocar com a superfície não perde energia, e portanto, seu coeficiente é igual a 1. O segundo é a colisão perfeitamente inelástica, no qual o bloco ao se chocar com a superfície perde totalmente a energia, e portanto, seu coeficiente é igual a 0. Por último, temos a colisão parcialmente inelástica, no qual a energia é perdida gradualmente durante sucessivos choques do bloco com a superfície, onde seu coeficiente varia de 0 a 1 (Figura 18).

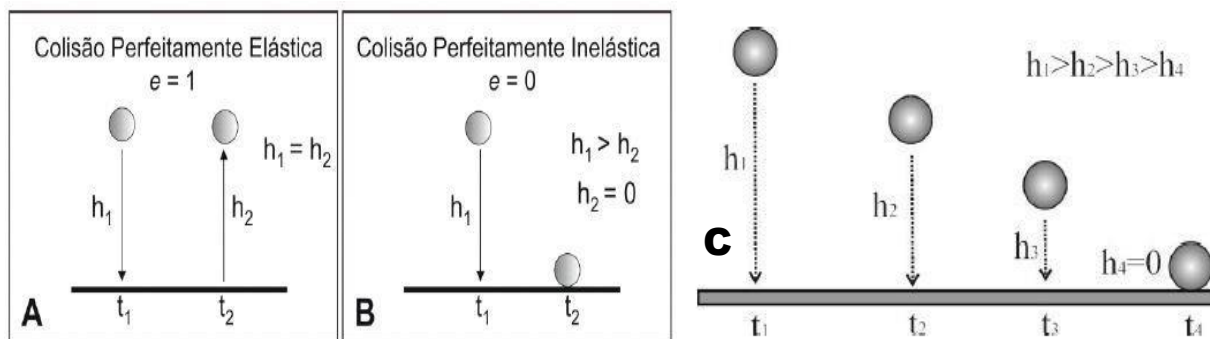


Figura 18 - Tipos de Colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica (Dias & Barroso, 2006); (C) Colisão Parcialmente Inelástica (Ribeiro, 2013).

O bloco, durante o choque em superfícies inclinadas, apresenta coeficiente de restituição formado por duas componentes: um normal e a outra, tangencial a encosta (Figura 19). As velocidades normal e tangencial à inclinação são reduzidas pelo coeficiente normal da restituição:  $e_n$  e coeficiente tangencial da restituição:  $e_t$  (Rocha, 2009). Essas componentes são definidas segundo as equações 2 e 3.

$$e_n = \frac{v_n^{n+1}}{v_n^n} \quad (2)$$

$$e_t = \frac{v_t^{n+1}}{v_t^n} \quad (3)$$

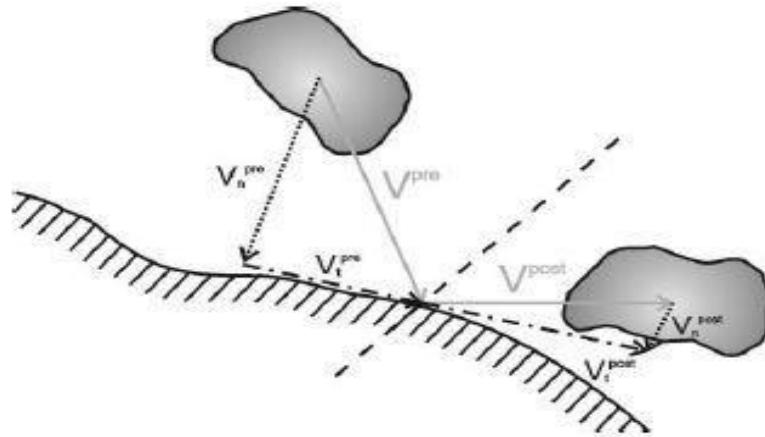


Figura 19 - Componentes da colisão de uma partícula em um plano inclinado (Giani *et al.*, 2004).

Para o cálculo dos coeficientes normal e tangencial é preciso conhecer os valores dos seguintes parâmetros (Figura 20): altura do bloco antes ( $h_n$ ) e após o impacto ( $h_{n+1}$ ); inclinação da encosta ( $i$ ); ângulo de inclinação ( $\gamma$ ) do vetor velocidade, também conhecido como ângulo de impacto (Ribeiro, 2013). O coeficiente de restituição é representado em função da aceleração da gravidade. As equações 4 e 5 interpretam a relação desses parâmetros com os coeficientes normal e tangencial.

$$e_n = \frac{\text{sen}(\gamma+i)}{\text{sen}\gamma \text{cos}i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad (4)$$

$$e_t = \frac{\text{cos}(\gamma+i)}{\text{sen}\gamma \text{sen}i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad (5)$$

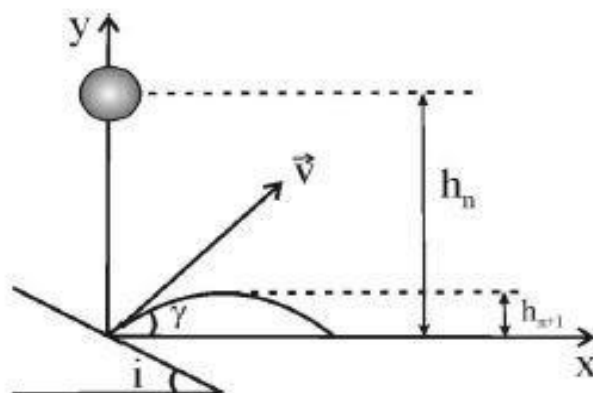


Figura 20 - Relação entre colisão de uma partícula em um plano inclinado (Modificado de Carnevale, 1991, *apud* Ribeiro, 2013).

Os valores para os coeficientes de restituição normal e tangencial junto com seus respectivos desvios padrões, foram adotados da literatura científica para os domínios estudados (gnaisse, granito, arenito e basalto) e os materiais presentes na rampa (tálus e solo residual), conforme encontram-se ilustrados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Valores do Coeficiente de Restituição Normal e Tangencial para encostas SEM rampa.

PARÂMETROS					
DOMÍNIO	Coeficiente de Restituição: SEM rampa				REFERÊNCIA
	COR N	Desvio-padrão	COR T	Desvio-padrão	
Gnaisse	0.60	0.04	0.90	0.04	Hoek E. RocFall, 1990
Granito	0.60	0.04	0.75	0.04	Antão, 2014
Arenito	0.35	0.05	0.62	0.05	Topal <i>et al.</i> , 2012
Basalto	0.80	0.04	0.60	0.04	Peng, 2000

Tabela 4 - Valores do Coeficiente de Restituição Normal e Tangencial para encostas COM rampa.

PARÂMETROS										
DOMÍNIO	Coeficiente de Restituição: COM rampa									
	TÁLUS				REFERÊNCIA	SOLO RESIDUAL				REFERÊNCIA
	COR N	Desvio-padrão	COR T	Desvio-padrão		COR N	Desvio-padrão	COR T	Desvio-padrão	
Gnaisse	0.30	0.04	0.80	0.04	Pfeiffer <i>et al.</i> (1989, <i>apud</i> Manual do usuário de RocFall)	0.25	0.06	0.55	0.06	Giani (1992, <i>apud</i> Manual do usuário de RocFall)
Granito										
Arenito										
Basalto										

É preciso ter mais atenção e estudos a respeito do coeficiente de restituição, por ser um parâmetro mais importante em simulações de software envolvendo queda de blocos. Em conformidade com Ribeiro (2013), seus valores na literatura científica ainda são escassos e os que existem, variam muito entre autores para o mesmo material que compõe a superfície da encosta.



- **ÂNGULO DE ATRITO:**

Segundo Rocscience (2003), o ângulo de atrito é escolhido com base na forma do bloco e no modo de movimento. Se a seção da encosta apresentar uma inclinação maior que o ângulo de atrito, o bloco situado nessa seção continuará seu movimento. Mas, se o ângulo de atrito for maior que a inclinação da encosta, o bloco tenderá ao repouso.

O ângulo de atrito pode ser medido por meio de ensaios de laboratório ou em ensaios de modelos reduzidos (Rocha, 2009). Na Tabela 5 é apresentado o resumo do parâmetro de ângulo de atrito de todos os materiais considerados nas análises deste estudo.

Foi estimado o mesmo ângulo de atrito do gnaïsse para o granito e arenito, porque segundo Selby (2005), o ângulo de atrito do granito encontra-se na faixa de 29° a 35°. Da mesma forma, o ângulo de atrito para arenito, encontra-se na faixa de 25° a 35°. Conforme outros autores como o Goodman (1989), o ângulo de atrito do granito é elevado e o ângulo de atrito do arenito é baixo, o que não corresponde aos valores estimados neste trabalho.

Tabela 5 - Dados do parâmetro de ângulo de atrito e seu respectivo desvio padrão.

PARÂMETROS							
DOMÍNIO	Ângulo de Atrito: SEM rampa (graus)	Desvio- Padrão	REFERÊNCIA	Ângulo de Atrito: COM rampa (graus)		Desvio- Padrão	REFERÊNCIA
				TÁLUS	SOLO RESIDUAL		
<b>GNAISSE</b>	29,6	2	Ribeiro, 2013	29,6	20,3	2	Ribeiro, 2013
<b>GRANITO</b>	29,6		Selby, 2005				
<b>ARENITO</b>	29,6		Selby, 2005				
<b>BASALTO</b>	30,5		Binal & Ercanoğlu, 2010				

- **RUGOSIDADE:**

A rugosidade é um parâmetro usado para modelar as variações locais na geometria, em uma escala que é medida entre os vértices que o usuário inseriu como a geometria da encosta. Como o programa apresenta seções transversais por linhas retas, o choque do bloco com a superfície se dará em uma mesma direção. Dessa forma, o ângulo de rugosidade se aplica a um desvio padrão no ângulo de inclinação da encosta, representando as imperfeições da superfície durante a trajetória do bloco. Caso esse parâmetro seja desconsiderado, a superfície do talude seria considerada completamente lisa (Flórez-Gálvez, 2012; Rocha, 2009).

A determinação deste parâmetro pelo usuário é baseado na forma e tamanho do bloco, e nas características da encosta em diferentes pontos da declividade. Em seguida, é feita uma análise de frequências nos dados. Conforme o tutorial do programa RocFall, os valores da rugosidade são geralmente muito pequenos. Os valores comuns para o desvio padrão da rugosidade da encosta são 0, 2, 3 ou 5 graus (Rocscience, 2003). Assim sendo, a rugosidade do programa foi fixada com um valor igual a zero graus para não haver intervenções, ou seja, o segmento se comportará como o segmento de linha reta original.

- MASSA DO BLOCO:

As massas dos blocos utilizadas no atual trabalho foram calculadas a partir dos valores da massa específica ( $\rho$ ) para cada material presente na encosta, em função do volume dos blocos (Equação 6). Portanto, foram usados blocos, para cada litologia, com três massas diferentes.

$$\text{massa do bloco} = \rho \times \text{volume} \quad (6)$$

A massa específica obtida da literatura científica foi determinada através de vários ensaios realizados em laboratório, com base na técnica de saturação, sobre amostras cilíndricas adquiridas nas sondagens (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores da massa específica com seu desvio padrão e massas dos blocos para os respectivos materiais de estudo da encosta.

PARÂMETROS						
DOMÍNIO	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Massas dos blocos (kg)			REFERÊNCIA
Gnaisse	2.630	0.4	2.630	13.150	26.300	Ribeiro, 2013
Granito	2.600		2.600	13.000	26.000	Moreira <i>et al.</i> , 2003
Arenito	2.366		2.366	11.830	23.660	Navarro, 2006
Basalto	2.800		2.800	14.000	28.000	Goodman, 1989

Os volumes da literatura científica são de blocos soltos obtidos em diversos acidentes de queda de blocos individuais que ocorreram ao longo dos anos no Rio de Janeiro. Conforme ilustrado na Tabela 7, os volumes dos blocos variam de 0,002 a 12,0 m<sup>3</sup>, portanto, no presente trabalho foram selecionados três volumes dessa faixa para todas as litologias, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 7 - Volume dos blocos em histórias de casos de queda de blocos no Rio de Janeiro (Vargas, Jr. *et al.*, 2004).

Localização	Data	Volume (m <sup>3</sup> )
Felipe Oliveira, Copacabana	18.02.2001	0.002
Niemeyer, Leblon	29.05.2001	0.002
Cond. Village, Jacarepaguá	18.06.2001	3.5
R. Barros Pedra Lisa	21.07.2001	3.0
A. Ramos, Botafogo	23.07.2001	12.0
Clarimundo de Melo, Piedade	27.07.2001	0.2
Cel Tito Carrilo, Paciência	26.10.2001	—
Sta Terezinha, Madureira	24.12.2001	2.0
Blumenau, Cascadura	24.12.2001	7.0
Aimará, Ramos	24.12.2001	3.0
Luís Catanhede, Laranjeiras	07.05.2002	0.4
Cascatinha, Vargem Grande	31.07.2002	2.0
Mal Rondon, Riachuelo	06.11.2002	0.15
V. de Sabóia, Cavalcante	10.12.2002	1.0
Sta Luzia, Grotão da Penha	08.01.2003	0.5
Clarimundo de Melo, Piedade	29.08.2003	1.0

Tabela 8 - Volumes dos blocos utilizados nas simulações.

PARÂMETRO	
DOMÍNIO	Volume (m <sup>3</sup> )
Gnaise	1, 5 e 10
Granito	
Arenito	
Basalto	

- VELOCIDADE ANGULAR:

O software RocFall permite que o usuário empregue a velocidade angular para os cálculos e definição das trajetórias de queda de blocos (Flórez-Gálvez, 2012). Para isso, é preciso que a velocidade angular seja considerada, o que foi atendida para o atual estudo. Este parâmetro representa o processo de rotação (mudança de orientação) que ocorre em um bloco rochoso em um instante de tempo.

Para este trabalho buscou-se variar a velocidade angular para melhor entendimento do alcance dos blocos em diversos eventos de queda de blocos já que este tipo movimento é extremamente rápido e também, por ser um parâmetro difícil de se obter em um evento real de queda de blocos. Foram usadas três velocidades angulares para cada litologia.

De acordo com Wyllie (2014), os blocos rotacionam como resultado do momento gerado pela velocidade tangencial e pela resistência ao atrito no contato do bloco com a superfície da encosta. Dessa forma, a medição da velocidade angular das quedas de blocos no campo requer o uso de câmeras de alta velocidade ou acelerômetros embutidos em blocos de rocha, conforme usado no local de testes de Ehime, Japão.

Tendo a envoltória na faixa de blocos de rocha de 5 a 25 rad/s, e levando em consideração a maior parte dos casos, foram realizadas simulações para todas as litologias com os valores da velocidade angular de 5 e 20 rad/s (Figura 21). Além disso, outro valor utilizado nas simulações foi estimado para uma rápida rotação ao iniciar a queda de bloco, por esse parâmetro ainda ser escasso na literatura científica (Tabela 9). Sabe-se que o valor alto da velocidade angular é raro de ocorrer em um evento real de queda de blocos, porém, foi utilizado esse dado para poder compreender melhor este parâmetro na influência do alcance máximo.

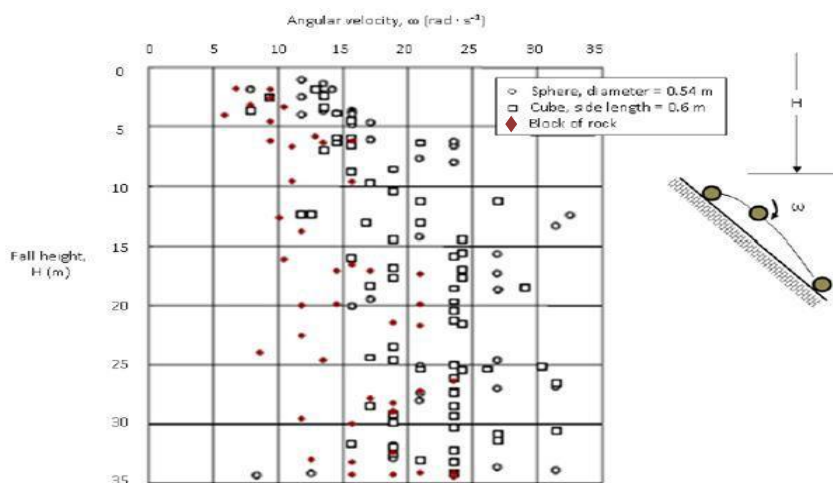


Figura 21 - Relação entre velocidade angular e altura de queda para quedas de blocos no local de testes de Ehime, Japão para blocos de rocha (Ushiro *et al.*, 2006, *apud* Wyllie, 2014).

Tabela 9 - Dados do parâmetro de velocidade angular.

PARÂMETRO		
DOMÍNIO	Velocidade Angular (rad/s)	REFERÊNCIA
Gnaisse	$\pi/8 = 0.39, 5 \text{ e } 20$	Valor estimado; Ushiro <i>et al.</i> , 2006
Granito		
Arenito		
Basalto		

Por fim, foram empregados os seguintes parâmetros para o projeto de modelagem (Tabela 10). Sabe-se que o modelo de cálculo adotado pelo RocFall para a realização das simulações é robusto (Stevens, 1998).

Nesta etapa do programa é permitido o controle do número de blocos, a escolha da geração de números aleatórios, a consideração da velocidade angular e o intervalo de amostragem de dados da trajetória de movimento do bloco. Conforme Rocha (2009), o RocFall realiza análises randômicas para as trajetórias de blocos, desse modo, em cada cálculo executado pelo programa ele fornece diferentes trajetórias. Com o objetivo de obter uma melhor estatística dos resultados do alcance, considerou-se uma grande quantidade de lançamentos de blocos.

Tabela 10 - Parâmetros do projeto de modelagem para o cálculo das trajetórias.

PARÂMETROS	VALORES
Número de blocos lançados	1000
Minimum velocity cut off (m/s)	0.1
Intervalo de amostragem	50
Geração de número	Random
Velocidade inicial (m/s)	0
Velocidade Horizontal e Vertical	0

### 3.3. PROGRAMA NUMÉRICO ROCFALL

RocFall (Rocscience Inc.) é um programa computacional bidimensional vinculado a análises estatísticas e probabilísticas com a finalidade de simular quedas de blocos e assim, definir o alcance e trajetória dos blocos para o estudo de medidas mitigadoras (Figura 22). Segundo Rocha (2009), o programa utiliza o método de massa concentrada, onde os blocos são representados por pontos adimensionais, considerando a massa concentrada no centro de gravidade.

As simulações podem ser simples, abrangendo um tipo de talude e um bloco, ou mais complexo. Podem ser calculados no programa a distribuição de energia, velocidade, altura de saltação do bloco ao longo da encosta e o alcance máximo dos blocos. Também permite alterar as propriedades do material de cada segmento de inclinação; fornece informações sobre barreiras protetoras com altura, inclinação, rigidez; o usuário também pode definir a barreira; e os parâmetros fundamentais da superfície da encosta são os coeficientes de restituição normal e tangencial, rugosidade e ângulo de atrito (Rocha, 2009; Rocscience, 1998-2002).

Nas simulações do programa RocFall é permitido adicionar a geometria do talude, as características do material, velocidade angular do bloco, localização inicial do bloco antes da queda, e a massa do bloco. Quando a geometria do talude é regular, a trajetória do bloco apresenta uma maior precisão no resultado do alcance, porém, em superfície irregular, com mais rugosidade, o alcance do bloco pode aumentar, ou seja, seu resultado não será muito preciso, pois a velocidade do bloco apresenta uma componente horizontal que modifica seu trajeto (Silveira, 2017).

De acordo com Stevens (1998), os cálculos usados na simulação da queda de blocos são bastante sensíveis a pequenas variações dos parâmetros mencionados anteriormente. A vantagem para utilização desse programa é a simplicidade no manuseio e em obter resultados.

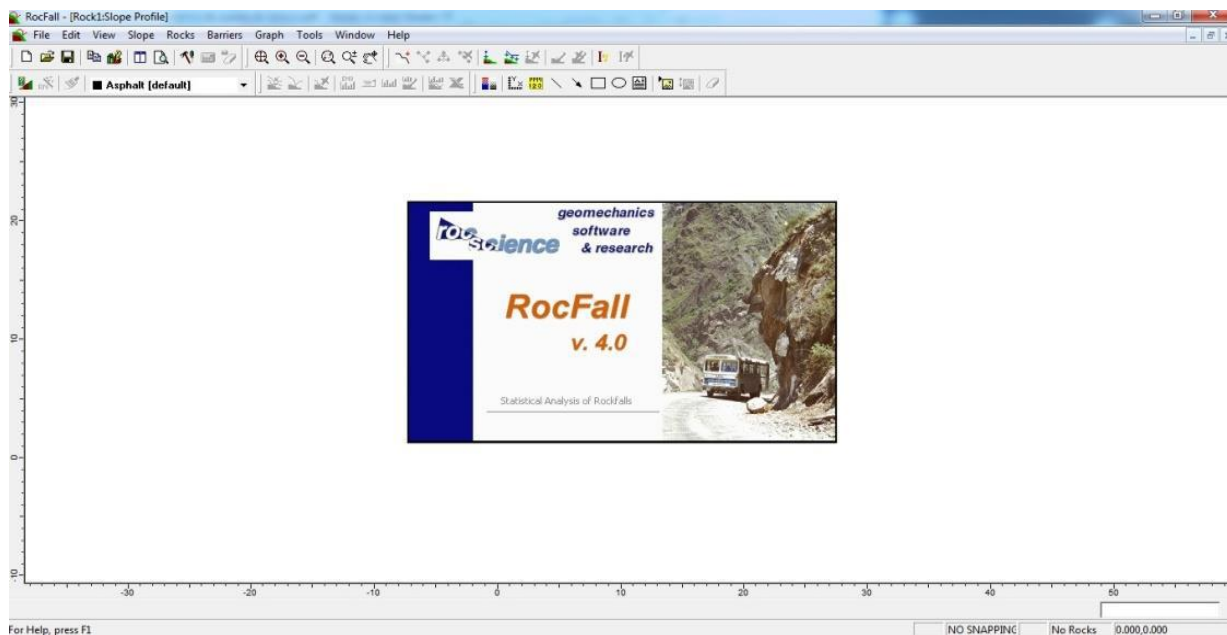


Figura 22 - Página inicial do programa RocFall 4.0 (Rocscience).

### 3.3.1. ALGORITMO DO SOFTWARE ROCFALL

A operação do programa RocFall para o evento de queda de blocos pode ser compreendida da seguinte maneira, levando em conta que esse processo ocorre para cada bloco lançado na encosta rochosa (Figura 23):

- Calcula-se a posição do bloco de rocha em movimento (x;y);
- Verifica-se se a posição pertence à superfície da encosta:
  - i. Caso não pertença: o software calcula novamente a posição do bloco;
  - ii. Caso pertença: aplicam-se os coeficientes de restituição normal e tangencial.
- Atualizam as velocidades de lançamento após cada impacto do bloco;
- Verifica-se se essas velocidades são nulas ou não:
  - i. Caso não seja nula: o software calcula novamente a posição do bloco;
  - ii. Caso seja nula: o processamento se encerra.



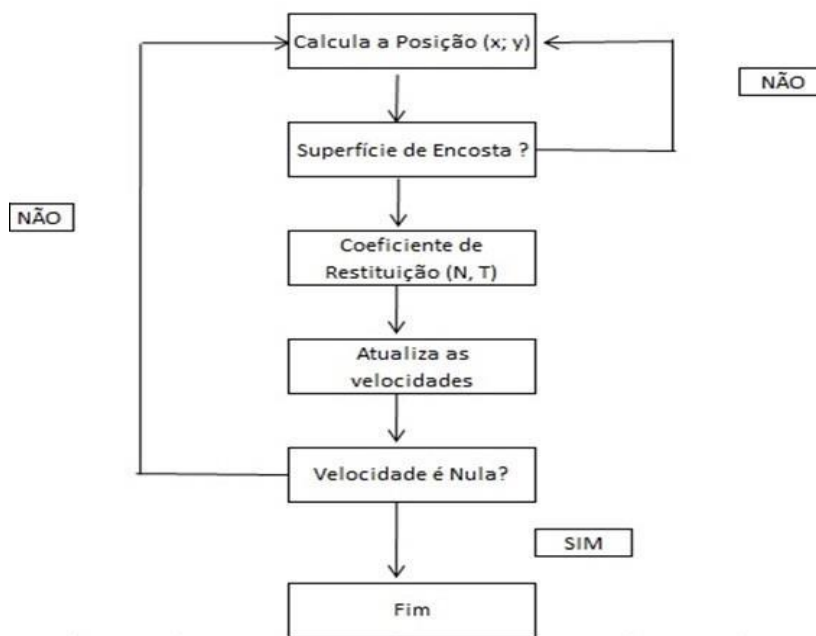


Figura 23 - Algoritmo do software RocFall.

### 3.3.2. SEQUÊNCIA DE TRABALHO NO ROCFALL

Para uma análise específica e dessa forma, obter os resultados dos alcances para cada simulação no software RocFall é preciso passar por várias etapas de entrada de dados. Conforme Tavares (2015), o RocFall apresenta dois modos de apresentação, projeto e resultados. O usuário prepara a sua análise no modo de projeto, definindo a geometria do talude (desenho), posicionando os vértices, especificando as propriedades do seu material e também a localização inicial, características dos blocos e projetando a modelagem. No modo dos resultados, o usuário interpreta os vários tipos de gráficos e a tabela de estatística com as conclusões da sua análise. As Figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30 demonstram a sequência de trabalho para adquirir o alcance.

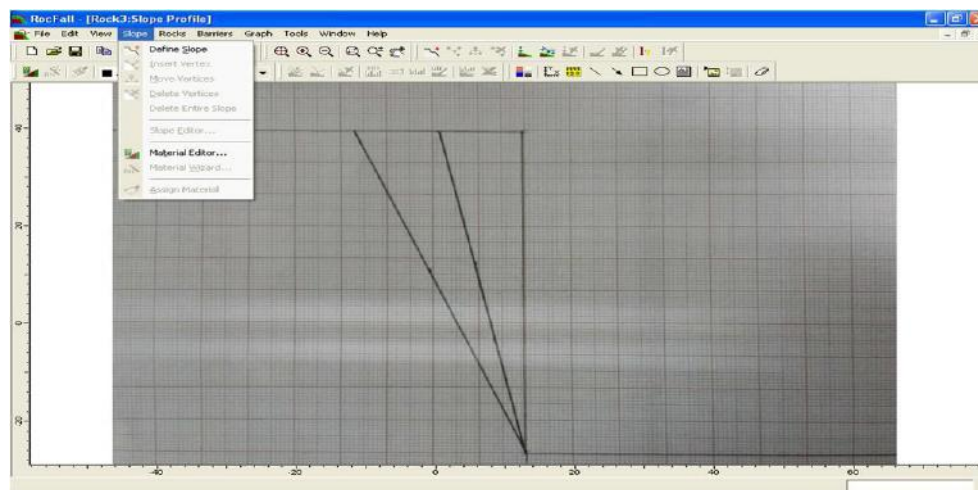


Figura 24 - Geometria do talude.

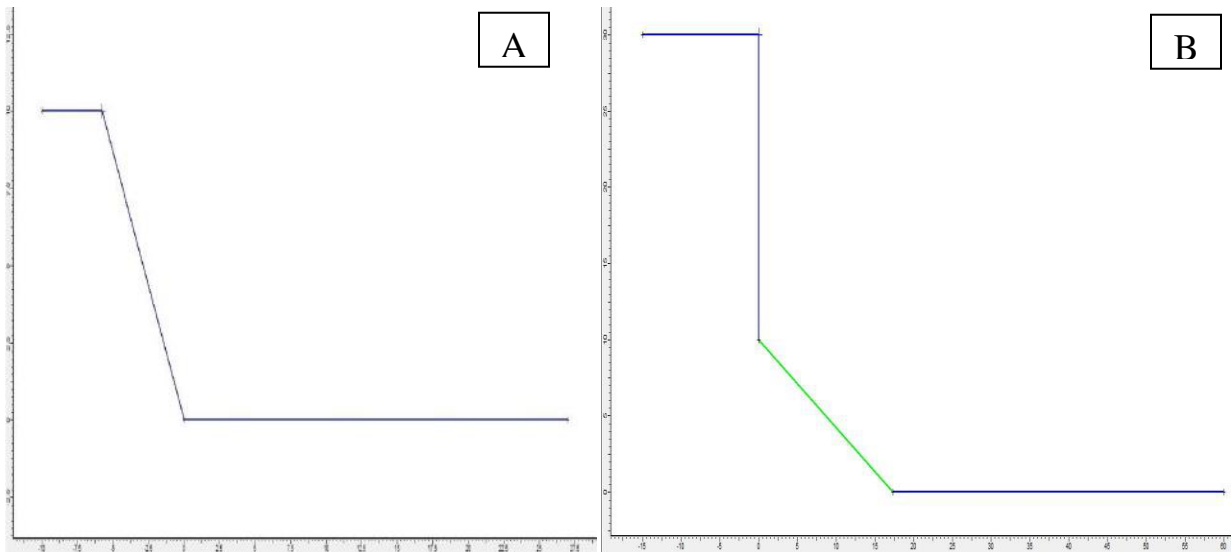


Figura 25 - Desenho do talude: (A) sem rampa. (B) com rampa.

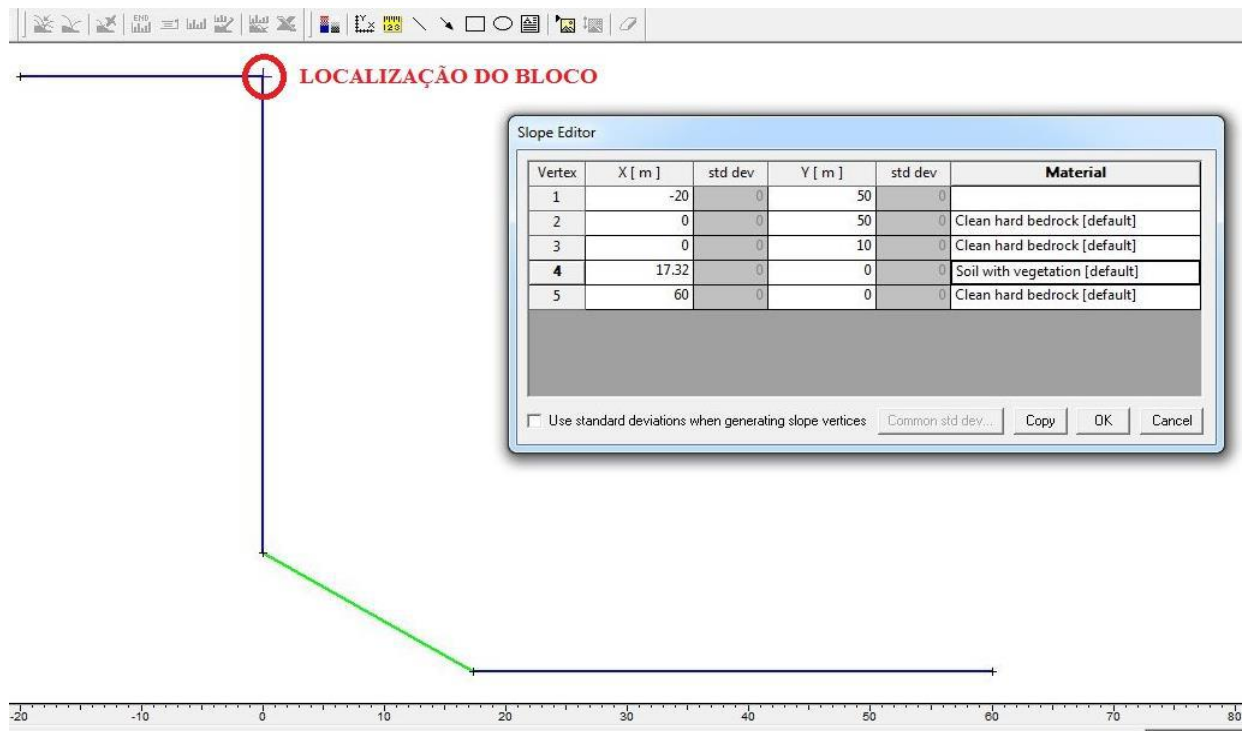


Figura 26 - Posicionamento dos vértices; Propriedade do material; Localização inicial do bloco.

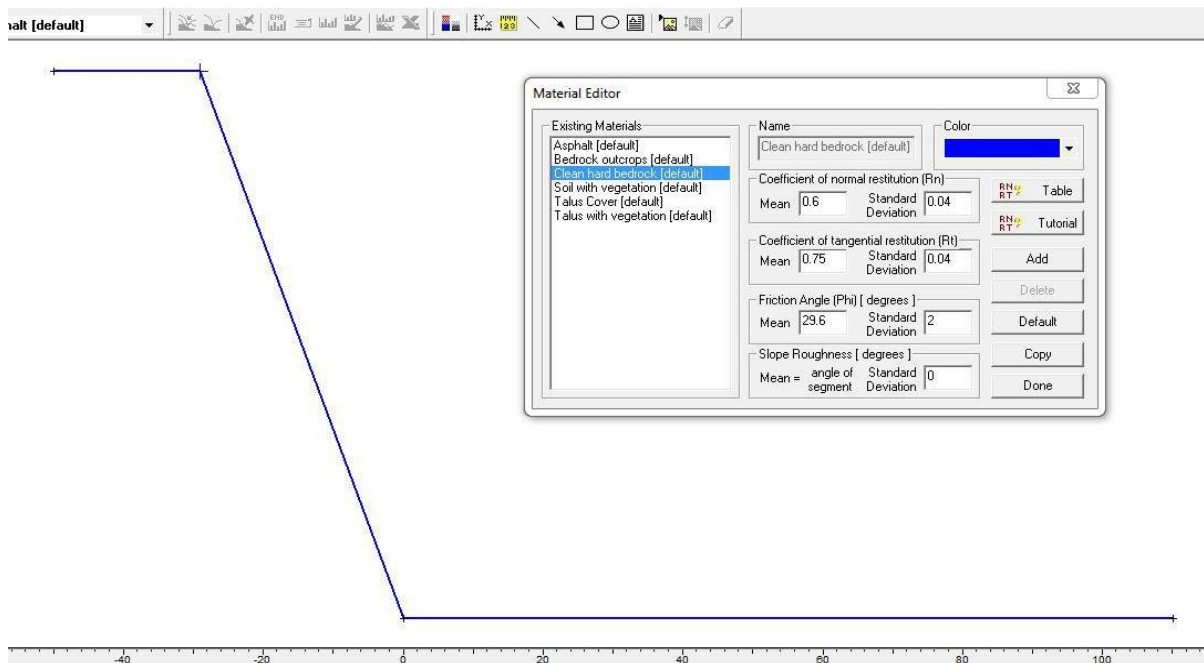


Figura 27 - Parâmetros do material: Coeficiente de Restituição; Ângulo de atrito e Rugosidade.

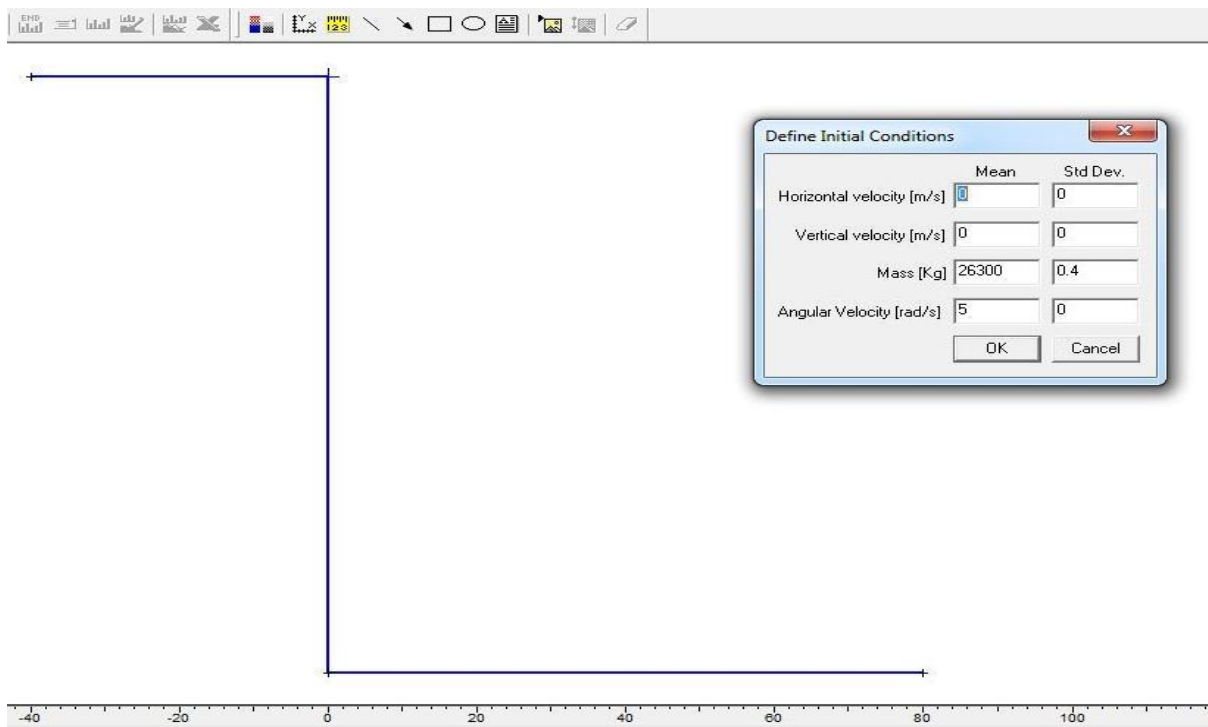


Figura 28 - Parâmetros do material: Velocidade horizontal e vertical; Massa do bloco e Velocidade angular.



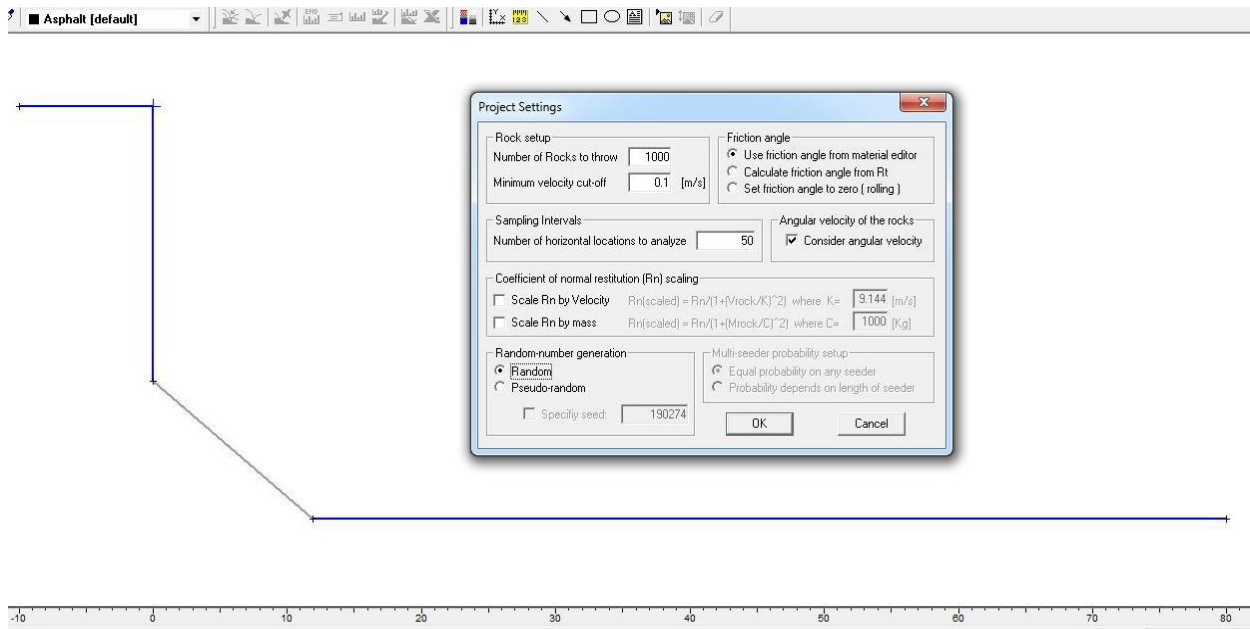


Figura 29 - Projeto da modelagem.

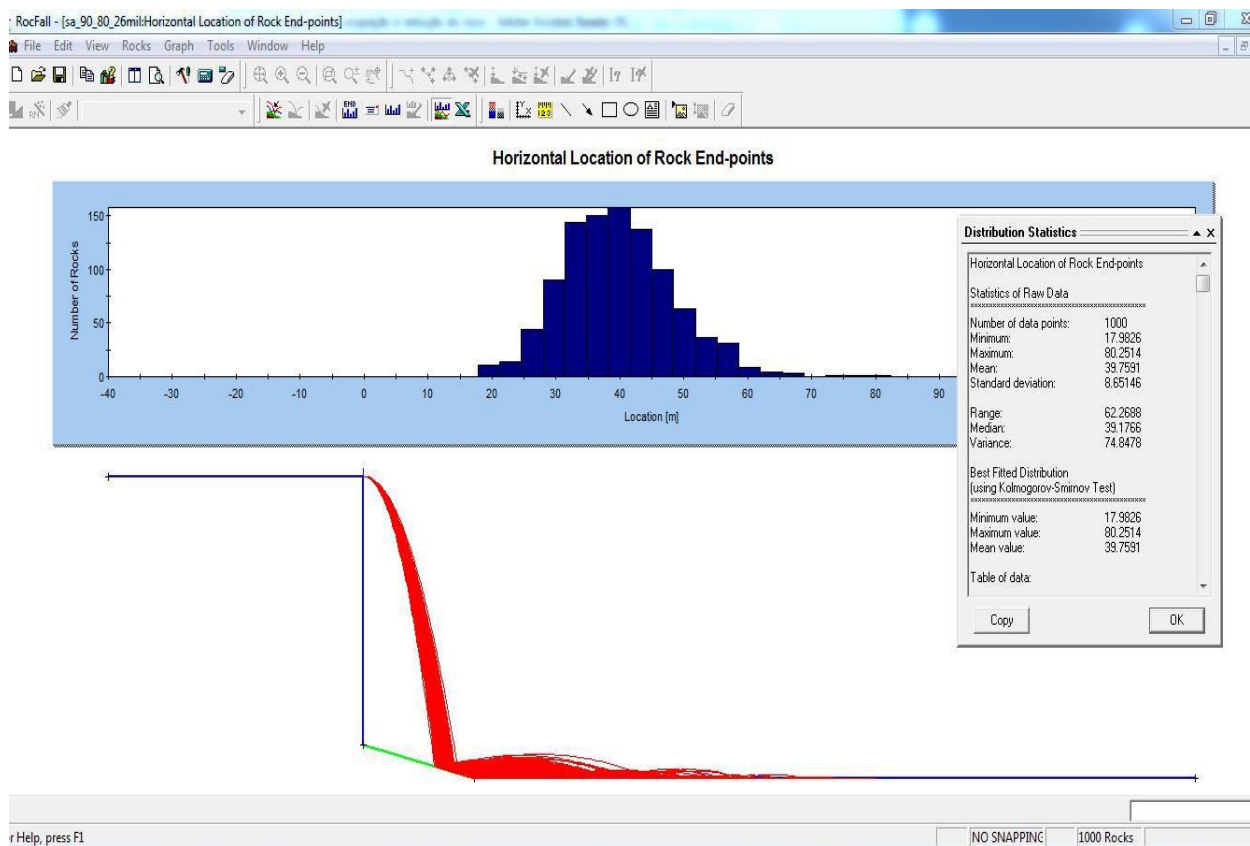


Figura 30 - Resultado final com a trajetória e alcance do bloco.

Nos APÊNDICES do presente trabalho apresentam-se exemplos de simulações realizadas com suas respectivas trajetórias e alcances, dando destaque também para a altura e inclinação da encosta, e a rampa.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises das simulações de quedas de blocos realizados por meio do software RocFall 4.0 tem como objetivo verificar a sensibilidade de diversos parâmetros, citados na seção 3.2, para avaliar os alcances e trajetórias de blocos rochosos em encostas. Para cada simulação realizada foram lançados 1000 blocos. Dessa forma, nas seguintes seções, serão apresentados os resultados dos alcances máximos em diferentes configurações geológicas e geomorfológicas das encostas, e uma rápida discussão deles com relação as sugestões de análise de perigo proposto pelo manual técnico do projeto GIDES.

### 4.1. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE GNAISSE

Nesta primeira análise das simulações estudou-se a influência do talude para o domínio de gnaiss com superfície em rocha sã. Os valores dos principais parâmetros empregados, variando a velocidade angular, foram:

- ✓ Massa específica do bloco: 2.630 kg/m<sup>3</sup>;
- ✓ Volume do bloco: 1 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup> e 10 m<sup>3</sup>;
- ✓ Massa dos blocos: 2.630 kg, 13.150 kg e 26.300 kg;
- ✓ Coeficiente de Restituição: Normal = 0.60 e Tangencial = 0.90;
- ✓ Ângulo de atrito: 29.6°;
- ✓ Para o elemento geomorfológico (rampa):
  - Solo residual:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.25 e Tangencial = 0.55;
    - Ângulo de atrito: 20.3°;
  - Tálus:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.30 e Tangencial = 0.80;
    - Ângulo de atrito: 29.6°.

#### 4.1.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s)

No caso do grupo III (inclinação da encosta > 70°) e sem rampa, para taludes com inclinação de 90°, o alcance máximo obtido varia de 0,58 a 4,26 metros. Para taludes com inclinação de 80°, o alcance máximo obtido varia de 4,40 a 64,68 metros (Tabela 11).

Esses resultados para inclinação de 90° do talude estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 50 metros para encosta superior a 70° de inclinação.

Para o caso dos resultados para inclinação de 80°, de acordo com as alturas do talude superiores a 80 metros, não estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, também com um limite do alcance proposto de 50 metros, porém, os resultados obtidos para as alturas do talude inferiores a 80 metros, estão de acordo com o limite do alcance máximo estabelecido.

Pode-se observar que em encosta com inclinação de 90°, os resultados de acordo com suas respectivas alturas apresentam menores alcances comparados aos resultados de menor inclinação (80°). Observa-se também que a tendência para blocos de menores proporções é atingir distâncias menores comparados aos blocos de maiores proporções.

Tabela 11 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	2,01	3,44	4,26	$\pi/8 = 22,5^\circ = 0.392699082$
	80	1,82	3,23	3,92	
	40	1,46	2,54	3,08	
	20	1,12	1,88	2,40	
	10	0,82	1,38	1,72	
	5	0,58	0,98	1,28	
80	100	<b>59,78</b>	<b>62,22</b>	<b>64,68</b>	
	80	<b>53,68</b>	<b>53,77</b>	<b>53,30</b>	
	40	30,04	31,60	32,74	
	20	16,92	16,43	16,06	
	10	8,43	9,05	8,49	
	5	4,40	4,41	4,56	

Conforme estabelecido pela CPRM, o grupo II apresenta inclinação de 50° a 70° e sem rampa. Na simulação com taludes de inclinação de 70°, o alcance máximo obtido varia de 7,21 a 109,44 metros. Para taludes com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 8,40 a 137,10 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 8,38 a 143,84 metros (Tabela 12).

Os resultados obtidos para inclinação de 70° do talude estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi determinado um limite do alcance de 100 metros para encosta com inclinação de 50° a 70°, com exceção aos resultados dos alcances para alturas do talude superiores a 80 metros, nos quais não estão de acordo com o limite proposto.

Para inclinação de 60° do talude, os resultados obtidos também estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, com exceção aos resultados dos alcances para alturas do talude superiores a 80 metros, em que apresentam alcances excedentes ao limite estabelecido de 100 metros.

No caso dos resultados para inclinação de 50°, segundo as alturas do talude superiores a 80 metros, não estão de acordo com a pesquisa apresentada pela CPRM. Já o restante das alturas inferiores a 80 metros, apresentam resultados dos alcances que estão de acordo com o limite proposto de 100 metros.

Em domínio de gnaisse para encosta sem rampa, foi observado que com a diminuição da inclinação, os resultados do alcance máximo aumentam. Da mesma forma, em todas as inclinações, com a diminuição da altura, os resultados do alcance máximo diminuem.

Tabela 12 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	<b>105,63</b>	<b>107,59</b>	<b>109,44</b>	$\pi/8 = 22,5^\circ = 0.392699082$
	80	90,69	92,39	95,61	
	40	52,50	54,67	53,41	
	20	26,92	27,53	28,40	
	10	14,38	14,54	14,29	
	5	7,22	7,21	7,39	
60	100	<b>128,35</b>	<b>133,29</b>	<b>137,10</b>	
	80	<b>112,09</b>	<b>119,02</b>	<b>117,51</b>	
	40	61,02	63,43	60,47	
	20	33,35	32,45	34,40	
	10	17,38	16,88	16,37	
	5	8,59	8,57	8,40	
50	100	<b>138,52</b>	<b>139,63</b>	<b>143,84</b>	
	80	<b>110,75</b>	<b>107,54</b>	<b>111,01</b>	
	40	61,35	58,43	57,71	
	20	32,17	32,09	33,18	
	10	16,15	16,30	15,99	
	5	8,95	8,46	8,38	

O grupo I (encosta com rampa) que apresenta taludes com inclinação de 90°, e rampa constituído de solo residual (inclinação de 30°), contém resultados do alcance máximo que variam de 28,79 a 113,24 metros. Para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 29,77 a 97,45 metros.

Para o caso de encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), também do Grupo I, os taludes com inclinação de 90° apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 25,02 a 124,02 metros. Em taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 27,21 a 129,86 metros (Tabela 13).

Todos esses resultados para inclinações de 90° e 50° dos taludes, formados por rampa de solo residual, e também por rampa de depósito de tálus, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 200 metros contados a partir da quebra inferior de 30° e 40° da rampa, respectivamente, para as encostas.

Pode-se observar que no geral, em encostas com rampa (solo residual), os resultados do alcance máximo diminuem de taludes com inclinação de 90° para taludes com inclinação de 50°. No caso de encostas com rampa (depósito de tálus), os resultados do alcance máximo diminuem de taludes com inclinação de 90° para taludes com inclinação de 50°, porém, tem algumas exceções nos quais o alcance máximo aumenta do talude com inclinação de 90° para talude com inclinação de 50°.

Em conformidade com as encostas sem rampa, também é possível observar que, com a diminuição da altura, ocorre a diminuição dos resultados do alcance máximo para as encostas com rampa.

No geral, é possível observar que os resultados do alcance máximo para blocos de menores proporções, na encosta com rampa (solo residual), alcançam distâncias maiores comparados aos blocos de maiores proporções. Pode-se dizer que a diferença do coeficiente de restituição, do maciço rochoso com relação a rampa, é o que influencia essa inversão dos resultados de acordo com a proporção do bloco. Na encosta com rampa (tálus) isto não é observado.

Tabela 13 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 0.39$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	113,24	100,91	94,61	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
		80	101,19	88,38	91,22	
		40	62,01	72,68	65,14	
		20	32,84	32,65	30,82	
		10	29,03	29,21	29,58	
		5	28,79	28,79	28,82	
	50	100	97,45	75,43	59,01	
		80	51,71	39,65	32,77	
		40	32,18	32,00	31,01	
		20	30,88	31,19	30,59	
		10	30,41	30,30	30,27	
		5	29,77	30,05	29,91	
TÁLUS	90	100	108,35	112,21	124,02	
		80	99,89	94,39	102,49	
		40	73,25	73,67	76,50	
		20	55,61	58,66	53,59	
		10	36,14	37,49	38,97	
		5	26,64	25,47	25,02	
	50	100	112,41	119,42	129,86	
		80	76,73	98,03	84,33	
		40	44,44	45,49	47,15	
		20	34,58	35,50	38,29	
		10	30,89	30,31	30,03	
		5	27,21	27,61	28,24	

#### 4.1.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s)

Em taludes com inclinação de 90°, o alcance máximo obtido varia de 7,41 a 55,03 metros. Para taludes com inclinação de 80°, o alcance máximo obtido varia de 5,41 a 67,92 metros (Tabela 14). Isso ocorre para as encostas do grupo III (inclinação da encosta > 70°).



Foi estabelecido um limite do alcance de 50 metros para encosta superior a 70° de inclinação, portanto, os resultados para inclinação de 90° do talude estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, exceto dois casos que apresentam altura de 80 e 100 metros, para massa do bloco de 26.300 kg, nos quais possuem resultados acima de 50 metros.

Para inclinação de 80° do talude, os resultados obtidos a partir da altura de 80 metros, não estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, porém, os resultados dos alcances inferiores a essa altura do talude, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, já que não apresentam alcances excedentes ao limite estabelecido de 50 metros.

Tabela 14 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 5$  rad/s.

INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
		2.630	13.150	26.300	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)					
90	100	25,75	42,12	<b>55,03</b>	286,479° = 5
	80	24,39	40,47	<b>51,22</b>	
	40	18,13	30,87	39,14	
	20	13,99	24,99	31,66	
	10	10,28	17,43	22,26	
	5	7,41	12,55	16,36	
80	100	<b>65,37</b>	<b>66,83</b>	<b>67,92</b>	
	80	<b>53,14</b>	<b>56,96</b>	<b>60,10</b>	
	40	31,29	33,08	34,55	
	20	17,49	18,44	19,81	
	10	10,21	10,99	13,05	
	5	5,41	6,99	8,40	

De acordo com o grupo II (inclinação de 50° a 70°), para taludes com inclinação de 70°, o alcance máximo obtido varia de 8,19 a 112,76 metros. Para taludes com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 9,17 a 144,85 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 9,12 a 146,97 metros (Tabela 15).

No caso dos resultados para inclinação de 70°, as alturas do talude superiores a 90 metros, não estão de acordo com a pesquisa apresentada pela CPRM. Os resultados do alcance máximo inferiores a essa altura estão de acordo com o limite proposto de 100 metros.

Os resultados obtidos para inclinação de 60° do talude estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, exceto aos resultados dos alcances para alturas do talude superiores a 80 metros, em que apresentam alcances distintos ao limite estabelecido de 100 metros.

Da mesma forma, para inclinação de 50° do talude, os resultados obtidos também estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi determinado também um limite do alcance de 100 metros, exceto aos resultados dos alcances para alturas do talude superiores a 80 metros.

Para os grupos III e II, pode-se observar que mesmo mudando a velocidade angular, os resultados do alcance máximo aumentam com a diminuição da inclinação da encosta. Observa-se também que com a diminuição da altura, o alcance máximo diminui. E por fim, observa-se que com o aumento da massa do bloco, o alcance máximo aumenta também.

Tabela 15 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	<b>110,49</b>	<b>111,07</b>	<b>112,76</b>	286,479° = 5
	80	91,30	89,90	94,42	
	40	52,95	52,88	56,58	
	20	28,69	28,74	31,06	
	10	14,65	16,56	17,56	
	5	8,19	9,04	10,57	
60	100	<b>134,95</b>	<b>141,59</b>	<b>144,85</b>	
	80	<b>106,70</b>	<b>119,44</b>	<b>120,17</b>	
	40	63,88	68,02	64,35	
	20	32,53	36,02	36,45	
	10	18,19	18,97	20,37	
	5	9,17	11,12	12,00	
50	100	<b>137,53</b>	<b>145,23</b>	<b>146,97</b>	
	80	<b>110,06</b>	<b>112,52</b>	<b>117,68</b>	
	40	60,94	64,44	66,23	
	20	31,68	34,93	35,44	
	10	16,55	18,72	19,26	
	5	9,12	10,47	11,74	

A Tabela 16, referente ao grupo I (encosta com rampa), expressa para taludes com inclinação de 90°, constituído por rampa com solo residual (inclinação de 30°), resultados do alcance máximo que varia de 26,44 a 106,52 metros. Para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 29,64 a 56,01 metros.

Para o caso de encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), também do grupo I, os taludes com inclinação de 90° apresentam os resultados do alcance máximo que varia de 25,85 a 81,83 metros. Em taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 27,31 a 115,98 metros (Tabela 16).

Todos os resultados do alcance máximo formados por rampa de solo residual, e também por rampa de depósito de tálus, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 200 metros contados a partir da quebra inferior de 30° e 40° da rampa, respectivamente, para as encostas.

Nas encostas com domínio de gnaiss, presença de rampa com solo residual, os resultados do alcance máximo diminuem quando ocorre a redução da altura do talude, mas também quando ocorre a diminuição do ângulo de inclinação do encosta.

Para encostas com inclinação de 90°, na presença de rampa em depósito de tálus, são observados três resultados do alcance máximo que diminuíram, sem nenhum sentido, em maiores proporções dos blocos. Isso ocorre, porque na queda livre os blocos atingem primeiro a parte final da rampa, na qual apresenta menor coeficiente de restituição comparado ao coeficiente de restituição do maciço rochoso. Dessa forma, a tendência é diminuir o alcance máximo em taludes com maior altura, devido a influência do coeficiente de restituição.

Tabela 16 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 5$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	106,52	97,29	88,60	286,479° = 5
		80	91,90	83,65	78,33	
		40	65,84	65,88	65,30	
		20	47,00	48,16	48,81	
		10	28,78	28,42	29,69	
		5	27,38	26,86	26,44	
	50	100	46,08	54,50	56,01	
		80	43,48	46,29	47,81	
		40	33,31	34,06	33,57	
		20	32,86	32,86	31,85	
		10	31,59	31,50	30,76	
		5	29,64	30,50	29,98	
TÁLUS	90	100	81,83	48,41	58,69	
		80	77,05	50,19	55,95	
		40	67,69	55,61	48,99	
		20	56,80	52,66	50,46	
		10	45,40	47,93	46,87	
		5	25,85	34,49	37,05	
	50	100	108,23	113,89	115,98	
		80	80,36	84,96	87,24	
		40	47,29	45,92	48,05	
		20	35,30	34,16	38,57	
		10	30,58	31,63	32,96	
		5	27,31	27,69	29,23	

#### 4.1.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s)

Conforme apresentado no grupo III (inclinação da encosta  $> 70^\circ$ ), taludes com inclinação de  $90^\circ$  contêm o alcance máximo obtido que varia de 30,61 a 210,80 metros. Para taludes com inclinação de  $80^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 15,27 a 98,67 metros (Tabela 17).

Os alcances obtidos tanto para taludes com ângulo de inclinação de  $90^\circ$ , como para os de inclinação de  $80^\circ$ , no geral, não estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM para a área crítica. Esses resultados correspondem a valores muito elevados, principalmente para encostas com alta inclinação. O limite do alcance máximo proposto de 50 metros para encosta superior a  $70^\circ$  de inclinação, só está de acordo para casos nos quais apresentam baixa altura do talude e menor proporção do bloco, basicamente para encostas com ângulo de inclinação de  $80^\circ$ .

Dessa forma, pode-se observar que com aumento da velocidade angular, independente do domínio, os resultados do alcance máximo atingem elevadas distâncias.



Tabela 17 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)					
90	100	96,85	168,20	210,80	1145,916° = 20
	80	91,71	161,33	202,60	
	40	74,07	131,99	157,64	
	20	58,91	95,33	123,48	
	10	41,69	71,15	92,56	
	5	30,61	52,82	68,74	
80	100	73,53	90,87	98,67	
	80	63,74	82,90	92,71	
	40	43,04	60,79	69,75	
	20	27,41	45,88	59,90	
	10	20,15	35,86	50,48	
	5	15,27	30,88	42,89	

De acordo com o grupo II (inclinação de 50° a 70°), para taludes com inclinação de 70°, o alcance máximo obtido varia de 17,74 a 142,27 metros. Para taludes com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 17,93 a 164,68 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 17,87 a 168,12 metros (Tabela 18).

Esses resultados para o ângulo inclinação de 70° do talude estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, somente até encostas com altura de 40 metros. Encostas acima dessa altura excedem o limite do alcance de 100 metros.

Para inclinação de 60° e 50° do talude, o limite estabelecido também foi de 100 metros, portanto, os resultados obtidos estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, com exceção aos resultados dos alcances para alturas do talude superiores a 40 metros.

Observa-se que tanto para o grupo III como para o grupo II, com o aumento da massa do bloco, os resultados do alcance máximo aumentam.

Tabela 18 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)					
70	100	116,40	130,59	142,27	1145,916° = 20
	80	106,54	116,89	122,57	
	40	62,76	74,28	93,20	
	20	36,47	55,19	66,86	
	10	23,92	41,64	55,37	
	5	17,74	34,09	48,12	
60	100	141,78	156,82	164,68	
	80	125,34	138,13	147,99	
	40	71,38	84,06	100,76	
	20	46,18	61,32	74,00	
	10	25,93	43,23	57,85	
	5	17,93	35,05	51,06	
50	100	144,26	151,54	168,12	
	80	119,96	137,24	143,41	
	40	69,59	84,90	101,77	
	20	40,42	58,39	74,15	
	10	26,83	42,96	56,45	
	5	17,87	34,88	51,08	

Para finalizar o domínio de gnaïsse, tem-se o grupo I (encosta com rampa) proposto pela CPRM no qual apresenta taludes com inclinação de 90°, constituído por rampa de solo residual (inclinação de 30°), cujo os resultados do alcance máximo variam 30,12 a 215,35 metros. Para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 30,67 a 96,55 metros.

Para o caso de encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), também do Grupo I, os taludes com inclinação de 90° apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 51,08 a 216,36 metros. Em taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 31,18 a 151,91 metros (Tabela 19).

Os resultados para inclinações de 90° e 50° dos taludes, formado por rampa de solo residual, e também para inclinações de 90° e 50° dos taludes, formado por rampa de depósito de tálus, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 200 metros. As quatro únicas exceções que não correspondem a esse limite são representadas por blocos de maior proporção, para ângulos de inclinação de 90°, e com alturas correspondentes a 80 e 100 metros, tanto para encostas com rampa de solo residual quanto para a de depósito de tálus.

Foi observado para todos os resultados do grupo I, que o alcance máximo aumenta quando aumentamos a massa do bloco, além disso, com a diminuição da altura dos taludes, ocorre a diminuição dos resultados, independente do ângulo de inclinação da encosta. Da mesma forma, observa-se que esses resultados do alcance para a inclinação de 90° não varia muito com a diferença da composição da rampa. A diferença dos resultados do alcance somente ocorre na inclinação de 50°, na qual é maior para a rampa de depósito de tálus.

Tabela 19 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GNAISSE e  $\omega = 20$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.630	13.150	26.300	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	109,60	173,97	<b>215,35</b>	1145,916° = 20
		80	97,90	161,69	<b>209,49</b>	
		40	79,58	136,20	177,42	
		20	63,21	113,23	140,19	
		10	41,88	96,34	122,40	
	5	30,12	87,61	105,01		
	50	100	80,85	91,52	96,55	
		80	64,13	62,96	71,03	
		40	34,52	34,06	34,29	
		20	32,79	32,49	33,42	
10		31,65	31,59	32,45		
5	30,89	30,67	31,62			
TÁLUS	90	100	100,04	178,39	<b>216,36</b>	1145,916° = 20
		80	95,44	171,49	<b>204,42</b>	
		40	79,21	137,93	168,11	
		20	68,88	110,88	142,26	
		10	55,13	93,84	122,23	
	5	51,08	84,66	111,95		
	50	100	119,40	142,04	151,91	
		80	92,58	118,83	114,01	
		40	49,86	58,85	60,56	
		20	38,30	44,10	51,70	
10		35,13	42,49	45,96		
5	31,18	37,91	41,55			

## 4.2. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE GRANITO

Na segunda análise das simulações estudou-se a influência do talude para o domínio de granito com superfície em rocha sã. Os valores dos principais parâmetros empregados, variando a velocidade angular, foram:

- ✓ Massa específica do bloco: 2.600 kg/m<sup>3</sup>;
- ✓ Volume do bloco: 1 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup> e 10 m<sup>3</sup>;
- ✓ Massa dos blocos: 2.600 kg, 13.000 kg e 26.000 kg;
- ✓ Coeficiente de Restituição: Normal = 0.60 e Tangencial = 0.75;
- ✓ Ângulo de atrito: 29.6°;
- ✓ Para o elemento geomorfológico (rampa):
  - Solo residual:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.25 e Tangencial = 0.55;
    - Ângulo de atrito: 20.3°;
  - Tálus:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.30 e Tangencial = 0.80;
    - Ângulo de atrito: 29.6°.

### 4.2.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s)

Segundo o grupo III (inclinação da encosta > 70°), para taludes com inclinação de 90°, o alcance máximo obtido varia de 0,39 a 2,52 metros. Para taludes com inclinação de 80°, o alcance máximo obtido varia de 3,95 a 49,64 metros (Tabela 20).

Dessa forma, pode-se dizer que os resultados do alcance máximo tanto para inclinação de 90°, quanto para inclinação de 80° do talude, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 50 metros para encosta superior a 70° de inclinação.

Tabela 20 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GRANITO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)					
90	100	1,16	2,01	2,52	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
	80	1,12	1,97	2,43	
	40	0,95	1,63	1,95	
	20	0,74	1,26	1,56	
	10	0,53	0,86	1,11	
	5	0,39	0,67	0,83	
80	100	46,69	47,56	49,64	
	80	39,75	41,84	38,84	
	40	24,64	25,80	25,81	
	20	13,28	14,49	13,47	
	10	7,55	7,22	6,97	
	5	3,95	4,02	4,00	

O grupo II (inclinação de 50° a 70°), apresenta encostas com inclinação de 70°, na qual o alcance máximo obtido varia de 5,79 a 83,05 metros. Para inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 6,55 a 99,79 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 6,14 a 102,37 metros (Tabela 21).

A partir desses resultados obtidos nas simulações, pode-se afirmar que tanto para o ângulo de inclinação de 70° da encosta, quanto para a inclinação de 60°, os alcances estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, cujo o limite do alcance estabelecido é de 100 metros para encosta com inclinação de 50° a 70°.

No caso dos resultados para inclinação de 50°, em que também foi estabelecido o mesmo limite, somente para encosta com altura de 100 metros e bloco de menor massa, não está de acordo com a pesquisa apresentada pela CPRM. O restante dos alcances estão de acordo com a pesquisa.

Assim sendo, em domínio de gnaiss para encosta sem rampa, observa-se que no geral, com a diminuição do ângulo de inclinação do talude, os resultados do alcance máximo aumentam. Com a diminuição da altura da encosta, o alcance máximo também diminui. Por fim, observa-se que para encostas com alto ângulo de inclinação, o alcance máximo dos blocos é menor em comparação com as encostas com baixo ângulo de inclinação.

Tabela 21 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GRANITO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	83,05	81,43	80,73	$\pi/8 = 22,5^\circ = 0.392699082$
	80	67,68	70,02	67,99	
	40	42,87	41,29	42,21	
	20	21,09	20,20	21,29	
	10	11,70	12,05	11,18	
5	6,06	5,84	5,79		
60	100	99,79	98,61	96,47	
	80	84,40	82,92	84,80	
	40	50,06	50,71	46,40	
	20	25,20	24,43	24,63	
	10	12,97	12,42	13,09	
5	6,55	6,83	6,56		
50	100	<b>102,37</b>	99,81	98,22	
	80	81,08	80,90	83,48	
	40	43,70	41,86	45,22	
	20	24,32	23,25	22,75	
	10	12,58	12,34	11,62	
5	6,14	6,26	6,66		

As encostas do grupo I apresentam ângulo de inclinação de 90°, e são constituídos por rampa de solo residual (inclinação de 30°), cujo os resultados do alcance máximo variam de 25,04 a 83,63 metros. Para encostas com ângulo de inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 26,03 a 41,46 metros.



Para o mesmo grupo I, porém, constituído por rampa de depósito de tálus (inclinação de 40°), apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 22,00 a 87,54 metros para taludes com inclinação de 90°. Em taludes com ângulo de inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 22,48 a 84,51 metros (Tabela 22).

Todos esses resultados tanto para inclinação de 90°, como para inclinação de 50° dos taludes, originada por rampa de solo residual, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 200 metros. Essa consequência também é válida para encostas originada por rampa de depósito de tálus, composta pelos mesmos ângulos de inclinação.

Dessa forma, pode-se observar que no geral, ocorre a diminuição dos resultados do alcance máximo de taludes com inclinação de 90° para taludes com inclinação de 50°, tanto em encostas desenvolvida por rampa de solo residual, como em rampa de depósito de tálus. Além disso, no geral, é possível observar o aumento do alcance máximo para encostas constituídas por rampa de solo residual, em comparação com as encostas constituídas por rampa de depósito de tálus, para os respectivos ângulos de inclinação de 90° e 50°.

Tabela 22 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GRANITO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	83,63	81,57	82,95	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
		80	79,39	73,82	77,29	
		40	52,15	53,10	53,82	
		20	27,04	29,03	28,39	
		10	25,33	25,62	25,88	
		5	25,31	25,04	25,07	
	50	100	41,46	40,16	39,62	
		80	37,28	37,51	36,22	
		40	28,46	29,58	28,10	
		20	26,73	26,82	26,99	
		10	26,13	26,16	26,40	
		5	26,03	26,07	26,24	
TÁLUS	90	100	87,54	85,65	83,93	
		80	77,86	78,93	75,25	
		40	64,58	57,68	61,24	
		20	44,51	45,19	47,17	
		10	30,54	29,30	28,73	
		5	22,00	22,17	22,14	
	50	100	84,51	81,77	79,73	
		80	58,35	56,14	61,94	
		40	36,86	35,73	43,33	
		20	29,36	28,93	29,03	
		10	24,79	24,78	25,24	
		5	22,48	22,87	22,76	

#### 4.2.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s)

Encostas sem a presença do elemento geomorfológico (rampa) são compostos por ângulo de inclinação  $> 70^\circ$ , no qual é conhecido como o grupo III. Dessa forma, em taludes com inclinação de  $90^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 5,60 a 40,91 metros. Para taludes com inclinação de  $80^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 4,10 a 52,37 metros (Tabela 23).

Os resultados indicam que para encostas com ângulo de inclinação de  $90^\circ$ , os alcances obtidos estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM. Para encostas com inclinação de  $80^\circ$ , somente dois casos do alcance máximo não estão de acordo com o limite do alcance de 50 metros para encosta superior a  $70^\circ$  de inclinação, ou seja, para blocos de elevada proporção e talude de 100 metros, esses casos excedem o limite.

Tabela 23 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de  $90^\circ$  e  $80^\circ$  em domínio de GRANITO e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	18,85	32,32	40,91	286,479° = 5
	80	17,73	30,08	37,28	
	40	13,85	23,66	28,82	
	20	10,69	17,18	21,37	
	10	7,79	12,54	15,72	
	5	5,60	9,28	11,44	
80	100	47,41	<b>50,79</b>	<b>52,37</b>	
	80	40,65	42,38	43,12	
	40	25,31	26,06	26,92	
	20	13,27	14,44	15,15	
	10	7,38	8,07	9,51	
	5	4,10	5,13	5,97	

As encostas sem rampa conhecidas como o grupo II (inclinação de  $50^\circ$  a  $70^\circ$ ), apresentam inclinação de  $70^\circ$ , cujo o alcance máximo obtido varia de 6,35 a 83,79 metros. Para taludes com inclinação de  $60^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 7,07 a 102,78 metros. E para taludes com inclinação de  $50^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 6,62 a 109,02 metros (Tabela 24).

Taludes com inclinação de  $70^\circ$ , demonstram que os resultados estão de acordo com o limite proposto de 100 metros. Os resultados para taludes com inclinação de  $60^\circ$  estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, com exceção dois casos (altura de 100 metros) cujo o alcance máximo excede o limite estabelecido. Por fim, os alcances obtidos para inclinação de  $50^\circ$  do talude também estão de acordo com a pesquisa, exceto novamente, dois casos (altura de 100 metros) em que ultrapassam o limite do alcance estabelecido de 100 metros.

Para os grupos III e II, pode-se observar que com o aumento do ângulo de inclinação da encosta, os alcances atingem menores distâncias, independentemente do valor da massa do bloco. Somente não entra nesse caso, no geral, os resultados da inclinação de  $50^\circ$  para a inclinação de  $60^\circ$  do talude, cujo os alcances atingem maiores distâncias. E finalmente, observa-se que com o aumento da massa do bloco, o alcance máximo aumenta.

Tabela 24 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GRANITO e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	81,15	80,53	83,79	286,479° = 5
	80	70,12	70,31	74,78	
	40	38,67	40,14	39,19	
	20	21,71	22,97	23,86	
	10	11,60	12,65	13,15	
	5	6,35	6,92	7,60	
60	100	95,77	<b>100,46</b>	<b>102,78</b>	
	80	83,15	86,77	88,27	
	40	44,29	48,64	47,74	
	20	24,53	25,69	26,16	
	10	13,54	13,70	14,82	
	5	7,07	7,79	8,09	
50	100	99,21	<b>103,40</b>	<b>109,02</b>	
	80	81,17	84,00	84,99	
	40	43,75	47,25	44,84	
	20	22,81	24,48	24,67	
	10	12,37	13,74	13,43	
	5	6,62	7,25	7,50	

A Tabela 25, contém o grupo I (encosta com rampa), que expressa para taludes com inclinação de 90°, composto por rampa com solo residual (inclinação de 30°), resultados do alcance máximo que varia de 23,76 a 86,59 metros. Para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 25,78 a 43,59 metros.

Encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), pertencente ao Grupo I, apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 21,41 a 68,39 metros para taludes com inclinação de 90°. Em taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 23,17 a 89,07 metros (Tabela 25).

O grupo I, por inteiro, exhibe os resultados do alcance máximo nos quais estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, tanto por encostas formados por rampa de solo residual, quanto por rampa de depósito de tálus. O limite do alcance estabelecido é de 200 metros contados a partir da quebra inferior de 30° e 40° da rampa, respectivamente, para as encostas.

No geral, para encostas com domínio de granito e presença de rampa com solo residual, os resultados do alcance máximo diminuem quando ocorre a redução da altura do talude, mas também quando ocorre a diminuição do ângulo de inclinação do encosta.

Por outro lado, encostas com presença de rampa em depósito de tálus, para inclinação de 90°, apresentam dois resultados do alcance máximo que diminuem em maiores proporções dos blocos. A causa para a diminuição desses alcances pode estar relacionado a diferença do coeficiente de restituição normal, no qual é maior no maciço rochoso em relação ao da rampa. Dessa forma, pode-se dizer que a variação do alcance dos blocos em função do coeficiente de restituição é relevante neste tipo de análise.

Tabela 25 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GRANITO e  $\omega = 5$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	80,97	83,56	86,59	286,479° = 5
		80	71,81	73,31	80,25	
		40	52,19	54,70	52,36	
		20	40,26	39,50	39,74	
		10	25,32	26,94	26,21	
		5	24,32	23,76	23,83	
	50	100	39,18	42,64	43,59	
		80	33,07	32,53	33,29	
		40	28,10	29,02	28,59	
		20	27,25	28,23	27,23	
		10	26,46	27,13	26,74	
		5	25,78	26,34	26,06	
TÁLUS	90	100	68,39	46,53	46,16	286,479° = 5
		80	62,52	48,78	42,35	
		40	54,78	46,90	44,11	
		20	47,77	43,45	41,81	
		10	35,88	37,47	38,84	
		5	21,41	22,74	27,78	
	50	100	78,11	85,62	89,07	
		80	66,32	61,88	67,55	
		40	35,88	37,65	38,91	
		20	29,23	29,38	28,92	
		10	25,19	25,99	26,26	
		5	24,18	23,17	24,15	

#### 4.2.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s)

Conforme determinado o grupo III (inclinação da encosta  $> 70^\circ$ ), taludes com inclinação de 90°, apresentam o alcance máximo obtido que varia de 20,95 a 156,61 metros. Para taludes com inclinação de 80°, o alcance máximo obtido varia de 9,42 a 71,21 metros (Tabela 26).

O limite do alcance máximo proposto é de 50 metros para encosta superior a 70° de inclinação portanto, os resultados obtidos para taludes com ângulo de inclinação de 90°, no geral, não estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, começando a partir da altura de 10 metros da encosta. Para taludes com inclinação de 80°, pode-se chegar a mesma conclusão no geral, porém, começando a partir da altura de 40 metros da encosta.

Dessa forma, podemos observar que com aumento da velocidade angular, os resultados do alcance máximo atingem elevadas distâncias. Além disso, com o aumento da massa dos blocos, os resultados dos alcances são cada vez maiores.



Tabela 26 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de GRANITO e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	<b>71,98</b>	<b>122,35</b>	<b>156,61</b>	1145,916° = 20
	80	<b>68,38</b>	<b>112,64</b>	<b>146,16</b>	
	40	<b>52,61</b>	<b>88,08</b>	<b>112,79</b>	
	20	39,78	<b>69,66</b>	<b>85,62</b>	
	10	29,99	49,02	<b>60,13</b>	
5	20,95	36,43	44,02		
80	100	<b>55,31</b>	<b>66,57</b>	<b>71,21</b>	
	80	49,16	<b>58,91</b>	<b>64,22</b>	
	40	30,46	40,10	<b>50,30</b>	
	20	20,18	29,79	36,45	
	10	13,42	21,89	29,58	
5	9,42	18,30	25,61		

De acordo com o grupo II (inclinação de 50° a 70°), taludes com inclinação de 70°, apresentam o alcance máximo que varia de 11,06 a 104,43 metros. Para taludes com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 11,82 a 110,86 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 11,08 a 116,89 metros (Tabela 27).

Os resultados obtidos para os ângulos de inclinação de 70°, 60° e 50° do talude, no geral, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi determinado um limite do alcance de 100 metros para encosta com inclinação de 50° a 70°. Com exceção, tem-se os resultados dos alcances para a altura do talude de 100 metros, pois ultrapassam o limite estabelecido.

Portanto, em domínio de granito para encosta sem rampa, observa-se que com a diminuição do ângulo de inclinação da encosta, os resultados do alcance máximo aumentam. Em contrapartida, tem casos em que ocorre a diminuição do alcance máximo quando acontece a redução do ângulo de inclinação.

Tabela 27 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de GRANITO e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	91,52	96,39	<b>104,43</b>	1145,916° = 20
	80	75,06	82,06	91,44	
	40	45,24	55,78	59,88	
	20	28,19	36,64	44,64	
	10	16,92	25,84	32,78	
5	11,06	20,37	27,51		
60	100	<b>100,46</b>	<b>106,39</b>	<b>110,86</b>	
	80	90,15	95,72	<b>100,99</b>	
	40	49,38	62,12	67,56	
	20	30,68	41,26	45,76	
	10	19,02	27,62	35,94	
5	11,82	21,55	29,82		
50	100	<b>108,22</b>	<b>111,06</b>	<b>116,89</b>	
	80	87,14	93,85	99,69	
	40	46,90	55,99	67,44	
	20	28,27	36,48	46,02	
	10	17,55	26,74	37,05	
5	11,08	21,70	27,67		

Para finalizar, no caso do grupo I (encosta com rampa) para taludes com inclinação de 90°, constituído por rampa de solo residual (inclinação de 30°), os resultados do alcance máximo variam 22,03 a 160,39 metros. Para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 26,33 a 66,88 metros.

Encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), também do grupo I, apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 34,74 a 162,19 metros para taludes com inclinação de 90°. Em taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 24,76 a 110,49 metros (Tabela 28).

Com todos os resultados do grupo I para inclinações de 90° e 50° dos taludes, formados por rampa de solo residual, e também por rampa de depósito de tálus, pode-se concluir que estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 200 metros.

Observa-se que para os resultados das encostas com solo residual e com depósito de tálus, o alcance máximo aumenta quando aumentamos a massa do bloco. Além disso, com a diminuição da altura dos taludes, ocorre a diminuição dos resultados do alcance. Da mesma maneira, observa-se que esses resultados do alcance para a inclinação de 90°, ocorre uma diminuição com a mudança da composição da rampa. Para a inclinação de 50°, pode-se observar o aumento dos resultados quando ocorre a mudança da composição da rampa.

Tabela 28 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de GRANITO e  $\omega = 20$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.600	13.000	26.000	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	77,28	128,36	160,39	1145,916° = 20
		80	73,93	120,32	150,43	
		40	57,37	95,99	121,02	
		20	41,71	83,57	101,23	
		10	37,10	68,34	88,25	
		5	22,03	59,79	73,33	
	50	100	43,84	59,76	66,88	
		80	33,63	41,77	43,87	
		40	28,31	28,77	29,23	
		20	27,49	27,73	28,53	
		10	26,86	27,00	27,62	
		5	26,33	26,73	26,81	
TÁLUS	90	100	75,66	126,27	162,19	1145,916° = 20
		80	71,43	120,10	149,32	
		40	56,60	98,97	125,58	
		20	47,79	81,50	100,16	
		10	39,80	69,19	84,20	
		5	34,74	59,15	73,55	
	50	100	86,45	103,92	110,49	
		80	72,56	79,09	81,01	
		40	40,83	41,73	47,55	
		20	31,41	33,99	36,90	
		10	27,54	31,18	33,65	
		5	24,76	29,32	31,73	

### 4.3. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE ARENITO

Na terceira análise das simulações estudou-se a influência do talude para o domínio de arenito com superfície em rocha sã. Os valores dos principais parâmetros empregados, variando a velocidade angular, foram:

- ✓ Massa específica do bloco: 2.366 kg/m<sup>3</sup>;
- ✓ Volume do bloco: 1 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup> e 10 m<sup>3</sup>;
- ✓ Massa dos blocos: 2.366 kg, 11.830 kg e 23.660 kg;
- ✓ Coeficiente de Restituição: Normal = 0.35 e Tangencial = 0.62;
- ✓ Ângulo de atrito: 29.6°;
- ✓ Para o elemento geomorfológico (rampa):
  - Solo residual:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.25 e Tangencial = 0.55;
    - Ângulo de atrito: 20.3°;
  - Tálus:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.30 e Tangencial = 0.80;
    - Ângulo de atrito: 29.6°.

#### 4.3.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.39 rad/s)

No caso do grupo III (inclinação da encosta > 70°), para taludes com inclinação de 90°, o alcance máximo obtido varia de 0,18 a 0,87 metros. Para taludes com inclinação de 80°, o alcance máximo obtido varia de 1,41 a 18,09 metros (Tabela 29).

As encostas que possuem o ângulo de inclinação de 90°, e também inclinação de 80°, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, cujo o limite do alcance estabelecido é de 50 metros para encosta superior a 70° de inclinação.

Tabela 29 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de ARENITO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)					
90	100	0,45	0,71	0,87	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
	80	0,40	0,64	0,83	
	40	0,37	0,60	0,78	
	20	0,32	0,49	0,61	
	10	0,20	0,35	0,47	
	5	0,18	0,29	0,36	
80	100	15,70	17,14	18,09	
	80	13,67	13,52	16,01	
	40	8,53	8,93	9,67	
	20	5,14	5,53	5,31	
	10	2,74	2,81	2,69	
	5	1,45	1,41	1,58	

Para o grupo II (inclinação de 50° a 70°), o alcance máximo obtido para taludes com inclinação de 70° varia de 2,22 a 35,46 metros. Para taludes com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 2,67 a 37,41 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 2,39 a 41,00 metros (Tabela 30).

Todos esses resultados do alcance máximo para inclinações de 70°, 60° e 50° das encostas estão de acordo com a pesquisa apontada pela CPRM, no qual limite estabelecido é de 100 metros.

Portanto, para os grupos III e II, pode-se observar que os resultados do alcance máximo aumentam com a diminuição da inclinação da encosta. Também é observado a diminuição do alcance máximo com a redução da altura da encosta. E por fim, nota-se que esses resultados são menores em comparação aos outros domínios do maciço rochoso, para a mesma velocidade angular.

Tabela 30 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de ARENITO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	28,07	31,83	35,46	$\pi/8 = 22,5^\circ = 0.392699082$
	80	26,27	24,50	25,78	
	40	14,94	14,76	15,67	
	20	8,14	8,04	8,10	
	10	4,54	4,68	4,17	
	5	2,22	2,42	2,56	
60	100	32,92	34,34	37,41	
	80	29,62	29,16	31,89	
	40	16,21	17,06	19,71	
	20	10,45	10,10	8,86	
	10	4,89	5,36	5,57	
	5	3,04	2,83	2,67	
50	100	36,53	38,16	41,00	
	80	30,09	30,02	30,27	
	40	16,19	17,78	16,57	
	20	8,87	9,21	9,16	
	10	4,95	4,62	4,75	
	5	2,39	2,45	2,53	

Para taludes com ângulo de inclinação de 90°, composto por rampa constituído de solo residual (inclinação de 30°) e referente ao grupo I (encosta com rampa), os resultados do alcance máximo variam de 20,31 a 61,46 metros. Taludes com inclinação de 50°, apresentam alcance máximo que variam de 20,68 a 38,64 metros.

Nos casos de encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), também do grupo I, os que correspondem ao ângulo de inclinação de 90° apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 15,83 a 57,14 metros. Em encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 16,88 a 42,27 metros (Tabela 31).



Os resultados para as inclinações de 90° e 50° dos taludes, formados pelos dois tipos de rampa, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, pois apresentam alcance máximo bem abaixo do limite estabelecido de 200 metros para as encostas.

Assim sendo, pode-se observar que os resultados do alcance máximo são bem próximos de acordo com a sua respectiva inclinação do talude, independente do tipo de rampa. Porém, nota-se que no geral, ocorre uma diminuição do alcance máximo para as inclinações de 90° e 50°, mas são observados algumas exceções, nos quais esses resultados aumentam.

Em conformidade com as encostas sem rampa, verifica-se que com a diminuição da altura, há diminuição dos resultados do alcance máximo para as encostas com rampa.

Tabela 31 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de ARENITO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	58,64	60,00	61,46	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
		80	53,06	50,95	47,11	
		40	35,89	34,50	34,17	
		20	22,37	22,77	22,05	
		10	21,07	20,67	20,70	
		5	20,54	20,48	20,31	
	50	100	38,64	35,29	34,14	
		80	24,07	23,50	25,59	
		40	22,31	21,44	21,47	
		20	21,34	21,16	20,89	
		10	20,99	20,79	20,79	
		5	20,88	20,72	20,68	
TÁLUS	90	100	50,75	54,05	57,14	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
		80	45,51	45,51	47,02	
		40	33,99	35,01	35,34	
		20	26,12	25,96	25,74	
		10	19,35	18,99	18,70	
		5	16,28	15,83	16,13	
	50	100	38,18	40,93	42,27	
		80	29,40	34,08	35,19	
		40	22,94	21,91	22,29	
		20	19,24	18,91	19,04	
		10	17,68	17,81	17,91	
		5	16,98	16,88	17,02	

#### 4.3.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s)

Encostas com ângulo de inclinação de  $90^\circ$ , pertencente ao grupo III (inclinação da encosta  $> 70^\circ$ ), apontam o alcance máximo obtido que varia de 2,85 a 20,87 metros. Para encostas com inclinação de  $80^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 1,71 a 20,16 metros (Tabela 32).

Foi estabelecido um limite do alcance máximo de 50 metros para encosta superior a  $70^\circ$  de inclinação, dessa forma, os resultados para as inclinações de  $90^\circ$  e  $80^\circ$  dos taludes estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM.

Através dos resultados, pode-se notar que os alcances já correspondem uma distância maior com relação aos resultados pertencentes a velocidade angular de 0.39 rad/s.

Tabela 32 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de  $90^\circ$  e  $80^\circ$  em domínio de ARENITO e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	10,27	16,69	20,87	286,479° = 5
	80	9,19	15,21	19,53	
	40	7,03	11,85	14,70	
	20	5,33	8,69	10,93	
	10	3,89	6,27	8,02	
	5	2,85	4,61	5,72	
80	100	16,34	18,10	20,16	
	80	15,25	15,73	16,23	
	40	9,11	10,04	9,90	
	20	5,35	6,00	5,69	
	10	2,89	3,38	3,39	
	5	1,71	1,96	2,10	

Para o grupo II (inclinação de  $50^\circ$  a  $70^\circ$ ), taludes com inclinação de  $70^\circ$  exibem o alcance máximo que varia de 2,49 a 30,83 metros. Taludes com inclinação de  $60^\circ$ , exibem o alcance máximo que varia de 2,76 a 35,43 metros. E para taludes com inclinação de  $50^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 2,51 a 36,07 metros (Tabela 33).

Estabelecido o limite do alcance máximo para 100 metros, conclui-se que todos os resultados do grupo II estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM.

Tendo uma visão geral dos resultados dos alcances, observa-se que com o aumento do ângulo de inclinação das encostas, ocorre a diminuição do alcance máximo, devido ao modo de movimentação dos blocos. Isso é inversamente proporcional aos resultados de acordo com a altura da encosta, no qual decrescem com a diminuição da altura. Nota-se também que no geral, com o aumento da massa do bloco, o alcance máximo atinge maior distância.

Tabela 33 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de ARENITO e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	27,22	29,53	30,83	286,479° = 5
	80	24,25	23,65	24,33	
	40	14,83	15,09	15,95	
	20	8,30	9,01	8,90	
	10	4,54	4,84	5,23	
	5	2,49	2,60	2,72	
60	100	35,43	34,42	35,07	
	80	31,13	30,96	30,52	
	40	19,46	18,19	22,01	
	20	9,43	10,09	10,72	
	10	5,47	5,32	5,43	
	5	2,84	2,76	3,39	
50	100	36,07	35,47	35,04	
	80	34,92	32,39	28,20	
	40	17,11	17,24	17,46	
	20	10,01	8,98	9,52	
	10	4,76	5,26	5,75	
	5	2,51	2,85	2,90	

A Tabela 34, referente ao grupo I (encosta com rampa), expressa para encostas constituídos por rampa com solo residual (inclinação de 30°) e com inclinação de 90°, resultados do alcance máximo que variam de 19,98 a 65,98 metros. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 20,63 a 27,55 metros.

Encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°) e com inclinação de 90°, também do grupo I, exibem os resultados do alcance máximo que variam de 15,89 a 46,56 metros. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 16,49 a 43,70 metros (Tabela 34).

Todos os resultados do alcance máximo para encostas formadas por rampa de solo residual, e também por rampa de depósito de tálus, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, pois encontram-se bem abaixo do limite do alcance estabelecido de 200 metros contados a partir da quebra inferior de 30° e 40° da rampa, respectivamente.

Para o domínio de arenito, encostas com presença de rampa por solo residual, nota-se uma queda dos resultados do alcance máximo com a diminuição do ângulo de inclinação. Isto também é observado em encostas com presença de rampa por depósito de tálus.

Da mesma maneira, no geral, observa-se um decréscimo do alcance para encosta com ângulo de inclinação de 90°, e um acréscimo do alcance para encosta com inclinação de 50°. No entanto, foi levado em conta a diferença no material composto pela rampa, no qual o coeficiente de restituição é maior na superfície constituída por solo residual em relação a superfície constituída por depósito de tálus.

Tabela 34 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de ARENITO e  $\omega = 5$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	61,05	64,69	65,98	286,479° = 5
		80	54,08	51,45	53,77	
		40	36,84	37,08	35,20	
		20	23,31	26,53	27,36	
		10	20,84	20,29	20,04	
		5	20,14	20,02	19,98	
	50	100	27,55	26,40	27,21	
		80	23,51	22,71	25,49	
		40	21,53	21,56	22,38	
		20	21,07	21,11	21,27	
		10	20,96	20,92	20,94	
		5	20,75	20,77	20,63	
TÁLUS	90	100	46,56	39,55	34,38	
		80	41,50	37,53	33,42	
		40	32,55	31,05	30,29	
		20	26,56	29,25	27,38	
		10	21,85	24,14	24,28	
		5	16,27	15,89	16,55	
	50	100	36,47	41,81	43,70	
		80	34,74	31,82	32,19	
		40	22,54	22,30	22,46	
		20	20,02	18,88	19,09	
		10	17,75	17,05	17,46	
		5	16,77	16,69	16,49	

#### 4.3.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s)

Para o grupo III (inclinação da encosta  $> 70^\circ$ ), que apresenta taludes com inclinação de  $90^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 10,09 a 79,04 metros. Para taludes com inclinação de  $80^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 3,12 a 23,76 metros (Tabela 35).

Os alcances obtidos para encostas com ângulo de inclinação de  $90^\circ$ , no geral, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, porém, em maiores proporções dos blocos a partir da altura de 40 metros do talude, o resultado excede o limite do alcance máximo proposto de 50 metros para encosta superior a  $70^\circ$  de inclinação. Para encostas com inclinação de  $80^\circ$ , os alcances estão de acordo com o limite estabelecido.

Assim sendo, pode-se observar que com a diminuição da altura do talude, ocorre uma diminuição dos resultados do alcance máximo. Observa-se que com o aumento da proporção dos blocos o alcance máximo aumenta. Ademais, com a redução do ângulo de inclinação da encosta, os blocos atingem menores distâncias.



Tabela 35 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de ARENITO e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	36,04	<b>60,50</b>	<b>79,04</b>	1145,916° = 20
	80	33,72	<b>55,62</b>	<b>68,65</b>	
	40	26,34	43,57	<b>53,62</b>	
	20	19,23	32,66	39,65	
	10	13,88	22,92	29,23	
5	10,09	16,84	21,84		
80	100	19,65	20,46	23,76	
	80	17,40	19,11	21,00	
	40	10,92	13,23	14,79	
	20	7,23	9,42	11,52	
	10	4,65	6,91	9,09	
5	3,12	5,44	7,92		

Conforme o grupo II (inclinação de 50° a 70°), para taludes com inclinação de 70°, o alcance máximo obtido varia de 3,82 a 34,33 metros. Para taludes com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 4,39 a 40,21 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 4,15 a 42,73 metros (Tabela 36).

Em decorrência dos alcances atingidos para os ângulos de inclinação de 70°, 60° e 50° das encostas, constata-se que os resultados estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, em razão do limite estabelecido do alcance máximo de 100 metros.

Observa-se que para o grupo II, os resultados dos alcances não são muito distintos com a mudança do ângulo de inclinação da encosta.

Tabela 36 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de ARENITO e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	28,57	31,36	34,33	1145,916° = 20
	80	25,75	29,91	31,54	
	40	15,89	19,14	21,30	
	20	9,84	12,36	13,90	
	10	6,09	8,46	10,39	
5	3,82	6,31	8,34		
60	100	36,44	39,71	40,21	
	80	30,64	33,01	32,81	
	40	18,74	20,56	23,48	
	20	11,44	13,73	16,24	
	10	7,11	9,76	11,49	
5	4,39	6,89	9,14		
50	100	39,96	42,63	42,73	
	80	32,31	32,41	33,06	
	40	19,10	20,40	22,39	
	20	10,23	14,04	15,69	
	10	6,33	9,08	10,66	
5	4,15	7,03	9,06		

Para finalizar o domínio de arenito, tem-se o grupo I (encosta com rampa) proposto pela CPRM no qual apresenta encostas com inclinação de 90°, constituído por rampa de solo residual (inclinação de 30°), cujo os resultados do alcance máximo variam de 19,38 a 80,04 metros. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 20,84 a 32,77 metros.

Encostas com rampa constituídos de depósito de tálus (inclinação de 40°), também do grupo I, apresentam inclinação de 90° cujo os resultados do alcance máximo variam de 21,17 a 79,53 metros. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 17,55 a 44,64 metros (Tabela 37).

Os resultados para as inclinações de 90° e 50° dos taludes, formados tanto por solo residual como por depósito de tálus, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi estabelecido um limite do alcance de 200 metros.

Pode ser constatado que para todos os resultados do grupo I, no geral, o alcance máximo aumenta quando aumentamos a massa do bloco. Da mesma forma, observa-se que esses resultados do alcance diminuem para a inclinação de 90° com a diferença da composição da rampa. Na inclinação de 50°, esses resultados do alcance máximo aumentam para encostas com maior altura, com a diferença da composição da rampa.

Tabela 37 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de ARENITO e  $\omega = 20$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.366	11.830	23.660	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	43,10	65,81	80,04	1145,916° = 20
		80	41,80	59,42	74,87	
		40	36,96	47,29	62,54	
		20	30,16	39,17	48,24	
		10	23,73	31,26	39,78	
	5	19,38	25,08	34,97		
	50	100	32,77	31,11	30,79	
		80	26,31	25,95	27,17	
		40	21,76	22,15	22,56	
		20	21,12	21,70	21,83	
10		20,99	21,18	21,11		
TÁLUS	90	100	38,22	63,33	79,53	1145,916° = 20
		80	36,34	57,05	73,29	
		40	30,04	46,61	57,72	
		20	23,48	38,29	48,17	
		10	22,49	32,11	40,00	
	5	21,17	29,44	35,62		
	50	100	40,89	43,34	44,64	
		80	31,93	33,47	35,77	
		40	22,74	23,51	23,85	
		20	19,86	20,34	21,13	
10		18,37	18,90	19,51		
5	17,55	17,94	18,78			

#### 4.4. SIMULAÇÕES EM DOMÍNIO DE BASALTO

Na quarta análise das simulações estudou-se a influência do talude para o domínio de basalto com superfície em rocha sã. Os valores dos principais parâmetros empregados, variando a velocidade angular, foram:

- ✓ Massa específica do bloco: 2.800 kg/m<sup>3</sup>;
- ✓ Volume do bloco: 1 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup> e 10 m<sup>3</sup>;
- ✓ Massa dos blocos: 2.800 kg, 14.000 kg e 28.000 kg;
- ✓ Coeficiente de Restituição: Normal = 0.80 e Tangencial = 0.60;
- ✓ Ângulo de atrito: 30.5°;
- ✓ Para o elemento geomorfológico (rampa):
  - Solo residual:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.25 e Tangencial = 0.55;
    - Ângulo de atrito: 20.3°;
  - Tálus:
    - Coeficiente de Restituição Normal = 0.30 e Tangencial = 0.80;
    - Ângulo de atrito: 29.6°.

##### 4.4.1. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (0.392699 rad/s)

Para inclinação da encosta > 70° (grupo III), taludes com inclinação de 90°, apresentam o alcance máximo que varia de 0,53 a 4,61 metros. Para taludes com inclinação de 80°, o alcance máximo obtido varia de 4,87 a 70,59 metros (Tabela 38).

Dessa forma, constata-se que os resultados do alcance máximo para inclinação de 90° da encosta, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM. Encostas com inclinação de 80°, no geral, também estão em conformidade com o limite do alcance estabelecido de 50 metros, a exceção dos casos em que apresentam altura superior a 80 metros do talude.

Tabela 38 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de BASALTO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	1,83	3,16	4,61	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
	80	1,76	2,97	3,77	
	40	1,39	2,28	2,91	
	20	1,02	1,74	2,12	
	10	0,75	1,23	1,59	
	5	0,53	0,91	1,15	
80	100	<b>66,51</b>	<b>68,61</b>	<b>70,59</b>	
	80	<b>57,28</b>	<b>56,32</b>	<b>56,48</b>	
	40	32,32	32,99	33,38	
	20	18,20	17,87	18,45	
	10	9,38	9,09	9,36	
	5	5,02	4,95	4,87	

O grupo II (inclinação de 50° a 70°), exibe encostas com inclinação de 70°, cujo o alcance máximo obtido varia de 7,93 a 112,57 metros. Para inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 8,96 a 135,26 metros. E para taludes com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 8,47 a 134,98 metros (Tabela 39).

A partir desses resultados obtidos nas simulações, pode-se afirmar que somente não estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, os alcances que ultrapassam o limite estabelecido de 100 metros. Portanto, nota-se os casos de encostas com altura de 100 metros e inclinação de 70°; encostas com altura superior a 80 metros e inclinação de 60°; e encostas com altura superior a 80 metros e inclinação de 50°. O restante dos casos estão de acordo com a pesquisa.

Por conseguinte, em domínio de basalto para encosta sem rampa, observa-se que no geral, com a diminuição do ângulo de inclinação do talude, os resultados do alcance máximo aumentam. Encostas com alto ângulo de inclinação, apresentam o alcance máximo dos blocos menor em comparação com as encostas com baixo ângulo de inclinação. Por fim, observa-se que com a diminuição da altura da encosta, o alcance máximo também diminua.

Tabela 39 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de BASALTO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	108,19	110,18	112,57	$\pi/8 = 22,5^\circ = 0.392699082$
	80	93,32	94,54	96,71	
	40	51,72	53,77	56,66	
	20	29,57	30,34	29,83	
	10	15,29	15,46	16,16	
	5	8,04	8,23	7,93	
60	100	129,53	134,74	135,26	
	80	119,25	114,66	114,17	
	40	59,98	62,57	63,92	
	20	32,08	32,60	35,41	
	10	17,11	17,38	18,04	
	5	8,96	9,24	9,13	
50	100	132,10	134,00	134,98	
	80	107,78	109,07	114,62	
	40	58,72	60,15	60,39	
	20	28,98	29,68	30,66	
	10	15,48	15,65	15,81	
	5	8,47	8,57	8,75	

As encostas do grupo I, apresentam ângulo de inclinação de 90°, e são constituídos por rampa de solo residual (inclinação de 30°), cujo os resultados do alcance máximo variam de 27,92 a 107,73 metros. Para encostas com ângulo de inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 28,68 a 53,32 metros.

Em outros casos de encostas, porém, constituídos por rampa de depósito de tálus (inclinação de 40°), apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 25,89 a 110,41 metros para inclinação de 90°. Encostas com ângulo de inclinação de 50°, exibem o alcance máximo que varia de 27,03 a 108,39 metros (Tabela 40).



Todos esses resultados tanto para inclinação de 90°, como para inclinação de 50° das encostas, originadas por rampa de solo residual, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, na qual foi determinado um limite do alcance de 200 metros. Esses alcances também são válidos para encostas originadas por rampa de depósito de tálus, compostas pelos mesmos ângulos de inclinação.

Assim sendo, pode-se observar que para inclinação de 90°, os resultados do alcance com a mudança da composição da rampa não se diferencia muito, mas claro, nota-se um alcance maior para a superfície que apresenta maior coeficiente de restituição. O efeito do maior coeficiente de restituição para a rampa composta por depósito de tálus é ainda maior para encostas com inclinação de 50°. No geral, é possível observar o aumento do alcance máximo para encostas constituídas por rampa de solo residual, em comparação com as encostas constituídas por rampa de depósito de tálus, para os respectivos ângulos de inclinação de 90° e 50°.

Tabela 40 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de BASALTO e  $\omega = 0.39$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	100,23	106,61	107,73	pi/8 = 22,5° = 0.392699082
		80	94,20	99,66	92,20	
		40	64,52	65,78	64,65	
		20	33,37	31,44	32,19	
		10	28,53	29,25	29,04	
		5	27,93	28,13	27,92	
	50	100	50,12	52,39	53,32	
		80	39,78	41,98	42,10	
		40	32,48	32,27	33,01	
		20	30,38	30,15	30,99	
		10	29,05	29,61	29,91	
		5	28,87	28,68	29,08	
TÁLUS	90	100	105,49	109,66	110,41	
		80	93,79	97,78	99,37	
		40	74,33	75,06	77,28	
		20	61,44	64,84	65,09	
		10	32,72	35,08	36,83	
		5	25,89	26,38	27,05	
	50	100	106,08	107,62	108,39	
		80	85,07	87,71	89,22	
		40	49,51	51,26	48,27	
		20	36,88	37,75	38,88	
		10	30,89	31,48	31,68	
		5	27,03	28,57	29,35	

## 4.4.2. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (5 rad/s)

Encostas sem a presença de rampa são compostas por ângulo de inclinação  $>70^\circ$ , pertencente ao grupo III. Assim sendo, em taludes com inclinação de  $90^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 6,32 a 46,19 metros. Para taludes com inclinação de  $80^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 5,69 a 72,92 metros (Tabela 41).

Os resultados indicam que para encostas com ângulo de inclinação de  $90^\circ$ , os alcances obtidos estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM. Na inclinação de  $80^\circ$  das encostas, o alcance máximo somente não está de acordo com o limite do alcance de 50 metros, para taludes com altura superior a 80 metros, pois esses casos excedem o limite.

Tabela 41 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de  $90^\circ$  e  $80^\circ$  em domínio de BASALTO e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	22,03	36,94	46,19	286,479° = 5
	80	21,07	34,25	45,77	
	40	16,79	26,96	33,81	
	20	12,52	20,29	25,34	
	10	9,08	14,88	18,32	
	5	6,32	10,53	12,79	
80	100	<b>68,63</b>	<b>70,84</b>	<b>72,92</b>	
	80	<b>59,71</b>	<b>59,81</b>	<b>60,20</b>	
	40	33,74	37,72	37,54	
	20	19,40	20,58	21,30	
	10	10,82	11,90	12,12	
	5	5,69	6,55	7,27	

As encostas sem rampa conhecidas como o grupo II (inclinação de  $50^\circ$  a  $70^\circ$ ), apresentam inclinação de  $70^\circ$ , cujo o alcance máximo obtido varia de 8,37 a 116,66 metros. Para encostas com inclinação de  $60^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 9,48 a 144,71 metros. E para encostas com inclinação de  $50^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 8,89 a 144,19 metros (Tabela 42).

O limite do alcance máximo estabelecido de 100 metros para o grupo II é ultrapassado em alguns resultados. Pode-se observar esses casos para taludes com inclinação de  $70^\circ$  e altura de 100 metros; taludes com inclinação de  $60^\circ$  e altura superior a 80 metros; e para taludes com inclinação de  $50^\circ$  e altura superior a 80 metros. O restante dos resultados do alcance máximo demonstram que estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM.

Portanto, para os grupos III e II, nota-se que com o aumento do ângulo de inclinação da encosta, os alcances atingem menores distâncias, independentemente do valor da massa do bloco. O alcance máximo aumenta com a mudança da velocidade angular de 0,39 rad/s para 5 rad/s. E finalmente, observa-se que com o aumento da massa do bloco, o alcance máximo aumenta.

Tabela 42 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de BASALTO e  $\omega = 5$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
		VOLUME DO BLOCO (m³)			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
70	100	113,43	114,31	116,66	286,479° = 5
	80	95,59	91,71	99,45	
	40	52,93	52,97	57,57	
	20	29,91	30,31	31,52	
	10	16,46	17,55	17,25	
	5	8,37	9,75	10,11	
60	100	138,45	144,71	142,83	
	80	109,30	114,85	116,44	
	40	62,10	67,20	64,90	
	20	34,47	37,03	35,42	
	10	17,62	20,30	20,55	
	5	9,48	10,55	11,27	
50	100	142,01	143,27	144,19	
	80	119,46	112,28	121,14	
	40	63,07	60,82	64,49	
	20	31,67	31,52	34,37	
	10	16,77	17,32	18,70	
	5	8,89	9,46	10,57	

A Tabela 43, pertencente ao grupo I (encosta com rampa), expressa para encostas com inclinação de 90°, compostas por rampa com solo residual (inclinação de 30°), resultados do alcance máximo que variam de 25,90 a 112,69 metros. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 28,71 a 54,55 metros.

As encostas com rampa constituídas de depósito de tálus (inclinação de 40°), pertencente ao grupo I, apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 26,42 a 86,42 metros para inclinação de 90°. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 28,66 a 109,44 metros (Tabela 43).

O grupo I, apresenta os resultados do alcance máximo nos quais estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, tanto para encostas formadas por rampa de solo residual, quanto por rampa de depósito de tálus. O limite do alcance estabelecido é de 200 metros contados a partir da quebra inferior de 30° e 40° da rampa, respectivamente, para as encostas.

No geral, para encostas com domínio de basalto e presença de rampa com solo residual, os resultados do alcance máximo diminuem quando ocorre a redução da altura da encosta, da mesma forma quando ocorre a diminuição do ângulo de inclinação do encosta.

Por outro lado, encostas com presença de rampa em depósito de tálus, para inclinação de 90°, apresentam um resultado do alcance máximo que diminui em maior massa do bloco (altura de 100 metros). A causa para a diminuição desse alcance pode estar relacionado a diferença do coeficiente de restituição normal, no qual é maior no maciço rochoso em relação ao da rampa. Para a inclinação de 50°, observa-se um aumento nos resultados do alcance e em seguida, uma diminuição dos alcances com a redução da altura da encosta.

Tabela 43 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de BASALTO e  $\omega = 5$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	108,61	110,01	112,69	286,479° = 5
		80	96,31	96,13	95,51	
		40	66,84	68,74	70,14	
		20	44,01	47,62	51,26	
		10	27,32	27,06	26,41	
		5	26,44	26,70	25,90	
	50	100	51,49	53,26	54,55	
		80	45,94	42,36	47,78	
		40	32,54	31,62	33,22	
		20	30,49	29,58	30,39	
		10	29,88	28,88	29,91	
		5	28,83	28,71	28,72	
TÁLUS	90	100	86,42	67,65	53,43	
		80	82,60	65,52	57,12	
		40	72,41	62,10	55,93	
		20	60,37	57,17	53,49	
		10	41,87	47,94	48,89	
		5	27,06	26,87	26,42	
	50	100	104,82	106,85	109,44	
		80	83,65	86,77	84,96	
		40	48,97	50,24	51,21	
		20	37,43	37,53	37,97	
		10	30,47	32,52	32,35	
		5	28,66	29,26	30,29	

#### 4.4.3. RESULTADOS - VELOCIDADE ANGULAR (20 rad/s)

Conforme o grupo III (inclinação da encosta  $> 70^\circ$ ), para taludes com inclinação de  $90^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 22,93 a 171,50 metros. Para taludes com inclinação de  $80^\circ$ , o alcance máximo obtido varia de 11,80 a 100,77 metros (Tabela 44).

Portanto, os resultados dos alcances tanto para encostas com ângulo de inclinação de  $90^\circ$ , como para as de inclinação de  $80^\circ$ , no geral, não estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM. Esses alcances correspondem a valores muito elevados, principalmente para encostas com alta inclinação. O limite do alcance máximo proposto de 50 metros para encosta superior a  $70^\circ$  de inclinação, só está de acordo para os casos nos quais apresentam baixa altura da encosta e menor massa do bloco.



Desse modo, nota-se que com aumento da velocidade angular, os resultados do alcance máximo atingem elevadas distâncias, principalmente para os casos que apresentam maior proporção dos blocos.

Tabela 44 - Resultado do alcance máximo para o grupo III: Inclinação de 90° e 80° em domínio de BASALTO e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
		ALCANCE MÁXIMO (m)			
90	100	82,07	135,47	171,50	1145,916° = 20
	80	77,72	124,95	161,76	
	40	59,40	101,27	125,02	
	20	44,43	75,90	95,30	
	10	31,06	53,13	68,17	
	5	22,93	39,27	49,58	
80	100	78,66	90,14	100,77	
	80	66,50	81,40	83,92	
	40	41,64	51,16	59,17	
	20	25,95	35,13	41,67	
	10	16,68	25,24	34,63	
	5	11,80	19,90	26,97	

De acordo com o grupo II (inclinação de 50° a 70°), encostas com inclinação de 70°, apresentam o alcance máximo que varia de 14,09 a 135,54 metros. Para encostas com inclinação de 60°, o alcance máximo obtido varia de 14,77 a 146,63 metros. E para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 14,15 a 148,23 metros (Tabela 45).

Os resultados obtidos para os ângulos de inclinação de 70°, 60° e 50° da encosta, no geral, estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, cujo o limite do alcance determinado é de 100 metros para encosta com inclinação de 50° a 70°. Os casos com exceção, para os respectivos ângulos de inclinação do grupo II, são aqueles nos quais os resultados do alcance ultrapassam o limite estabelecido para a altura do talude superior a 80 metros.

Desta maneira, em domínio de basalto para encosta sem rampa, observa-se que com a diminuição do ângulo de inclinação da encosta, os resultados do alcance máximo diminuem para o grupo III. No caso do grupo II, com a diminuição da inclinação da encosta, os resultados do alcance máximo aumentam, porém, tem casos em que ocorre a diminuição do alcance máximo quando acontece a redução do ângulo de inclinação.

Tabela 45 - Resultado do alcance máximo para o grupo II: Inclinação de 70°, 60° e 50° em domínio de BASALTO e  $\omega = 20$  rad/s.

TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
		VOLUME DO BLOCO (m <sup>3</sup> )			
		1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)					
70	100	112,00	125,98	135,54	1145,916° = 20
	80	100,65	112,67	121,24	
	40	56,73	65,15	72,20	
	20	35,59	46,21	51,80	
	10	22,18	31,13	38,31	
	5	14,09	21,98	29,64	
60	100	139,98	142,41	146,63	
	80	121,30	125,66	135,76	
	40	73,75	79,52	90,07	
	20	41,10	50,09	60,46	
	10	24,42	32,76	41,06	
	5	14,77	24,32	32,26	
50	100	144,18	145,17	148,23	
	80	117,13	119,22	123,53	
	40	67,80	74,89	80,69	
	20	38,51	46,48	55,46	
	10	23,60	31,31	41,40	
	5	14,15	22,44	31,62	

Para finalizar, o grupo I (encosta com rampa) no qual apresenta encostas com inclinação de 90°, constituídas por rampa de solo residual (inclinação de 30°), exibem os resultados do alcance máximo que variam de 25,00 a 170,69 metros. Para encostas com inclinação de 50°, o alcance máximo obtido varia de 28,90 a 57,20 metros.

A presença de rampa constituídas de depósito de tálus (inclinação de 40°) nas encostas, também do grupo I, apresentam os resultados do alcance máximo que variam de 44,29 a 182,28 metros para inclinação de 90°. Encostas com inclinação de 50°, apresentam o alcance máximo obtido que varia de 30,57 a 124,61 metros (Tabela 46).

Para todos os resultados do grupo I com inclinações de 90° e 50° dos taludes, formados por rampa de solo residual, e também por rampa de depósito de tálus, nota-se que estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, pois são inferiores ao limite do alcance estabelecido de 200 metros.

Portanto, constata-se que os resultados do alcance são próximos para encostas com inclinação de 90° nas duas composições da rampa, porém, observa-se um leve aumento do alcance nas encostas com rampa de depósito de tálus. Para a inclinação de 50°, pode-se observar o aumento dos resultados do alcance máximo quando ocorre a mudança da composição da rampa de solo residual para depósito de tálus. A explicação para estas observações está relacionada ao coeficiente de restituição, no qual é maior na superfície em depósito de tálus.

Tabela 46 - Resultado do alcance máximo para o grupo I: Solo Residual e Tálus, com inclinação de 90° e 50° em domínio de BASALTO e  $\omega = 20$  rad/s.

RAMPA	TALUDE		MASSA DO BLOCO (kg)			VELOCIDADE ANGULAR (rad/s)
	INCLINAÇÃO (graus)	ALTURA (m)	2.800	14.000	28.000	
			VOLUME DO BLOCO (m³)			
			1	5	10	
ALCANCE MÁXIMO (m)						
SOLO RESIDUAL	90	100	83,56	136,03	170,69	1145,916° = 20
		80	78,87	131,31	164,03	
		40	60,19	109,72	135,82	
		20	49,14	87,06	113,55	
		10	43,73	72,36	98,10	
		5	25,00	47,34	80,68	
	50	100	57,20	52,15	53,90	
		80	37,81	42,19	45,39	
		40	31,48	33,84	34,48	
		20	29,77	31,92	32,39	
		10	29,02	29,88	31,14	
		5	28,90	29,65	30,18	
TÁLUS	90	100	83,88	140,45	182,28	
		80	77,83	135,45	167,06	
		40	63,46	109,39	134,91	
		20	53,26	91,03	115,50	
		10	48,36	76,40	93,30	
		5	44,29	67,39	82,78	
	50	100	107,39	119,17	124,61	
		80	86,44	87,32	98,40	
		40	50,91	52,17	55,56	
		20	40,38	41,55	44,11	
		10	35,08	37,80	39,22	
		5	30,57	32,96	36,45	

Os tipos de movimentos observados nas simulações nos casos de encostas sem rampa, correspondem a queda livre para inclinações de 90° e 80°, e saltação para inclinações de 70°, 60° e 50°. Nos casos de encostas com rampa, para inclinação de 90°, foi observado o tipo de movimento que corresponde a queda livre. Já para inclinação de 50°, foi observado o tipo de movimento que corresponde a saltação com pouco deslizamento.

Nos APÊNDICES do presente trabalho apresentam-se gráficos de alcance máximo obtidos nas simulações no software RocFall 4.0. São observados também esses resultados com relação aos limites estabelecidos do alcance máximo pelo projeto GIDES. Esses gráficos expressam a relação entre a altura do talude (m) e o alcance máximo dos blocos (m). A linha tracejada representa o limite do alcance dos blocos para encostas com rampa e sem rampa, e suas respectivas inclinações.

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Os estudos dos eventos de queda de blocos abordam muitas incertezas, devido ao número de parâmetros envolvidos e diferentes testes e metodologias que influenciam no alcance e na trajetória dos blocos. Para planejar medidas corretivas, o uso de um modelo de simulação de rochas com base em análises probabilísticas é fundamental para a previsão do alcance e trajetória dos blocos rochosos.

Assim sendo, este trabalho de monografia permitiu analisar, a partir de simulações, os alcances em fenômenos de queda de blocos. Para isso, foi levado em conta a pesquisa bibliográfica dos parâmetros de entrada para a modelagem numérica como os coeficientes de restituição normal e tangencial, ângulos de atrito, velocidades angular, rugosidade, massa específica e volumes dos blocos e velocidade inicial. Além disso, foram examinadas as características geomorfológicas das encostas.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 4, foram realizados no total 1.944 simulações variando a velocidade angular, domínio litológico do maciço rochoso e altura do talude, dividindo-se em três grupos de acordo com o ângulo de inclinação da encosta e a presença da rampa. Desse total, 1.731 simulações foram atendidas pelo critério da CPRM para as áreas críticas, segundo o limite do alcance máximo. Portanto, 89,04% dos alcances são considerados como medida da eficiência da previsão.

Para a área de dispersão, 1.915 simulações foram atendidas pelo critério da CPRM, segundo o limite do alcance máximo. Dessa forma, 98,51 % dos alcances são considerados como medida da eficiência da previsão.

Pelos resultados obtidos, notam-se que as encostas mais altas conferem aos blocos maior energia potencial do que as encostas mais baixas, ou seja, atingem maiores distâncias. Com o aumento da velocidade angular dos blocos, faz com que estes atingem maiores distâncias. Em conformidade, os blocos de menor massa atingem distâncias menores comparados aos blocos de maior massa. Para este estudo, foi levado em consideração o volume dos blocos reais aproximados.

Segundo cada divisão de grupo, numa abordagem geral, o grupo III, obteve maiores resultados do alcance para o elevado ângulo de inclinação do talude. O grupo II (encostas com inclinação de 50° a 70°) obteve um declínio dos resultados do alcance de acordo com o aumento do ângulo de inclinação da talude. Já o grupo I (encosta com rampa), obteve resultados do alcance bem próximos para a inclinação de 90° do talude, com a mudança da composição da rampa. Porém, para a inclinação de 50° do talude, ocorre um aumento dos alcances com a mudança da composição da rampa de solo residual para depósito de tálus.

Conforme o domínio litológico do maciço rochoso, percebe-se uma diferença do alcance máximo. O domínio de arenito resultou no menor alcance máximo, independente do grupo e da velocidade angular do bloco, podendo estar relacionado ao baixo coeficiente de restituição. Entre o domínio de gnaiss e granito, no qual apresentam valores dos parâmetros bem próximos, até mesmo o coeficiente de restituição, observou-se para o gnaiss o resultado do alcance máximo superior ao resultado do alcance para o granito. Ambos ainda superiores ao domínio do arenito. Já o domínio de basalto, apresentou o resultado do alcance máximo próximo ao do gnaiss, porém, inferior. Estes alcances para basalto só excedem aos resultados do granito e arenito.

Os responsáveis pelo comportamento dos blocos rochosos, no qual podem reproduzir movimentos de rotação e/ou translação influenciando no alcance, são: geometria da encosta e dos blocos, ângulo de atrito, velocidade angular, coeficiente de restituição da rocha, rugosidade e massa específica dos blocos. Dessa forma, a pesquisa mostra que a variabilidade do alcance dos blocos segundo os dois principais parâmetros, coeficiente de restituição e velocidade angular, é imprescindível neste tipo de análise.

Com base na média geral dos resultados dos alcances das simulações, incluindo todas as inclinações de cada grupo, conclui-se que para o domínio de GNAISSE em velocidade angular de 0.39 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 15,80 metros; para o grupo II é de 57,76 metros; e para o grupo I é de 56,21 metros. Em velocidade angular de 5 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 29,56 metros; para o grupo II é de 60,11 metros; e para o grupo I é de 51,29 metros. Com velocidade angular de 20 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 81,53 metros; para o grupo II é de 81,71 metros; e para o grupo I é de 90,10 metros.

Com o domínio de GRANITO em velocidade angular de 0.39 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 12,20 metros; para o grupo II é de 43,00 metros; e para o grupo I é de 43,94 metros. Em velocidade angular de 5 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 22,03 metros; para o grupo II é de 43,99 metros; e para o grupo I é de 42,11 metros. Com velocidade angular de 20 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 57,17 metros; para o grupo II é de 56,16 metros; e para o grupo I é de 65,30 metros.

Para o domínio de ARENITO em velocidade angular de 0.39 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 4,41 metros; para o grupo II é de 16,10 metros; e para o grupo I é de 29,13 metros. Em velocidade angular de 5 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 9,58 metros; para o grupo II é de 16,17 metros; e para o grupo I é de 28,37 metros. Para velocidade angular de 20 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 24,69 metros; para o grupo II é de 19,53 metros; e para o grupo I é de 34,44 metros.

Em domínio de BASALTO em velocidade angular de 0.39 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 16,87 metros; para o grupo II é de 57,90 metros; e para o grupo I é de 54,88 metros. Em velocidade angular de 5 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 28,62 metros; para o grupo II é de 60,62 metros; e para o grupo I é de 52,81 metros. Com velocidade angular de 20 rad/s, o alcance máximo para o grupo III é de 66,95 metros; para o grupo II é de 72,13 metros; e para o grupo I é de 72,72 metros.

Tomando esses resultados como medida conservadora e levando como base a média dos alcances máximos em cada grupo para a área crítica, notam-se que para os grupos I e II os alcances estão de acordo com a pesquisa proposta pela CPRM, pois os alcances são inferiores ao limite estabelecido de 200 metros e 100 metros, respectivamente. O grupo III também está dentro do limite do alcance estabelecido de 50 metros, porém, para os domínios de gnaiss, granito e basalto em velocidade angular dos blocos de 20 rad/s, são considerados casos críticos e não estão de acordo com a pesquisa da CPRM, pois o alcance máximo excede o limite.

Como conclusão deste estudo, o método utilizado vem se confirmar como adequado e satisfatório para a análise geral do movimento gravitacional de massa do tipo queda de blocos rochosos, permitindo a melhor compreensão do problema e também dos fatores geológico, geomorfológico e geotécnico. O trabalho mostrou a importância da altura inicial do bloco na estimativa do alcance e é importante ressaltar, que o método da CPRM é conservador.

Esta pesquisa irá contribuir para a previsibilidade de eventos associados a este tipo de movimento de massa, para a modelagem geológica mais realista através do método numérico pouco utilizado para esta finalidade, e para redução de acidentes que envolvam queda de blocos rochosos. Espera-se por fim, diante da dificuldade de localização dos blocos suscetíveis aos deslocamentos nas encostas, difundir este tipo de análise numérica e colocá-la à serviço dos órgãos públicos para planejamentos de medidas mitigadoras para as áreas de risco geológico.

Para trabalhos futuros serão sugeridos algumas abordagens, a seguir:

- ✓ Determinar os coeficientes de restituição a partir de análise inversa (retro-análise) e ensaios de laboratório, para diversos tipos de rochas recorrentes nas encostas, por ser um parâmetro escasso na literatura geológica;
- ✓ Determinar a velocidade angular de blocos por ser um parâmetro também escasso na literatura geológica;
- ✓ Pesquisar procedimentos para preparação de esferas perfeitas de rochas para os ensaios de laboratório;
- ✓ Estudar mais casos reais de encostas brasileiras para controlar melhor a altura e o ângulo de inclinação de queda de blocos;
- ✓ Testar novas rochas, até mesmo com algum grau de alteração, além de variar mais os valores dos parâmetros para ampliar os casos mais frequentes de queda de blocos no Brasil;
- ✓ Verificar o percentual do número de alcances dos blocos para as áreas críticas e de dispersão;
- ✓ Verificar o grau de eficiência para os três grupos, separadamente;
- ✓ Discutir mais sugestões de alteração do alcance máximo do manual da CPRM.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- G1. Pedra que caiu na entrada de túnel em Santa Teresa é removida. 2011. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2011/05/pedra-que-caiu-na-entrada-de-tunel-em-santa-teresa-e-removida.html>>. Acessado em Fevereiro de 2019.
- ANTÃO, A.M. 2014. Caracterização da instabilidade de um talude de escavação na zona da guarda. Characterization of slope rockfall instability in guarda region. Disponível em: [10.13140/2.1.3684.1285](https://doi.org/10.13140/2.1.3684.1285).
- AUGUSTO FILHO, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1. Rio de Janeiro. Anais. p. 721-733.
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*. v.2, n. 1, 2007. Disponível em: <http://australiangeomechanics.org/resources/downloads/#dILRM2000>.
- BINAL, A. & ERCANOĞLU, M. 2010. Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) Geopark Region. *Environmental Earth Sciences*, 61(7), 1361–1373. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0454-1>.
- BRANDÃO DA SILVA, L. J. R. *et al.* 2011. Acidente no condomínio da rua engenheiro Gama Lobo, 650, Rio de Janeiro: Investigações geológicas-geotécnicas para a mitigação do risco a acidentes geológicos. 13º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL.
- CARNEVALE, G. 1991. Simulações Teóricas de Casos de Desmoronamento de Taludes Rochosos de Taludes Rochosos. *Solos e Rochas*, v.14, nº1, p. 21-40.
- CHAU, K.T.; WONG, R.H.C.; WU, J.J. 2002. Coefficient of restitution and rotational motion of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.39, p. 69-77.
- CHAU, K.T. *et al.* 2003. Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v.36, nº5, p. 383-408.
- COPONS, R.; VILAPLANA, J.M.; LINARES, R. 2009. Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Sol`ad`Andorra la Vella, Central Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. v. 9, p. 2107 – 2118.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. MANUAL de Mapeamento de Perigo e Riscos a Movimentos Gravitacionais de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais - Projeto GIDES. 2018. Rio de Janeiro: CPRM. ISBN: 978-85-7499-448-2.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. 1996. Landslide types and processes. In: Landslides, Investigation and Mitigation, Turner A.K., Schuster R.L. (eds). Special Report 247. Transportation Research Board: Washington DC; 36-75.
- DIAS, G.P. & BARROSO, E.V. 2006. Determinação experimental do coeficiente de restituição normal de rochas: Aplicação na previsão do alcance de blocos em encostas. In: ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – UFRJ, 29 (2): 149-167.



- DORREN, L.K.A.; DOMAAS, U.; KRONHOLM, K.; LABIOUSE, V. 2011. Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. *In*: S. Lambert & F. Nicot (editores). Rockfall engineering. ISTE Ltd. / John Wiley & Sons Inc.: p. 143 – 173.
- FELL, R; COROMINAS, J; BONNARD, C; CASCINI, L; LEROI, E; SAVAGE, W. Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102 (2008) 85–98. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/enggeo](http://www.elsevier.com/locate/enggeo).
- FLÓREZ-GÁLVEZ, J. H. 2012. Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da Rodovia RS471/BR153, lote 2. Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Geotecnia), 166p.
- GEOBRUGG. Catálogos de produtos. Romanshorn, Suíça. 2012. Disponível em: <http://www.geobrugg.com>.
- GIANI, G. P. 1992. Rock Slope stability analysis. Rotterdam: Balkema, 345 p.
- GIANI, G. P.; GIACOMINI, A.; MIGLIAZZA, M.; SEGALINI, A. 2004. Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design, Department of Civil and Environmental Engineering and Architecture, Parma, Italy, pp. 369-389.
- GOMES, J. C. Avaliação do perigo relacionado à queda de blocos em rodovias. 2009. 138f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- GOODMAN, R.E. 1989. Introduction to Rock Mechanics. (2nd ed.), Wiley, New York, 562.
- GUIDICINI, G. & Nieble, C.M. 1984. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: 2º ed. Edgard Blücher, 194 p.
- HIGHLAND, L.M. & BOBROWSKY, P. 2008. O Manual do Deslizamento –um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- HOEK E. ROCKFALL - A program in BASIC for the analysis of rockfalls from slopes. 1990. Golder Associates/University of Toronto, Unpublished notes.
- LOPES, E.S.S., 2006. Modelagem espacial dinâmica em Sistema de Informação Geográfica – uma aplicação ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS DA UNESP (IGCE/UNESP), Rio Claro, 2006. 314p.
- MOREIRA, J.M.S.; FREIRE, M.N.; AND HOLANDA, J.N.F. 2003. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica* 49, 262–267.
- NAVARRO, Fabiano Cabañas. 2006. Influência da petrografia sobre a anisotropia à tensão de compressão e dilatação térmica de rochas ornamentais. xi, 179f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS.
- PACHECO, M. & COUTINHO, R.Q. 2006. Avaliação de Risco de Deslizamentos nas Encostas de Petrópolis (RJ) e da Região Metropolitana de Recife (PE). *Solos e Rochas*, 29 (2): 223-235.
- PEILA, D.; PELIZZA, S. & SASSUDELLI, F. 1998. Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31(1): 1-24.

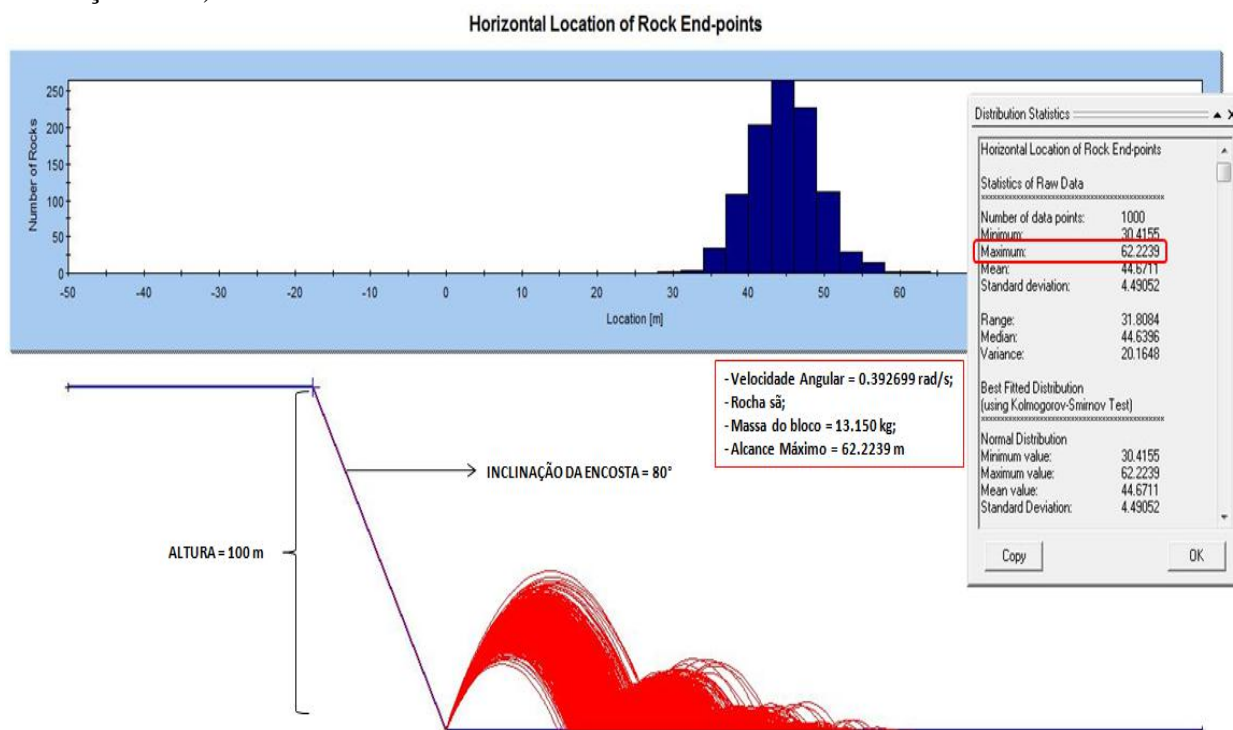
- PEILA, D. & RONCO, C. 2009. Technical Note: Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. v.9, p. 1291–1298.
- PENG, B. 2000. Rockfall trajectory analysis: Parameter determination and application, M.S. thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- PFEIFFER, T. J. & BOWEN, T. 1989. “Computer Simulation of Rockfalls”. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, V 26(1), pp. 135-146.
- PIERSON, L. A.; GULLIXON, G. F.; CHASSIE, R. G. 2001. Rockfall Catchment Area Design Guide Final Report SPR-3 (032). Technical Report Form DOT F 1700.7. Oregon, U. S.
- RAHN, P.H. 1986. *Engineering Geology: An Environmental Approach*. New Jersey, USA, Elsevier, 589p.
- RIBEIRO, R.S. 2008. Análise comparativa do alcance de blocos rochosos utilizando os softwares RocFall e PFC-2D. Departamento de Geologia. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso\_ Bacharelado em Geologia. 54p.
- RIBEIRO, R.S. 2013. Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos. Tese (Doutorado em Ciências (Geologia)) – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 265f.
- RICHARDS, L.R.; PENG, B.; BELL D.H. 2001. Laboratory and Field Evaluation of the Normal Coefficient of Restitution for Rocks. *Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock*. p.149-155.
- RITCHIE, A. M. 1963. Evaluation of Rockfall and its Control. *Highway Research Record*, USA, 17, pp. 13-28.
- ROCHA, J.S.A. 2009. Estudos numéricos sobre trajetórias de queda de blocos rochosos. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- ROCSCIENCE (1998-2002). Manual do Usuário de RocFall: Risk Analysis of Falling Rocks on Steep Slopes, 59p.
- ROCSCIENCE, 2003. Advanced Tutorial: Determining Input Parameters for a RocFall Analysis. Disponível em: [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).
- SELBY, M.J. 2005. *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, Oxford, England. 451p.
- SILVEIRA, L. R. C. 2017. Avaliação do perigo de queda de blocos em taludes urbanos e ferroviários e simulação de sua trajetória. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, Ouro Preto, 156f.
- SOUSA, Luís & VARGAS JR, Eurípedes & SOUSA, Rita. 2013. Analysis and Risk Management for Slopes of Rio de Janeiro State, Brazil (in Portuguese). [10.13140/2.1.1305.1683](https://doi.org/10.13140/2.1.1305.1683).
- STEVENS, WARREN DOUGLAS. 1998 - RocFall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Ann Arbor: University of Toronto (Canada). 104-104 p.

- TAVARES, L. M. M. S. C. 2015. Análise Paramétrica No Estudo Da Queda De Blocos Em Encostas Rochosas. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 110p.
- TOMINAGA, L.K. 2007. Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. Tese de Doutorado. DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA DA FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, SP, 220p.
- TOPAL, T.; AKIN, M. K.; & AKIN, M. 2012. Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural Hazards*, 62(2), 255–274. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9995-1>.
- USHIRO, T.; KUSUMOTO, M.; SHINOHARA, S; AND KINOSHITA, K. 2006. An experimental study related to rock fall movement mechanism. *J. Japan Soc. of Civil Engineers, Series F*, 62(2), 377-386 (*In: SYMP. ON GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES IN MOUNTAINOUS TERRAIN*), Kathmandu, Nepal, 366-375.
- VARGAS, JR.E.; CASTRO, J.T.; AMARAL, C; & FIGUEIREDO, R.P. 2004. On Mechanisms for Failures of Some Rock Slopes in Rio de Janeiro, Brazil: Thermal Fatigue?, *In: IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES*, Balkema, Rotterdam, Rio de Janeiro.
- VARNES, D.J 1958. Landslide Types and Processes. *In: LANDSLIDES AND ENGINEERING PRACTICE*. Eckel, e.b. ed. Washington: Highway Research Board. v. 29, cap. 3, p. 20 – 47.
- VARNES, D.J. 1978. Slope Movement Types and Processes. *In*, Special Report 176: R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.), *Landslides: Analysis and Control*, TRB, *National Research Council*, Washington, USA, pp. 11-33.
- WOLTJER, M. *et al.* 2008. Coupling a 3D patch model and a rockfall module to assess rockfall protection in mountain forests. *Journal of Environmental Management*. v.87, p. 373–388.
- WYLLIE, D. C. 2014. Rockfall engineering: development and calibration of an improved model for analysis of rock fall hazards on highways and railways (T). University of British Columbia. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0167542>.

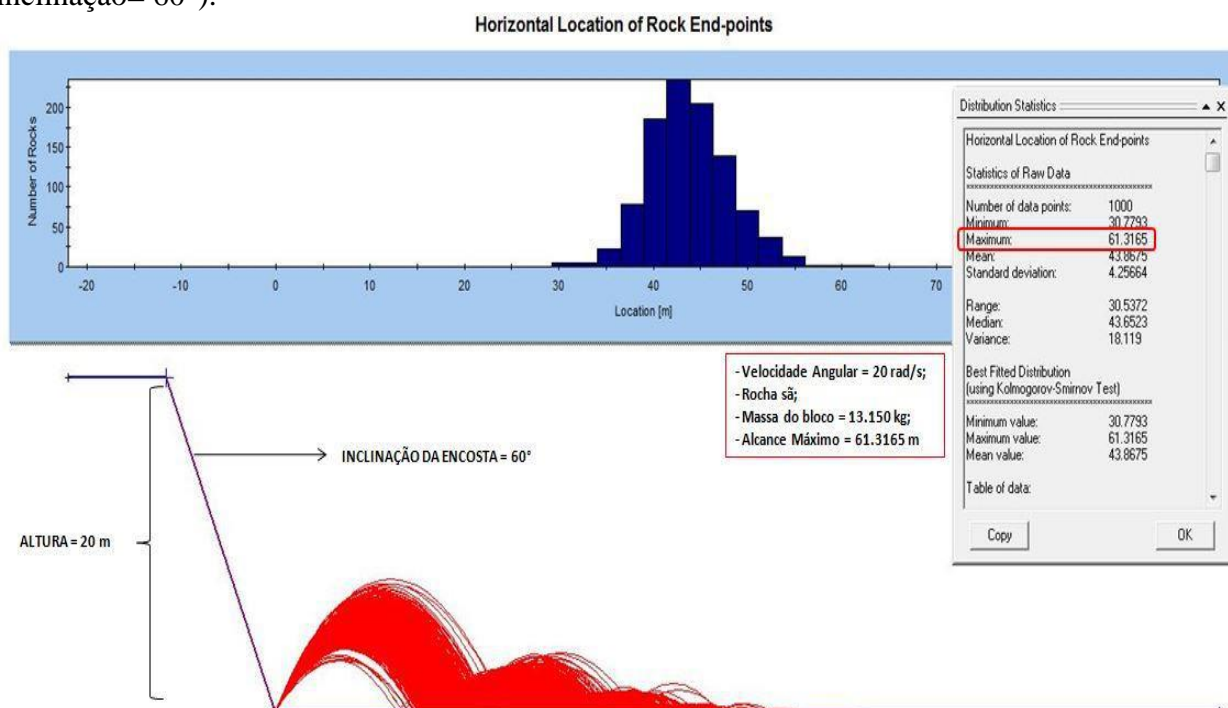
## **APÊNDICES**

Estes apêndices apresentam alguns exemplos de simulações da trajetória e alcance dos blocos rochosos, com destaque para a altura, inclinação da encosta e a presença da rampa.

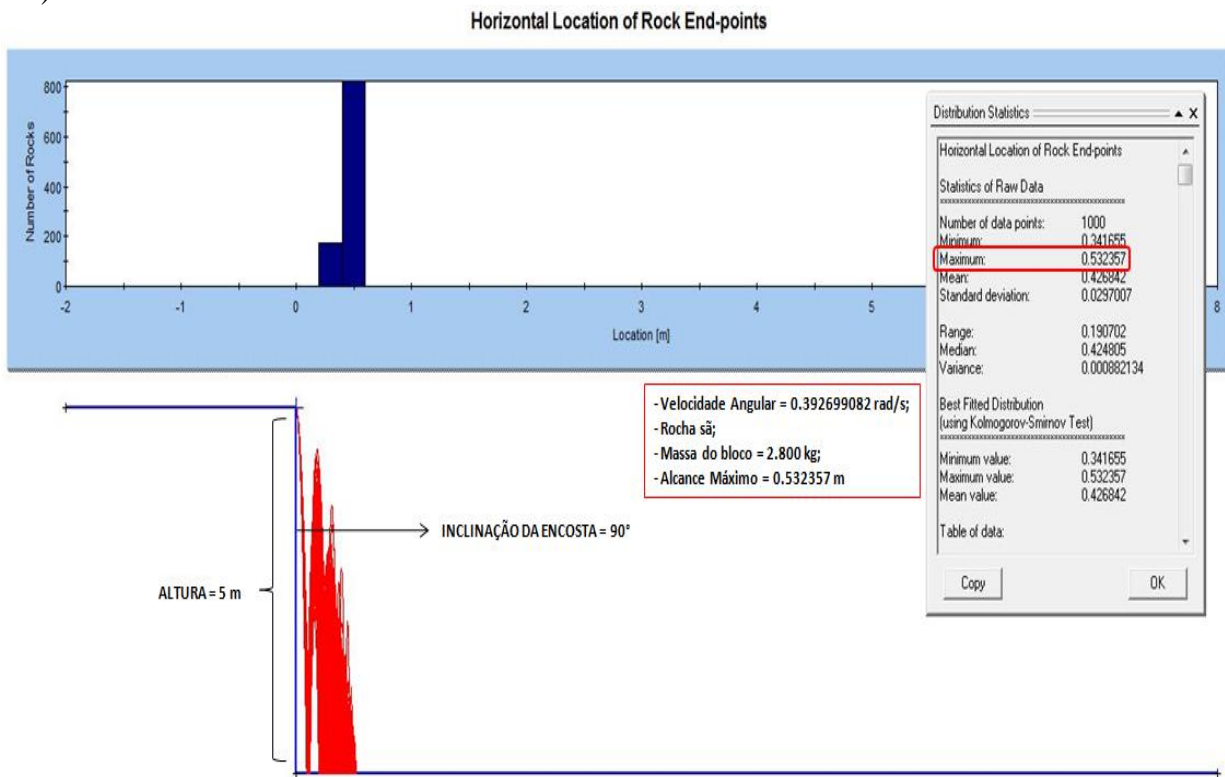
APÊNDICE A–Trajetória e alcance dos blocos em domínio de gnaiss (altura= 100 m; inclinação= 80°).



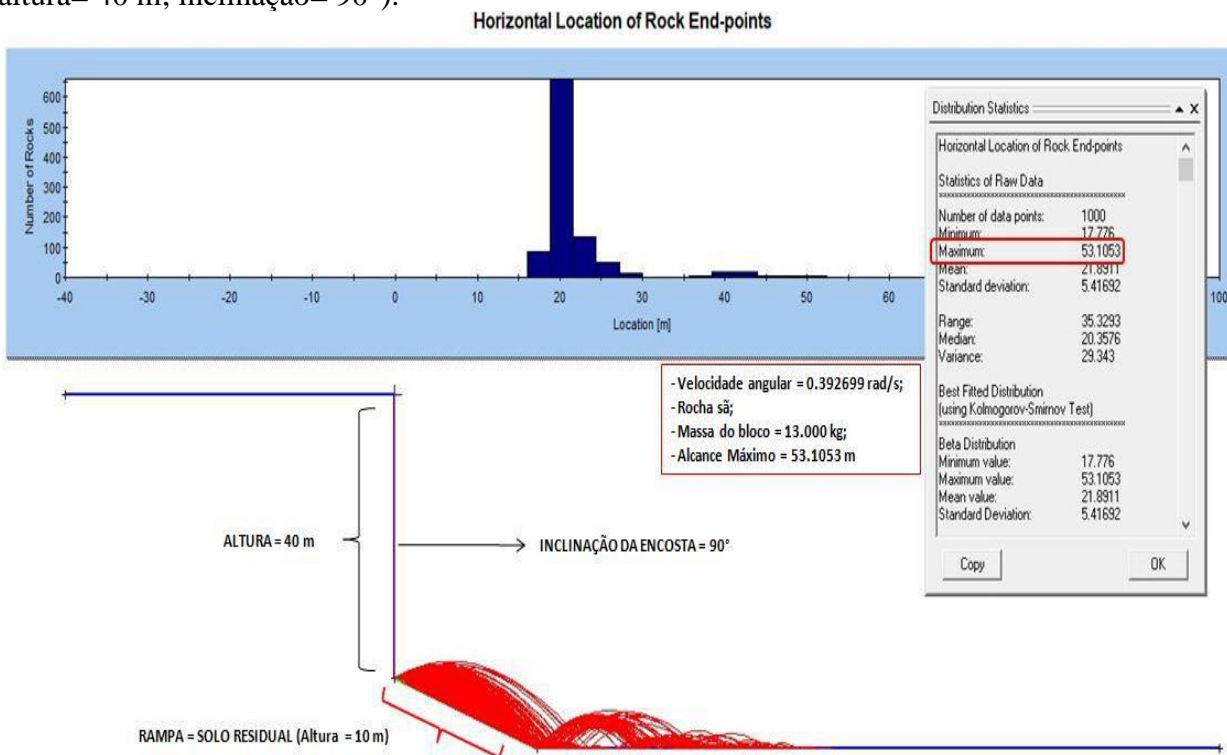
APÊNDICE B – Trajetória e alcance dos blocos em domínio de gnaiss (altura= 20 m; inclinação= 60°).



APÊNDICE C – Trajetória e alcance dos blocos em domínio de basalto (altura= 5 m; inclinação= 90°).

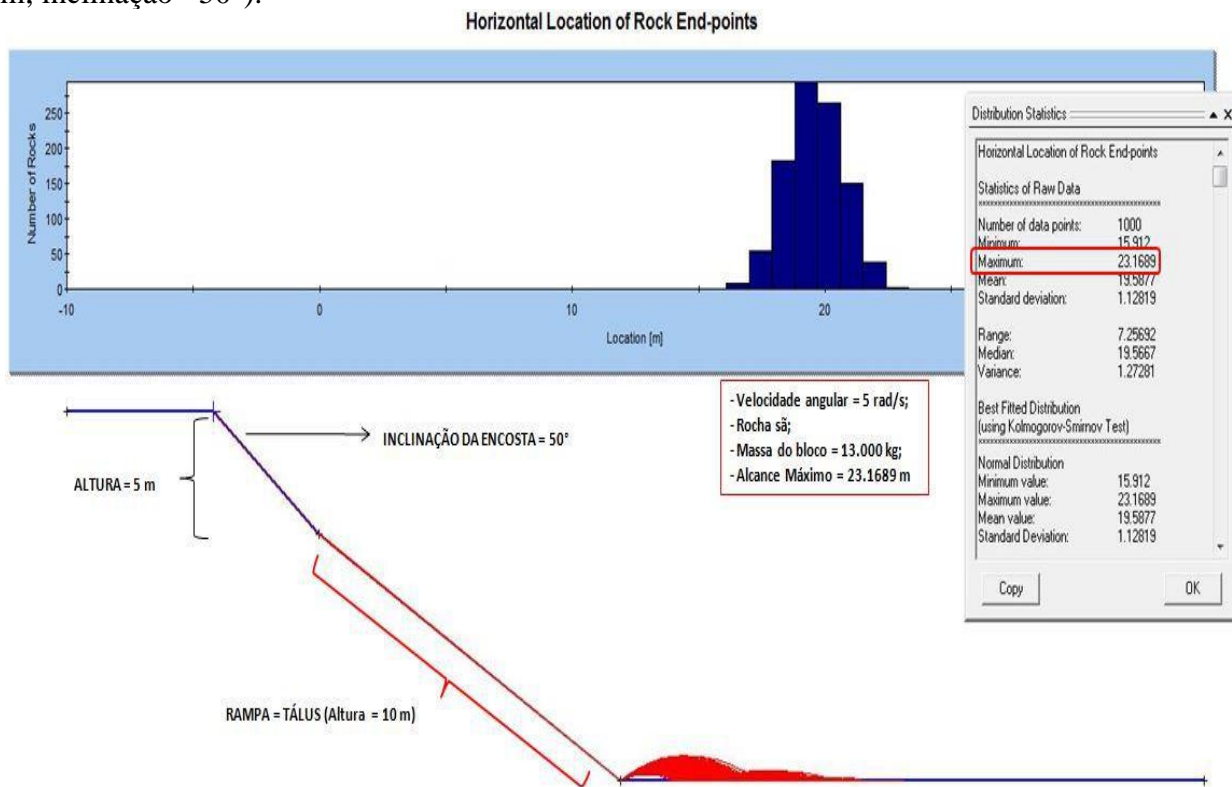


APÊNDICE D – Trajetória e alcance dos blocos em domínio de granito (rampa= solo residual; altura= 40 m; inclinação= 90°).

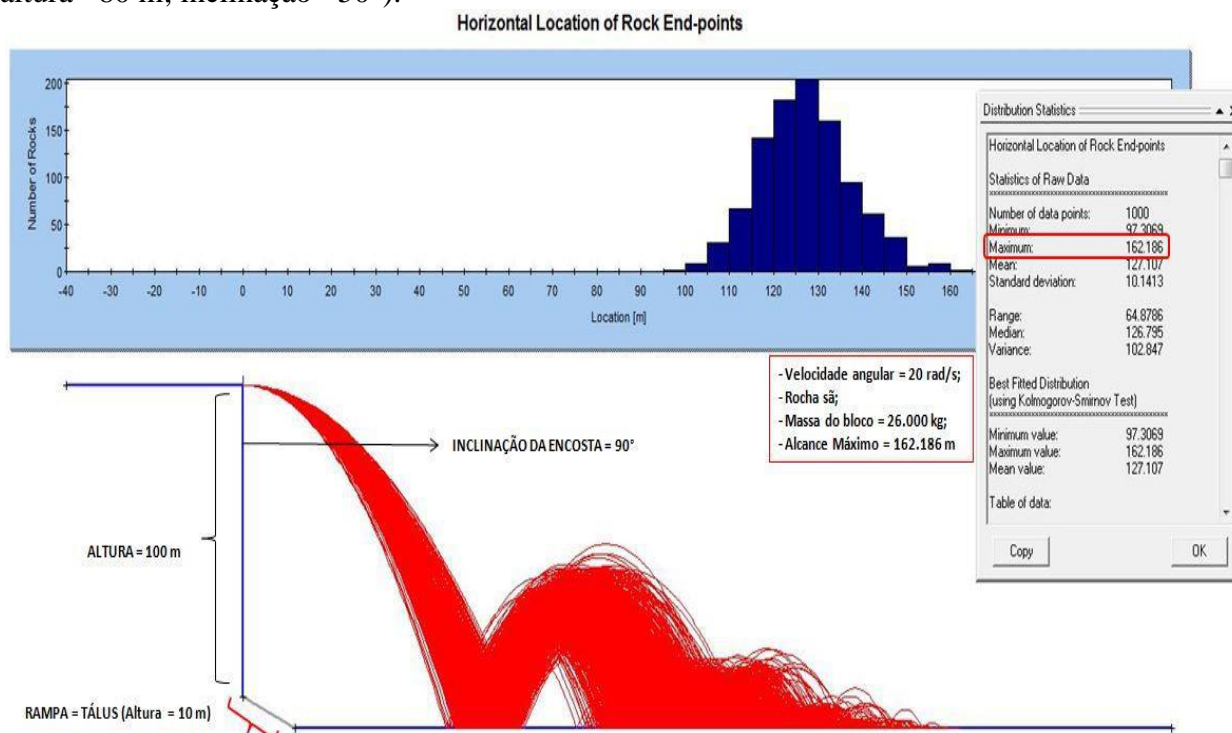




APÊNDICE E – Trajetória e alcance dos blocos em domínio de granito (rampa= tálus; altura= 5 m; inclinação= 50°).

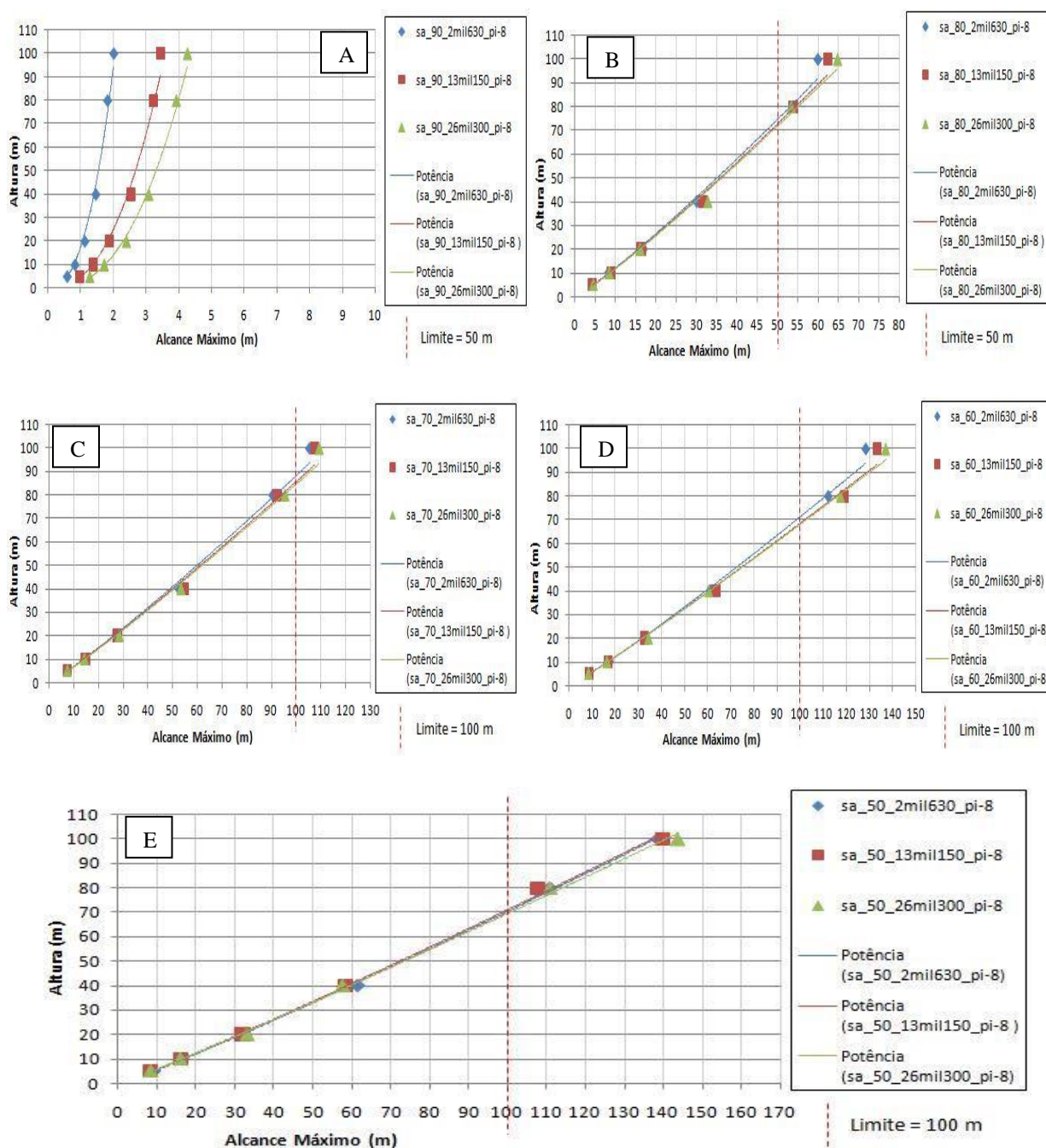


APÊNDICE F – Trajetória e alcance dos blocos em domínio de granito (rampa= solo residual; altura= 80 m; inclinação= 50°).

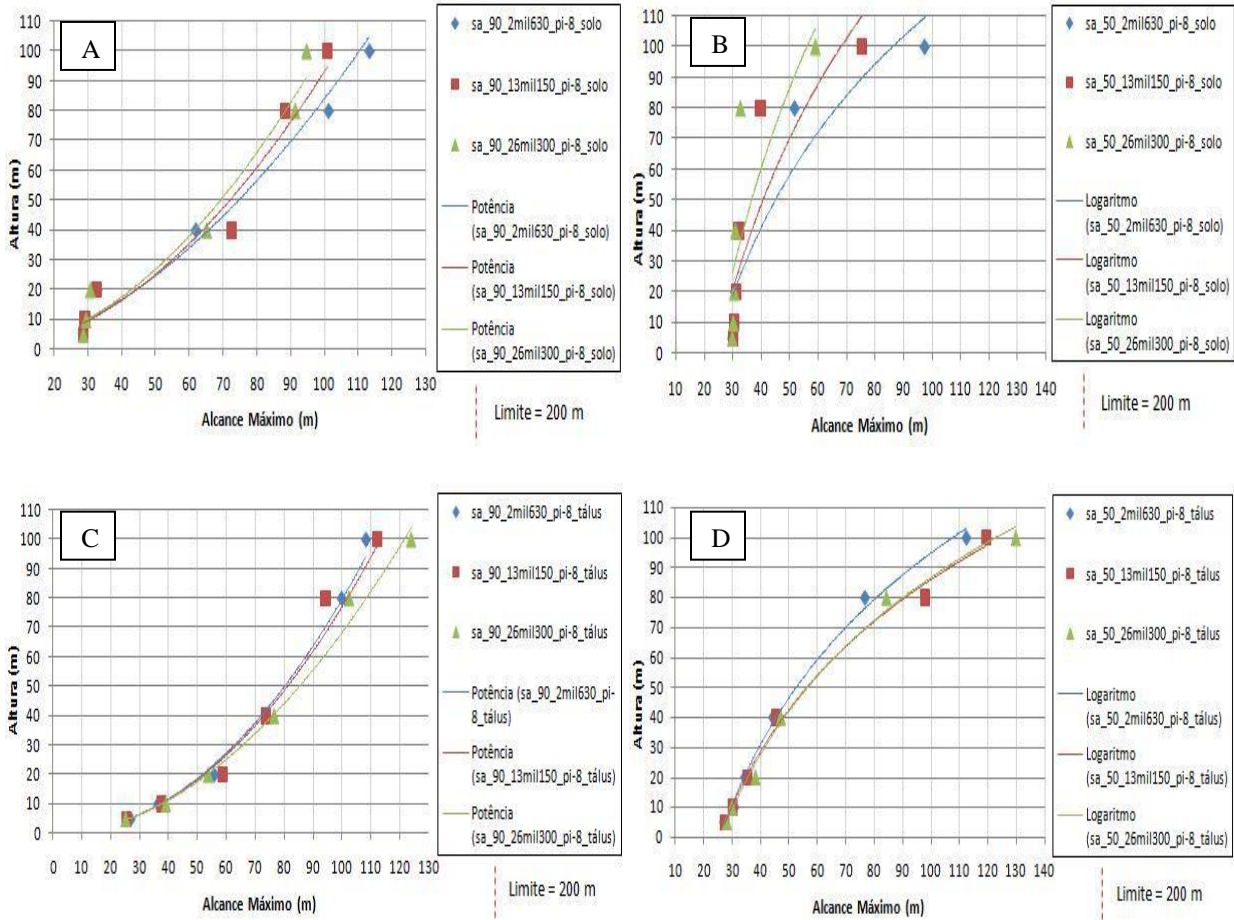


As curvas em cada gráfico representam os resultados do alcance máximo para cada altura da encosta, e se diferenciam pela massa dos blocos. A curva azul representa a massa do bloco de menor volume; a curva vermelha representa a massa do bloco de volume mediano; e a curva verde, representa a massa do bloco de maior volume.

APÊNDICE G – Gráficos do alcance máximo para domínio de GNAISSE e velocidade angular de 0.39 rad/s.

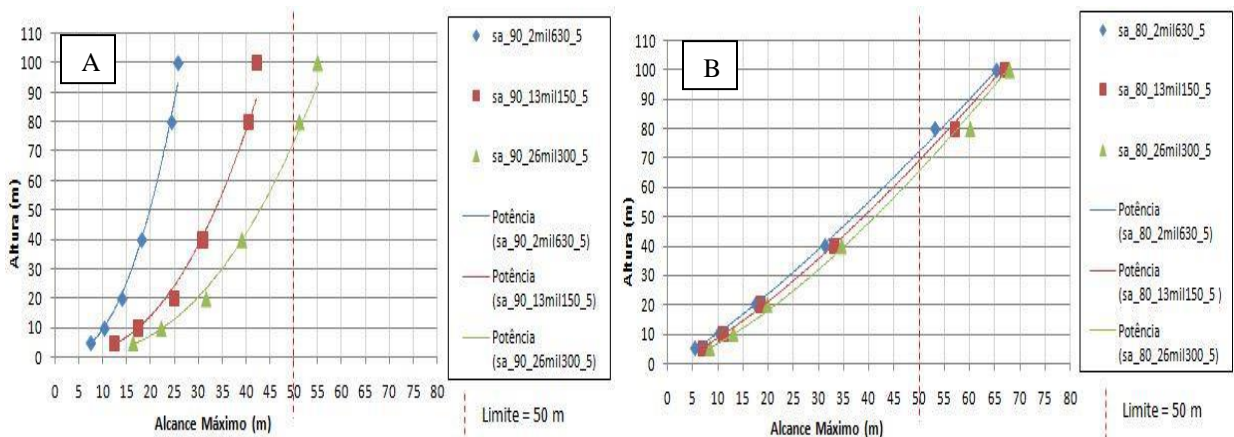


Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39$  rad/s): (A) Inclinação de 90°; (B) Inclinação de 80°; (C) Inclinação de 70°; (D) Inclinação de 60°; (E) Inclinação de 50°.

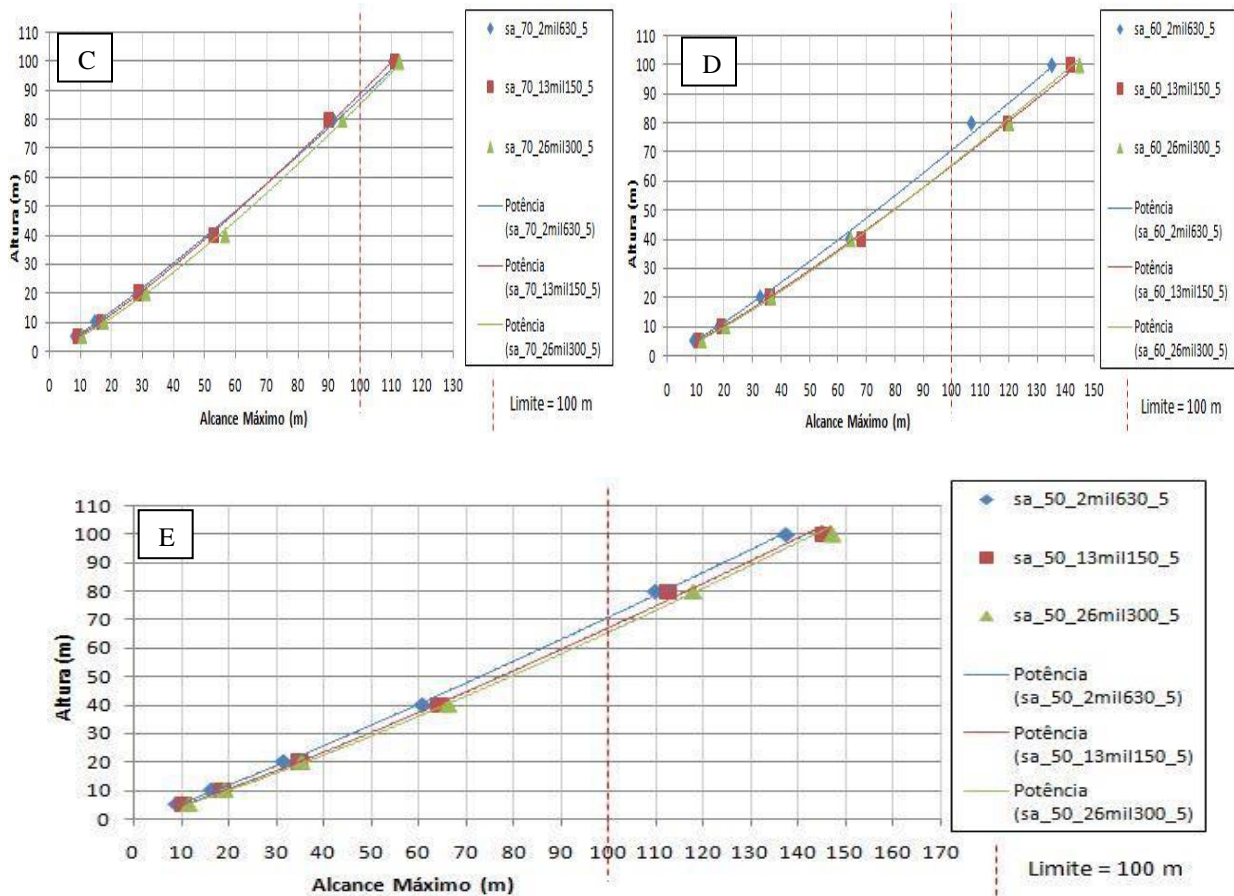


Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de  $90^\circ$  - solo residual; (B) Inclinação de  $50^\circ$  - solo residual; (C) Inclinação de  $90^\circ$  - tálus; (D) Inclinação de  $50^\circ$  - tálus.

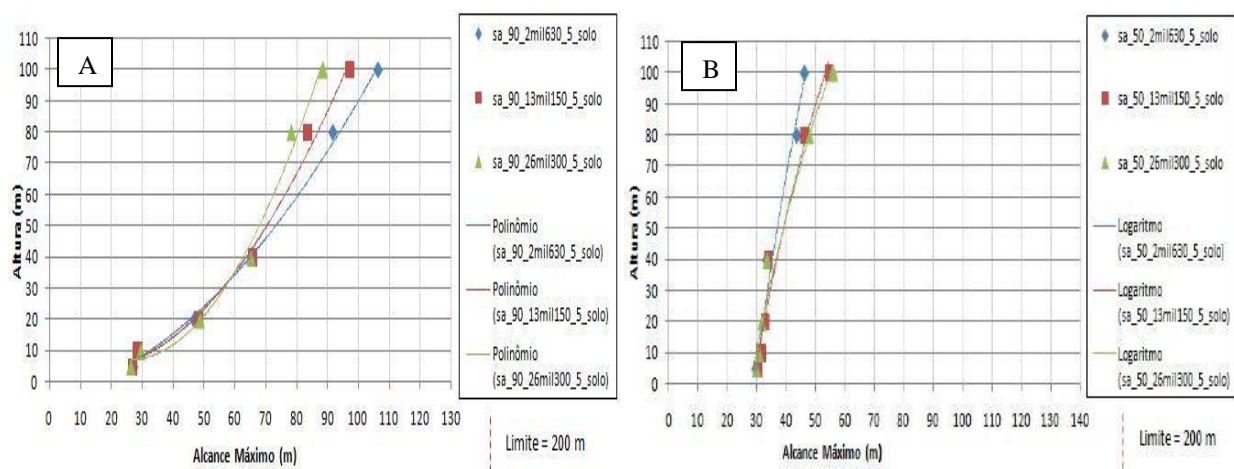
APÊNDICE H – Gráficos do alcance máximo para domínio de GNAISSE e velocidade angular de 5 rad/s.

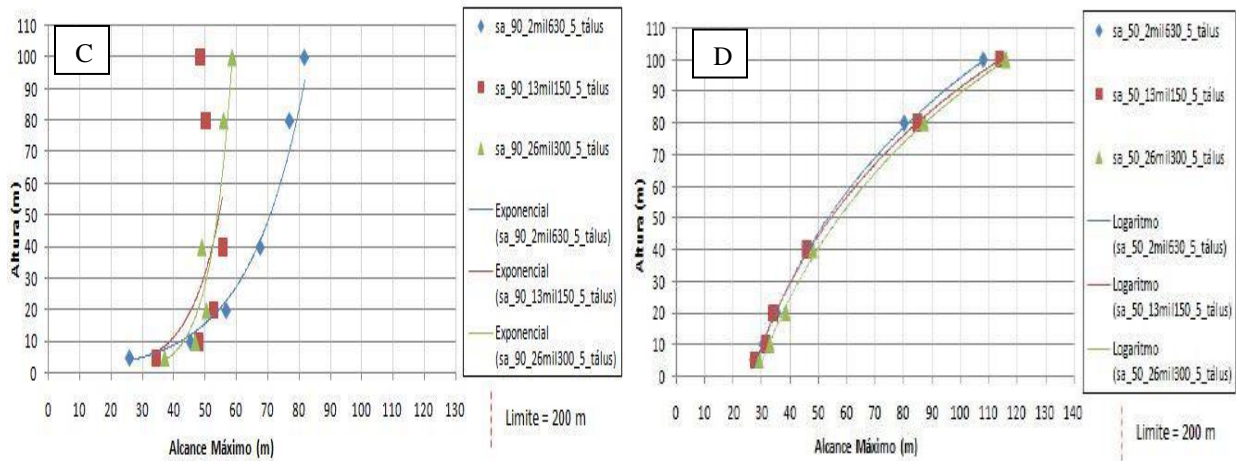






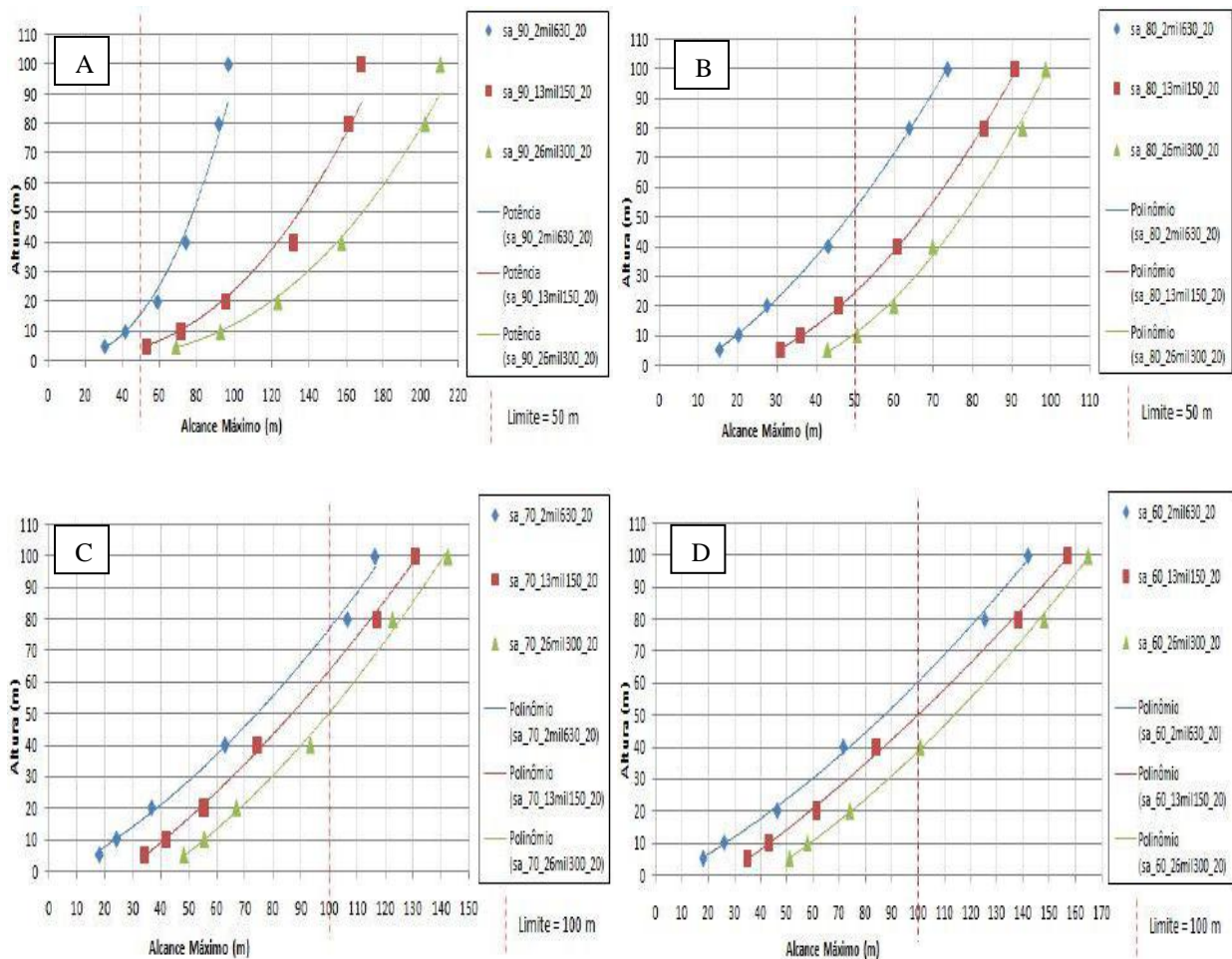
Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de  $90^\circ$ ; (B) Inclinação de  $80^\circ$ ; (C) Inclinação de  $70^\circ$ ; (D) Inclinação de  $60^\circ$ ; (E) Inclinação de  $50^\circ$ .

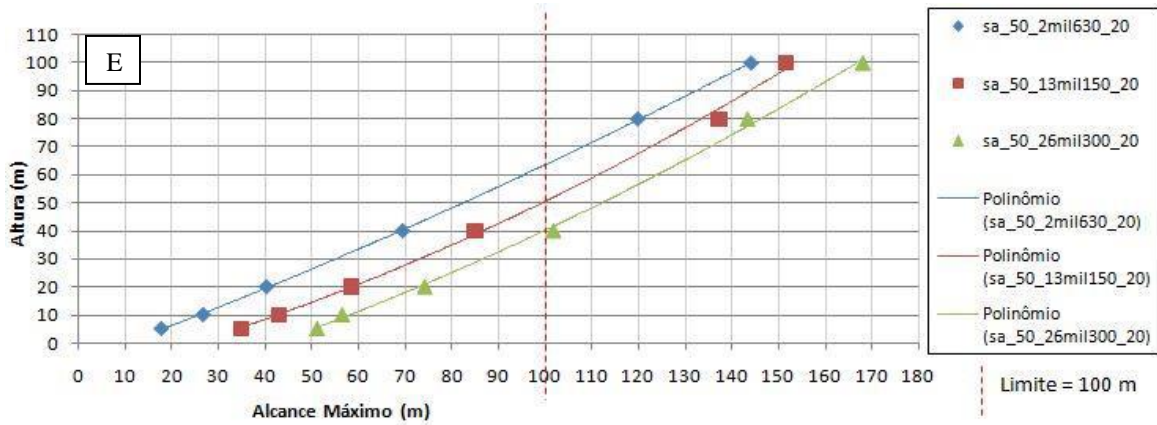




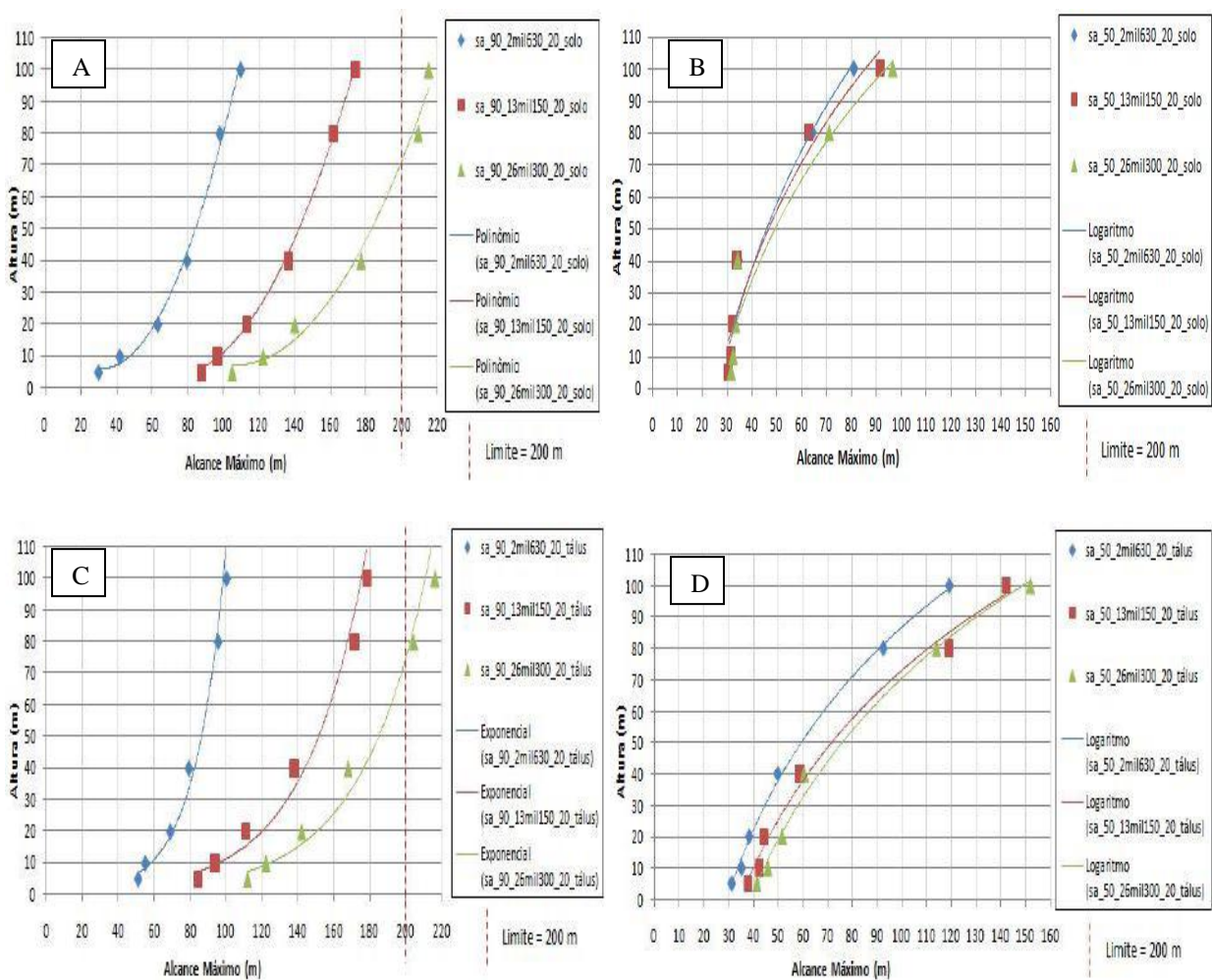
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5$  rad/s): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

APÊNDICE I – Gráficos do alcance máximo para domínio de GNAISSE e velocidade angular de 20 rad/s.





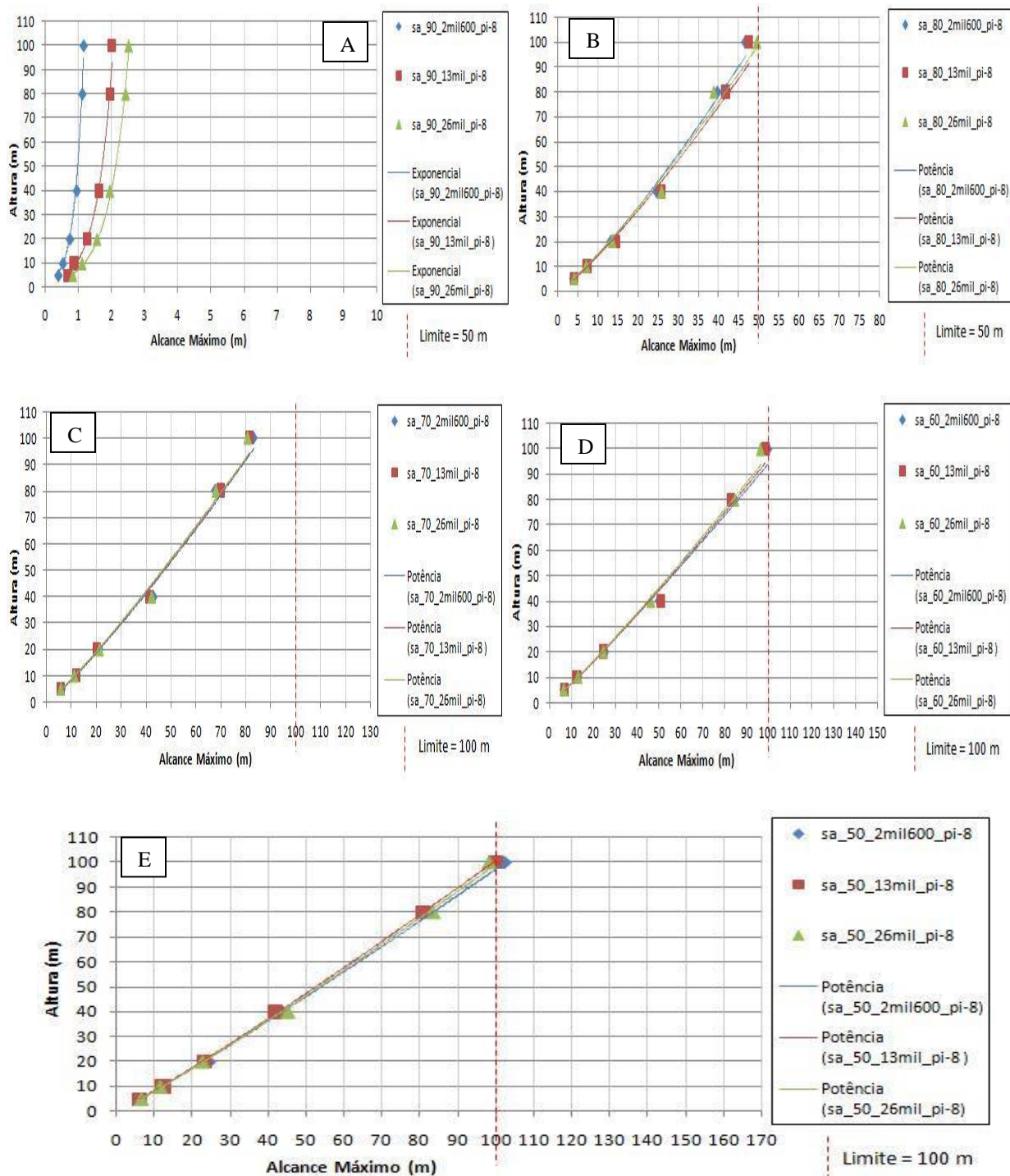
Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$ ; (B) Inclinação de  $80^\circ$ ; (C) Inclinação de  $70^\circ$ ; (D) Inclinação de  $60^\circ$ ; (E) Inclinação de  $50^\circ$ .



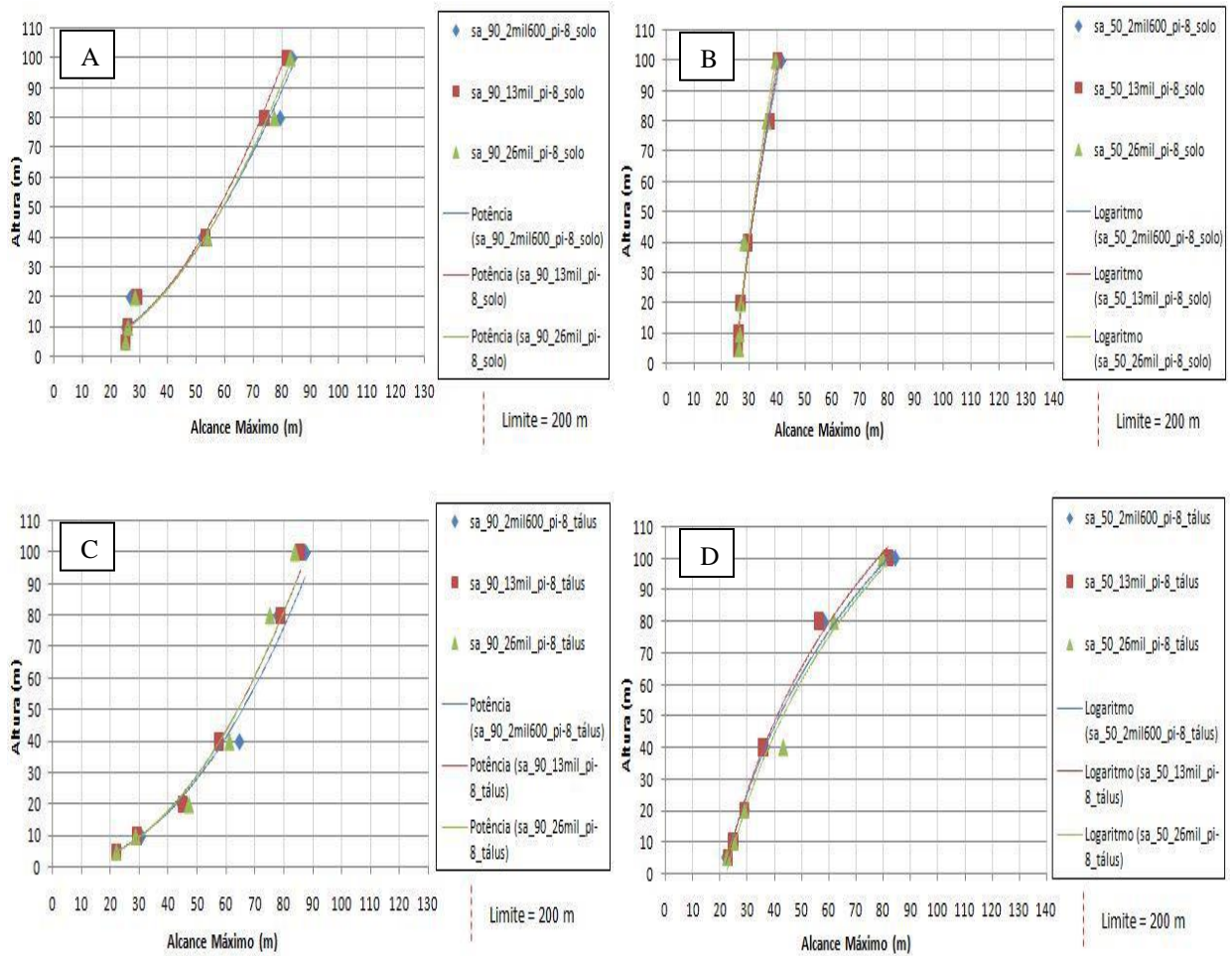
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$  - solo residual; (B) Inclinação de  $50^\circ$  - solo residual; (C) Inclinação de  $90^\circ$  - tálus; (D) Inclinação de  $50^\circ$  - tálus.



APÊNDICE J – Gráficos do alcance máximo para domínio de GRANITO e velocidade angular de 0.39 rad/s.

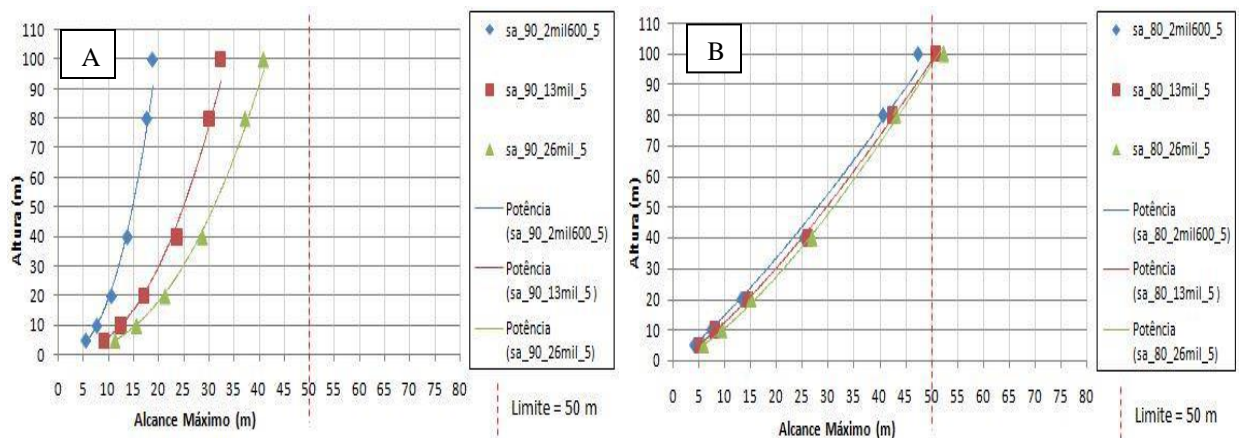


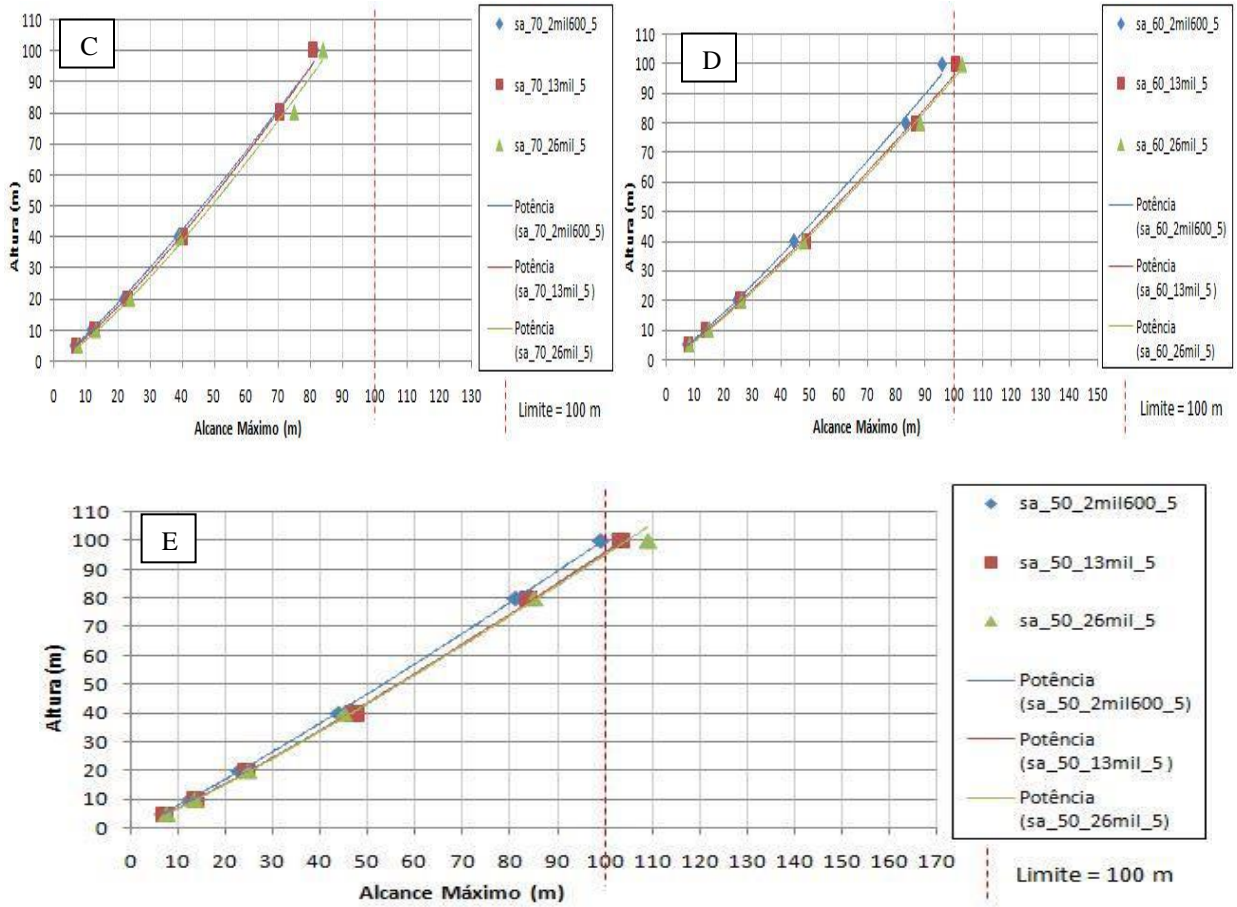
Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39$  rad/s): (A) Inclinação de 90°; (B) Inclinação de 80°; (C) Inclinação de 70°; (D) Inclinação de 60°; (E) Inclinação de 50°.



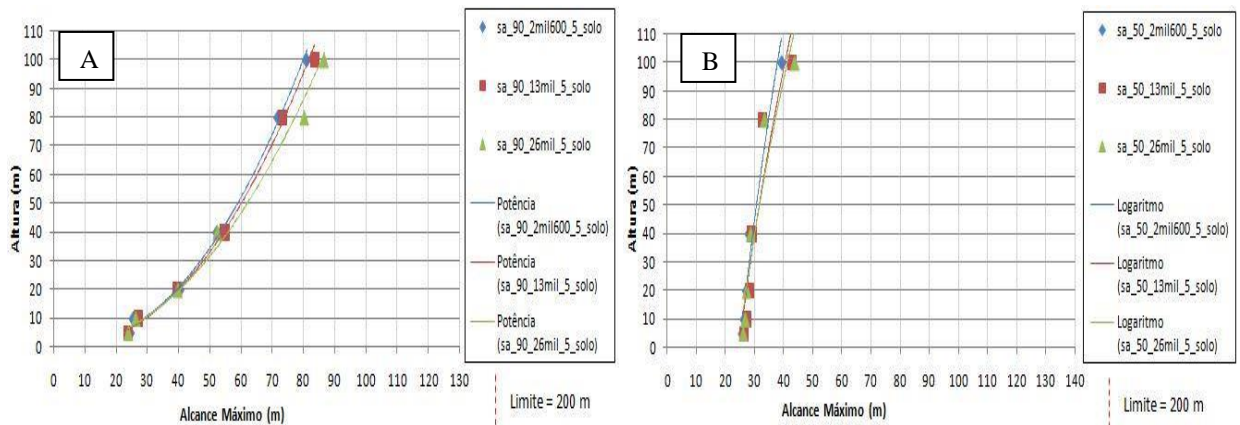
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

APÊNDICE K – Gráficos do alcance máximo para domínio de GRANITO e velocidade angular de 5 rad/s.

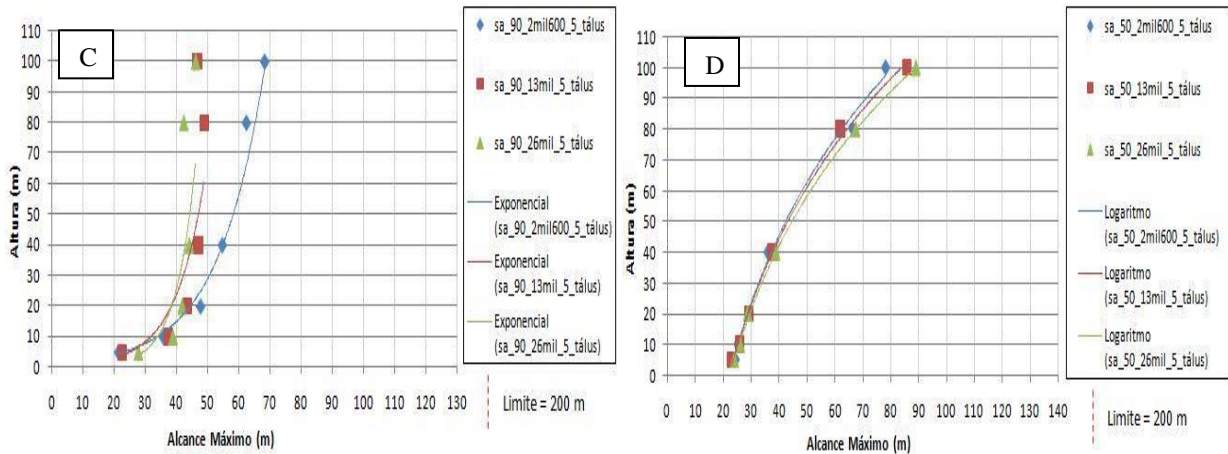




Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5$  rad/s): (A) Inclinação de 90°; (B) Inclinação de 80°; (C) Inclinação de 70°; (D) Inclinação de 60°; (E) Inclinação de 50°.

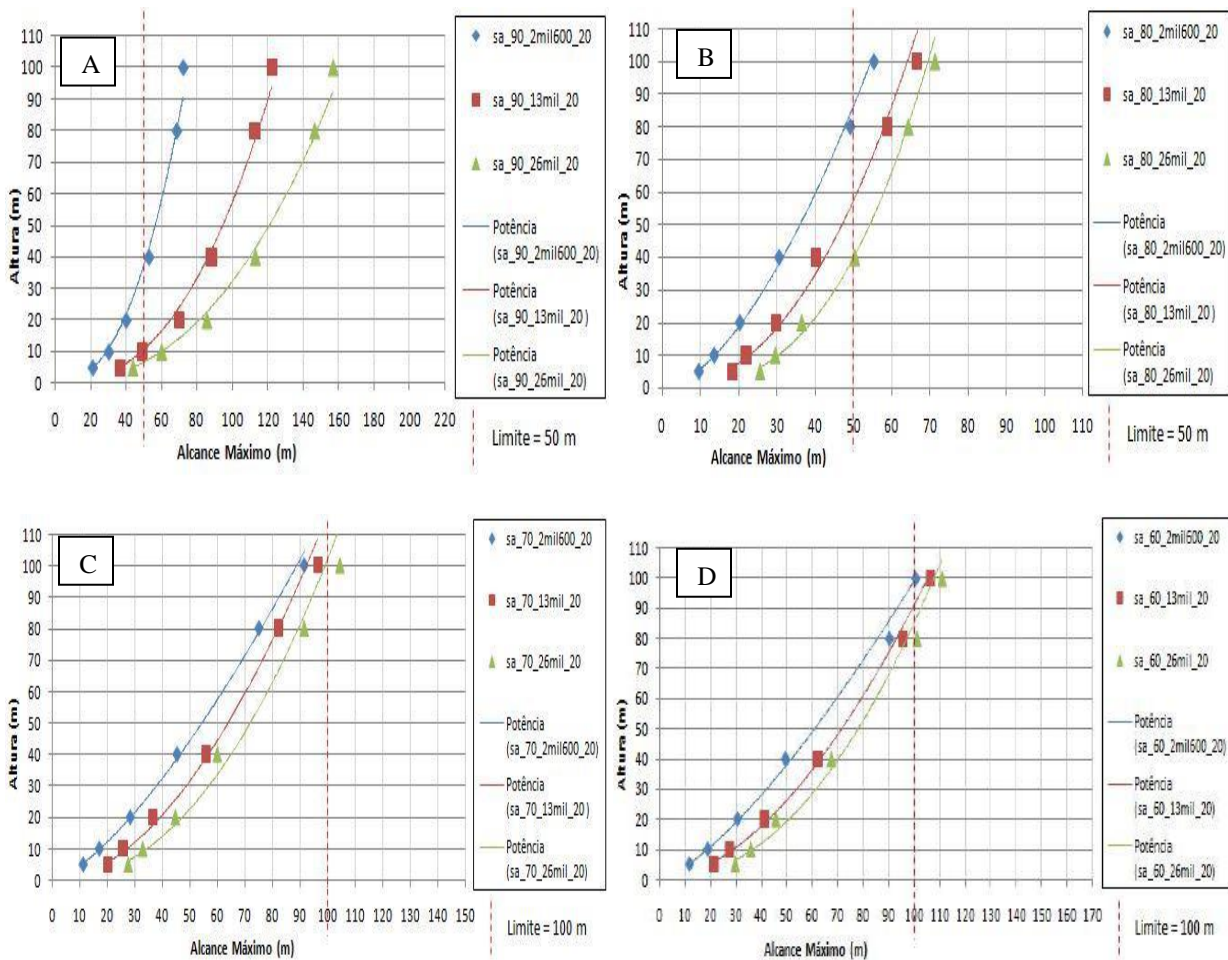


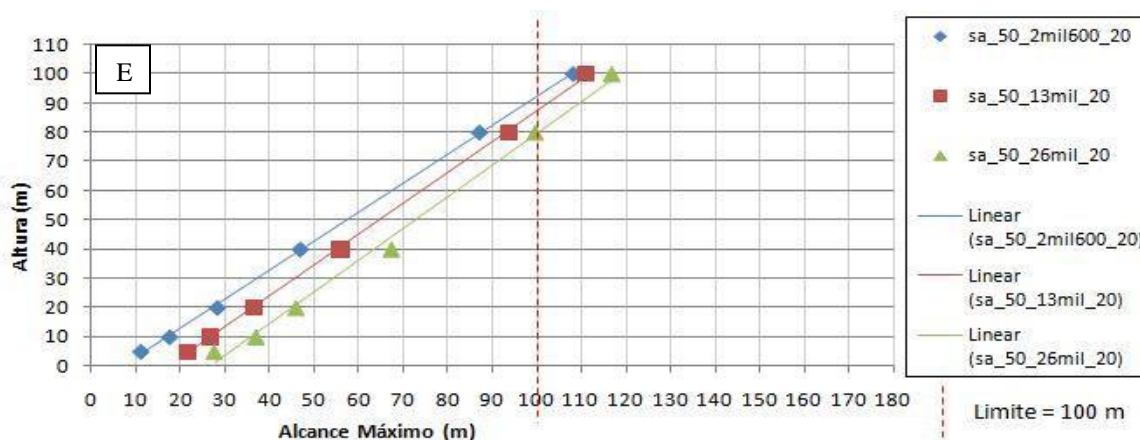




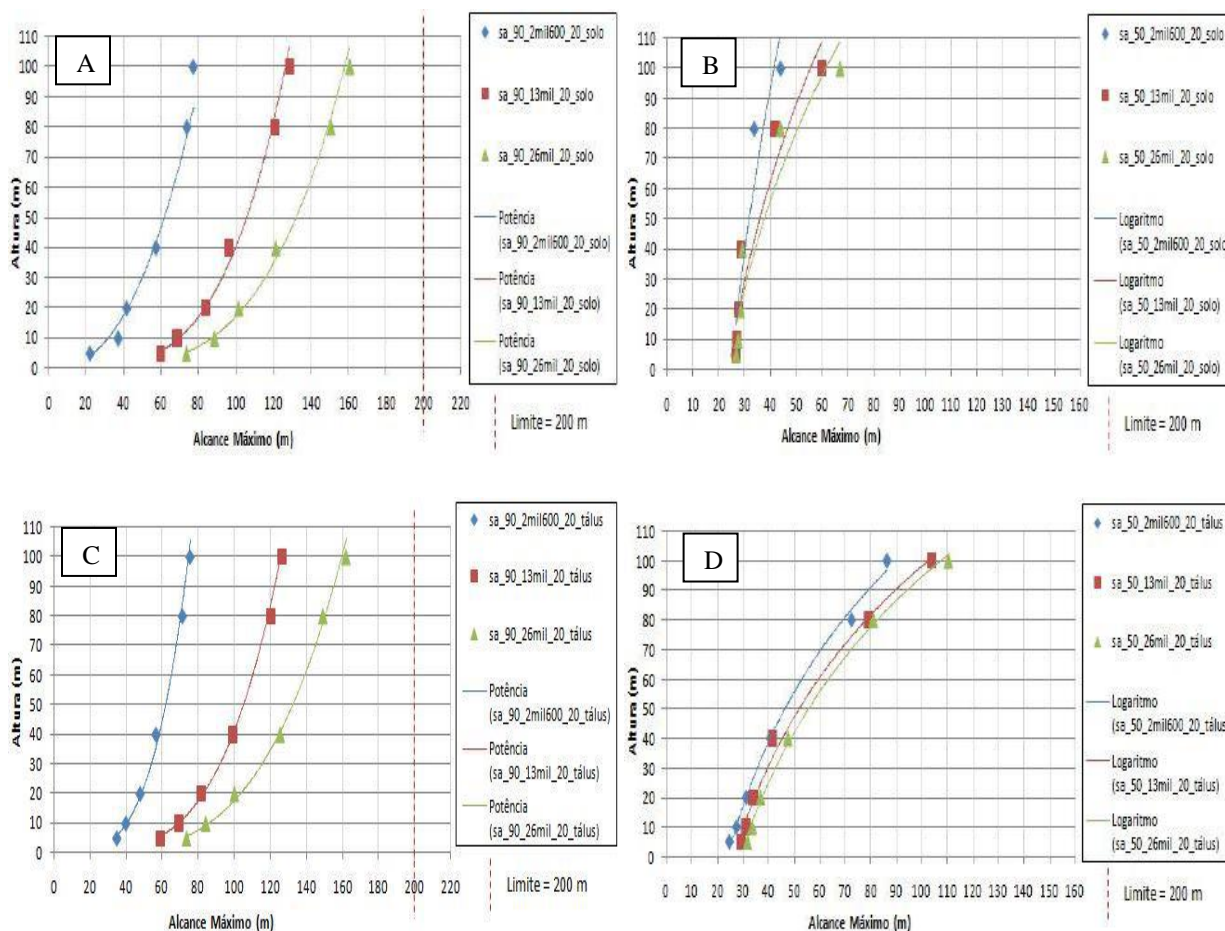
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

APÊNDICE L – Gráficos do alcance máximo para domínio de GRANITO e velocidade angular de 20 rad/s.



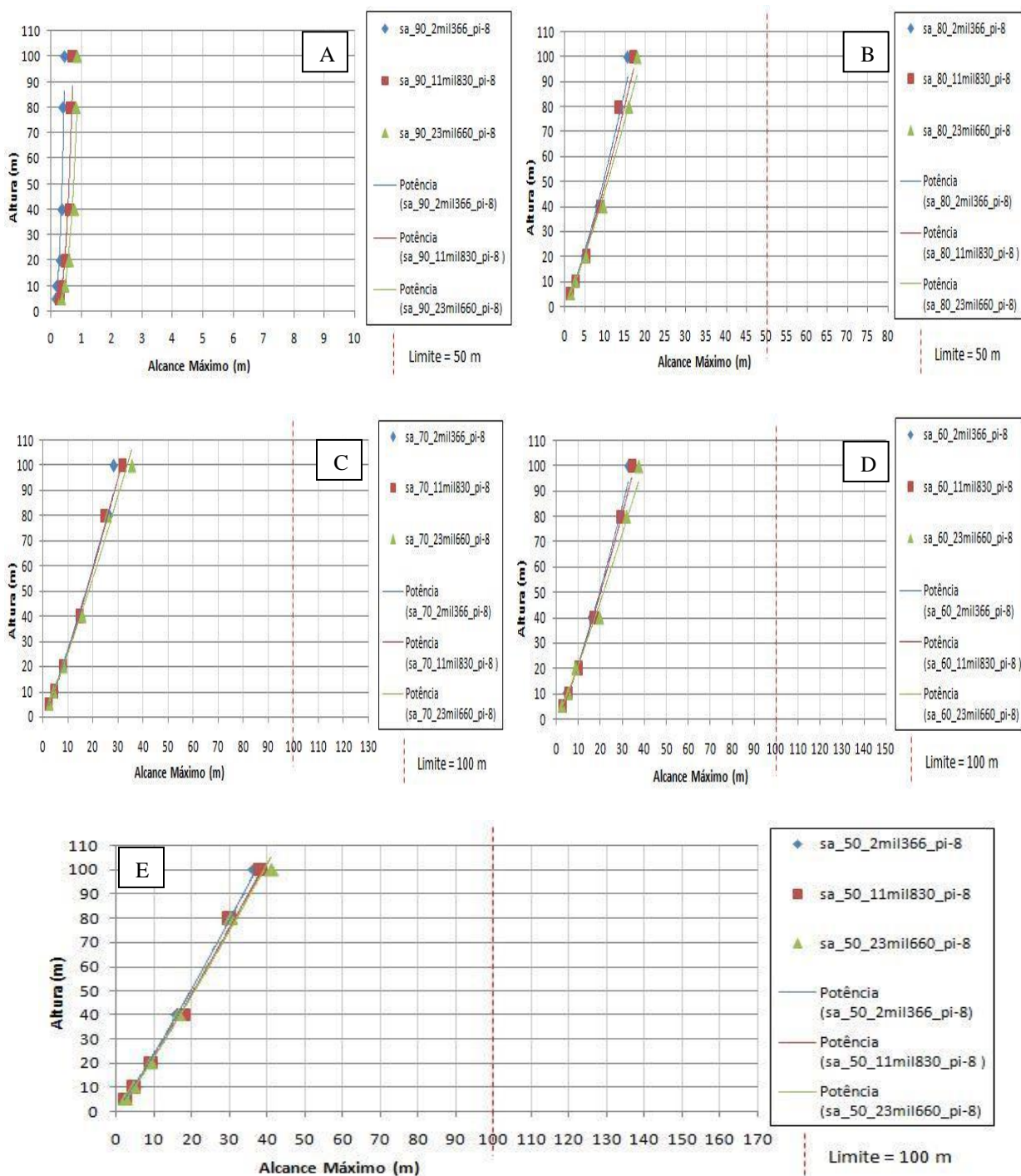


Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$ ; (B) Inclinação de  $80^\circ$ ; (C) Inclinação de  $70^\circ$ ; (D) Inclinação de  $60^\circ$ ; (E) Inclinação de  $50^\circ$ .



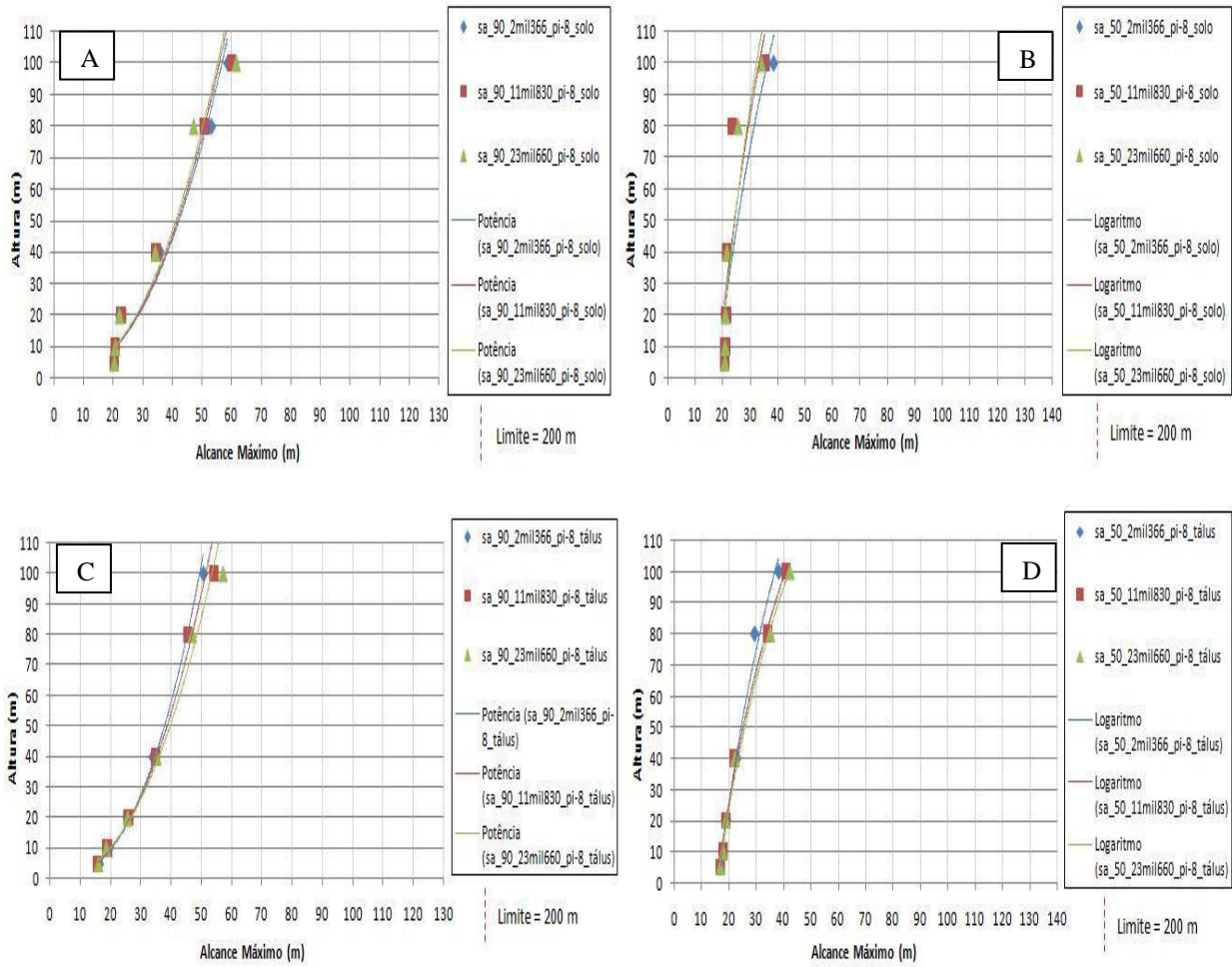
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$  - solo residual; (B) Inclinação de  $50^\circ$  - solo residual; (C) Inclinação de  $90^\circ$  - tálus; (D) Inclinação de  $50^\circ$  - tálus.

APÊNDICE M – Gráficos do alcance máximo para domínio de ARENITO e velocidade angular de 0.39 rad/s.



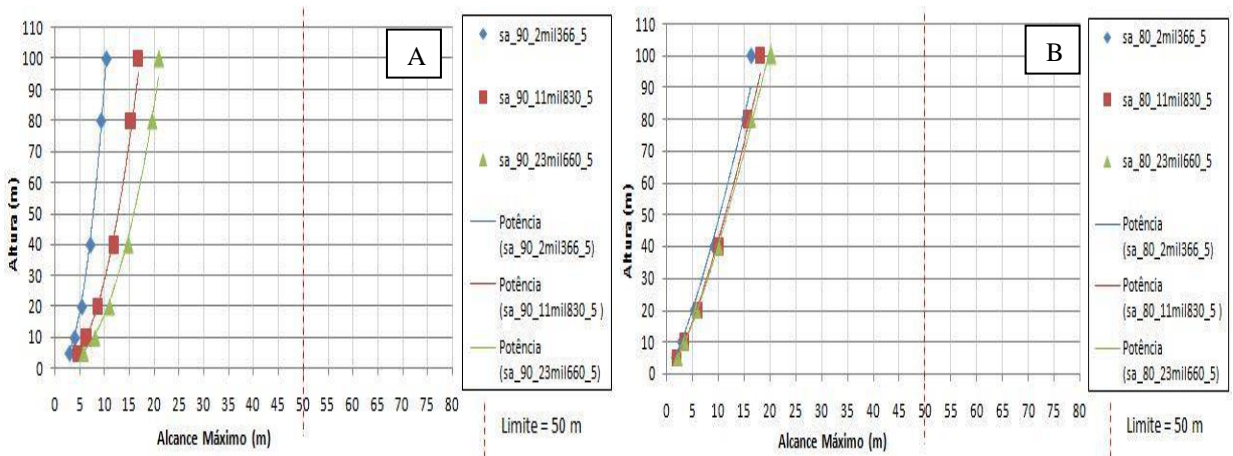
Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39$  rad/s): (A) Inclinação de 90°; (B) Inclinação de 80°; (C) Inclinação de 70°; (D) Inclinação de 60°; (E) Inclinação de 50°.

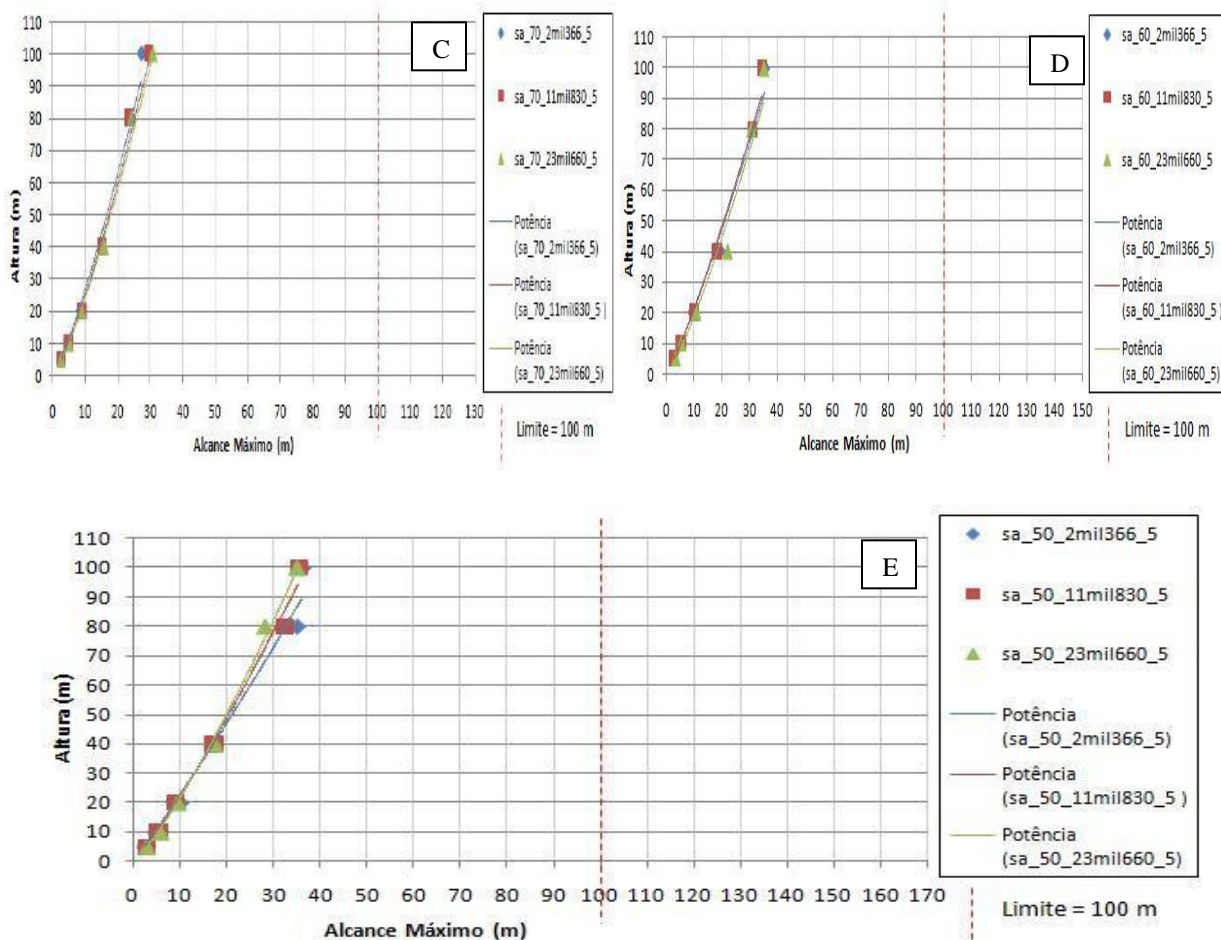




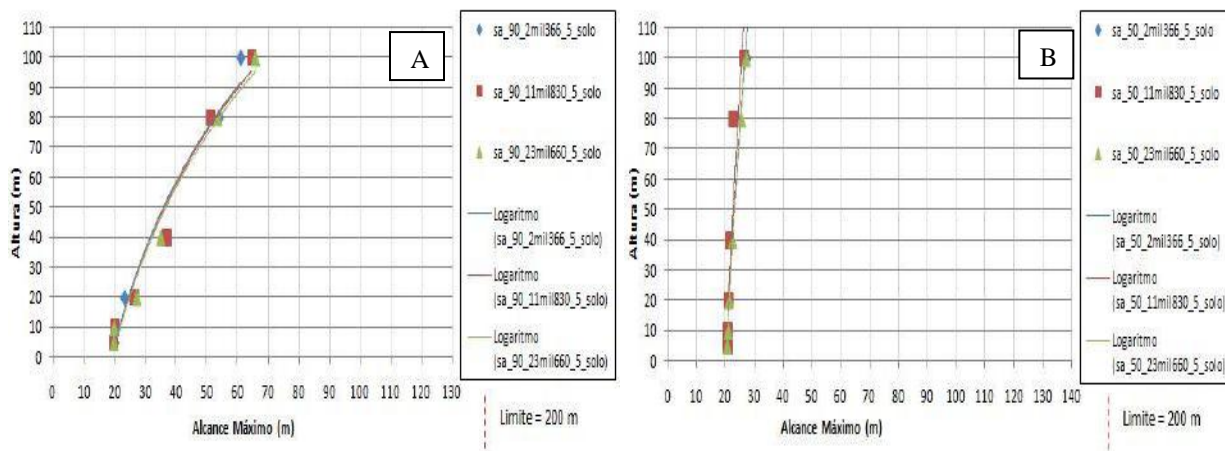
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

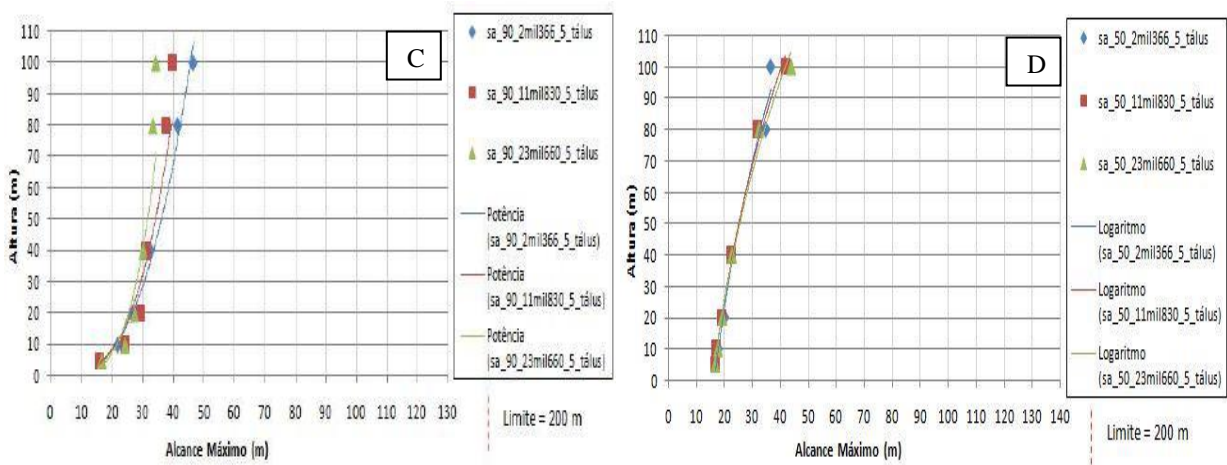
APÊNDICE N – Gráficos do alcance máximo para domínio de ARENITO e velocidade angular de 5 rad/s.





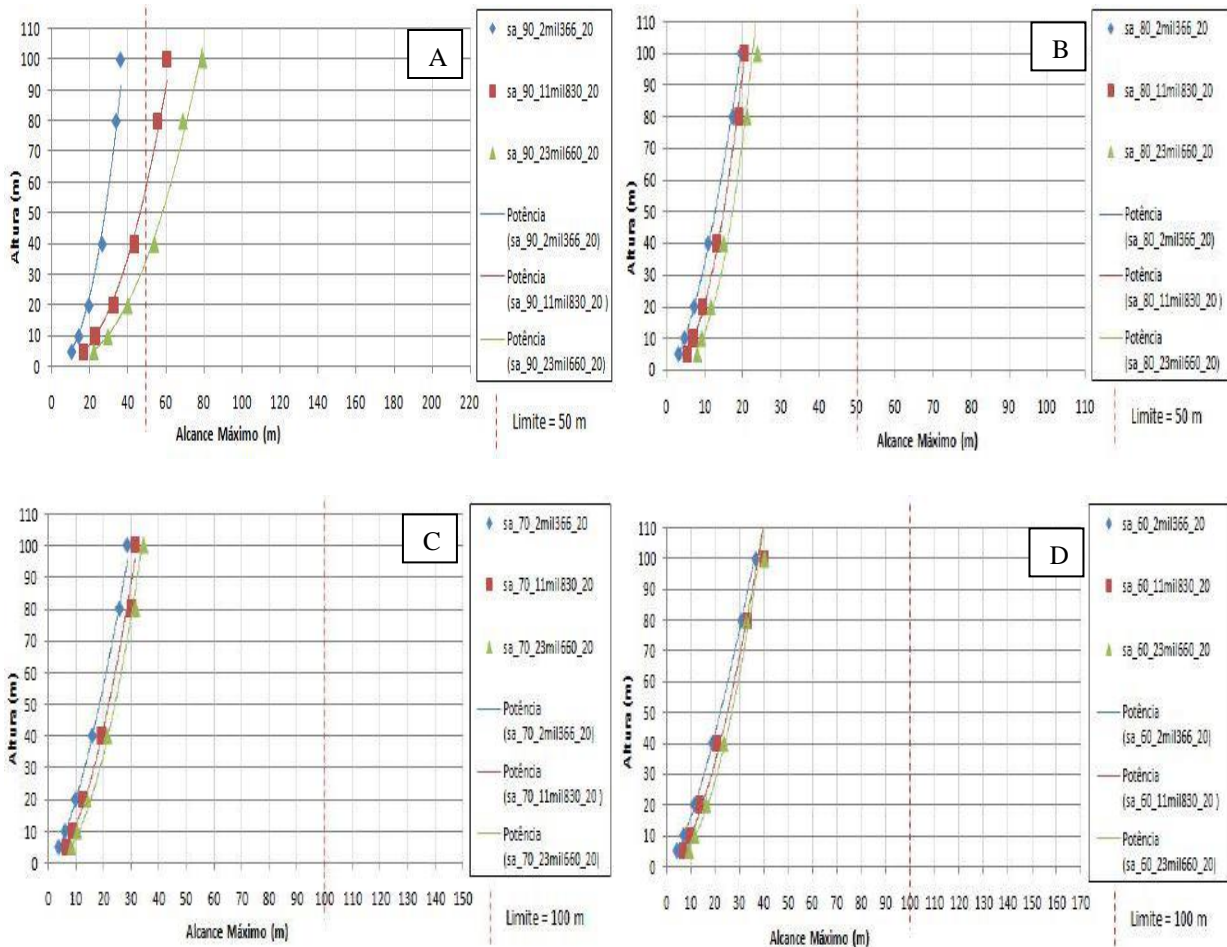
Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de 90°; (B) Inclinação de 80°; (C) Inclinação de 70°; (D) Inclinação de 60°; (E) Inclinação de 50°.



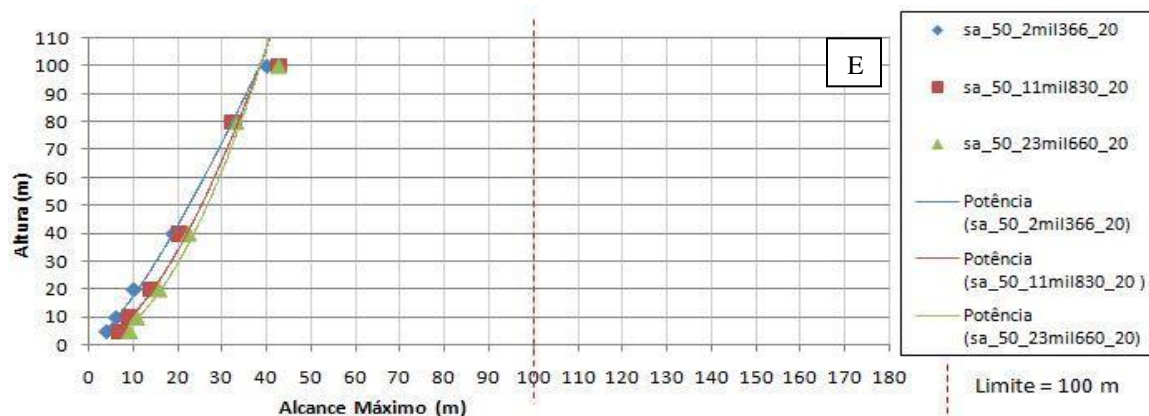


Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

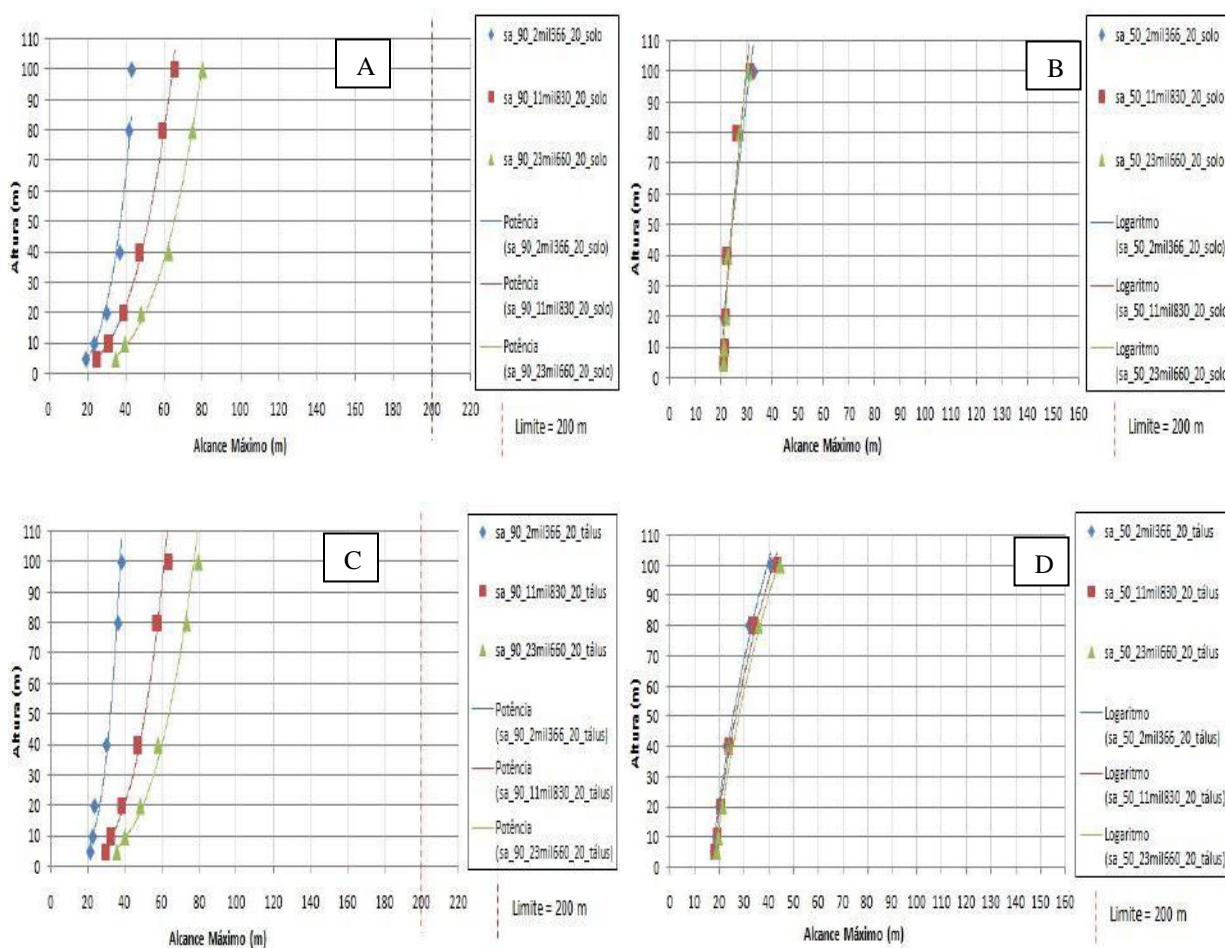
APÊNDICE O – Gráficos do alcance máximo para domínio de ARENITO e velocidade angular de 20 rad/s.





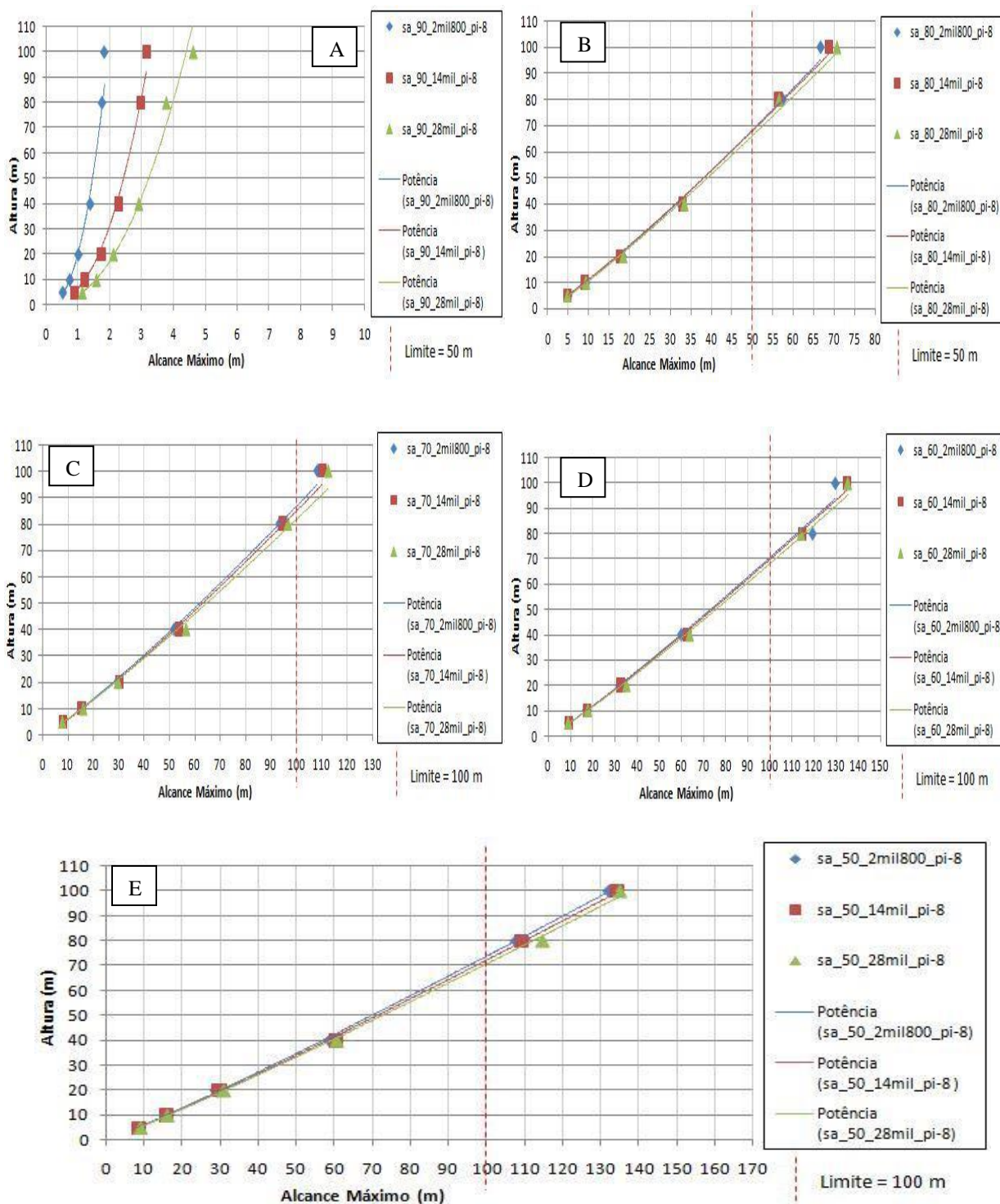


Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$ ; (B) Inclinação de  $80^\circ$ ; (C) Inclinação de  $70^\circ$ ; (D) Inclinação de  $60^\circ$ ; (E) Inclinação de  $50^\circ$ .

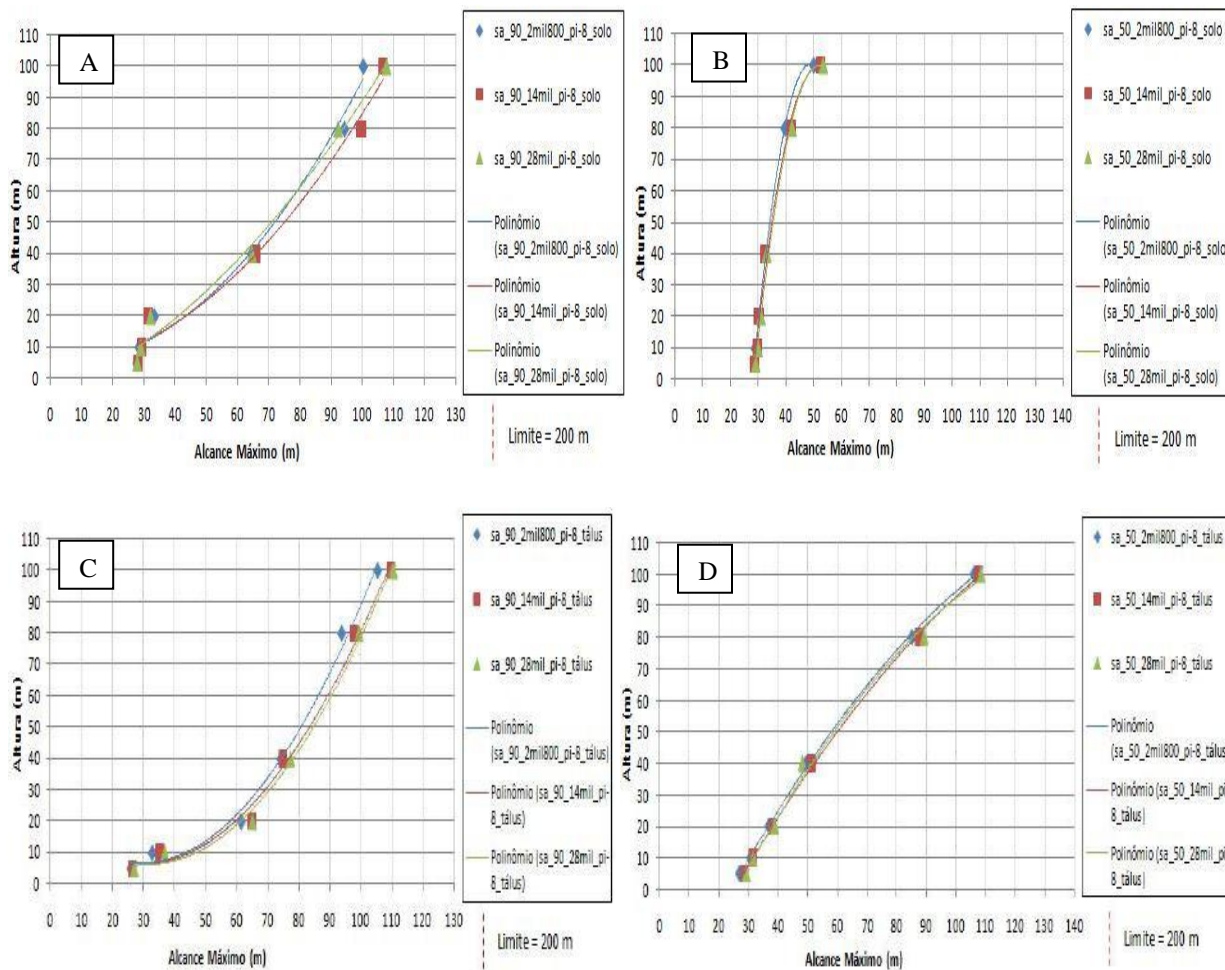


Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$  - solo residual; (B) Inclinação de  $50^\circ$  - solo residual; (C) Inclinação de  $90^\circ$  - tálus; (D) Inclinação de  $50^\circ$  - tálus.

APÊNDICE P – Gráficos do alcance máximo para domínio de BASALTO e velocidade angular de 0.39 rad/s.

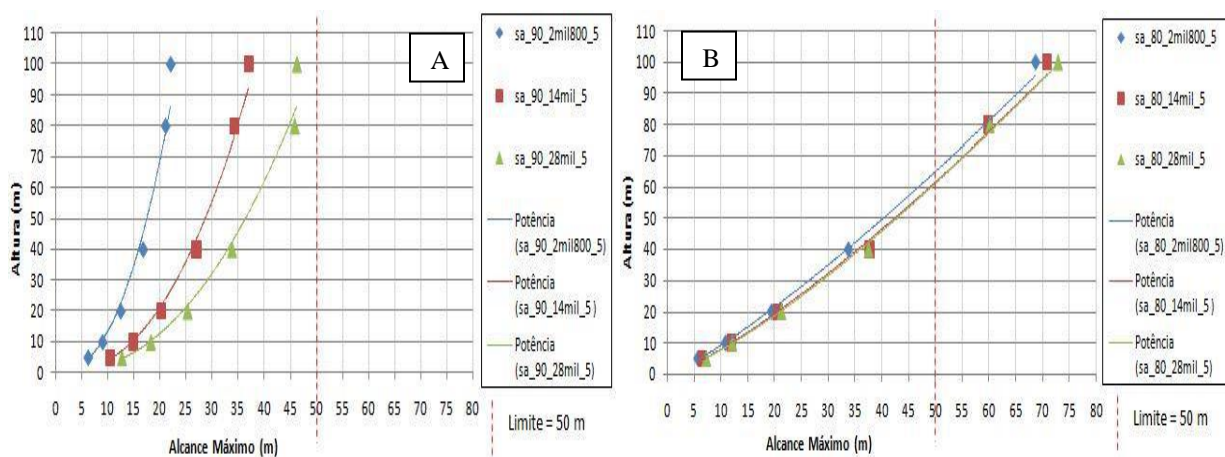


Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39$  rad/s): (A) Inclinação de 90°; (B) Inclinação de 80°; (C) Inclinação de 70°; (D) Inclinação de 60°; (E) Inclinação de 50°.

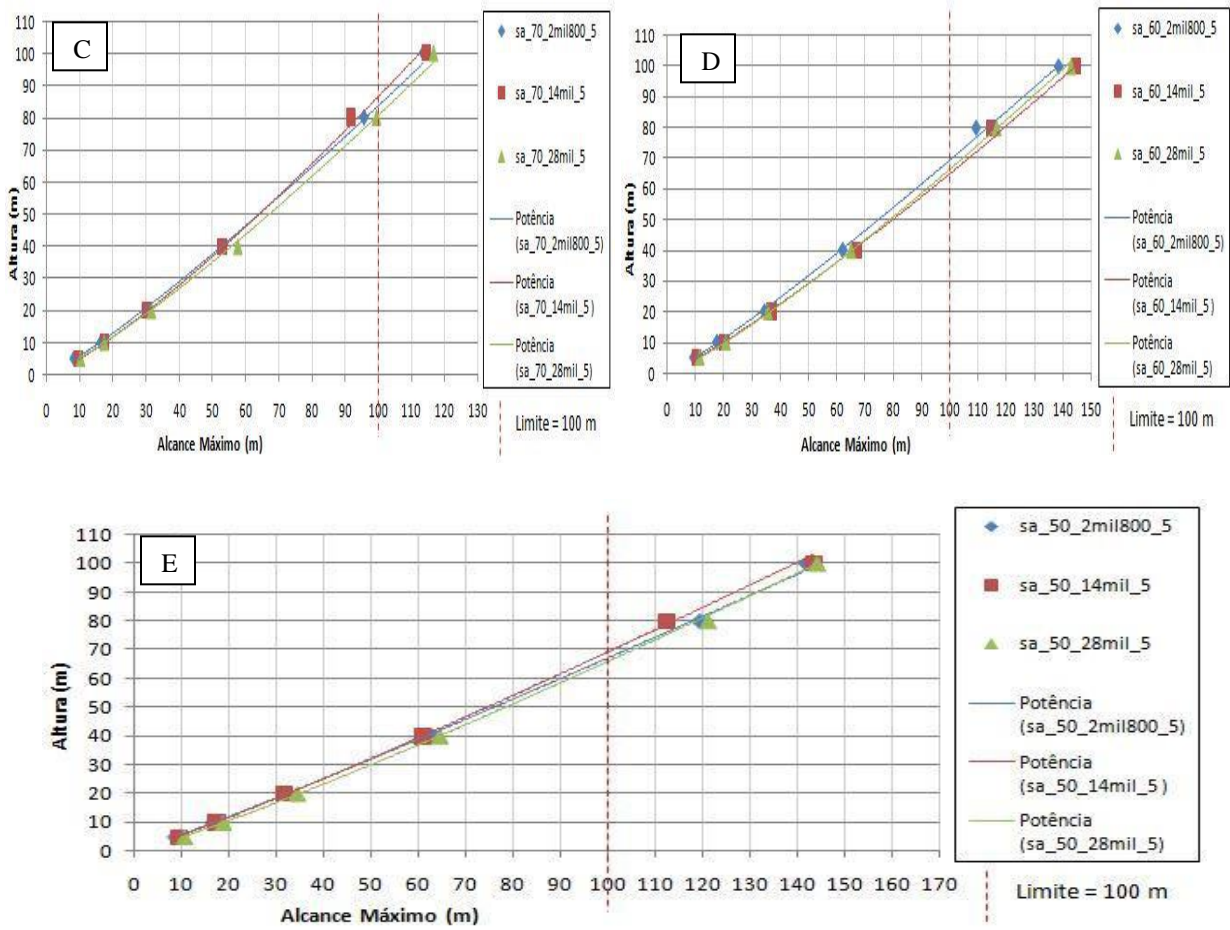


Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 0.39$  rad/s): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

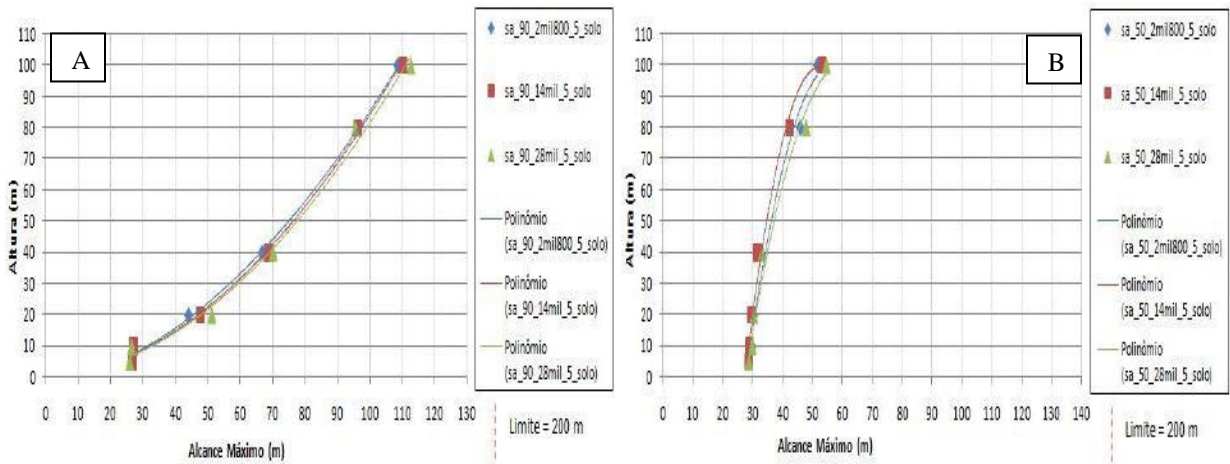
APÊNDICE Q – Gráficos do alcance máximo para domínio de BASALTO e velocidade angular de 5 rad/s.

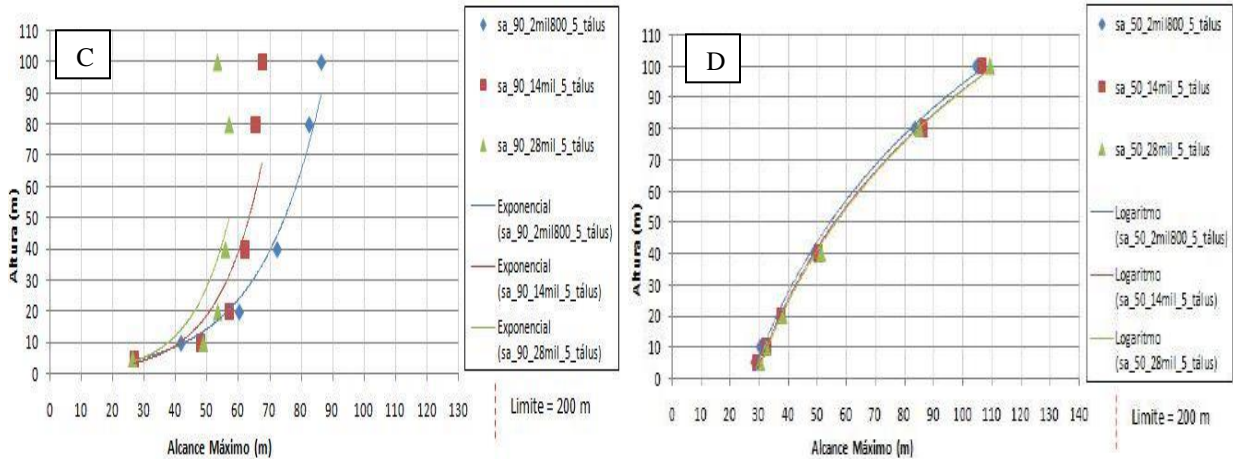






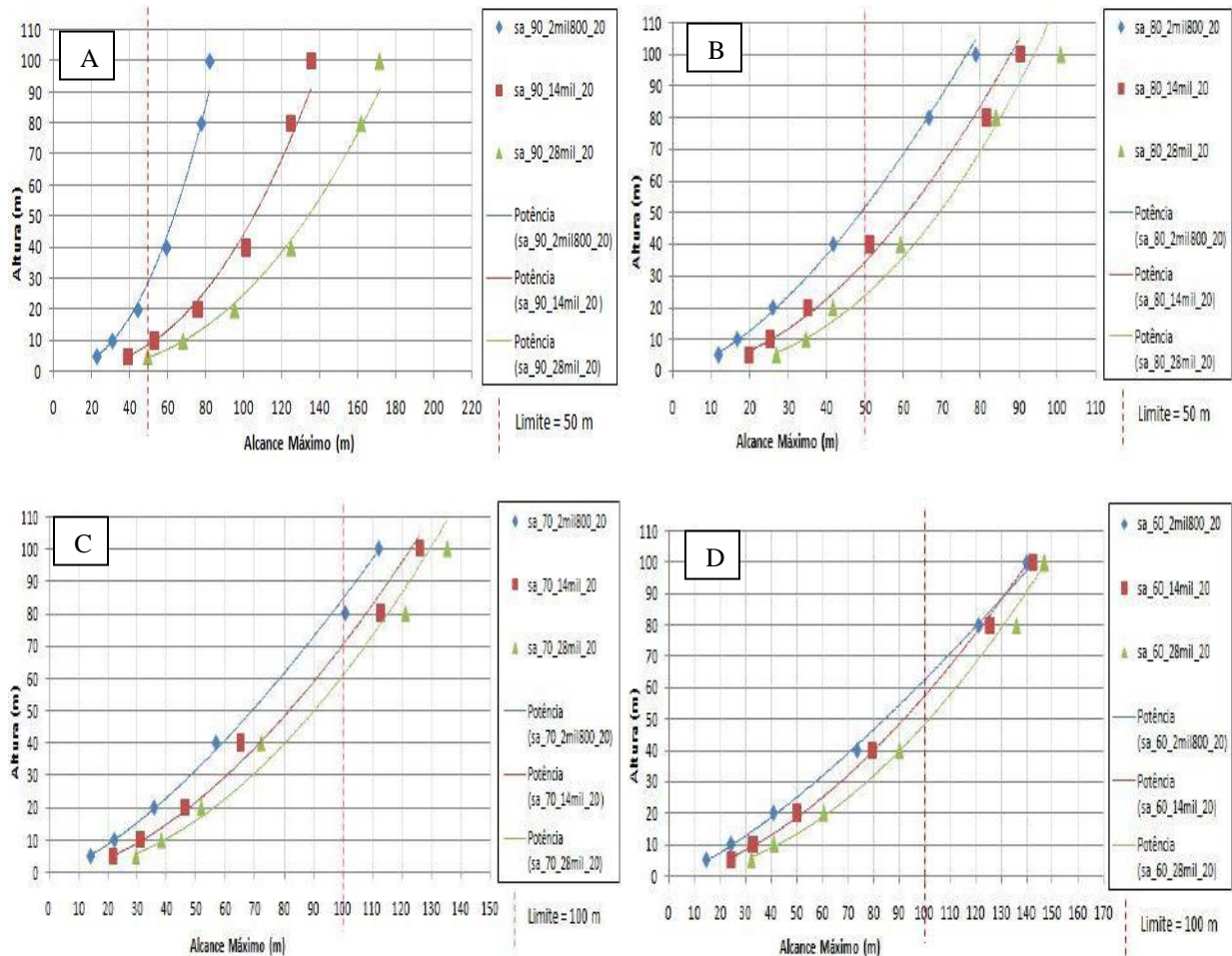
Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de  $90^\circ$ ; (B) Inclinação de  $80^\circ$ ; (C) Inclinação de  $70^\circ$ ; (D) Inclinação de  $60^\circ$ ; (E) Inclinação de  $50^\circ$ .

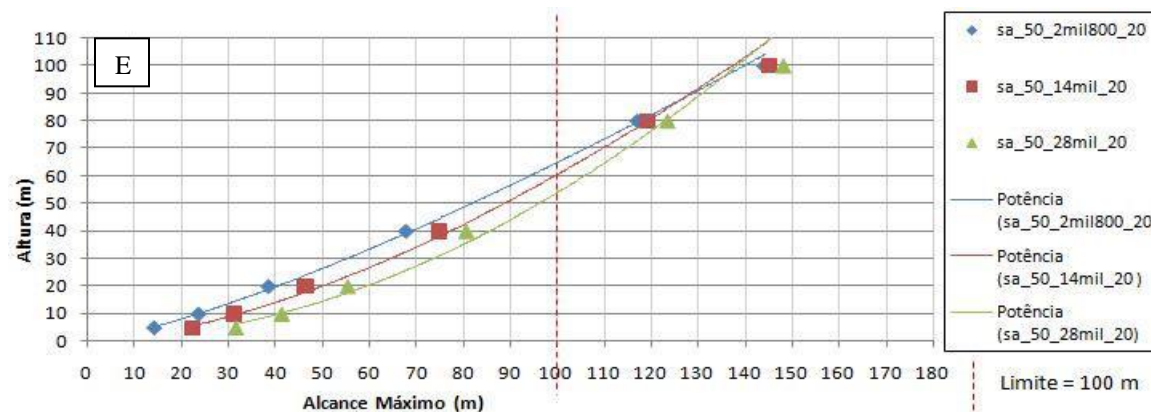




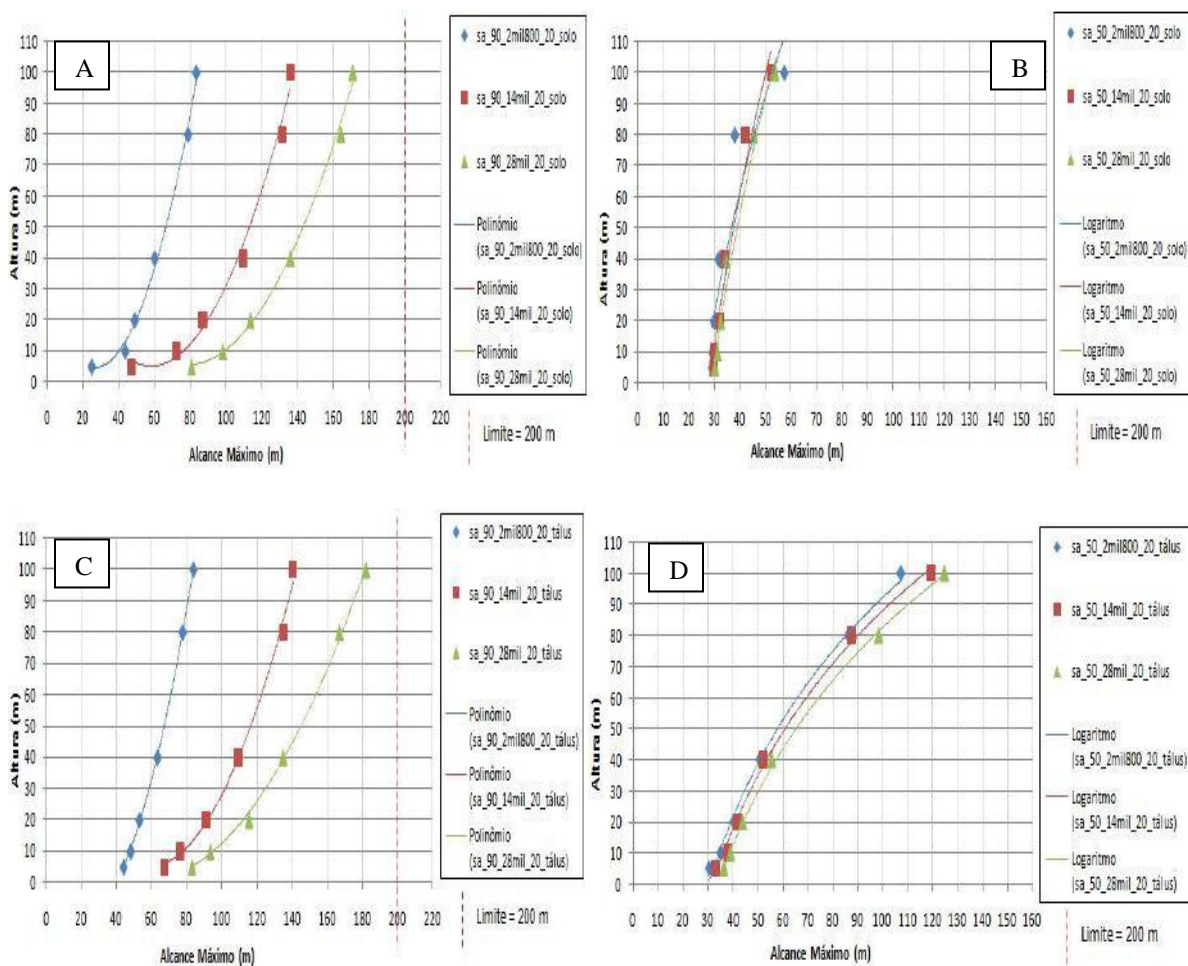
Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 5 \text{ rad/s}$ ): (A) Inclinação de 90° - solo residual; (B) Inclinação de 50° - solo residual; (C) Inclinação de 90° - tálus; (D) Inclinação de 50° - tálus.

APÊNDICE R – Gráficos do alcance máximo para domínio de BASALTO e velocidade angular de 20 rad/s.





Gráficos do alcance para encostas sem rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$ ; (B) Inclinação de  $80^\circ$ ; (C) Inclinação de  $70^\circ$ ; (D) Inclinação de  $60^\circ$ ; (E) Inclinação de  $50^\circ$ .



Gráficos do alcance para encostas com rampa e superfície em rocha sã ( $\omega = 20$  rad/s): (A) Inclinação de  $90^\circ$  - solo residual; (B) Inclinação de  $50^\circ$  - solo residual; (C) Inclinação de  $90^\circ$  - tálus; (D) Inclinação de  $50^\circ$  - tálus.