



COPPE/UFRJ

ESTUDOS NUMÉRICOS SOBRE TRAJETÓRIAS DE QUEDA DE BLOCOS
ROCHOSOS

José Simão de Almeida Rocha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ESTUDOS NUMÉRICOS SOBRE TRAJETÓRIAS DE QUEDA DE BLOCOS
ROCHOSOS

José Simão de Almeida Rocha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof.^a Anna Laura Lopes da Silva Nunes, Ph.D.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão, Ph.D.

Prof. André Pacheco de Assis, Ph.D.

Prof. Willy de Alvarenga Lacerda, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2009

Rocha, José Simão de Almeida

Estudos Numéricos sobre Trajetórias de Queda de Blocos Rochosos/ José Simão de Almeida Rocha. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXI, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 136-140.

1. Quedas de blocos rochosos. 2. Simulações numéricas. 3. Fatores de influência. I. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*À minha família pelo
amor e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Admardo e Dalva, pelo amor, carinho e contínuo incentivo, sempre mostrando que a educação é o maior bem que se pode ter na vida.

Aos irmãos, Grasielle, Ana Paula e Admardo, pelo amor, companheirismo e união.

À minha orientadora, Professora Anna Laura Nunes, que acreditou em mim em todos os momentos, muito obrigado pelos ensinamentos e pela amizade.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

À Concremat Engenharia e Tecnologia S.A. e a Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., pelos ensinamentos profissionais. Obrigado por ter aceitado meu trabalho em tempo parcial durante o mestrado, investindo no meu aprendizado.

Aos meus amigos de república Lucas Knupp e Rafael Batista pelo acolhimento e companheirismo.

Aos meus amigos de Minas Gerais, Paulo, David, Lucas, Leo, Manel, Natália, Karen, Rafael, Felipe, Breno, Emerson Tiago, Kadú e Kleber, pela amizade de hoje e sempre.

Aos meus “irmãos” de orientação, Carol, Raquel, Helena, Lydice, Janaína e Marcelo, pela amizade e ajuda nos momentos decisivos. Aos meus amigos de turma 2007/01, Grazi, Fábio, Leo, Maurício, Alessandra, Mário, Flávia e Rafael, pelo companheirismo e ajuda nos momentos difíceis ao longo do curso. Aos meus amigos gaúchos, Sissa, Diego e Shuler pelos momentos de descontração. E as minhas amigas geotécnicas da Valec, Bernadete, Desirée, Maria e Liege pela amizade pessoal e profissional.

A todos os professores, funcionários e técnicos do Laboratório de Geotecnia e do Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ.

Agradeço finalmente a Deus pela força e proteção concedida em todos os momentos da minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDOS NUMÉRICOS SOBRE TRAJETÓRIAS DE QUEDA DE BLOCOS ROCHOSOS

José Simão de Almeida Rocha

Dezembro/2009

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Programa: Engenharia Civil

Encostas rochosas fraturadas ou com juntas de alívio apresentam um potencial de instabilização por queda de lascas e blocos. Este tipo de ruptura, geralmente abrupta e sem indícios de movimentação, envolve velocidades e energias cinéticas elevadas, resultando em danos materiais e muitas vezes acompanhadas de perdas de vidas. As técnicas de convivência com estas instabilidades são representadas por medidas passivas e ativas, principalmente a execução de estruturas de proteção. Este trabalho visa analisar a influência dos principais parâmetros associados às quedas de blocos através de simulação das trajetórias de movimento utilizando o programa RocFall v.4.0. Os estudos realizados consideraram uma seção crítica da rodovia BR-116, vizinha ao Morro do Escalavrado, situado no parque Nacional da Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro. Os resultados indicaram que os coeficientes de restituição normal e tangencial são os principais fatores de influência, seguidos pelo coeficiente de atrito entre os blocos e a superfície da encosta rochosa.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

NUMERICAL STUDIES ON ROCKFALLS PATHS

José Simão de Almeida Rocha

December/2009

Advisor: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Department: Civil Engineering

Fractured and jointed rocky hillsides present a potential for rock fall instabilization. This type of failure, generally abrupt and without movement indications, involves high speeds and kinetic energies, resulting in material damages and many times followed by loss of lives. The techniques of coping with these instabilities are represented by passive and active measures, mainly the execution of protection structures. This study aims at analyzing the influence of the main parameters associated to rock falls by simulation of the displacement paths using the RocFall v.4.0 program. This research considered a critical section of the highway BR-116, at the vicinities of Escalavrado Hill, situated in the National Park of Serra dos Orgãos, in Rio de Janeiro state. The results indicated that the coefficients of normal and tangential restitution are the main factors of influence, followed by the friction angle between the blocks and the surface of the rocky hillside.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	2
1.3 ESCOPO DA PESQUISA	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 MOVIMENTOS DE MASSA.....	4
2.2 MECANISMOS DE INSTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	6
2.2.1 Ruptura Circular.....	6
2.2.2 Ruptura Planar.....	7
2.2.3 Ruptura em Cunha.....	8
2.2.4 Tombamento.....	9
2.2.5 Queda de Blocos	10
2.2.6 Fluxo de Detritos (Debris Flow).....	14
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES ROCHOSOS.....	15
2.3.1 Eliminação do Problema	16
2.3.2 Técnicas de Estabilização.....	17
2.3.3 Soluções de Convivência.....	21
2.4 BARREIRAS FLEXÍVEIS.....	26
2.5 ANÁLISES EXPERIMENTAIS DE QUEDAS DE BLOCOS.....	30
2.5.1 Testes em Laboratório	30
2.5.2 Testes em Campo.....	32
2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS	35
2.7 MÉTODOS EMPÍRICOS	39
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA NUMÉRICO E CASO HISTÓRICO	42

3.1 INTRODUÇÃO	42
3.2 PROGRAMA NUMÉRICO ROCFALL	42
3.2.1 Definição da Geometria	45
3.2.2 Definição dos Materiais e dos Trechos Distintos	46
3.2.3 Definição das Condições iniciais dos Blocos.....	48
3.2.4 Definição das Barreiras.....	50
3.2.5 Trajetória de Movimento	51
3.2.6 Resultados.....	52
3.3 APLICAÇÃO AO CASO HISTÓRICO AO MORRO DO ESCALAVRADO.....	54
3.3.1 Descrição da Área	54
3.3.2 Mapeamento Geológico-Geotécnico	55
3.3.3 Modelo adotado por Nunes et al. (2008)	59
3.3.4 Trajetórias Previstas	60
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
CAPÍTULO 4 – ANÁLISES NUMÉRICAS	68
4.1 INTRODUÇÃO	68
4.2 METODOLOGIA DE ESTUDO	68
4.3 MODELO BÁSICO ADOTADO PARA AS ANÁLISES	72
4.4 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE K_n / K_t	75
4.4.1 Condições das Análises.....	75
4.4.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg).....	75
4.4.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg)	78
4.4.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg)	80
4.4.5 Comentários	81
4.5 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO (ϕ) ...	82
4.5.1 Condições de Análises.....	82
4.5.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg).....	82

4.5.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg)	84
4.5.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg)	86
4.5.5 Comentários	88
4.6 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE INICIAL (v) ...	88
4.6.1 Condições de Análises.....	88
4.6.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg).....	89
4.6.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg).....	91
4.6.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg).....	92
4.6.5 Comentários	94
4.7 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE.....	95
4.7.1 Condições de Análises.....	95
4.7.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg).....	95
4.7.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg).....	97
4.7.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg).....	99
4.7.5 Comentários	101
4.8 ANÁLISES DOS TIPOS DE MOVIMENTOS DE QUEDA DOS BLOCOS.....	102
4.8.1 Variação dos Coeficientes de Restituição (Kn e Kt)	102
4.8.2 Variação do Ângulo de Atrito (\emptyset)	104
4.8.3 Variação da Velocidade Inicial do Bloco (v)	105
4.8.4 Variação da Rugosidade (rug)	107
4.9 ANÁLISES DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE BLOCOS POR SIMULAÇÃO... 108	
4.9.1 Variação dos Coeficientes de Restituição Kn e Kt.....	108
4.9.2 Variação do Ângulo de Atrito (\emptyset)	110
4.9.3 Variação da Velocidade (v).....	112
4.9.4 Variação da Rugosidade.....	114
4.9.5 Análise dos Tipos de Movimento de Queda dos Blocos.....	117
4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	130
5.1 INTRODUÇÃO	130
5.2 CONCLUSÕES	131
5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ruptura circular (Nunes, 2008).	7
Figura 2.2 – Ruptura planar (Nunes, 2004).	8
Figura 2.3 – Ruptura em cunha (Hoek, 2001).	9
Figura 2.4 – Ruptura por tombamento (Nunes, 2008).	10
Figura 2.5 – Queda de blocos (Nunes, 2008).	11
Figura 2.6 – Movimentos de queda livre, saltos e rolamentos de blocos (Bautista, 2007).	11
Figura 2.7 – Tipos de movimento em função da inclinação (modificado de Ritche, 1963).	13
Figura 2.8 – Fluxo de detritos em Angra dos Reis/RJ (Nunes, 2008).	15
Figura 2.9 – Alternativas de soluções de projeto para taludes rochosos (GeoRio, 1999).	16
Figura 2.10 – Fragmentação de bloco por processos mecânicos (GeoRio, 1999).	17
Figura 2.11 – Retaludamento em banquetas (Nunes, 2008).	18
Figura 2.12 – Aplicação do concreto projetado.	19
Figura 2.13 – Sistema de drenagem em talude rochoso (GeoRio, 1999).	20
Figura 2.14 – Fixação por grelhas ancoradas e contrafortes (GeoRio, 1999).	21
Figura 2.15 – Bermas para redução da energia dos blocos rochosos.	22
Figura 2.16 – Trincheira para coleta de bloco (Nunes, 2008).	23
Figura 2.17 – Muro rígido (Nunes, 2008).	24
Figura 2.18 – Dique de solo reforçado (Peila et al., 1998).	24
Figura 2.19 – Tela metálica (Geobruigg, 2004).	25
Figura 2.21 – Barreira flexível (Geobruigg, 2009).	27
Figura 2.22 – Visão lateral esquemática da barreira com os elementos discriminados (modificado de Peila <i>et al.</i> , 1998).	28
Figura 2.23 – Visão frontal esquemática da barreira com os elementos discriminados (modificado de Peila <i>et al.</i> , 1998).	28

Figura 2.24 – Colisão parcialmente inelástica de uma esfera (Dias & Barroso, 2006).	31
Figura 2.25 – Esfera rochosa (Dias & Barroso, 2006).....	31
Figura 2.26 – Posição do bloco em diferentes intervalos de tempo durante o ensaio de queda <i>in situ</i> (Giani <i>et al.</i> , 2004).	33
Figura 2.27 – Talude esquemático com realização de teste <i>in situ</i> , medidas em metro (Giani <i>et al.</i> , 2004).	33
Figura 2.28 – Bloco esquemático com as componentes para cálculo (Giani <i>et al.</i> , 2004).	35
Figura 2.29 – The Fahrböschung (F) e o Minimum Shadow Angle (MSA) de encosta com presença de tálus (modificado de Meissl, 1998).....	41
Figura 3.1 – Tela principal do programa <i>RocFall v.4.0</i>	43
Figura 3.2 – Perfil transversal da encosta gerado no programa <i>RocFall</i>	46
Figura 3.3 – Definição dos materiais da superfície da encosta.	47
Figura 3.4 – Definição das condições iniciais dos blocos.....	49
Figura 3.5 – Definição do tipo e parâmetros da barreira.	51
Figura 3.6 – Definição dos condicionantes para o cálculo das trajetórias.....	52
Figura 3.7 – Trajetórias e gráfico com distribuição dos pontos de chegada dos blocos.	53
Figura 3.8 – Localização do Morro do Escalavrado.	54
Figura 3.9 – Visão geral da área de estudo do Morro do Escalavrado.	55
Figura 3.10 – Áreas críticas do Morro do Escalavrado em relação a BR-116 (Nunes <i>et al.</i> , 2008).....	56
Figura 3.11 – Identificação das lascas 1 a 16 (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	57
Figura 3.12 – Identificação das lascas 1 a 18 (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	57
Figura 3.13 – Identificação das lascas 8 a 28 (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	58
Figura 3.14 – Seção transversal do Morro do Escalavrado adotada nas análises (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	59
Figura 3.15 – Trajetórias de queda das lascas 5, 6 e 7 (Nunes <i>et al.</i> , 2008).....	61

Figura 3.16 – Envoltória de alcance das lascas 5, 6 e 7 após as quedas (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	61
Figura 3.17 – Envoltória de alcance das lascas 1 e 2 após as quedas (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	62
Figura 3.18 – Envoltória de alcance das lascas 3 e 4 após as quedas (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	63
Figura 3.19 – Envoltória de alcance das lascas 8 e 14 após as quedas (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	63
Figura 3.20 – Envoltória de alcance das lascas 15 e 16 após as quedas (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	64
Figura 3.21 – Envoltória de alcance das lascas 17 a 28 após as quedas (Nunes <i>et al.</i> , 2008).	64
Figura 4.1 – Esquema da metodologia adotada para o estudo paramétrico.....	69
Figura 4.2 – Seção transversal do Morro do Escalavrado com exemplo de trajetórias de blocos simulados.	70
Figura 4.3 – Histograma de número de blocos e localização dos pontos de parada dos blocos.	71
Figura 4.4 – Gráfico de distribuição da energia cinética total máxima dos blocos ao longo da encosta.	71
Figura 4.5 – Energia cinética máxima em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 1.	77
Figura 4.6 – Posição final dos blocos em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 1.	77
Figura 4.7 – Energia cinética máxima em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 2.	79
Figura 4.8 – Posição final dos blocos em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 2.	79
Figura 4.9 – Energia cinética máxima em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 3.	80
Figura 4.10 – Posição final dos blocos em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 3.	81

Figura 4.11 – Energia cinética máxima em função da variação do ângulo de atrito (θ) – Bloco 1.....	83
Figura 4.12 – Posição final dos blocos em função da variação do ângulo de atrito (θ) – Bloco1.	84
Figura 4.13 – Energia cinética máxima em função da variação do ângulo de atrito (θ) – Bloco 2.....	85
Figura 4.14 – Posição final dos blocos em função da variação do ângulo de atrito (θ) – Bloco 2.....	86
Figura 4.15 – Energia cinética máxima em função da variação do ângulo de atrito (θ) – Bloco 3.....	87
Figura 4.16 – Posição final dos blocos em função da variação do ângulo de atrito (θ) – Bloco 3.....	87
Figura 4.17 – Energia cinética máxima em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 1.....	90
Figura 4.18 – Posição final dos blocos em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 1.....	90
Figura 4.19 – Energia cinética máxima em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 2.....	91
Figura 4.20 – Posição final dos blocos em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 2.....	92
Figura 4.21 – Energia cinética máxima em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 3.....	93
Figura 4.22 – Posição final dos blocos em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 3.....	94
Figura 4.23 – Energia cinética máxima em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 1.	96
Figura 4.24 – Posição final dos blocos em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 1.	97
Figura 4.25 – Energia cinética máxima em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 2.	98

Figura 4.26 – Posição final dos blocos em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 2.	99
Figura 4.27 – Energia cinética máxima em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 3.	100
Figura 4.28 – Posição final dos blocos em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 3.	101
Figura 4.29 – Trajetórias de queda na análise k1 – Bloco 2.....	103
Figura 4.30 – Trajetórias de queda na análise k5 – Bloco 2.....	103
Figura 4.31 – Trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.....	104
Figura 4.32 – Trajetórias de queda na análise phi7 – Bloco 2.....	105
Figura 4.33 – Trajetórias de queda na análise v1 – Bloco 2.....	106
Figura 4.34 – Trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.....	106
Figura 4.35 – Trajetórias de queda na análise rug1 – Bloco 2.	107
Figura 4.36 – Trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.	108
Figura 4.37 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação do coeficiente de restituição – Bloco 2.....	110
Figura 4.38 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação do ângulo de atrito – Bloco 2.	112
Figura 4.39 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação da velocidade inicial – Bloco 2.	114
Figura 4.40 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação da rugosidade – Bloco 2.	116
Figura 4.41 – 100 trajetórias de queda na análise k5 – Bloco 2.	117
Figura 4.42 – 1.000 trajetórias de queda desenvolvidas na análise k5 – Bloco 2.....	118
Figura 4.43 – 10.000 trajetórias de queda na análise k5 – Bloco 2.	118
Figura 4.44 – 100 trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.	119
Figura 4.45 – 1.000 trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.	119
Figura 4.46 – 10.000 trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.	120
Figura 4.47 – 100 trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.	121

Figura 4.48 – 1.000 trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.	121
Figura 4.49 – 10.000 trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.	122
Figura 4.50 – 100 trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.	123
Figura 4.51 – 1.000 trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.	123
Figura 4.52 – 10.000 trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.	124
Figura 4.53 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação do coeficiente de restituição.	126
Figura 4.54 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação do ângulo de atrito.	126
Figura 4.55 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação da velocidade inicial do bloco.	127
Figura 4.56 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação da rugosidade da superfície.	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos movimentos de encosta segundo VARNES (1978).....	5
Tabela 2.2 – Programas bi e tridimensionais para análises de queda de blocos.....	36
Tabela 2.3 – Principais características dos programas numéricos de simulação de queda de blocos.	39
Tabela 3.1 – Características geométricas das lascas.	58
Tabela 3.2 – Resultados das análises de trajetórias de queda de lascas (Nunes <i>et al.</i> 2008).	65
Tabela 4.1 – Resultados das análises com variação do coeficiente de restituição – Bloco 1.....	76
Tabela 4.2 – Resultados das análises com variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 2.	78
Tabela 4.3 – Resultados das análises com variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 3.	80
Tabela 4.4 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 1.	83
Tabela 4.5 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 2.	85
Tabela 4.6 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 3.	86
Tabela 4.7 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial (v) – Bloco 1.	89
Tabela 4.8 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial (v) – Bloco 2.	91
Tabela 4.9 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial (v) – Bloco 3.	93
Tabela 4.10 – Resultados das análises com variação da rugosidade da superfície – Bloco 1.....	96

Tabela 4.11 – Resultados das análises com variação da rugosidade da superfície – Bloco 2.....	98
Tabela 4.12 – Resultados das análises com variação da rugosidade da superfície – Bloco 3.....	100
Tabela 4.13 – Resultados das análises com variação do coeficiente de restituição e do número de blocos simulados – Bloco 2.....	109
Tabela 4.14 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito e do número de blocos simulados – Bloco 2.....	111
Tabela 4.15 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial e do número de blocos simulados – Bloco 2.....	113
Tabela 4.16 – Resultados das análises com variação da rugosidade e do número de blocos simulados – Bloco 2.....	115
Tabela 4.17 – Resumo dos resultados de variação da energia cinética máxima das análises com variação de massa dos Blocos 1, 2 e 3 em função da variação dos coeficientes de restituição, ângulo de atrito, velocidade inicial e rugosidade.	125
Tabela 4.18 – Resumo dos resultados de variação da energia cinética máxima das análises realizadas com variação do número de blocos para simulação de trajetórias - Bloco 2.....	128
Tabela 4.19 – Resumo dos resultados de variação da energia cinética máxima (ΔE) das análises realizadas com 100 e 1.000 blocos em relação às análises com 10.000 blocos – Bloco 2.	129

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

CRSP	- <i>Colorado Rockfall Simulation Program</i>
DTM	- modelo digital do terreno
Emax	- energia cinética máxima
F	- <i>Fahrböschung</i>
h	- altura de queda
J	- joules
K	- coeficiente de restituição
kg	- quilograma
kJ	- quilojoule
kN	- quilonewton
K_n	- coeficiente de restituição normal
K_t	- coeficiente de restituição tangencial
k	- análises com variação do coeficiente de restituição
m	- metro
M	- massa
MAS	- <i>Minimum Shadow Angle</i>
m/s	- metro por segundo
n	- direção normal à superfície de impacto na encosta
phi	- análises com variação do ângulo de atrito
rad/s	- radiano por segundo
RHRS	- <i>Rockfall Hazard Rating System</i>
rug	- análises com variação da rugosidade
s	- segundo
t	- tangente à superfície de impacto na encosta
v_x	- velocidade inicial do bloco na direção x

V_y	- velocidade inicial do bloco na direção y
V_{ang}	- velocidade angular inicial do bloco
v	- análises com variação da velocidade
x	- eixo horizontal
X_f	- posição do intervalo de máxima deposição de blocos
X_{max}	- posição do ponto de máxima energia
y	- eixo vertical
°	- graus
ΔE	- variação da energia cinética máxima
\emptyset	- ângulo de atrito da superfície da encosta
%	- percentagem
#blocos	- número de blocos depositados

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os taludes rochosos estão presentes em áreas urbanas e rurais, remotas e próximas das atividades humanas e industriais. Sua instabilização representa riscos e/ou prejuízos humanos e materiais de menor ou maior intensidade. Em consequência, a avaliação das condições da estabilidade de encostas a curto, médio e longo prazo é tarefa importante do engenheiro geotécnico.

Os maciços rochosos são sistemas formados pela associação de rochas intactas (porção maciça) e descontinuidades (falhas, diáclases, fraturas, juntas, fissuras e microfissuras). Suas propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade são, portanto o resultado da complexa combinação entre as propriedades da rocha intacta e das descontinuidades. A estabilidade de maciços rochosos é função desta combinação e das condições nas quais o talude se encontra (Nunes, 2008).

Encostas rochosas fraturadas com descontinuidades apresentam um potencial de instabilização por queda de lascas e blocos. Este tipo de ruptura, geralmente abrupta e sem indícios de movimentação, envolve velocidades e energias cinéticas elevadas, resultando em danos materiais e prejuízos significativos, muitas vezes acompanhados de perdas de vidas. As técnicas de convivência com estas instabilidades são representadas por medidas de engenharia passivas e ativas, principalmente a execução de estruturas de proteção em áreas urbanas.

Visando a avaliação dos riscos inerentes à queda de blocos, vários programas computacionais com base em análises probabilísticas têm sido desenvolvidos e testados com o objetivo de simular o movimento de blocos, permitindo realizar previsões das trajetórias e estimativas relevantes relacionadas à energia, altura do salto e distância de alcance do bloco. Este conjunto de informações é subsídio fundamental para o estudo e concepção de medidas mitigadoras.

O uso desses programas computacionais exige o levantamento das características da encosta e dos blocos, determinadas através de cuidadosa investigação geológico-geotécnica e a seleção de parâmetros de entrada capazes de simular o movimento de

queda dos blocos instáveis, tais como a velocidade inicial, o ângulo de atrito entre bloco e superfície da encosta, rugosidade e coeficientes de restituição de energia.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho visa analisar a influência dos principais parâmetros associados às simulações da trajetória de queda de blocos por meio do programa *RocFall v.4.0*, comercializado pela *Rocsciense Inc.* (Canadá). Os parâmetros selecionados para a análise da influência são:

- (i) Coeficientes de restituição normal e tangencial da superfície da encosta;
- (ii) Ângulo de atrito da superfície de contato bloco-encosta;
- (iii) Rugosidade da superfície;
- (iv) Velocidade inicial do movimento do bloco.

Para tanto, foi considerada uma seção crítica do Morro do Esclavrado situado no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, no Município de Teresópolis, estado do Rio de Janeiro. A seção selecionada é vizinha à rodovia BR-116, intensificando os riscos de prejuízos materiais e fatalidades de usuários desta estrada. Adotou-se como bloco instável de referência o conjunto das lascas denominadas lascas 5, 6 e 7 por Nunes *et al.* (2008), situado na parte superior da encosta.

O trabalho avalia o comportamento do movimento dos blocos rochosos instáveis em função da variação dos principais fatores de influência. O efeito da variação destes parâmetros é analisado através da trajetória de movimento, alcance e energia de impacto dos blocos analisados.

O estudo também avalia a variação da massa dos blocos e o número de blocos adotado para as simulações das trajetórias de queda, considerando a variação dos parâmetros de influência.

1.3 ESCOPO DA PESQUISA

A dissertação é composta de cinco capítulos, apresentando inicialmente, neste capítulo, a introdução ao tema e os objetivos da pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos e classificações dos tipos de movimentos de massa, além das diversas medidas de estabilização e proteção de taludes rochosos. Para o entendimento dos tipos de movimentos de quedas de blocos rochosos, são apresentados diversos métodos de análises de modo a auxiliar na previsão e intervenção destes tipos de movimentos. Enfoque especial é dado aos métodos numéricos, geralmente probabilísticos, usados para a simulação das trajetórias de queda dos blocos.

No Capítulo 3, apresentam-se as características do programa numérico *RocFall*, e os procedimentos para obtenção das simulações de trajetórias de queda dos blocos. Apresenta-se também o caso histórico selecionado para o desenvolvimento desta pesquisa. Trata-se da seção crítica do Morro do Escalavrado (Nunes *et al.*, 2008), onde foram realizadas análises para a verificação da segurança da rodovia BR-116, que situa na parte inferior da encosta.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia de estudo, o modelo básico adotado nas análises e os resultados obtidos através do programa numérico *RocFall*. Apresenta também a análise dos resultados dos estudos paramétricos, indicando o grau de influência dos parâmetros analisados.

O Capítulo 5 encerra o trabalho com a apresentação das principais conclusões. São propostas também recomendações para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos e classificações dos tipos de movimentos de massa, os diferentes tipos de rupturas ocasionadas em maciços rochosos, e as diversas medidas de estabilização de taludes rochosos.

Para o entendimento e análise dos tipos de movimentos de quedas de blocos rochosos, também são apresentados diversos métodos de análises de modo a auxiliar na previsão e intervenção destes tipos de movimentos.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa são deslocamentos de solo e/ou rocha provocados por efeitos naturais ou não, que implicam em aumento da tensão cisalhante atuante (fatores externos) ou em redução da resistência ao cisalhamento da massa (fatores internos).

VIEIRA et al. (1997) afirmam que, dentre os diversos fatores que contribuem para a geração de movimentos de massas nas encostas, destacam-se a morfologia do terreno (declividade, forma em planta e perfil, orientação), regime pluviométrico, propriedades do solo e da rocha (textura, espessura, mineralogia, atrito interno, descontinuidades, feições estruturais da rocha, etc.), cobertura vegetal e o tipo de uso e ocupação do solo.

Os movimentos de massa têm sido objeto de estudos em diversos países. Estes estudos decorrem da necessidade de se obter um melhor entendimento dos tipos de mecanismos e frequências com que ocorrem, para que seja possível projetar obras seguras ou até mesmo permitir a tomada de decisão quanto a uma intervenção em tempo hábil.

Esses movimentos se subdividem em movimentos gravitacionais de massa, quando o movimento de solo e/ou rocha se faz sob influência da gravidade, e movimentos de transporte de massa, quando o material movimentado é transportado por um meio qualquer como a água.

Há várias formas de classificar e denominar os tipos de movimentos de massa e o enfoque dado em cada classificação depende do objetivo de estudo, da aplicação a que se propõe e, ainda, dos fatores analisados. Por este motivo, HANSEN (1987) afirma que a formulação de uma classificação de movimentos de massa não é tarefa simples.

Diversos autores propuseram classificações de movimentos de massa, tais como SHARPE (1938), SKEMPTON & HUTCHINSON (1969), VARNES (1978), CRUDEN & VARNES (1996), entre outros.

A classificação proposta por VARNES (1978) é a mais utilizada internacionalmente. Baseando-se no tipo de movimento e no tipo de material transportado, o autor propôs uma primeira classificação em 1958, que foi estendida em 1978 para incluir movimentos extremamente lentos de solos e/ou rochas, conhecidos como rastejo. Foram incluídos também os movimentos de tombamento e expansão lateral. A tabela 2.1 apresenta a classificação dos movimentos de VARNES (1978).

Tabela 2.1 – Classificação dos movimentos de encosta segundo VARNES (1978).

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			de rocha	de detritos	de terra
Tombamentos			de rocha	de detritos	de terra
Escorregamentos	Rotacionais	Poucas unidades	abatimento de rocha	abatimento de detritos	abatimento de terra
	Translacionais	Muitas unidades	de blocos rochosos	de blocos de detritos	de blocos de terra
Expansões laterais			de rocha	de detritos	de terra
Corridas/escoamentos			de rocha (rastejo profundo)	de detritos (rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

Seguindo a classificação de VARNES (1978), CRUDEN & VARNES (1996) sugerem a utilização de termos que indiquem a atividade (estado, distribuição e estilo) e as características do movimento (velocidade e condição de umidade) associadas ao tipo de material e tipo de movimento, para que se obtenha uma descrição mais completa e que transmita a maior quantidade de informações possível.

Várias feições geológicas (fraturas, falhas, foliação e bandamento composicional, entre outras) e geomorfológicas podem atuar como fatores condicionantes que controlam os movimentos de massa, determinando a localização espacial e temporal destes movimentos nas condições de campo.

2.2 MECANISMOS DE INSTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os diferentes tipos de ruptura são condicionados primeiramente pelo grau de fraturamento do maciço rochoso e pela orientação e distribuição das descontinuidades em relação ao talude, ficando a estabilidade definida pelos parâmetros de resistência das descontinuidades e do maciço rochoso.

Em maciços rochosos resistentes, as descontinuidades determinam a situação dos planos de ruptura. Em maciços de rocha branda, a matriz rochosa pode ser responsável pelo mecanismo de ruptura.

2.2.1 Ruptura Circular

Neste tipo de ruptura, a superfície de deslizamento tem forma conchoidal (Figura 2.1). Pode ocorrer em maciços rochosos compostos de rochas brandas e em maciços muito alterados ou intensamente fraturados, com comportamento semelhante a um solo. Apresentam um comportamento predominantemente isotrópico. Entretanto, a existência de planos de descontinuidades nesse tipo de maciço, como por exemplo, falhas, podem condicionar modelos de ruptura com outras tipologias.



Figura 2.1 – Ruptura circular (Nunes, 2008).

2.2.2 Ruptura Planar

A ruptura planar ocorre ao longo de uma descontinuidade pré-existente, que pode ser uma junta tectônica, estratificação ou falha (Figura 2.2). A condição básica é a presença de uma descontinuidade principal de mesma direção do talude, cumprindo a condição na qual o ângulo de mergulho do talude seja maior que o ângulo da descontinuidade, e este por sua vez seja maior que o ângulo de atrito da superfície da junta.

Dependendo da distribuição e das características das descontinuidades, existem dois tipos de ruptura planar:

- (i) Ruptura por um plano paralelo à face do talude, provocada por erosão ou perda de resistência do pé do talude;

- (ii) Ruptura por um plano que aflora na face ou no pé do talude, com ou sem fenda de tração.



Figura 2.2 – Ruptura planar (Nunes, 2004).

2.2.3 Ruptura em Cunha

Corresponde ao deslizamento de um bloco em forma de cunha, formado por dois planos de descontinuidades cuja interseção mergulha em direção ao talude. Para que seja produzido este tipo de ruptura, os dois planos devem aflorar na superfície do talude e devem-se cumprir as mesmas condições para a ruptura planar, na qual o ângulo de mergulho do talude seja maior que o ângulo do mergulho da linha de interseção dos dois planos da descontinuidade, e este por sua vez seja maior que o ângulo de atrito das juntas.

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

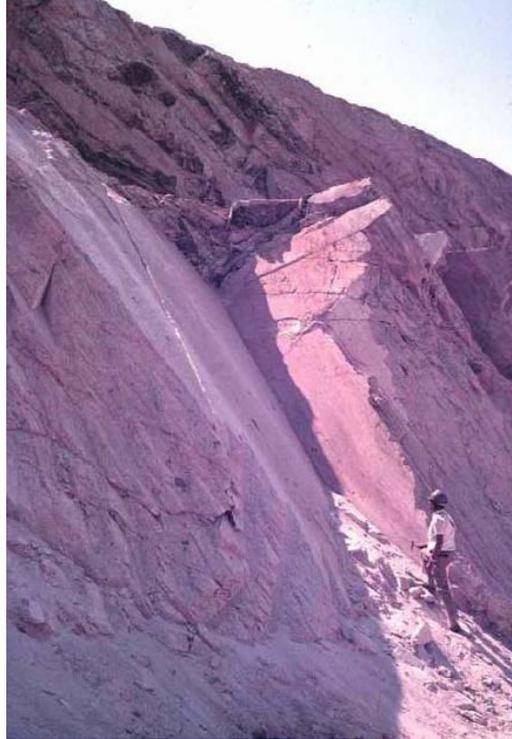


Figura 2.3 – Ruptura em cunha (Hoek, 2001).

2.2.4 Tombamento

Este tipo de ruptura apresenta-se em maciços rochosos onde as descontinuidades apresentam mergulho vertical ou sub vertical e em direção paralela ao talude (Figura 2.4). O movimento de rotação para frente e para fora do talude ocorre sobre um ponto ou eixo abaixo do centro de gravidade da massa deslocada (Cruden & Varnes, 1996). Em geral, verifica-se a ocorrência de blocos individualizados por um sistema de descontinuidades ortogonais.

Segundo CRUDEN & VARNES (1996), tombamentos podem conduzir a movimentos do tipo quedas ou escorregamentos, dependendo da geometria da massa movimentada, da geometria da superfície de separação e da orientação e extensão das descontinuidades existentes. A velocidade deste tipo de movimento pode variar de extremamente lenta a extremamente rápida.

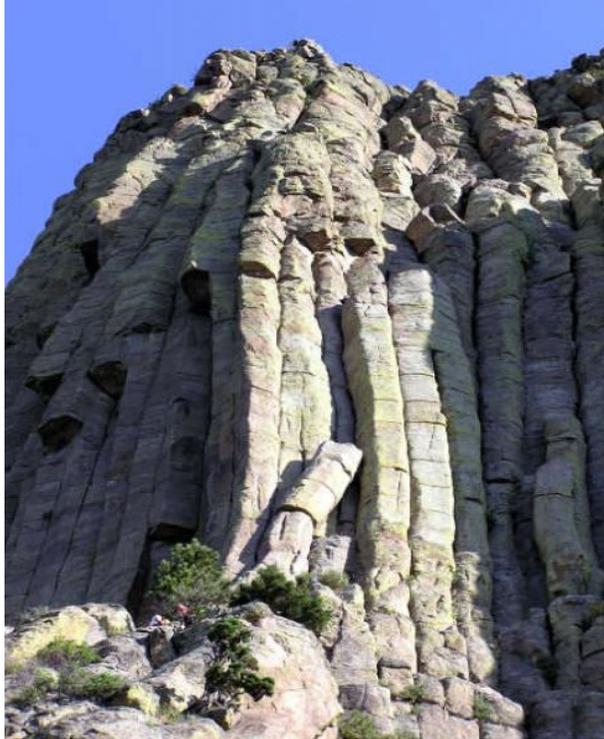


Figura 2.4 – Ruptura por tombamento (Nunes, 2008).

2.2.5 Queda de Blocos

A queda de blocos ou lascas é uma instabilidade freqüente em áreas montanhosas e antigas pedreiras, agravada pela ocorrência de sismos e chuvas intensas.

Este fenômeno está relacionado com a presença de descontinuidades físicas (fraturas e falhas) e também por intemperismo químico e físico, gerando mudanças nas forças atuantes e na resistência dos maciços rochosos, as quais podem dar origem a blocos e lascas.

As rupturas do tipo queda de blocos rochosos consistem em deslocamentos por gravidade de blocos de rocha com volumes e litologia diversos que se destacam de taludes ou encostas íngremes e deslocam-se ao logo da encosta em movimentos do tipo queda livre, deslizamento, rolamento e salto ao longo de superfícies inclinadas (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Queda de blocos (Nunes, 2008).

O processo de movimento pode consistir também no desprendimento de placas ou lascas que se formam a partir de estruturas acamadas ou xistosas por alívio de tensões ou variação térmica. O desprendimento dessas lascas pode ocorrer em queda livre ou por deslizamento ao longo de uma superfície inclinada. HANSEN (1987) considera que o movimento de queda está relacionado apenas com o fenômeno de queda livre, porém, os fenômenos de rolamento e salto também são incluídos por outros autores como CRUDEN & VARNES (1996), conforme esquematizado na Figura 2.6.

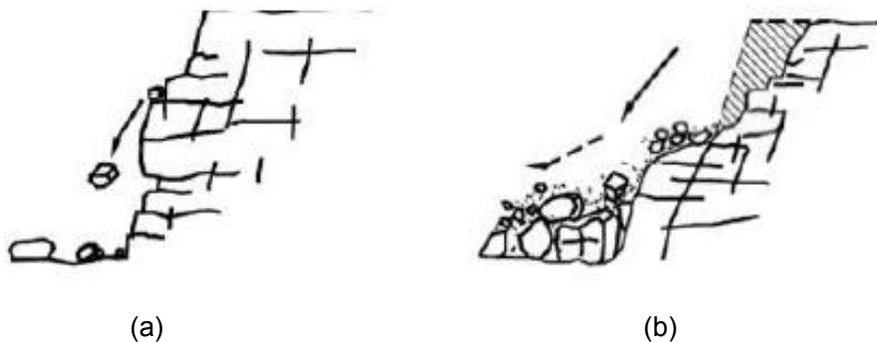


Figura 2.6 – Movimentos de queda livre, saltos e rolamentos de blocos (Bautista, 2007).

Após o desprendimento do bloco, o movimento desenvolvido é fortemente determinado pela inclinação presente ao longo da encosta (Dorren, 2003). Conforme já mencionado, os três tipos mais importantes de movimentos são de queda livre, saltos e rolamento (Figura 2.7).

Durante a queda geralmente o bloco desenvolve dois ou mais tipos de movimentos. Sob a forma de lasca pode desenvolver também um movimento do tipo deslizamento, o qual é observado geralmente na fase inicial e/ou nos estágios finais de movimento, onde os níveis de energia são baixos.

Em encostas muito íngremes, o movimento predominante é a queda livre. De acordo com RITCHE (1963), a queda livre ocorre se a inclinação da encosta excede 76° . Porém, este valor pode variar dependendo das condições de campo. A queda livre também pode ser intercalada com movimentos de saltos. A Figura 2.7 indica a ocorrência de queda livre para inclinações entre 70° e 90° .

Durante a queda livre, o bloco pode desenvolver movimentos de translação e/ou rotação, os quais influenciam a sua trajetória (Azzoni et al., 1995). O bloco em rotação, ao entrar em contato com a superfície pode saltar em um sentido inesperado em relação aos movimentos precedentes.

Se a inclinação média da encosta diminui ao longo da seção, um bloco em queda livre que colide na superfície passa a desenvolver movimentos em saltos. Na primeira colisão, os blocos tendem a se quebrar, acarretando uma perda de energia considerável (Bozzolo & Pamini, 1986).

Se a inclinação média da encosta é menor do que aproximadamente 45° , um bloco em salto muda gradualmente seu movimento para rolamento, ficando quase sempre com as bordas com raio maior em contato com a superfície da encosta. Caso a inclinação média aumente, o bloco pode desenvolver movimentos de saltos ou queda livre. Caso contrário, o bloco continua a desenvolver movimentos de rolamento até a sua paralisação completa, devido à grande perda de energia por fricção com a superfície.

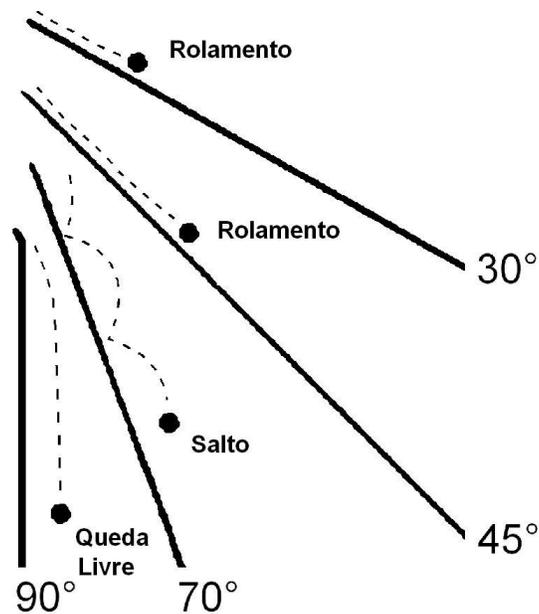


Figura 2.7 – Tipos de movimento em função da inclinação (modificado de Ritche, 1963).

A resistência do ar pode influenciar na velocidade e, conseqüentemente, na energia de um bloco em queda. Porém, BOZZOLO & PAMINI (1986) afirmam que a resistência do ar não tem nenhum efeito significativo no movimento do bloco. Outro fator de influência do movimento é a colisão entre blocos em queda, cujos efeitos são difíceis de analisar durante eventos reais ou ensaios in situ em escala real (Azzoni *et al.*, 1995).

Além da inclinação da encosta, o tamanho do bloco e o material de cobertura da encosta (solo, blocos rochosos e vegetação) são fatores determinantes na trajetória final de um evento de queda de bloco.

Em relação ao tamanho dos blocos, os blocos menores atingem distâncias menores, pois apresentam energia cinética total consideravelmente menor em relação aos blocos maiores. Tal fato pode ser observado no mapeamento de tálus em campo, onde geralmente o material fino é encontrado perto da face da encosta e os blocos maiores são encontrados na parte final da base da encosta.

Quanto ao material de cobertura presente na superfície da encosta, a vegetação de grande porte apresenta grande capacidade de absorver energia cinética do bloco, seja por fricção do bloco com o solo, seja pelo contato do bloco com os trocos das árvores.

Este tipo de vegetação funciona como uma barreira natural e pode interromper o movimento do bloco, impedindo que o mesmo atinja áreas a jusante da encosta. Para o caso de pedreiras desativadas ou encostas desprovidas de solo e vegetação, os blocos ao se chocarem com a superfície rochosa não perdem energia dando continuidade ao movimento e atingindo grande distância a jusante da encosta.

Uma eventual queda de bloco, quando não retida pela presença de barreiras naturais (vegetação) ou construídas (artificiais), pode atingir áreas habitadas ou equipamentos relacionados à infra-estrutura urbana, representando riscos e/ou prejuízos humanos e materiais de menor ou maior intensidade.

2.2.6 Fluxo de Detritos (Debris Flow)

O fluxo de detritos é um mecanismo de ruptura complexo que pode se manifestar em decorrência do aumento de poropressões nas descontinuidades da rocha, provocado por chuvas intensas e prolongadas, ou ainda pela ação de sismos (Nunes, 2008).

É uma ruptura catastrófica com velocidades compreendidas entre 0,005 a 500 m/s, que pode provocar danos de grande intensidade (Nunes & Rios Filho, 2009). O fluxo de detritos pode ocorrer em maciços rochosos fraturados, brandos ou duros. Os blocos que se desprendem do maciço rochoso movimentam-se subitamente pelas calhas de drenagem naturais da encosta, podendo atingir grandes distâncias horizontais após o pé da encosta (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Fluxo de detritos em Angra dos Reis/RJ (Nunes, 2008).

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES ROCHOSOS

O entendimento dos fatores deflagradores de movimentos de massa nas encostas é condição básica para a definição de medidas buscando a estabilização e/ou a mitigação de suas conseqüências.

A solução deve ser precedida da caracterização do problema, abordando os aspectos topográficos e geológicos, com especial atenção à inclinação e à altura do talude, além do estudo da litologia, das discontinuidades, do grau de intemperização da rocha, das condições de contato e da possibilidade de sismos e demais riscos envolvidos (ABNT, 2009).

De forma a permitir a elaboração de um modelo mecânico, é necessário o registro dos elementos instáveis com fotos e indicação em planta, aerofotografia ou foto convencional de todo o conjunto, ortofoto digital e perfis esquemáticos, indicando as dimensões dos elementos instáveis (declividade, rugosidade e tipo de material) e o levantamento das discontinuidades (se preenchidas ou não) com a representação estereográfica.

As técnicas de estabilização de taludes rochosos são divididas em três grandes grupos (GeoRio, 1999):

- Eliminação do problema de instabilidade;
- Estabilização;
- Convivência com o problema.

A Figura 2.9 apresenta um esquema que auxilia a análise do talude rochoso potencialmente instável para a seleção de solução de projeto.

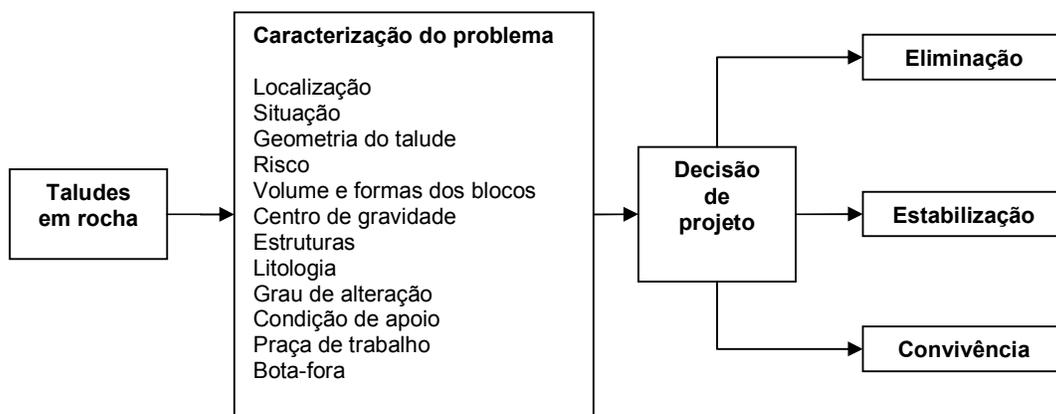


Figura 2.9 – Alternativas de soluções de projeto para taludes rochosos (GeoRio, 1999).

2.3.1 Eliminação do Problema

A opção de eliminação da área de risco em detrimento da sua estabilização é função principalmente do tamanho e condições de apoio do bloco e/ou lasca instável.

A medida mais simples para a eliminação dos elementos instáveis (blocos ou lascas) é a remoção manual. Para blocos e lascas de maiores dimensões, faz-se necessário o desmonte prévio para posterior remoção do local. O desmonte pode ser realizado através de processo mecânico (Figura 2.10), por explosivos (fogo) ou por polímero expansivo. O desmonte com explosivos deve ser bem estudado, a fim de não acarretar danos ao maciço, evitando a possibilidade de abertura de novas fissuras e individualização de lascas pelo efeito dinâmico dos gases liberados na explosão.

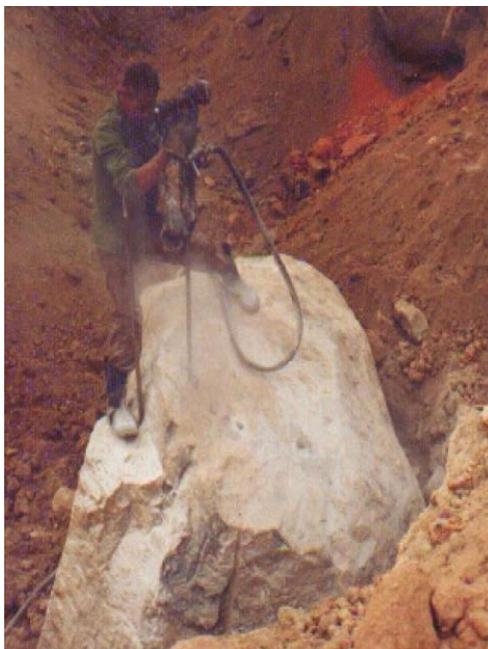


Figura 2.10 – Fragmentação de bloco por processos mecânicos (GeoRio, 1999).

2.3.2 Técnicas de Estabilização

(i) Retaludamento com Implantação de Banquetas

O retaludamento da encosta rochosa é realizado através da suavização da inclinação e/ou execução de banquetas.

A implantação de banquetas ou bermas possibilita a diminuição do ângulo médio do talude, de forma a aumentar o fator de segurança, e permite a execução da drenagem superficial, dividindo a vazão em cada trecho do sistema drenante (Figura 2.11).

Outro objetivo das banquetas é criar espaços para possibilitar a redução da energia cinética de blocos rochosos em queda. A largura e a altura das banquetas devem ser determinadas por métodos numéricos que simulem a energia e a trajetória dos blocos rochosos em queda e sempre visando atender a estabilidade geral da encosta e a de cada talude entre banquetas.



Figura 2.11 – Retaludamento em banquetas (Nunes, 2008).

(ii) Proteção Superficial

A proteção superficial de taludes com o uso de concreto aplicado manualmente ou por máquinas de projeção é uma solução simples e eficiente para reduzir a instabilidade de maciços muito alterados e fraturados, evitando-se a erosão e ruptura por ação das águas incidentes (Figura 2.12).

O revestimento do talude somente com o emprego de argamassa de cimento e areia ou concreto pode resultar em patologias. A ausência de tela metálica ou fibra, chumbadores, drenos, dosagem inadequada e preparo deficiente da superfície pode resultar em fissuração generalizada da camada de concreto, com a conseqüente perda de desempenho e redução da vida útil do revestimento. Mais recentemente tem sido utilizado um concreto projetado compósito, constituído pela mistura de concreto e fibras de aço para garantia do reforço da camada projetada sem tela de aço.



Figura 2.12 – Aplicação do concreto projetado.

(iii) Drenagem

Devido aos inúmeros efeitos que a água pode exercer sobre um maciço de solo ou de rocha (aumento do peso específico do material, aumento da poropressão, forças de percolação, subpressão, entre outros), é extremamente necessário que se tomem os cuidados recomendados no que diz respeito à drenagem adequada do terreno.

Os sistemas de drenagem podem abranger os seguintes tipos:

(i) Drenos superficiais, com instalação de canaletas na superfície do talude para recolher e destinar a um local determinado a água presente na superfície do talude;

(ii) Drenos profundos, com o objetivo de recolher a água presente no interior do talude. Os drenos profundos são utilizados para manter rebaixado o lençol freático e devem ser dimensionados com base em estudos geotécnicos e hidrológicos. No caso de maciços rochosos fraturados, os drenos profundos devem interceptar o maior número possível de fraturas. São geralmente constituídos de tubos plásticos perfurados e envolvidos com geotêxtil. Para permitir avaliar a eficiência dos drenos, as vazões devem ser medidas em intervalos definidos no projeto.

A Figura 2.13 ilustra o sistema de drenagem do Morro Dois Irmãos (Rio de Janeiro), composto por canaletas de drenagem construídas ao longo da encosta rochosa.

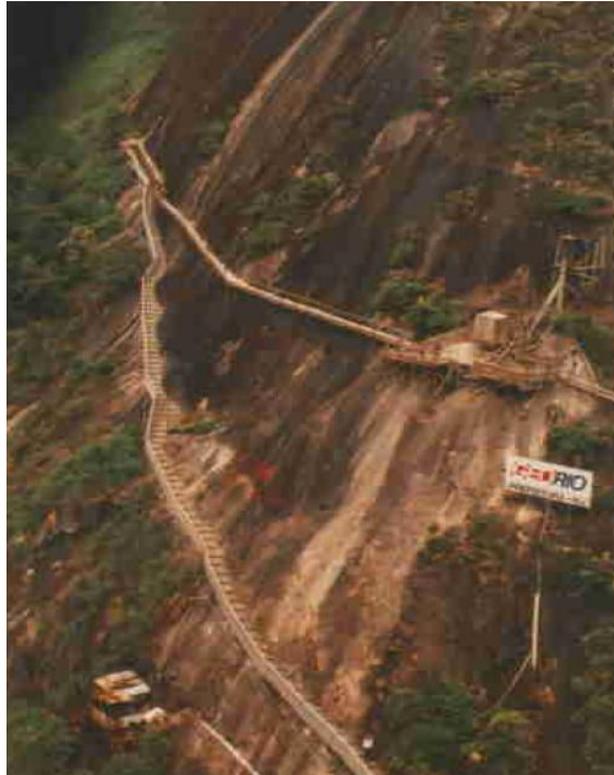


Figura 2.13 – Sistema de drenagem em talude rochoso (GeoRio, 1999).

(iv) Estruturas de Suporte

As medidas de estabilização com estruturas de reforço são indicadas para blocos e lascas soltos e maciços rochosos fraturados que oferecem condições adequadas para fixação de ancoragens e chumbadores.

A utilização de ancoragens, grampos e chumbadores pode estar ou não associada à estruturas, geralmente de concreto armado, pretendendo consolidar uma determinada região potencialmente desfavorável. Geralmente a estabilização é realizada com a utilização de grelhas ancoradas e contrafortes (Figura 2.14).

As grelhas ancoradas são estruturas constituídas, em geral, de vigas horizontais e verticais de concreto armado, adaptadas às irregularidades da face do talude rochoso, tendo ancoragens protendidas posicionadas na interseção das vigas. As grelhas são

aplicadas em taludes rochosos fraturados com presença de blocos muito grandes justapostos ou taludes com foliação de mergulho desfavorável.



Figura 2.14 – Fixação por grelhas ancoradas e contrafortes (GeoRio, 1999).

Os contrafortes de concreto armado são estruturas adaptadas às irregularidades da face do talude rochoso, associadas ou não a ancoragens, chumbadores ou grampos, trabalhando predominantemente à compressão e aplicadas como apoio ou calçamento de blocos rochosos.

2.3.3 Soluções de Convivência

As técnicas de estabilização com estruturas de reforço tornam-se inviáveis em maciços rochosos muito fraturados com quantidade elevada de blocos e lascas potencialmente instáveis. A solução para este tipo de problema é a adoção de medidas de convivência. Estas medidas possibilitam conviver com o talude instável de forma mais segura. A ruptura não é evitada, porém é controlada para minimização dos riscos.

São várias as soluções de convivência com o problema: barreiras flexíveis de impacto, telas metálicas para controle da trajetória de queda do bloco, muros de impacto

rígidos, trincheiras para coleta de blocos, bermas dissipadoras para redução de energia cinética, túnel falso para proteção da infra-estrutura.

(i) Bermas para Redução de Energia

A confecção das bermas em encostas rochosas possibilita a redução da energia cinética de blocos rochosos. A posição e a geometria das bermas devem ser determinadas por métodos que simulem a energia e a trajetória de blocos rochosos em queda, visando atender simultaneamente a estabilidade global da encosta e a de cada talude entre as bermas. Para maior redução de energia, podem-se recobrir as bermas com algum tipo de vegetação ou com material granular não compactado (Figura 2.15).



Figura 2.15 – Bermas para redução da energia dos blocos rochosos.

(ii) Trincheiras ou Valas para Coleta de Blocos

Um sistema simples e eficaz para proteção permanente contra queda de blocos é a implantação de trincheiras para coleta do material instável (Figura 2.16). Posicionadas no pé da encosta, a largura e a profundidade das trincheiras devem ser determinadas por métodos que consideram a energia e a trajetória de queda dos blocos rochosos.



Figura 2.16 – Trincheira para coleta de bloco (Nunes, 2008).

(iii) Muros de Impacto

Os muros de impacto rígidos ou semi-rígidos são estruturas metálicas ou de concreto armado destinadas ao amortecimento do impacto de blocos e lascas rochosas, além de massas terrosas (Figura 2.17). A largura da área de amortecimento e a altura do muro devem ser dimensionadas em função da energia e a trajetória de blocos rochosos, determinadas por métodos analíticos e/ou numéricos. Outra solução aplicada para áreas sujeitas a queda de blocos com volumes ou energias elevadas é o uso de diques de solo reforçados com geossintéticos (Figura 2.18). A desvantagem mais relevante desta técnica é a necessidade de encontrar um local com as características geométricas que são apropriadas para a construção do dique, além de jazidas de solo próxima. Entre as vantagens que os muros de impacto oferecem podem ser ressaltadas a baixa manutenção após impactos e a capacidade de absorver impactos de alta energia.



Figura 2.17 – Muro rígido (Nunes, 2008).



Figura 2.18 – Dique de solo reforçado (Peila et al., 1998).

(iv) Telas Metálicas

São estruturas flexíveis compostas de redes de arame com ou sem cabos de aço de elevada resistência, utilizadas para estabilização de taludes rochosos muito fraturados

ou mesmo de solo saprolítico. São posicionadas junto à face do talude e fixadas por meio de ancoragens (tirantes ou chumbadores).

Conforme ilustrado na Figura 2.19, a contenção com telas metálicas deve ser verificada quanto à possibilidade da ruptura do sistema formado pela tela, pelas placas metálicas de distribuição de tensões e pelos elementos de fixação. O sistema e seus componentes devem ter resistência, durabilidade, proteção anti-corrosiva e desempenho adequados. O comprimento, espaçamento e diâmetro dos elementos de fixação devem ser dimensionados em função da possibilidade de ruptura global do maciço, queda de blocos rochosos, ruptura planar ou em cunha.



Figura 2.19 – Tela metálica (Geobrugg, 2004).

(v) Túnel Falso

Os túneis falsos são estruturas metálicas ou em concreto armado utilizadas como cobertura para trechos de rodovias ou ferrovias e destinadas a receber e/ou desviar avalanches e quedas de blocos rochosos ou detritos (Figura 2.20). A largura e a extensão do túnel devem ser determinadas por métodos numéricos que simulem a energia e trajetória de movimento de blocos rochosos e de massas de solo. Deve-se

também garantir a estabilidade estrutural do túnel em função da energia e do impacto esperados.



Figura 2.20 – Túnel falso rodoviário (Nunes, 2008).

2.4 BARREIRAS FLEXÍVEIS

As barreiras flexíveis são dispositivos projetados para interromper o movimento de blocos de rocha (*rockfalls*) que venham a se desprender do talude rochoso. Estas barreiras são estruturas relativamente leves e esbeltas, compostas por postes metálicos que mantêm em posição uma tela metálica capaz de interceptar o bloco em movimento e de transferir as forças pelos cabos de aço para as ancoragens fixadas no maciço rochoso (Figura 2.21).



Figura 2.21 – Barreira flexível (Geobruigg, 2009).

As Figuras 2.22 e 2.23 ilustram respectivamente as seções transversal e frontal de uma barreira flexível típica.

O sistema consiste em uma rede (tela metálica) suportada verticalmente por postes metálicos fixados à fundação através de uma placa rotulada. Na parte superior de cada poste, encontram-se as extremidades dos cabos com dissipadores de energia, os quais são fixados nas ancoragens. Os dissipadores de energia são capazes de dissipar a energia pelo efeito da fricção ou pela deformação permanente de sua própria estrutura, minimizando a força de impacto transmitida aos elementos da ancoragem.

As barreiras flexíveis são geralmente posicionadas e dimensionadas em função do tamanho e das possíveis trajetórias de blocos instáveis. Vários procedimentos analíticos para a descrição do fenômeno de queda de bloco têm sido estudados por diversos pesquisadores.

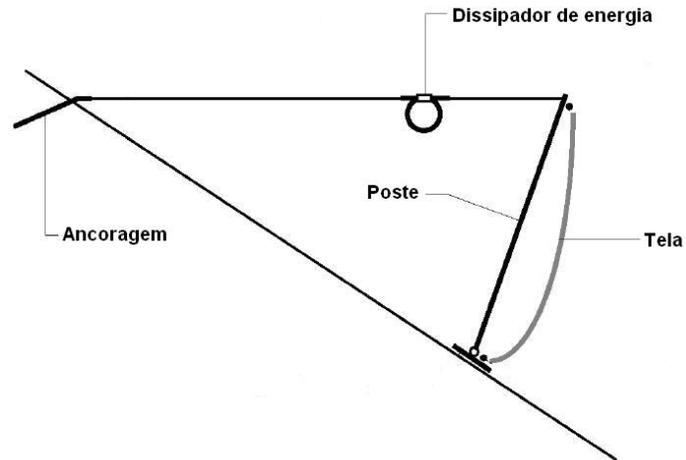


Figura 2.22 – Visão lateral esquemática da barreira com os elementos discriminados (modificado de Peila *et al.*, 1998).

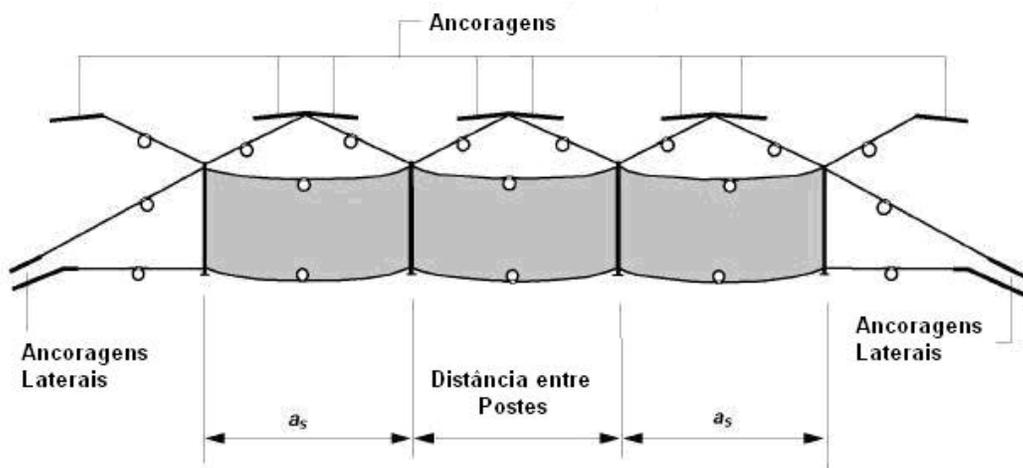


Figura 2.23 – Visão frontal esquemática da barreira com os elementos discriminados (modificado de Peila *et al.*, 1998).

Estas barreiras são bastante utilizadas em regiões montanhosas para proteção de rodovias, ferrovias e complexos urbanos. Nos últimos anos seu uso tem aumentado consideravelmente principalmente nos países europeus (França, Itália e Suíça), onde estudos e testes são desenvolvidos para definir o comportamento destas estruturas.

Constata-se um avanço expressivo da capacidade de absorção de energia das barreiras através da utilização e alteração de componentes estruturais mais sofisticados. Em 1985, por exemplo, as barreiras eram capazes de suportar blocos

com uma energia cinética de no máximo 250 kJ (Gerber & Haller, 1997). Hoje, barreiras apresentam a capacidade de suportar blocos com energia de impacto de até 5000 kJ. Estes resultados não poderiam ter sido alcançados sem a cooperação industrial entre empresas e institutos de pesquisa, principalmente nos EUA, Japão, França, Itália e Suíça. Isso se aplica particularmente aos testes de componentes estruturais individuais e de sistemas completos das barreiras flexíveis.

Geralmente, as barreiras são posicionadas e dimensionadas em função das trajetórias possíveis de blocos. Desta forma, a definição correta da trajetória do bloco e características tais como distância, altura, velocidade e energia do bloco são muito importantes. A modelagem numérica ou analítica de queda de bloco exige a determinação das características geométricas e físicas da encosta e do bloco. As características geométricas principais referem à topografia do talude, tamanho e forma do bloco. Outras características são a velocidade inicial de queda do bloco, os coeficientes de restituição da superfície da encosta e o coeficiente de atrito relativo ao movimento do bloco na superfície rochosa, cujos valores podem ser definidos a partir de retro-análise de quedas de blocos já ocorridas.

Dentre os parâmetros envolvidos, talvez o coeficiente de restituição (K) seja o mais importante e difícil de ser obtido (Stevens, 1998). Sua determinação exige medidas específicas realizadas em lançamentos experimentais de blocos in situ ou por retro-análise de movimentos já ocorridos. Estas medidas acarretam considerável parcela de incerteza associada aos coeficientes de restituição assim determinados.

O coeficiente de restituição corresponde à energia cinética dissipada em sucessivos impactos e pode ser obtido pela razão entre as velocidades depois e antes do impacto do bloco. As colisões podem ser classificadas pela capacidade de conservação de energia cinética no choque.

Normalmente, um bloco em movimento ao se chocar com a superfície do talude perde parte de sua energia cinética. Para este comportamento é dado o nome de Colisão Parcialmente Inelástica, onde o coeficiente de restituição (K) possui valor entre zero e a unidade ($0 < K < 1$).

O coeficiente de restituição é um parâmetro bastante relevante em estudos de avaliação de risco, pois influencia diretamente na capacidade do bloco rochoso atingir regiões habitadas ou estruturas urbanas. Uma das formas de se obter esse parâmetro

é executar lançamentos *in situ* e filmar o movimento com a possibilidade de se obterem diretamente os coeficientes de restituição normal e tangencial à superfície de choque.

2.5 ANÁLISES EXPERIMENTAIS DE QUEDAS DE BLOCOS

2.5.1 Testes em Laboratório

DIAS & BARROSO (2006) apresentam a aplicação de uma metodologia para a determinação do coeficiente de restituição normal de rochas em laboratório. Os autores propõem a aplicação de um método que consiste no registro sonoro dos sucessivos impactos de uma esfera de rocha solta contra uma superfície plana rochosa, dispensando a realização de lançamentos *in situ* que geralmente são ensaios complexos e onerosos em tempo e custos.

As colisões podem ser classificadas pela capacidade de conservação de energia cinética no choque. Quando uma esfera é solta a uma determinada altura, colidindo com uma superfície plana e alcança uma altura igual a inicial, tem-se uma colisão perfeitamente elástica, com o valor do coeficiente de restituição equivalente a uma unidade ($K=1$). Nesse caso a energia cinética envolvida na colisão foi conservada. Caso a esfera, ao colidir com a superfície, mantenha-se em repouso, tem-se uma colisão perfeitamente inelástica e, nesse caso, o coeficiente de restituição é nulo ($K=0$), pois toda a energia cinética foi perdida na colisão.

Na maioria dos casos, os materiais ao se chocarem perdem parcialmente a sua energia, ou seja, uma esfera ao ser solta a certa altura retorna até uma altura menor que a anterior e assim sucessivamente, até perder completamente a energia. Para este comportamento é dado o nome de colisão parcialmente inelástica. A Figura 2.24 apresenta esquematicamente este tipo de colisão, onde o coeficiente de restituição (K) possui valor entre zero e a unidade ($0 < K < 1$).

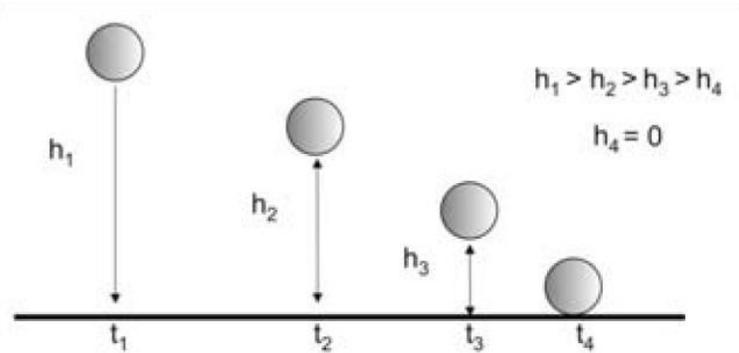


Figura 2.24 – Colisão parcialmente inelástica de uma esfera (Dias & Barroso, 2006).

No experimento em laboratório, a esfera de rocha (Figura 2.25) é solta a uma altura sob a superfície plana, também constituída de rocha, e os sons produzidos pelos sucessivos impactos são captados por um microfone interligado a um programa computacional que registra o som em um gráfico de frequência versus tempo, permitindo a obtenção dos intervalos de tempo de cada som emitido pelos sucessivos saltos ou repiques da esfera de rocha sobre a superfície rochosa. O experimento é repetido várias vezes para diferentes alturas de queda, obtendo assim uma quantidade de valores que permitam uma representatividade estatística.



Figura 2.25 – Esfera rochosa (Dias & Barroso, 2006).

O método de medida adotado para o cálculo do coeficiente de restituição normal de rochas é simples, de rápida execução e requer um equipamento de fácil acesso, que pode ser utilizado com softwares de registro sonoro disponíveis na Internet.

O método acústico pode ser uma boa alternativa para a estimativa do coeficiente de restituição quando não é possível empregar experimentos de campo.

Ressalta-se que em regiões onde não é possível fazer ensaios em escala real costumam-se aplicar valores de coeficiente de restituição obtidos da retro-análise de movimentos já ocorridos que, no entanto, podem não guardar semelhança com os materiais geológicos envolvidos e com a geometria da encosta ou talude sob investigação. Portanto, nesses casos, há uma considerável parcela de incerteza associada aos coeficientes de restituição assim determinados.

2.5.2 Testes em Campo

Ao se desprender da encosta, o bloco podem desenvolver movimentos tipos queda livre, saltos, rolamentos e deslizamento. O desenvolvimento de modelos matemáticos englobando a transição desses tipos de movimento se torna uma tarefa muito complexa. Contornando tal fato, os modelos empregados nos programas de simulação de queda de bloco são frequentemente calibrados por meio de retro análise de eventos ocorridos ou por meio de ensaios *in situ* (escala real).

O método de análise experimental consiste em testes *in situ* em escala real com o objetivo de analisar o comportamento dos blocos que venham a se desprender do talude rochoso. Estas análises são realizadas em um local de teste determinado de modo a diminuir riscos materiais e humanos.

A Figura 2.26 ilustra um lançamento *in situ*, o qual foi filmado para a determinação dos coeficientes de restituição. Essa prática tem a vantagem de fornecer diretamente os coeficientes de restituição normal e tangencial da superfície da encosta. No entanto, ressalta-se que experimentos deste tipo só podem ser realizados em locais onde não haja risco para população e estruturas urbanas.

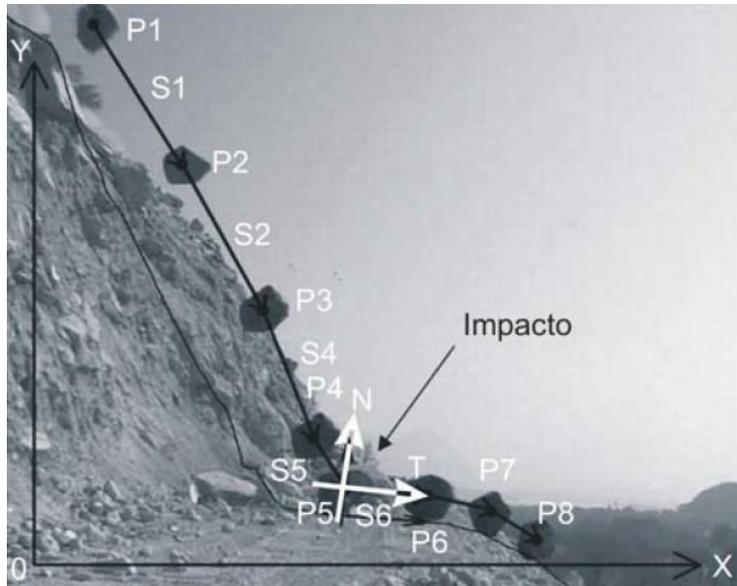


Figura 2.26 – Posição do bloco em diferentes intervalos de tempo durante o ensaio de queda *in situ* (Giani *et al.*, 2004).

Para a realização do ensaio, primeiramente, é realizado um levantamento topográfico detalhado da área a fim de definir com precisão a morfologia e as seções verticais relevantes para as trajetórias dos blocos. São também determinados o volume e a forma dos blocos de rocha a serem usados nos ensaios. Uma escavadeira mecânica no topo da encosta de teste executa o lançamento dos blocos (Figura 2.27).

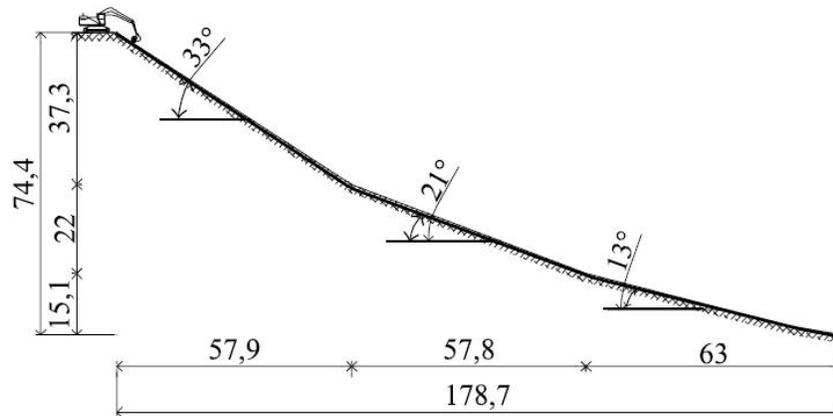


Figura 2.27 – Talude esquemático com realização de teste *in situ*, medidas em metro (Giani *et al.*, 2004).

As características do movimento são descritas a partir da gravação de ensaios de queda de bloco em escala real. Os ensaios são registrados por meio de uma série de

câmeras de vídeo fixas, posicionadas ao longo da encosta, de modo que elas tenham aproximadamente o mesmo campo de visão. Isto permite uma cobertura completa da trajetória dos blocos.

Com a realização dos ensaios, as imagens são captadas por câmeras capazes de captar 10 quadros por segundo. Estas imagens são transferidas para um computador e editadas de forma a obter a seqüência de imagens de todo movimento do bloco ensaiado. Através de um programa específico, a posição do centróide do bloco é referenciada para um sistema de coordenadas cartesianas, conforme já ilustrado na Figura 2.26.

A partir das coordenadas do centróide do bloco e do intervalo de tempo entre quadros seguintes, é possível calcular a velocidade e o ângulo de rotação dos blocos.

São aplicados dois sistemas de coordenadas: o primeiro sistema (global) é o sistema x,y (que é fixado para cada câmera), onde x é o eixo horizontal e y é o eixo vertical. O segundo sistema (local) é o n,t , sistema em que a direção n é a normal para a superfície de impacto na encosta e t é a tangente. Este sistema de referência é definido por meio da seção da encosta traçada a partir do levantamento topográfico detalhado.

Dois coeficientes de restituição são determinados através da análise dos dados da energia cinética dissipada no momento do impacto. Para cada ponto de impacto, os coeficientes de restituição normal e tangencial são determinados pelo quociente entre os vetores velocidade pré e pós-impacto nas direções normal e tangencial (Figura 2.28).

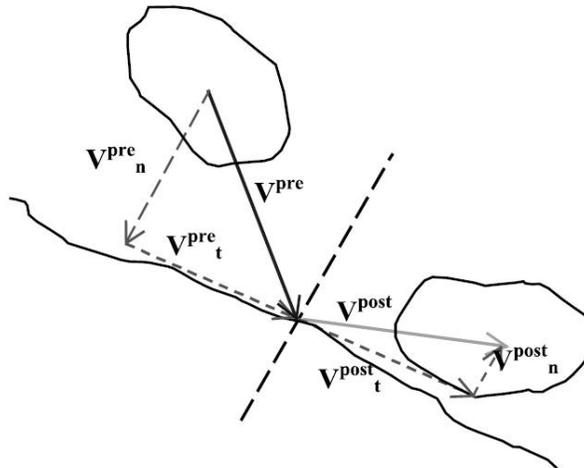


Figura 2.28 – Bloco esquemático com as componentes para cálculo (Giani *et al.*, 2004).

Os ensaios em escala real permitem a avaliação dos parâmetros envolvidos na queda de blocos, e a definição de parâmetros a serem utilizados em análises numéricas, além de permitir uma calibração detalhada de modelos numéricos de previsão de queda de blocos.

2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS

Vários programas computacionais acoplados a análises probabilísticas têm sido desenvolvidos e testados com o objetivo de simular quedas de blocos, permitindo realizar previsões das trajetórias dos blocos com a obtenção de dados relevantes (energia, altura do salto e distância de alcance do bloco) para o estudo e concepção de medidas de proteção.

Modelos numéricos também têm sido criados a fim de estimar o risco associado ao fenômeno de queda de bloco. Estes programas podem adotar esquemas em 2 ou 3 dimensões para modelar queda de blocos (Tagliavini *et al.*, 2008).

Os modelos analíticos adotados nos programas numéricos podem basicamente ser divididos em dois tipos, aqueles que consideram o bloco (adimensional) com massa concentrada no centro de gravidade, e aqueles que consideram o bloco como um corpo com massa, forma e volume.

O modelo de massa concentrada não pode simular movimento do tipo rolamento, visto que a forma e o volume do bloco não são considerados.

Os modelos mais rigorosos, que consideram a forma e volume do bloco, podem reproduzir tipos distintos de movimentos. Entretanto, determinar de forma realística o tamanho e a forma do bloco pode ser uma tarefa muito difícil, o que torna este método pouco usado na prática.

A maioria dos programas numéricos simula as trajetórias de queda de blocos em um espaço bidimensional. Os modelos bidimensionais e tridimensionais apresentam vantagens e limitações para cada caso particular. Cabe ao técnico analisar a capacidade de cada programa e determinar qual utilizar, de modo que a simulação reproduza com fidelidade um caso real. Para esta escolha, o ideal é avaliar a confiabilidade de cada programa com a comparação de dados de eventos ocorridos, ou se possível, com a realização de testes *in situ* na região de estudo.

Na maioria dos programas, os parâmetros mais utilizados para a modelagem do evento são os coeficientes de restituição, coeficiente de atrito, geometria da encosta e a dimensão dos blocos.

A Tabela 2.2 resume os principais programas de simulação bidimensional e tridimensional de trajetória de queda de bloco criados nas últimas décadas.

Tabela 2.2 – Programas bi e tridimensionais para análises de queda de blocos.

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

Dentre os programas listados na Tabela 2.2, o *Colorado Rockfall Simulation Program* (CRSP) é um programa numérico bidimensional que permite adotar blocos em forma

de esferas, cilindros ou discos, com atribuição de massa, volume e uma velocidade inicial de componentes horizontal e vertical. O bloco pode desenvolver movimentos do tipo queda livre, salto e rolamento ao longo da seção, fornecendo uma análise estatística de velocidade, energia cinética e da altura dos blocos em diferentes pontos da seção transversal da encosta. Este modelo representa o movimento dos blocos rochosos ao longo da encosta através de uma equação de movimento parabólico de corpo em queda livre associada ao princípio da conservação de energia. Os parâmetros físicos exigidos pelo programa são a geometria da seção transversal, os coeficientes de restituição normal e tangencial e a rugosidade da encosta.

O programa numérico ROTOMAP, é um programa de modelo tridimensional para a análise e o projeto de dispositivos de proteção contra queda de blocos. O programa adota uma aproximação estatística que simula um grande número de quedas de blocos (representados por pontos adimensionais de massa concentrada) e identifica as áreas susceptíveis de deposição de blocos. Exige uma base topográfica e geomorfológica para identificar áreas de desprendimentos de blocos. O modelo digital do terreno (DTM) pode ser obtido através de uma distribuição arbitrária dos pontos (X, Y, Z), convertida em uma grade regular. O programa pode gerar plantas da topografia ou das seções transversais com as trajetórias simuladas, permite a colocação de barreiras flexíveis com altura e capacidade determinada pelo usuário e gera informações pontuais da altura do bloco, energia cinética, velocidade.

O *Georock* é um programa numérico que simula as trajetórias de queda de blocos para fins de projetos de estruturas protetoras (barreiras flexíveis), possibilitando a determinação da capacidade, altura e inclinação desses dispositivos. O programa é formado por dois pacotes, um com abordagem bidimensional e outro tridimensional, baseados nos métodos de massa concentrada em um ponto e de blocos com forma e volume definidos. No *Georock* 2D a seção da encosta é representada por coordenadas de pontos ligados por segmentos retos cujos blocos são representados por pontos com massa concentrada no centro de gravidade. O *Georock* 3D é um programa para análise tridimensional com a utilização de modelo digital do terreno (DTM). Ele permite adotar blocos em forma de esferas, cilindros ou discos, com atribuição das dimensões, massa, volume, módulo de elasticidade e velocidade inicial horizontal e vertical. Para a realização das análises, as propriedades físicas da superfície da encosta determinantes são os coeficientes de restituição normal e

tangencial. O programa gera informações referentes às trajetórias, velocidade e energia dos blocos.

O programa numérico *STONE* apresenta uma abordagem tridimensional para a simulação de trajetórias de queda de bloco (Guzzetti *et al.*, 2002). A encosta é representada a partir de modelos digitais do terreno (DTM) e os blocos são considerados pontos adimensionais com massa concentrada. O programa é capaz de simular movimentos do tipo queda livre, saltos e rolamentos. Os parâmetros de entrada são os mesmos dos programas citados anteriormente, ou seja, coeficientes de restituição normal e tangencial, rugosidade e ângulo de atrito da encosta. O programa gera informações referentes às trajetórias, velocidade e energia dos blocos, porém não considera a utilização de estruturas protetoras (barreiras flexíveis).

O *RocFall* é um programa bidimensional no qual a seção transversal é representada por coordenadas de pontos (x,y), ligados por segmentos retos. Os parâmetros referentes à superfície da encosta são os coeficientes de restituição normal e tangencial, ângulo de atrito e rugosidade. Os blocos são representados por pontos adimensionais de massa concentrada com velocidades horizontal, vertical e angular. O programa permite a utilização de barreiras flexíveis com altura, inclinação, rigidez e capacidade determinadas pelo usuário, auxiliando nos projetos de dispositivos de proteção. A saída de resultados se refere às trajetórias, velocidades e energias dos blocos ao longo da encosta.

A Tabela 2.3 resume as principais características dos programas numéricos de simulação de queda de blocos mais utilizados.

As simulações numéricas de queda de blocos nos programas com base estatística, tais como o programa *RocFall*, resultam em análises muito sensíveis a pequenas alterações nos parâmetros de entrada. Por essa razão, os parâmetros utilizados nas análises devem se aproximar o máximo possível das condições reais de campo.

Deve-se atentar especialmente para os resultados de saída desses programas, os quais fornecem informações relativas a trajetórias médias mais prováveis e as fisicamente elegíveis associadas a trajetórias não consistentes. A responsabilidade pela sensibilidade da simulação não reside exclusivamente no programa ou na

metodologia utilizada. Cabe ao técnico a responsabilidade dos parâmetros de entrada das análises e, principalmente, dos resultados das mesmas.

Tabela 2.3 – Principais características dos programas numéricos de simulação de queda de blocos.

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

2.7 MÉTODOS EMPÍRICOS

Os modelos empíricos de quedas de blocos são baseados geralmente na relação entre fatores topográficos e o comprimento da zona de deposição de vários eventos de queda de blocos (Dorren, 2003).

São desenvolvidos com base em análises de eventos de quedas passadas, no mapeamento de pontos de desprendimento de blocos, em evidência de superfície do tálus e em blocos maiores depositados além da base inferior do tálus.

Os métodos empíricos são capazes de avaliar o risco de acidentes relacionados às quedas de blocos em encostas. As aproximações empíricas são apropriadas para analisar de forma rápida e preliminar os fenômenos de queda de blocos, estimando a presença e localização de possíveis blocos que venham a se desprender e a área susceptível a passagem e deposição de blocos.

O *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS), desenvolvido pelo *Highway Division of Oregon* tem sido muito utilizado nos EUA. Este sistema simples classifica as encostas

de acordo com o grau de risco de queda de bloco. A finalidade destas classificações é identificar as encostas que oferecem riscos sócio-econômicos, exigindo uma intervenção corretiva, preventiva ou um estudo detalhado adicional (Hoek, 2000). Outro método similar, também aplicado para rodovias e ferrovias é o Rockfall Hazard Rating Ontário (RHRON), desenvolvido na Província de Ontário no Canadá.

EVANS & HUNGR (1993) sugerem o princípio de *Fahrböschung* (Heim, 1932) para prever zonas possivelmente atingidas por eventos de queda de bloco. O *Fahrböschung* (F) é o ângulo entre um plano horizontal e uma linha da parte superior do ponto de desprendimento do bloco ao ponto máximo de deposição de todos os blocos do evento de queda (Figura 2.29).

Um princípio alternativo sugerido por EVANS & HUNGR (1993) é o *Minimum Shadow Angle* (MSA). Este é o ângulo de uma linha reta entre o ponto superior do tálus (o ponto mais elevado da encosta onde se dá o acúmulo de blocos) e o ponto de parada do bloco mais afastado da crista da encosta (Figura 2.29).

Comparando os resultados de diversos estudos, o *Minimum Shadow Angle* (MSA) encontra-se entre 22° e 30° (Evans e Hungr, 1993).

Baseado em análises de 25 eventos de queda de bloco no Vale do Yosemite, Califórnia, WIECZOREK *et al.* (2008) sugerem um valor do *Minimum Shadow Angle* igual a 22° para definir áreas susceptíveis.

EVANS & HUNGR (1993) relatam um *Minimum Shadow Angle* igual a 27,5°, resultante da investigação de dezesseis encostas na Grã Bretanha. Segundo estes autores, o *Minimum Shadow Angle* é preferível ao *Fahrböschung*. Ressalta-se que ambos os princípios devem somente ser usados para uma primeira aproximação do comprimento de uma área de deposição de blocos rochosos.

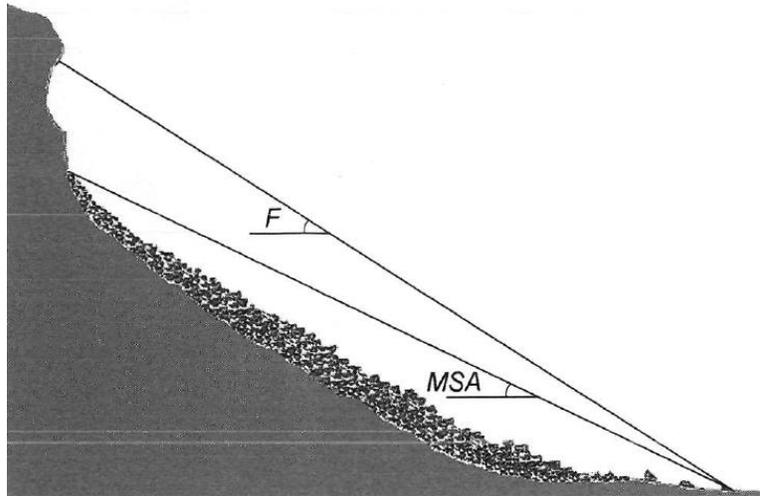


Figura 2.29 – The Fahrböschung (F) e o Minimum Shadow Angle (MSA) de encosta com presença de tálus (modificado de Meissl, 1998).

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os conceitos e classificações dos tipos de movimentos de massa, e as rupturas típicas de maciços rochosos, condicionadas primeiramente pelo grau de fraturamento do maciço e pela orientação e distribuição das descontinuidades em relação à encosta.

Apresenta também os fatores deflagradores dos movimentos e as medidas de estabilização de taludes rochosos, com ênfase na técnica das barreiras flexíveis, que correspondem aos dispositivos destinados a coletar e interromper o movimento de quedas de blocos que se desprendem do talude rochoso.

Para o entendimento e previsão dos movimentos de quedas de blocos rochosos, foram apresentados diversos métodos de análises, correspondentes aos ensaios experimentais de campo (*in situ*) e de laboratório, os métodos empíricos e os métodos de análises numéricos, destacando-se o programa de simulação de queda de blocos *RocFall* (*Rocscience*), cujo é um programa bidimensional com os blocos representados por pontos adimensionais de massa concentrada e que possibilita a obtenção das trajetórias, velocidades e energias dos blocos ao longo da encosta.

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA NUMÉRICO E CASO HISTÓRICO

3.1 INTRODUÇÃO

Em grande parte das encostas rochosas, naturais ou em corte, as quedas de blocos representam riscos sócio-econômicos consideráveis, envolvendo muitas vezes a possibilidade de vítimas fatais. Por essa razão, ao longo dos últimos anos foram desenvolvidos programas numéricos para simular esse fenômeno de forma a auxiliar projetos de medidas preventivas e de proteção.

Este capítulo apresenta a descrição do programa numérico *RocFall v.4.0*, que realiza simulações probabilísticas de queda de blocos.

Este capítulo apresenta, ainda, a descrição do caso histórico selecionado para estudo nesta pesquisa. O caso é referente ao Morro do Escalavrado, no município de Teresópolis/RJ, onde foram realizadas análises para a verificação da segurança da rodovia BR-116 cujo eixo passa na parte inferior da encosta (Nunes *et al.*, 2008).

3.2 PROGRAMA NUMÉRICO ROCFALL

O *RocFall (Rocsciense Inc)* é um programa computacional robusto e de fácil utilização (Figura 3.1), que realiza simulações probabilísticas de queda de blocos (Stevens, 1998). Deve-se mencionar que o programa considera o problema em duas dimensões, sendo necessário definir as seções transversais mais críticas da encosta e realizar um número significativo de análises para cada seção, obtendo-se assim um conjunto de trajetórias possíveis para cada seção crítica da encosta.

O *RocFall* utiliza o método de massa concentrada (*lumped mass*), onde os blocos são representados por pontos adimensionais, simulando a massa concentrada no centro de gravidade. Além de definir a trajetória de movimento dos blocos, o programa é capaz de definir a energia, velocidade e a altura do salto dos blocos ao longo da seção transversal da encosta. Igualmente, estima a distância máxima de deposição dos blocos, que representa um fator importante na determinação da segurança de infra-estruturas vizinhas.

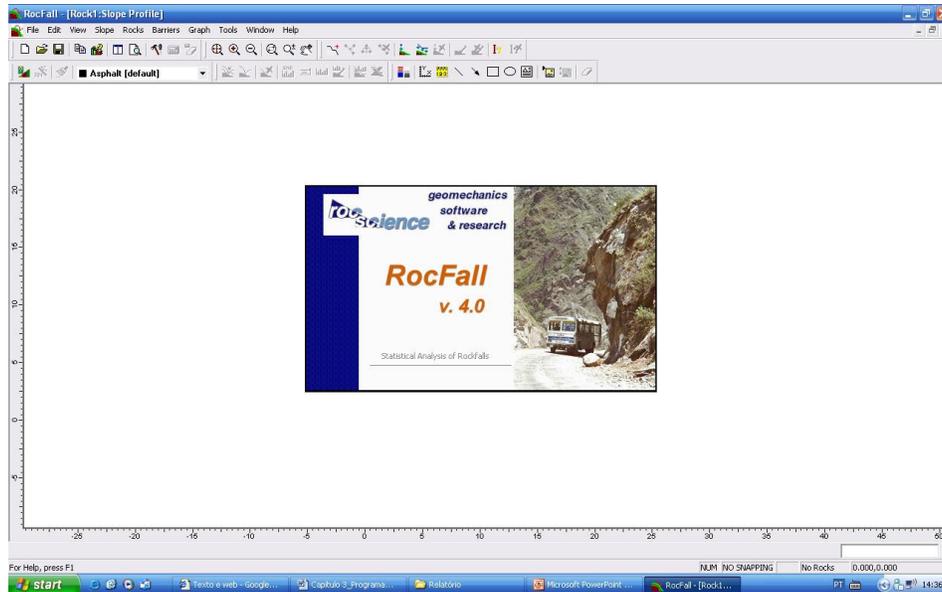


Figura 3.1 – Tela principal do programa RocFall v.4.0.

As análises são realizadas por meio de conceitos balísticos que utilizam as relações de força gravitacional, impulso inicial após cada colisão, velocidade e inclinação de seu vetor em relação à horizontal e as suas componentes paralelas e ortogonais ao declive no ponto de impacto. Desta forma, o modelo verifica a ocorrência ou não do choque e as condições de continuação do movimento do bloco.

A seção transversal a ser utilizada nas simulações de queda é definida por segmentos retos ligados a pontos de coordenadas x , y , levantados a partir de estudos topográficos realizados em campo. O programa permite que a seção seja desmembrada em segmentos de comportamentos geotécnicos distintos com diferentes valores paramétricos.

Os parâmetros referentes à superfície da seção são:

(i) Rugosidade: é um parâmetro usado para modelar variações locais na geometria do perfil da encosta. Devido ao fato do programa representar a seção transversal por linhas retas, a colisão de um bloco se dará sempre em uma mesma direção. Assim sendo, o ângulo de rugosidade implica em um desvio padrão no ângulo de inclinação da encosta, simulando as imperfeições presentes na superfície real da encosta. O valor é determinado pelo usuário com base nas características da encosta real e do tamanho e forma dos blocos instáveis por desprendimento da encosta. De acordo com

o tutorial avançado do programa, os valores típicos de rugosidade são geralmente pequenos, em torno de 0 a 5°. Por exemplo, um ângulo de rugosidade de 5° em um segmento da encosta com inclinação de 15° representa colisões dos blocos no segmento com inclinação variando entre 10 e 20°.

(ii) Ângulo de atrito: é um fator importante do movimento do bloco. Caso o segmento da encosta tenha inclinação maior que o ângulo de atrito determinado pelo usuário, o bloco situado naquele segmento continua em movimento. Caso contrário, ou seja, o ângulo de atrito é maior que a inclinação do segmento, o bloco tenderá ao repouso. O ângulo de atrito pode ser medido por meio de ensaios de laboratório e em ensaios de modelos reduzidos.

(iii) Coeficientes de restituição normal e tangencial: determina a parcela de energia do bloco que se dissipa na colisão com a superfície da encosta. Varia em função do material que compõe a superfície da encosta simulada. Além da energia, na colisão do bloco com a superfície, as velocidades normal e tangencial à inclinação são reduzidas pelos coeficientes K_n (coeficiente normal da restituição) e K_t (coeficiente tangencial da restituição). O valor de K varia entre 0 e 1. Se a superfície da encosta apresenta coeficiente de restituição igual a zero, o bloco pára no ato da colisão com a superfície (representa um material inelástico). Se a superfície da encosta apresenta coeficiente de restituição igual a 1, o bloco ao colidir com a superfície continua com a mesma velocidade e energia (representa um material perfeitamente elástico). Os valores dos coeficientes da restituição são determinantes nos resultados finais das trajetórias de queda de blocos, demandando grande atenção em sua determinação. Os coeficientes podem ser estimados por retro-análises, testes *in situ* ou em laboratório.

Em relação aos blocos rochosos, o programa permite que o usuário defina a posição inicial dos blocos de duas formas: (i) um único ponto “semeador”, ou seja, todos os blocos partem de um único ponto inicial, e (ii) uma linha “semeadora”, que representa a partida dos blocos uniformemente distribuídos ao longo deste intervalo determinado pela linha. O programa também permite a definição da massa do bloco e das velocidades linear (horizontal e vertical) e angular, iniciais do movimento.

Após a elaboração da seção, e a atribuição das características físicas do bloco e dos materiais na superfície do talude, o programa executa cálculos que determinam as

trajetórias de movimento dos blocos, tipos de movimentos realizados, alcance e energia de impacto dos blocos analisados (Stevens, 1998).

Uma análise típica utilizando o programa *RocFall* envolve as seguintes atividades:

- (i) Definição da geometria da encosta;
- (ii) Definição dos tipos de materiais da encosta;
- (iii) Definição dos trechos com características distintas;
- (iv) Definição dos blocos (localização, velocidade inicial, massa);
- (v) Processamento das trajetórias;
- (vi) Resultados correspondentes às trajetórias de movimento, velocidade, energia ao longo do movimento e pontos de chegada dos blocos instáveis.

3.2.1 Definição da Geometria

A definição do perfil geométrico da encosta é relativamente irrestrita, uma vez que qualquer perfil geométrico pode ser modelado. A definição do perfil é realizada inserindo as coordenadas (x,y) dos pontos notáveis (adquiridos a partir de mapas de relevo, topografia e curvas de nível determinados em campo). A Figura 3.2 ilustra um perfil genérico de encosta no programa *RocFall*.

Uma vez que a área em risco pode ser bastante extensa, o perfil bidimensional da encosta onde possivelmente ocorrerá a queda pode variar consideravelmente ao longo da sua extensão.

É importante notar que muitas vezes não é possível realizar um levantamento detalhado de toda a área. Desta forma, o engenheiro responsável pelas análises pode optar por um levantamento localizado de algumas seções transversais, com maior risco de queda de blocos.

A determinação acurada do perfil geométrico da encosta é recomendada, visto que a maioria das simulações de quedas de blocos é sensível a pequenas mudanças na geometria da encosta (Stevens, 1998).

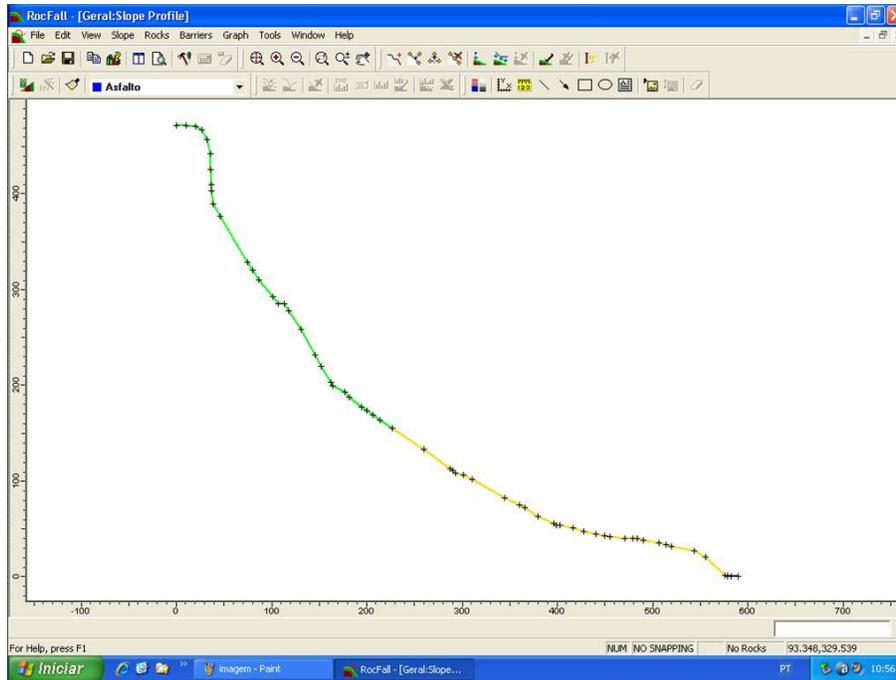


Figura 3.2 – Perfil transversal da encosta gerado no programa RocFall.

3.2.2 Definição dos Materiais e dos Trechos Distintos

A seção transversal da encosta geralmente não é homogênea. Os materiais da superfície (desde a crista até a base da encosta) podem variar consideravelmente em um pequeno trecho da seção. Isto resulta em variação dos valores de coeficiente de restituição normal (K_n), coeficiente de restituição tangencial (K_t), ângulo de atrito (ϕ) e rugosidade ao longo da encosta.

A Figura 3.3 apresenta a entrada típica de parâmetros dos materiais da superfície da encosta no programa *RocFall*.

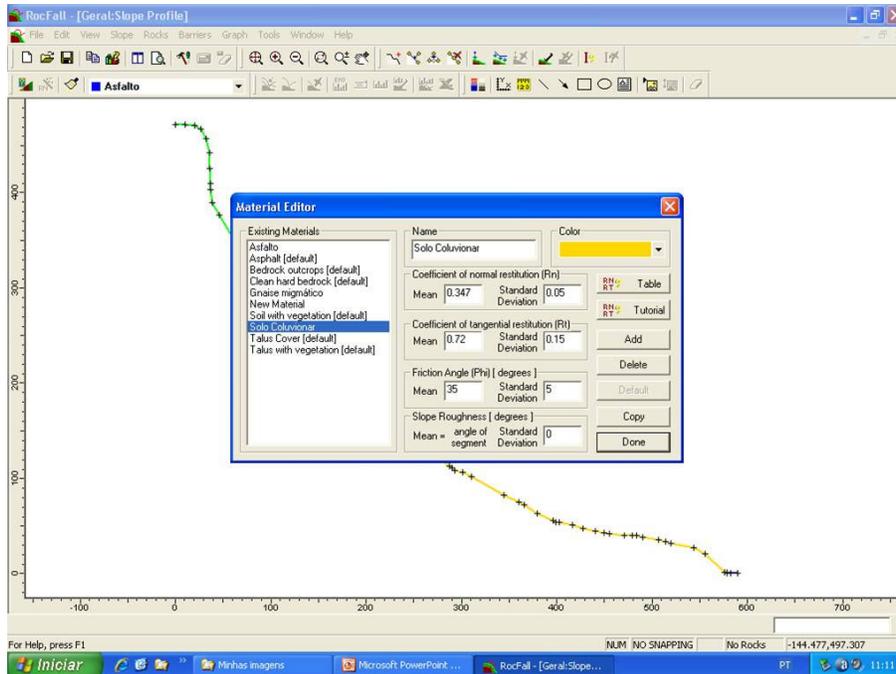


Figura 3.3 – Definição dos materiais da superfície da encosta.

Este programa oferece ao usuário uma tabela com diversos tipos de materiais com valores de parâmetros pré-definidos. Os valores típicos para o coeficiente de restituição normal (K_n) utilizados em análises de quedas de blocos variam geralmente entre 0,3 e 0,5. Os valores típicos utilizados para o coeficiente de restituição tangencial (K_t) variam entre 0,8 e 0,95. Geralmente esses valores são maiores em áreas compostas por superfícies em rocha sã ou asfalto, e menores em áreas de solo mole e com vegetação.

O algoritmo utilizado pelo programa é sensível a pequenas mudanças nos coeficientes de restituição da encosta. Por exemplo, um segmento do talude com K_n igual a 0,4 resulta em comportamento muito diferente da mesma encosta com K_n igual a 0,5 (Stevens, 1998). Portanto, a definição precisa dos coeficientes de restituição é essencial para a realização de uma análise realística.

Diferentemente do conceito de ângulo de atrito (ϕ), o qual a maioria dos técnicos têm grande familiaridade em selecionar valores, a estimativa dos coeficientes de restituição nem sempre é uma tarefa simples e rotineira.

A realização de uma retro-análise de algum evento de queda de bloco já ocorrido na área abordada é o melhor método para determinação dos coeficientes de restituição. Isso é possível com a coleta de dados referentes à massa do bloco, ponto de partida, localização dos impactos e alcance final. Neste caso, valores empíricos dos coeficientes de restituição são determinados pela trajetória de movimento, calculada pelo programa que foi capaz de reproduzir o mesmo comportamento de queda do bloco no campo. Este método não é capaz de determinar o valor exato dos parâmetros, entretanto oferece uma aproximação adequada que, associada à experiência do técnico, possibilita uma seleção mais realista dos parâmetros a serem utilizados nas análises de queda de bloco da área estudada.

3.2.3 Definição das Condições iniciais dos Blocos

Nesta etapa definem-se as condições iniciais do bloco, tais como localização, massa, velocidades horizontal, vertical e angular iniciais.

As encostas que apresentam risco de queda de bloco podem ter grande número de blocos soltos ao longo de todo perfil. Stevens (1998) reporta que possíveis variações na posição inicial do bloco analisado não influenciam significativamente a sua trajetória. Porém, as trajetórias dos blocos são muito influenciadas pelas propriedades dos materiais e geometria do perfil.

A determinação precisa da massa dos blocos é extremamente importante, uma vez que as barreiras são especificadas em unidades de energia. Naturalmente, dependendo das condições locais, uma pequena variação na determinação da massa do bloco pode representar uma grande variação na determinação da energia do bloco durante o movimento.

As velocidades iniciais horizontais, verticais e angulares de cada bloco (Figura 3.4) podem ser especificadas por um valor constante ou a partir de uma amostra aleatória de distribuição. Isto dependerá das condições locais da área estudada (por exemplo, se há ou não ocorrência de sismo).

A localização inicial dos blocos pode ser indicada em qualquer ponto do perfil transversal. Quando esta definição se dá por somente um único ponto de partida, todos os blocos começarão a trajetória a partir do mesmo local definido. Este caso se

aplica quando se tem a confirmação da localização exata do bloco potencialmente instável em campo.

Quando não se têm a posição exata do bloco, mas sim um intervalo provável de onde esses blocos possam partir, pode-se determinar um trecho do perfil no qual os blocos poderão começar a trajetória de forma aleatória. Esta ferramenta é definida pelo programa como uma “linha semeadora”. A posição inicial de cada bloco é distribuída uniformemente ao longo da “linha semeadora” definida pelo usuário.

Independentes de quantos pontos isolados ou quantas “linhas semeadoras” de partidas, qualquer combinação pode ser adicionada na simulação, pois os blocos irão partir de quaisquer dos pontos de forma uniforme.

Quando houver mais de uma linha semeadora na modelagem, o usuário do programa pode determinar se os blocos partem de forma uniforme em qualquer uma das linhas (com mesma probabilidade para todos) ou se a distribuição de partida dos blocos será proporcional ao comprimento da linha semeadora (ou seja, mais blocos partindo da linha semeadora de maior comprimento).

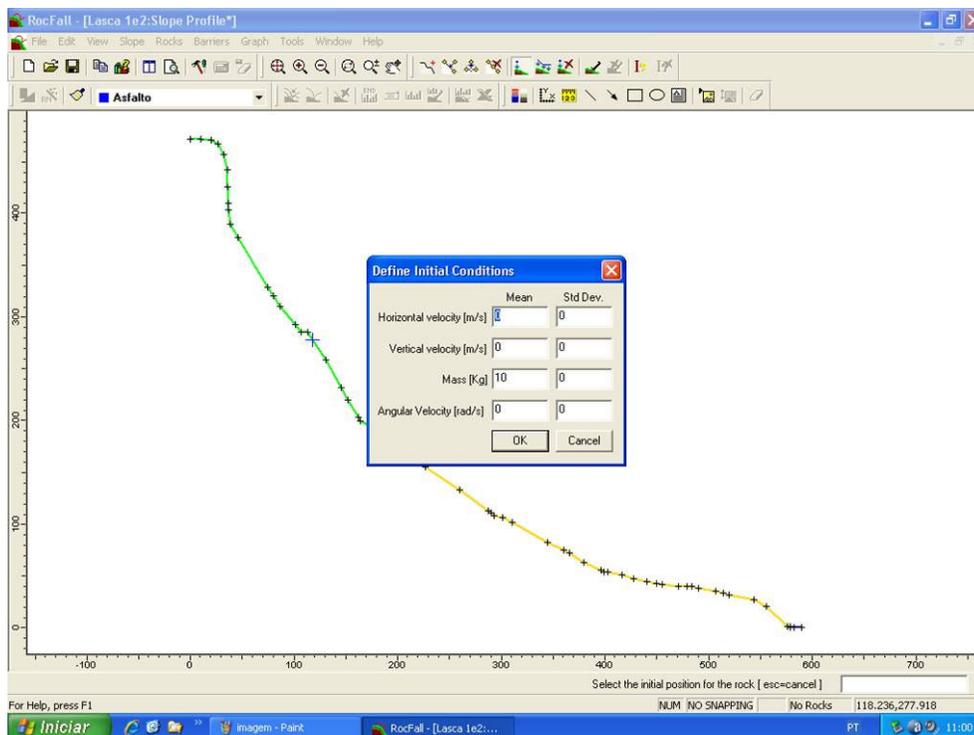


Figura 3.4 – Definição das condições iniciais dos blocos.

3.2.4 Definição das Barreiras

A colocação das barreiras na modelagem é uma poderosa ferramenta que o programa disponibiliza auxiliando o usuário na determinação e verificação das medidas preventivas que podem ser aplicadas no campo.

No *RocFall*, as barreiras são representadas por um segmento reto com uma das extremidades em contato com o perfil transversal. Não há um limite quanto ao número de barreiras colocadas numa mesma seção transversal, desde que elas não se cruzem umas com as outras.

Através de uma caixa de diálogo do programa, o usuário pode definir as propriedades da barreira determinando os valores dos coeficientes de restituição e a sua capacidade em Joules (J).

As barreiras podem ser definidas como (Figura 3.5):

- (i) Perfeitamente inelásticas (coeficientes de restituição igual a zero);
- (ii) Perfeitamente elásticas (coeficientes de restituição igual a 1);
- (iii) Elástica inelásticas (coeficientes de restituição variando entre 0 e 1).

Além disso, pode-se selecionar barreiras com capacidade de carga infinita, ou seja, capazes de absorver blocos com qualquer energia cinética.

Quando a barreira é definida como perfeitamente inelástica, todos os blocos que a atingem terão seus movimentos paralisados por completo, ou seja, toda energia cinética do bloco será absorvida pela barreira e o bloco simplesmente irá repousar na base da barreira.

Ao contrário, quando barreira é definida como perfeitamente elástica, ela não paralisa o movimento por completo, pois absorve apenas parte da energia cinética total do bloco. Desta forma ele pode ser arremessado para jusante da encosta e, posteriormente, entrar em repouso em um ponto qualquer da mesma.

Ao se atribuir um valor definido para a capacidade da barreira, qualquer bloco que a atinja com uma energia cinética maior do que sua capacidade, o mesmo não será

retido. A passagem do bloco pela barreira reduz sua energia de movimento equivalente à capacidade da barreira perfurada.

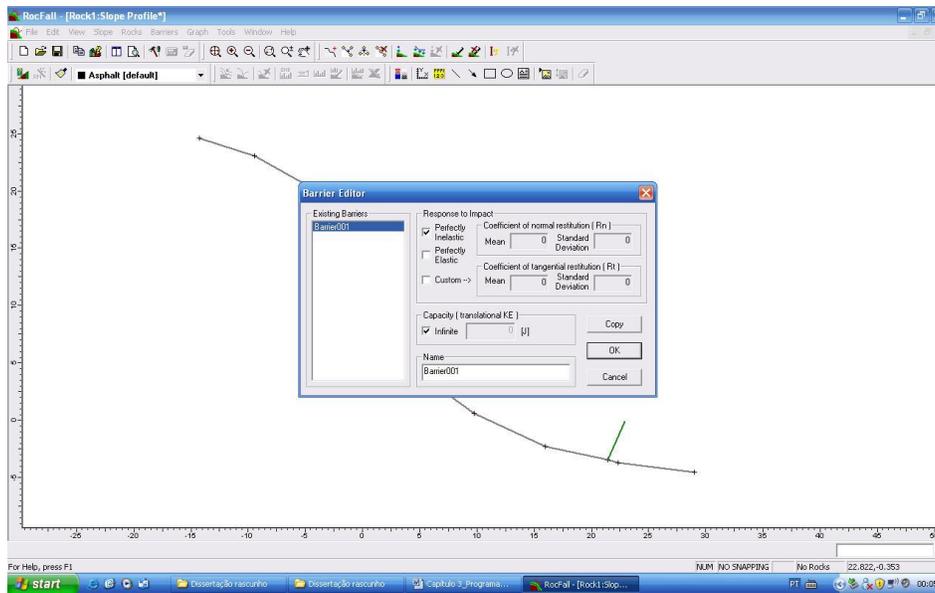


Figura 3.5 – Definição do tipo e parâmetros da barreira.

3.2.5 Trajetória de Movimento

Apesar de negligenciar os efeitos referentes ao tamanho e forma do bloco, o modelo de cálculo adotado pelo *RocFall* para a realização das simulações é robusto. Ainda tem a vantagem de ser extremamente rápido, permitindo ao usuário, a realização de análises de sensibilidade dos resultados obtidos (Stevens, 1998).

O programa admite o controle do número de blocos, a consideração da velocidade angular, a escolha do tipo de análises randômicas ou pseudo-randômicas e o número de intervalos para amostragem de dados ao longo da trajetória de movimento do bloco (Figura 3.6).

A definição do número de intervalos para amostragem determina a frequência com que os dados relativos à energia cinética, velocidade e altura do bloco em relação à superfície serão coletados. Desta forma, obtém-se o comportamento detalhado do bloco ao longo da trajetória de movimento.

O *RocFall* realiza análises randômicas para as trajetórias de blocos, ou seja, em cada cálculo executado pelo programa ele fornece trajetórias distintas. No entanto, caso o usuário deseje realizar uma amostragem de dados constantes, o programa permite análises pseudo-randômicas. Este tipo de análise gera trajetórias constantes para cada estudo realizado, sendo bastante útil quando se quer analisar a influência de parâmetros isolados na trajetória dos blocos.

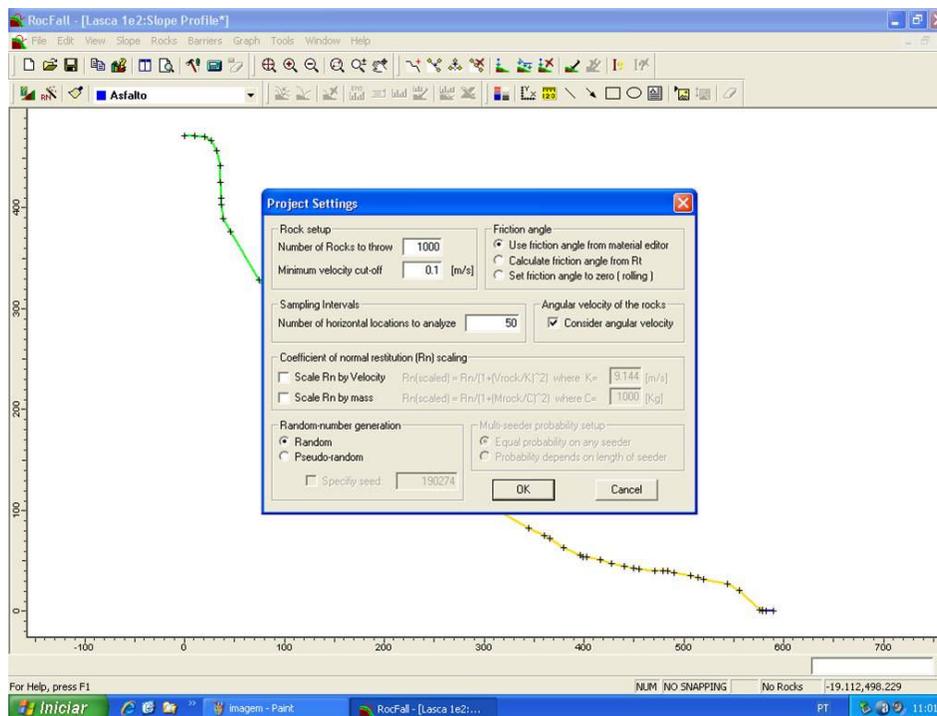


Figura 3.6 – Definição dos condicionantes para o cálculo das trajetórias.

3.2.6 Resultados

Os resultados fornecidos pelo *RocFall* oferecem uma visão geral das características referentes ao movimento dos blocos. Isto permite a definição de medidas de proteção, auxiliando principalmente no posicionamento mais eficiente das barreiras de impacto.

O programa disponibiliza gráficos referentes à altura do salto, energia cinética total, energia cinética translacional, energia cinética rotacional, velocidade translacional e velocidade rotacional do bloco ao longo da superfície.

A localização final do bloco é, indiscutivelmente, a informação mais importante fornecida pelo programa (Figura 3.7).

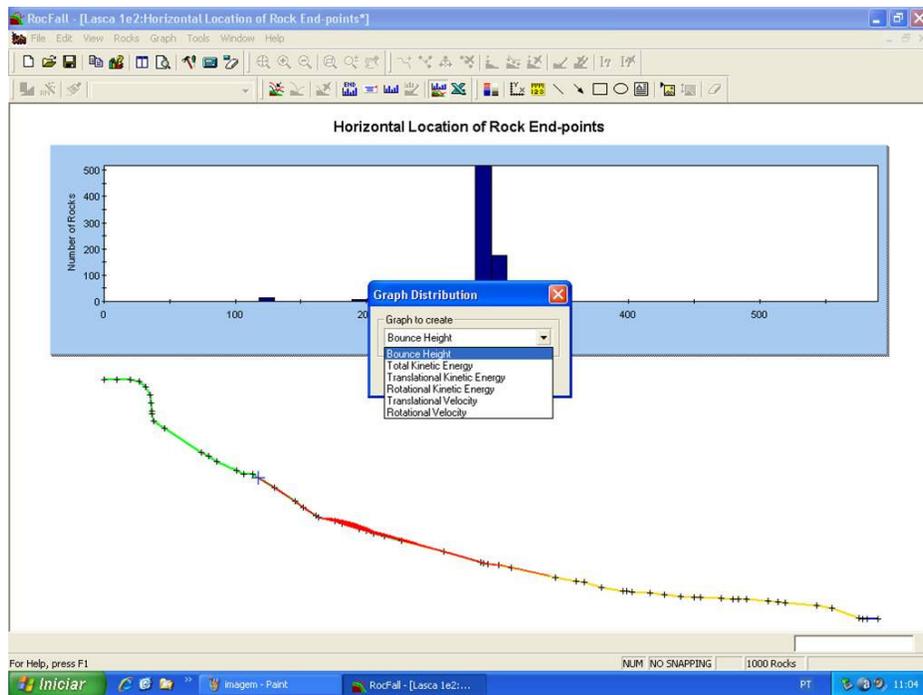


Figura 3.7 – Trajetórias e gráfico com distribuição dos pontos de chegada dos blocos.

Os dados necessários para geração dos gráficos são coletados por seções verticais “invisíveis”. O número de seções igualmente espaçadas sobre a superfície é determinado pelo usuário.

Quando o usuário deseja ter informações referentes ao impacto dos blocos na barreira, o programa fornece os seguintes gráficos de distribuição:

- (i) Coordenadas x, y do ponto de impacto do bloco;
- (ii) Energia cinética total;
- (iii) Energia cinética translacional;
- (iv) Energia cinética rotacional;
- (v) Velocidade translacional;
- (vi) Velocidade rotacional.

Caso o usuário deseje fazer a coleta de dados em um ponto específico distinto do ponto de impacto, podem ser instalados coletores de dados naquele ponto, permitindo assim a obtenção dos gráficos de distribuição relativos ao ponto escolhido.

3.3 APLICAÇÃO AO CASO HISTÓRICO AO MORRO DO ESCALAVRADO

3.3.1 Descrição da Área

O Morro do Escalavrado, com 1420m de altura, localiza-se no interior do Parque Nacional da Serra dos Órgãos e nas proximidades do km 96,5 da Rodovia BR-116/ RJ (Rio - Teresópolis - Além Paraíba/MG), no Estado do Rio de Janeiro (Figura 3.8). A região de estudo corresponde a uma área retangular cujas dimensões aproximadas dos lados são 550m a leste, 520m a oeste, 470m ao norte e 320m ao sul. Ao nível da rodovia BR-116, as cotas do Escalavrado variam de 506 a 521m, enquanto ao norte, variam de 695 a 770m (Nunes *et al.*, 2008).

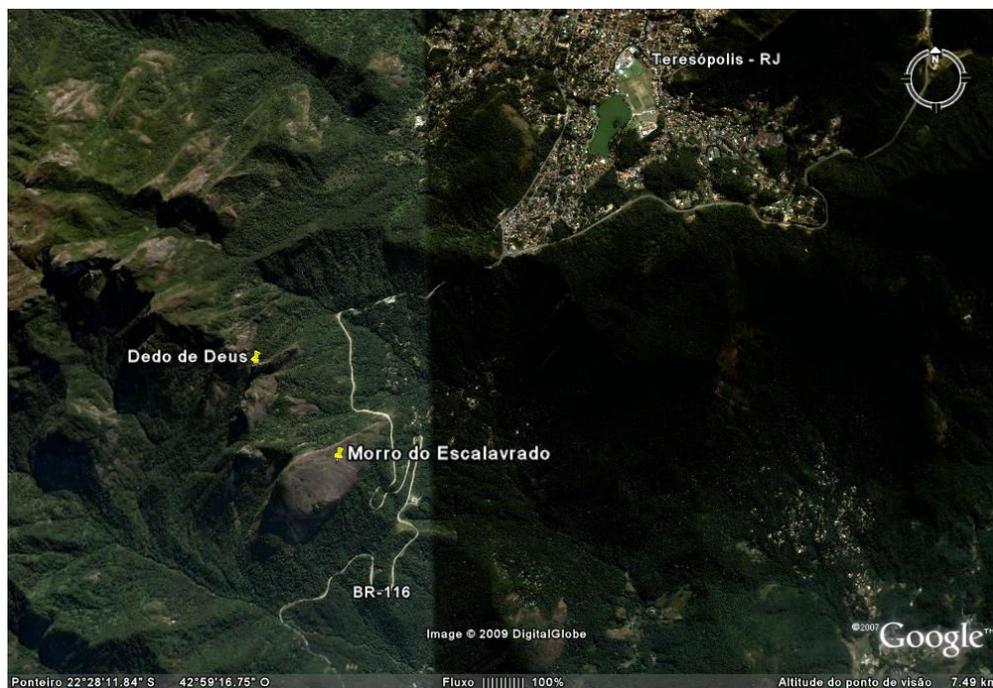


Figura 3.8 – Localização do Morro do Escalavrado.

A Figura 3.9 apresenta uma vista geral do Morro do Escalavrado na região mais crítica em relação à chegada de blocos instáveis na Rodovia BR-116.

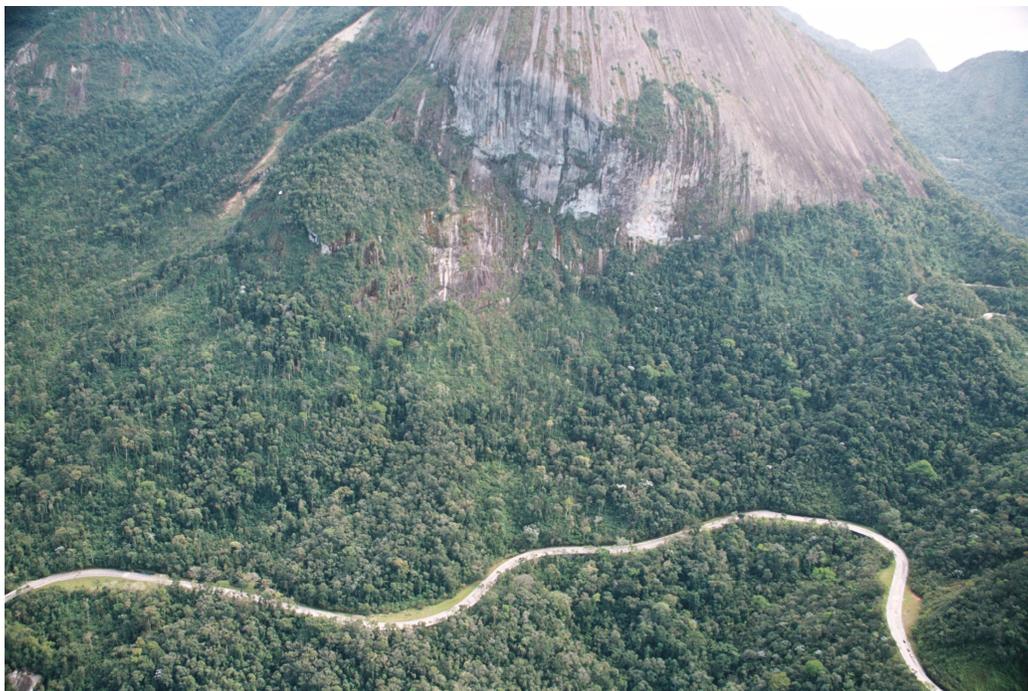


Figura 3.9 – Visão geral da área de estudo do Morro do Escalavrado.

3.3.2 Mapeamento Geológico-Geotécnico

O Morro do Escalavrado é constituído predominantemente por granito intrusivo, claro e de textura fina. Apresenta enclaves anfibolíticos em algumas partes do contato com rochas mais antigas que sofreram metamorfismo.

As investigações geológico-geotécnicas realizadas na área indicam que o maciço rochoso apresenta lascas e blocos passíveis de desprendimentos da parede verticalizada do Morro do Escalavrado, além de blocos soltos depositados na parte inferior da encosta (Figura 3.10). Estas condições sugerem a possibilidade de movimentos, predominantemente do tipo queda e tombamento de blocos e lascas. Estas rupturas são condicionadas à perda das propriedades de resistência do material, naturalmente decorrentes da ação de intemperismos físico e químico nas superfícies de contacto e discontinuidades das lascas e blocos rochosos.

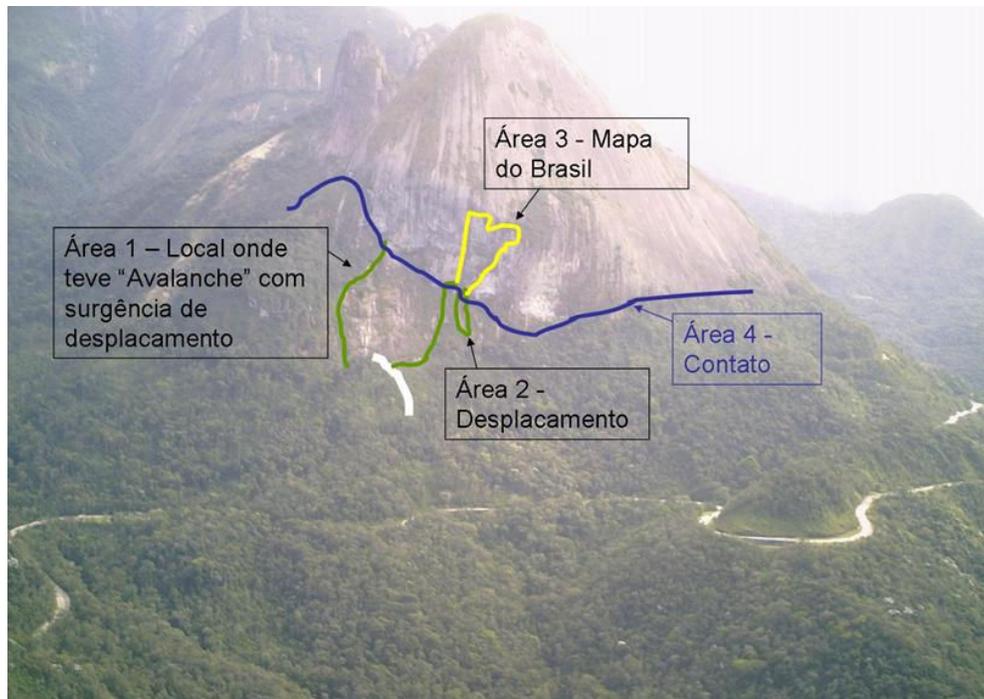


Figura 3.10 – Áreas críticas do Morro do Escalavrado em relação a BR-116 (Nunes *et al.*, 2008).

Devido à proximidade da Rodovia BR-116 em relação ao Morro do Escalavrado, foi realizado um mapeamento detalhado das lascas e blocos rochosos com potencial de ruptura, a fim de subsidiar as análises de trajetória e alcance destes materiais em relação à pista. As Figuras 3.11 a 3.13 ilustram as lascas 1 a 28, juntamente com suas geometrias, identificadas no Morro do Escalavrado.



Figura 3.11 – Identificação das lascas 1 a 16 (Nunes *et al.*, 2008).

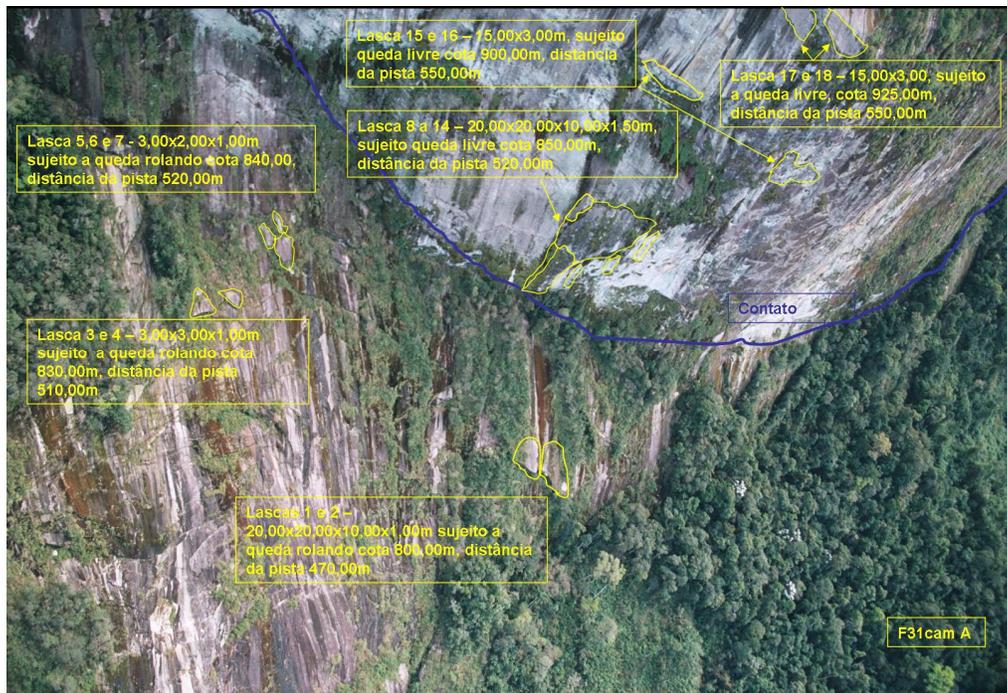


Figura 3.12 – Identificação das lascas 1 a 18 (Nunes *et al.*, 2008).

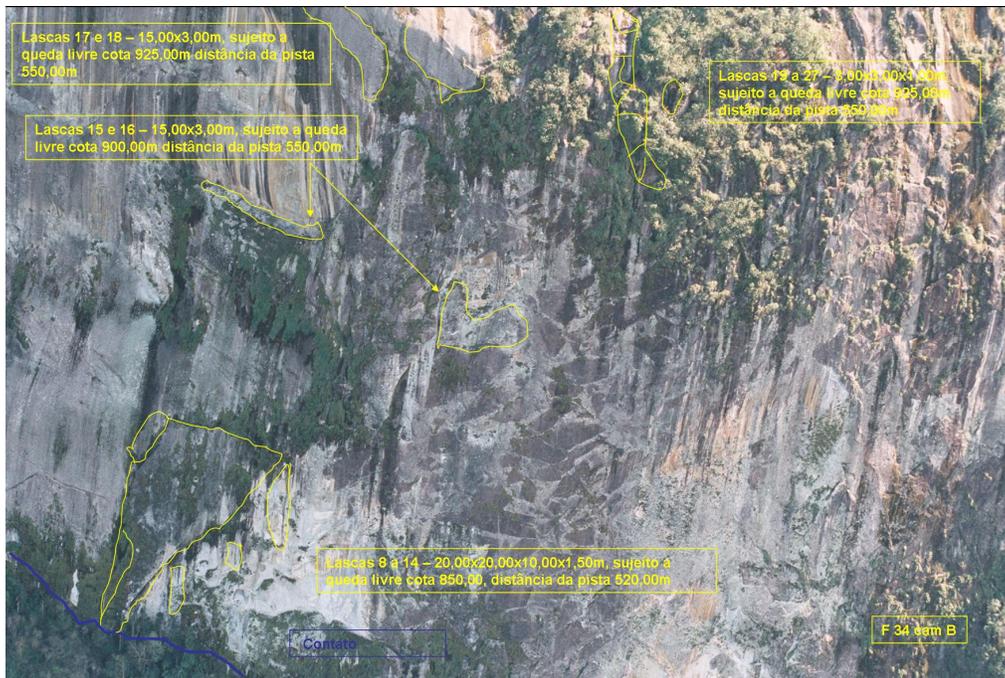


Figura 3.13 – Identificação das lascas 8 a 28 (Nunes *et al.*, 2008).

A Tabela 3.1 resume as informações sobre as dimensões de cada lasca, além das cotas e distâncias (em projeção horizontal) da pista da BR-116. As lascas 1, 2 e 8 a 14 apresentam uma geometria em forma retangular irregular. As lascas 3 a 7 e 19 a 28 são aproximadamente triangulares, enquanto as lascas 15 a 18 se aproximam de retângulos regulares.

Tabela 3.1 – Características geométricas das lascas.

Lascas	Dimensões frontais (m)	Cota (m)	Distância da pista (m)
1 e 2	20 x 10 x 1	800	470
3 e 4	3 x 3 x 1	830	510
5, 6 e 7	3 x 2 x 1	840	520
8 a 14	20 x 10 x 1	850	520
15 e 16	15 x 3	900	550
17 e 18	15 x 3	925	550
19 a 28	3 x 3 x 1	925	650

Observação: Distância da pista definida em projeção horizontal

3.3.3 Modelo adotado por Nunes et al. (2008)

As análises de trajetória e alcance das lascas e blocos foram realizadas utilizando a seção transversal crítica da encosta do Morro do Escalavrado (Figura 3.14). A encosta é constituída por um paredão vertical de granito seguido por face rochosa de gnaíse migmatítico e, próximo ao sopé, ocorre uma camada de solo coluvionar de espessura variável com blocos rochosos soltos. Consideraram-se as lascas 1 a 28 ainda fixadas na região superior da encosta com seus respectivos volumes, estimados em função da geometria.

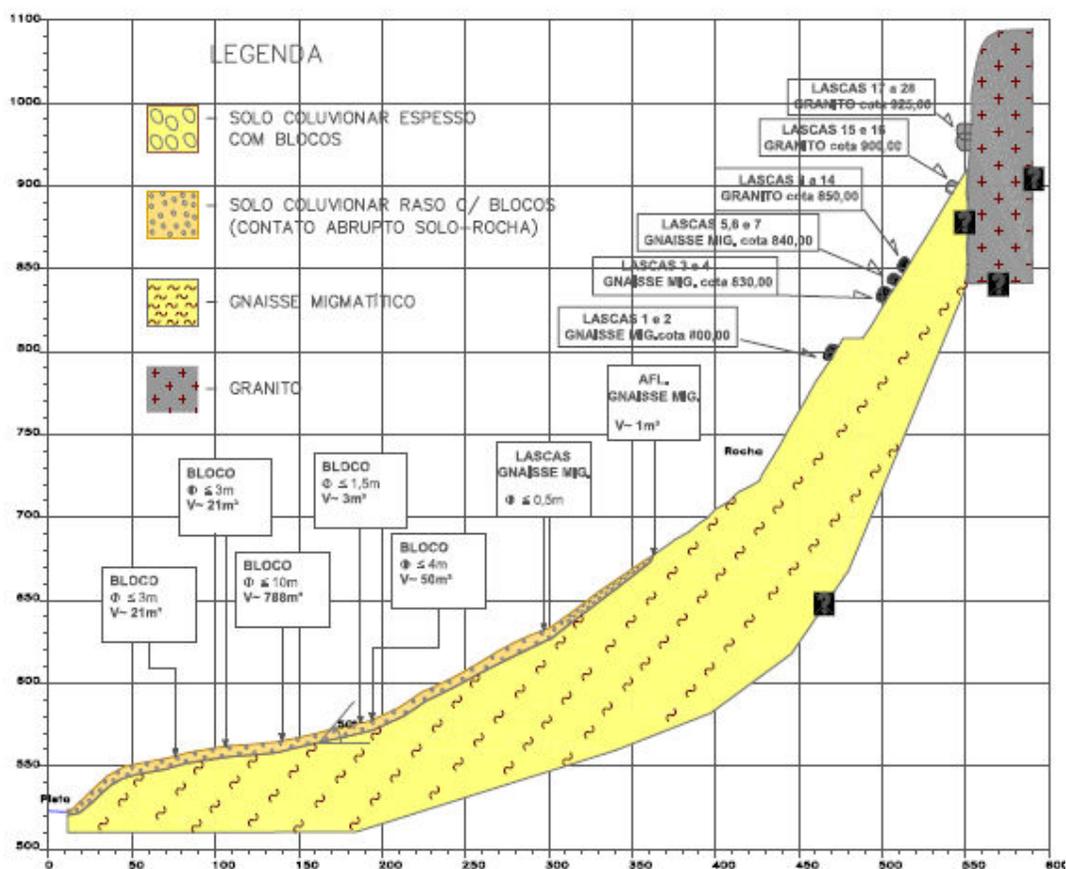


Figura 3.14 – Seção transversal do Morro do Escalavrado adotada nas análises (Nunes et al., 2008).

Nunes et al. (2008) realizaram análises com programa *RocFall v4.0 - Rocscience*, adotando critérios severos e os mais conservadores relativos às condições do Morro do Escalavrado. Os blocos e lascas foram considerados em ruptura iminente com início de movimento conforme a posição definida na Figura 3.14 e com velocidade

inicial de partida igual a 1m/s. Os pesos foram calculados através dos volumes indicados pela investigação *in situ* (Figuras 3.11 a 3.13 e Tabela 3.1) e peso específico de 27 kN/m³. Assumiu-se que os blocos e lascas apresentavam a forma geométrica mais crítica correspondente à ausência de cantos vivos, aproximando-se de geometrias ovóides e esféricas.

Em relação à encosta rochosa, considerou-se a seção transversal da Figura 3.14. Os valores de coeficientes de restituição normal e tangencial foram selecionados por Nunes et al. (2008) através de indicações encontradas na literatura.

Na região superior do Morro do Escalavrado, o material foi admitido variar de rocha sã sem recobrimentos vegetais e sem blocos à rocha sã com depósito de blocos e lascas. Os coeficientes de restituição normal e tangencial variaram de 0,35 a 0,53 e 0,83 a 0,99, respectivamente. O ângulo de atrito foi adotado igual a 45° com desvio padrão de 5°. Portanto, ele variou entre 40 e 50°, correspondendo a diferentes graus de alteração do maciço rochoso.

Na região inferior o material foi considerado variar da condição de rocha sã, rocha alterada com recobrimento vegetal até a condição de rocha com recobrimento de tálus com vegetação. Os coeficientes de restituição normal e tangencial variaram de 0,30 a 0,37 e 0,53 a 0,87, respectivamente. O ângulo de atrito foi adotado igual a 30° com desvio padrão de 5°, variando entre 25 e 35°, correspondendo a espessuras variadas de solo e quantidades diversas de blocos. Em todas as análises realizadas por Nunes et al. (2008), a superfície rochosa do Morro do Escalavrado foi considerada lisa e planar com rugosidade nula.

A quantidade de trajetórias adotada nas análises de queda variou entre 3000 e 10000 para cada tipo de bloco/lasca da seção.

3.3.4 Trajetórias Previstas

Os resultados das análises realizadas por NUNES et al. (2008) com o programa *RocFall*, simulando a queda das lascas 1 a 28, são apresentados:

- (i) Gráficos com as possíveis trajetórias de queda;

(ii) Gráficos correspondentes aos pontos de partida (círculo negro) e os possíveis pontos de chegada (círculos azuis) das lascas e envoltórias da quantidade de blocos ao longo da encosta em vermelho.

As Figuras 3.15 a 3.21 correspondem, respectivamente, às análises das lascas 5 a 7, lascas 1 e 2, lascas 3 e 4, lascas 8 a 14, lascas 15 e 16 e lascas 17 a 28.

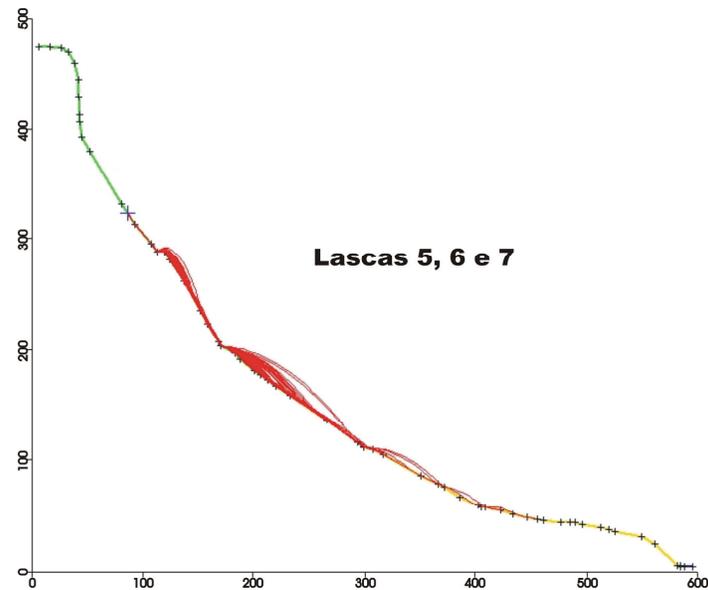


Figura 3.15 – Trajetórias de queda das lascas 5, 6 e 7 (Nunes *et al.*, 2008).

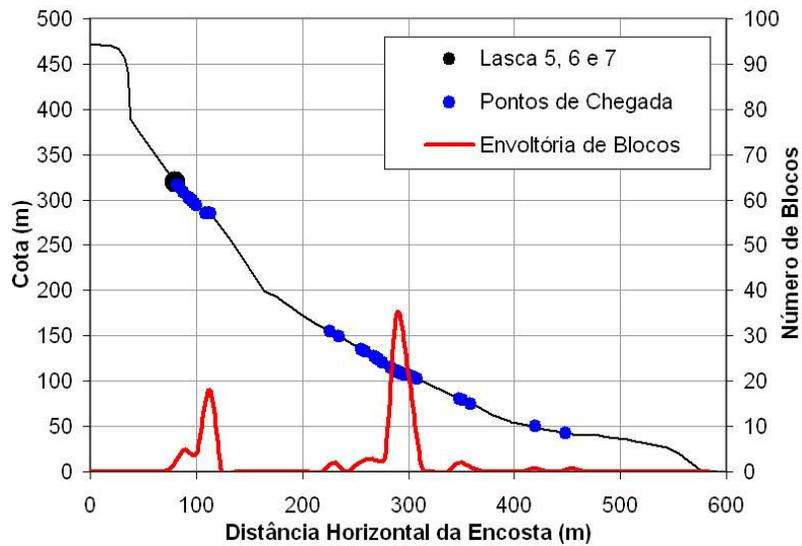


Figura 3.16 – Envoltória de alcance das lascas 5, 6 e 7 após as quedas (Nunes *et al.*, 2008).

As lascas 5, 6 e 7 apresentam movimentos com quedas livres e 3 repiques na encosta até a completa parada (Figura 3.15). A envoltória de alcance de lascas mostra que cerca de 40% das lascas alcançam uma distância horizontal de 290m da pista da BR-116 e somente 1% se aproxima da estrada, parando a uma distância confortável de 120m (Figura 3.16).

As Figuras 3.17 a 3.21 correspondem, respectivamente, às envoltórias de alcance obtidas do estudo das lascas 1 e 2, lascas 3 e 4, lascas 8 a 14, lascas 15 e 16 e lascas 17 a 28.

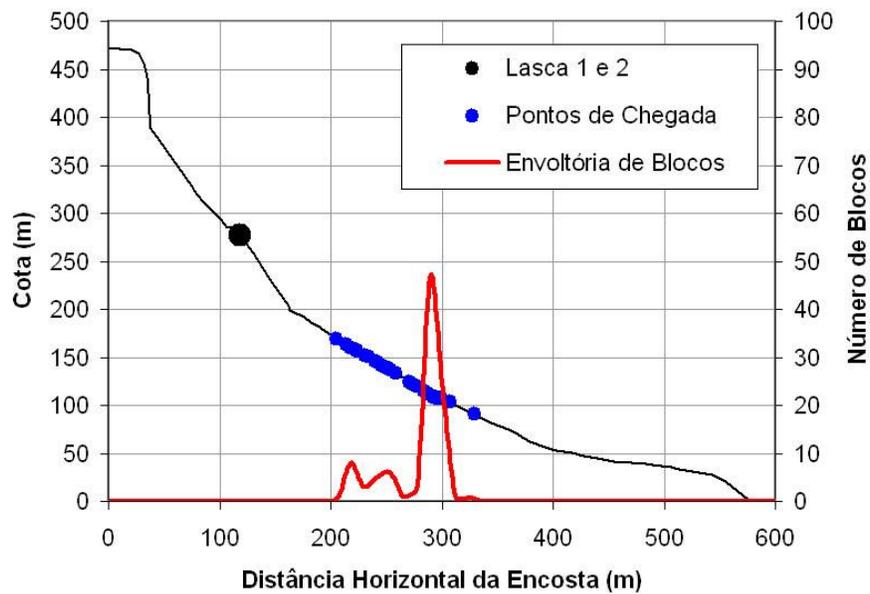


Figura 3.17 – Envoltória de alcance das lascas 1 e 2 após as quedas (Nunes *et al.*, 2008).

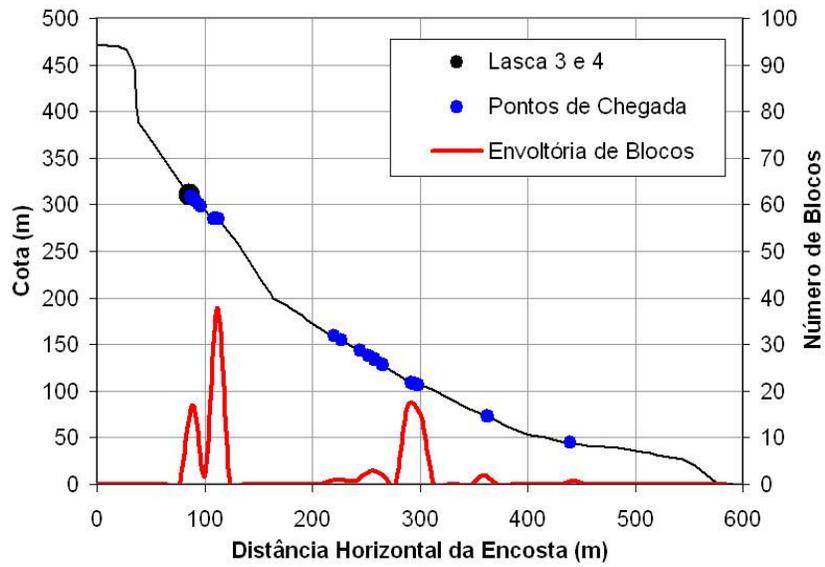


Figura 3.18 – Envoltória de alcance das lascas 3 e 4 após as quedas (Nunes *et al.*, 2008).

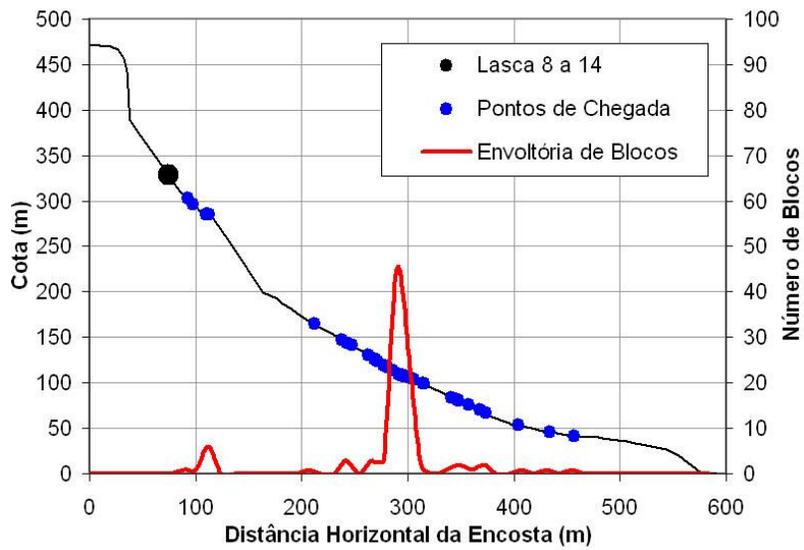


Figura 3.19 – Envoltória de alcance das lascas 8 e 14 após as quedas (Nunes *et al.*, 2008).

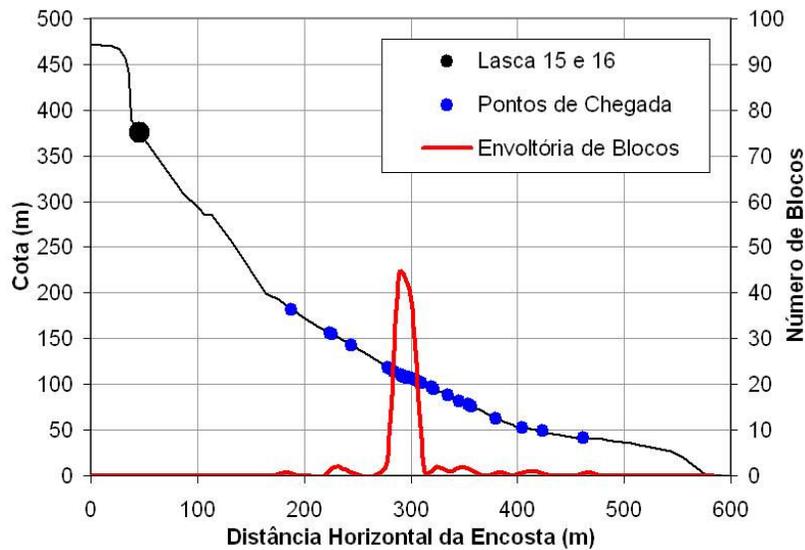


Figura 3.20 – Envoltória de alcance das lascas 15 e 16 após as quedas (Nunes *et al.*, 2008).

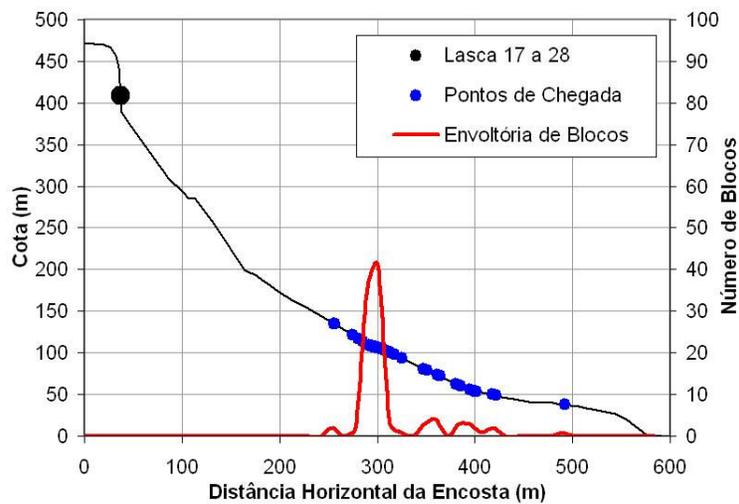


Figura 3.21 – Envoltória de alcance das lascas 17 a 28 após as quedas (Nunes *et al.*, 2008).

A Tabela 3.2 resume os resultados apresentados nas Figuras 3.16 a 3.21. O peso da lasca corresponde ao valor calculado com as dimensões estimadas e peso específico de 27kN/m^3 , admitido um desvio padrão de 10%. Os trechos de chegada e de acúmulo das lascas são referenciados à distância horizontal da encosta, a partir da crista do Morro do Escalvrado.

Tabela 3.2 – Resultados das análises de trajetórias de queda de lascas (Nunes *et al.* 2008).

Lascas	Peso (kN)	Trecho de chegada (m)	Trecho de acúmulo (m)
1 e 2	1620	200 – 310	280 - 310
3 e 4	25	70 – 400	80 – 120 280 – 305
5 a 7	16	70 – 450	80 – 115 280 – 305
8 a 14	1620	90 – 460	100 – 110 275 – 310
15 e 16	122	190 – 460	280 – 305
17 a 28	122	250 – 490	280 – 315

Obs.: Os trechos de chegada e acúmulo de lascas são referenciados em distância horizontal a partir da crista do Escalavrado.

O trecho de acúmulo de blocos corresponde à região da encosta em projeção horizontal que acolhe um número de blocos igual ou superior a 10% dos blocos lançados (Nunes *et al.*, 2008).

Observa-se na Tabela 3.2 que, em todas as situações analisadas por Nunes *et al.* (2008), nenhuma lasca atingiu a vizinhança da pista da BR-116. A menor distância horizontal entre um ponto de chegada de uma lasca e a pista é de 100m (Figura 3.21). Ressalta-se ainda que este resultado corresponde a 1% de todas as trajetórias possíveis das lascas analisadas.

As envoltórias de alcance das lascas indicaram que o alcance médio da grande maioria das lascas é de 290m a partir da projeção horizontal da crista da encosta. Isto significa uma distância horizontal da pista da BR-116 de cerca de 300m, indicando uma reduzida possibilidade de impacto de uma lasca na pista da BR-116.

Estas análises mostraram que a rodovia pode ser considerada segura em relação à queda de lascas, sem exigir a execução de qualquer medida de convivência tal como o emprego de barreiras flexíveis, muros de impacto ou valas e trincheiras de contenção. De fato, a região inferior do Morro do Escalavrado aparenta funcionar como uma bacia de dissipação de energia cinética da lasca, além de funcionar como região de coleta das lascas em movimento. Isto se comprova pela grande quantidade de blocos mapeados nesta região (Nunes *et al.*, 2008).

Na região inferior do Morro do Escalavrado encontram-se blocos e lascas dispersos em um manto coluvial. Estes materiais são, muito provavelmente, o resultado de quedas de lascas em tempos passados. Ressalta-se que a região de depósito natural destes blocos coincide com a área de chegada das lascas 1 a 28, analisadas probabilisticamente com o programa *RocFall*. Em função da cobertura de solo, presença de vegetação e forma e peso dos blocos nesta área, as análises de queda não indicam qualquer tipo de movimentação.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o programa numérico *RocFall v.4.0*, com suas características e principais resultados que auxiliam o projeto de dispositivos de proteção contra impactos em infra-estruturas.

O *RocFall* é um programa bidimensional que utiliza a seção transversal da encosta, o que torna a análise mais rápida e simples. O programa considera o bloco (adimensional) com massa concentrada no centro de gravidade. Uma desvantagem do modelo de massa concentrada é a impossibilidade de simular movimento do tipo rolamento, visto que a forma e o volume do bloco não são considerados.

Outra vantagem do programa é permitir a avaliação de barreiras flexíveis com altura, inclinação, rigidez e capacidade determinadas pelo usuário. Como resultados, o programa é capaz de definir a trajetória de movimento, alcance e energia de impacto dos blocos analisados.

Este capítulo apresentou também a descrição do caso histórico selecionado para estudo nesta pesquisa. O caso de NUNES *et al.* (2008) correspondente ao Morro do Escalavrado, no município de Teresópolis/RJ, onde foram realizadas análises para a

verificação da segurança da rodovia BR-116, cujo eixo passa na parte inferior da encosta.

Os dados e parâmetros do Morro do Escalavrado foram selecionados para o desenvolvimento deste estudo cujo objetivo é observar a influência de parâmetros específicos nas análises de simulação da trajetória de queda de blocos por meio do programa *RocFall*.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISES NUMÉRICAS

4.1 INTRODUÇÃO

Visando observar a influência de parâmetros específicos nas análises de simulação da trajetória de queda de blocos por meio do programa *RocFall*, foram realizadas análises paramétricas da seção transversal mais crítica do Morro do Escalavrado, no Município de Teresópolis / RJ.

Este capítulo apresenta a metodologia de estudo empregada, o modelo básico adotado nas análises e os resultados obtidos através do programa numérico *RocFall*. Apresenta também a análise dos resultados dos estudos paramétricos, indicando o grau de influência de cada parâmetros, além da influência do número total de blocos adotados para a simulação das trajetórias de queda.

4.2 METODOLOGIA DE ESTUDO

O estudo paramétrico foi realizado em duas fases. Primeiramente, de modo a observar o comportamento e a influência do coeficiente de restituição, ângulo de atrito, rugosidade e velocidade inicial nas trajetórias dos blocos simulados, foram realizadas análises com a variação progressiva de um único parâmetro, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Nestas análises foram adotados três blocos distintos, partindo do mesmo ponto da encosta: (i) Bloco 2 correspondendo ao bloco real referente às lascas 5, 6 e 7 do Morro do Escalavrado, com massa igual a 16.200 kg; (ii) Bloco 1 com massa 10 vezes menor que o bloco real; (iii) Bloco 3 com massa 10 vezes maior que o bloco real. A utilização de blocos fictícios (Blocos 1 e 3) possibilitou uma abordagem abrangente quanto à ordem de grandeza das lascas presentes no Morro do Escalavrado.

Na segunda fase do estudo, a fim de verificar a influência do número de blocos na simulação das trajetórias de queda, foram realizadas análises paramétricas adotando-se o Bloco 2 (16.200 kg). Foram consideradas simulações com 100, 1.000, e 10.000 blocos para as análises de trajetórias. Considerou-se também a variação progressiva de um único parâmetro com os demais constantes, conforme adotado na primeira fase do estudo.

A Figura 4.1 apresenta um esquema que mostra a metodologia empregada no estudo. Utilizando os Blocos 1, 2 e 3, foram realizadas as análises com a variação progressiva de um único parâmetro, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Utilizando somente o bloco original (Bloco 2), foram realizadas análises com a variação progressiva dos parâmetros selecionados nas simulações anteriores, considerando 100, 1.000 e 10.000 trajetórias de bloco. Este estudo adotou para comparação os resultados obtidos nas simulações de queda do programa *RocFall*, sendo: (i) E_{max} , máxima energia cinética total; (ii) X_{max} , posição do ponto de máxima energia; (iii) X_f , posição do intervalo de máxima deposição de blocos; (iv) #blocos, número de blocos depositados no intervalo determinado.

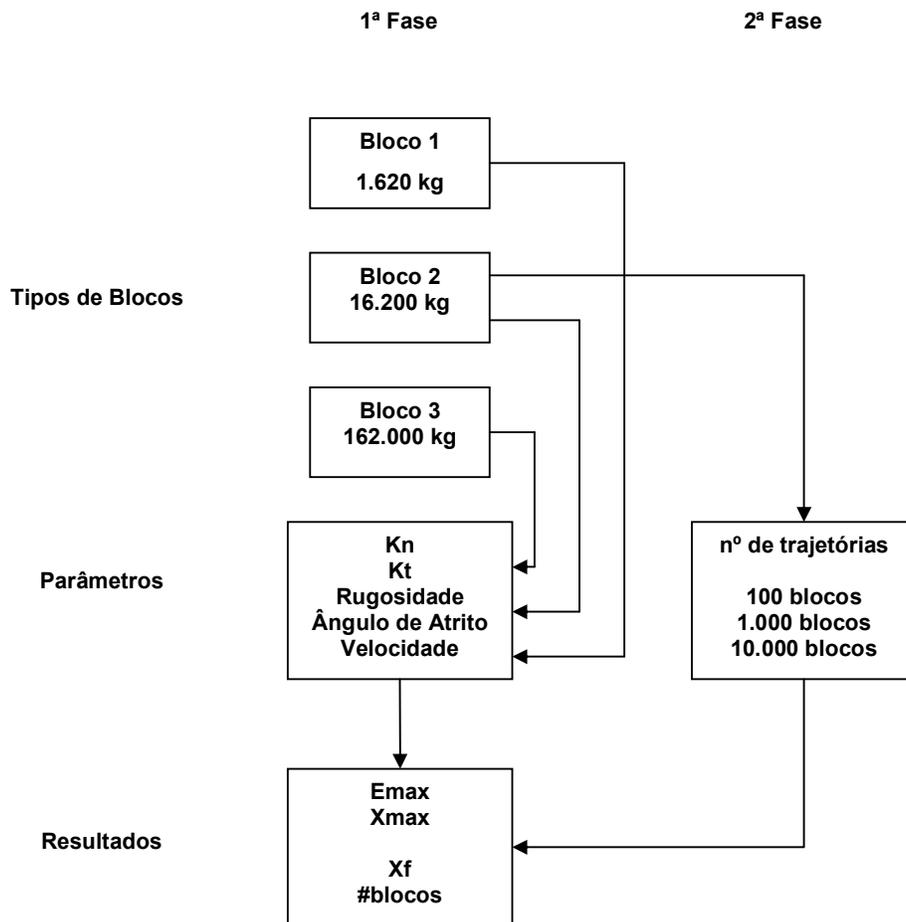


Figura 4.1 – Esquema da metodologia adotada para o estudo paramétrico.

Além das trajetórias de queda dos blocos na seção transversal da encosta, o programa *RocFall* permite obter gráficos com informações do movimento do bloco ao longo da superfície. Os gráficos referentes à posição, energia cinética total, energia cinética translacional, energia cinética rotacional, velocidade translacional e velocidade rotacional são gerados, e permitem ao usuário visualizar facilmente o comportamento do bloco ao longo do movimento sobre toda extensão da encosta.

As análises realizadas neste estudo foram comparadas por meio dos seguintes resultados:

- (i) Seção da encosta com as trajetórias dos blocos;
- (ii) Distribuição e localização dos pontos de parada dos blocos;
- (iii) Distribuição da energia cinética total máxima dos blocos ao longo da encosta.

A apresentação da seção da encosta com as trajetórias de movimentos dos blocos permite observar o tipo de movimento do bloco ao longo da encosta. Pode-se constatar se o movimento é predominantemente caracterizado por queda livre, salto, deslizamento ou rolamento, e em qual região da encosta ocorre a deposição dos blocos (Figura 4.2).

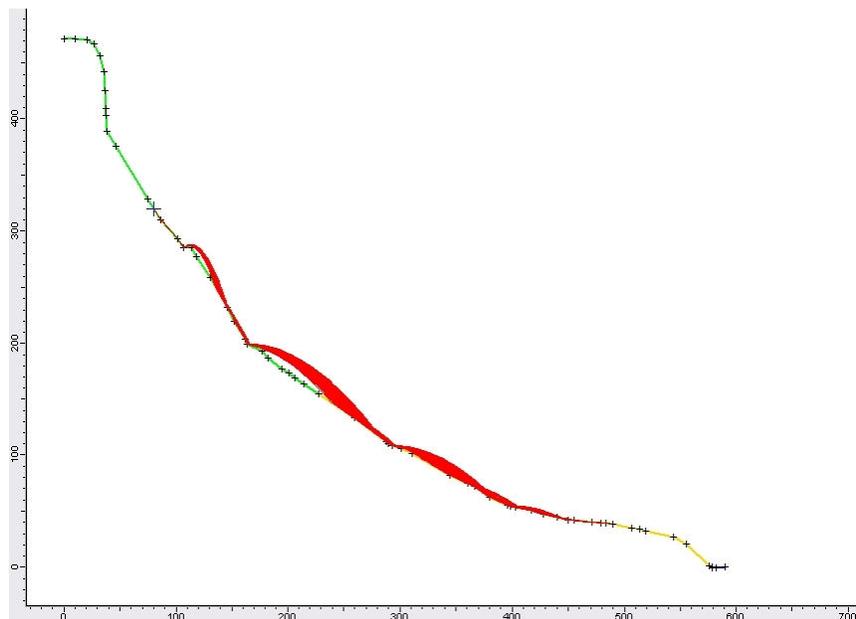


Figura 4.2 – Seção transversal do Morro do Escalavrado com exemplo de trajetórias de blocos simulados.

O gráfico de distribuição e localização dos pontos de parada dos blocos permite obter o segmento da encosta onde se dá a maior deposição de blocos e o número de blocos depositados naquele segmento específico. Dependendo da variação dos parâmetros adotados nas simulações, pode-se verificar a influência dos mesmos na distribuição e quantidade de blocos ao longo da encosta (Figura 4.3).

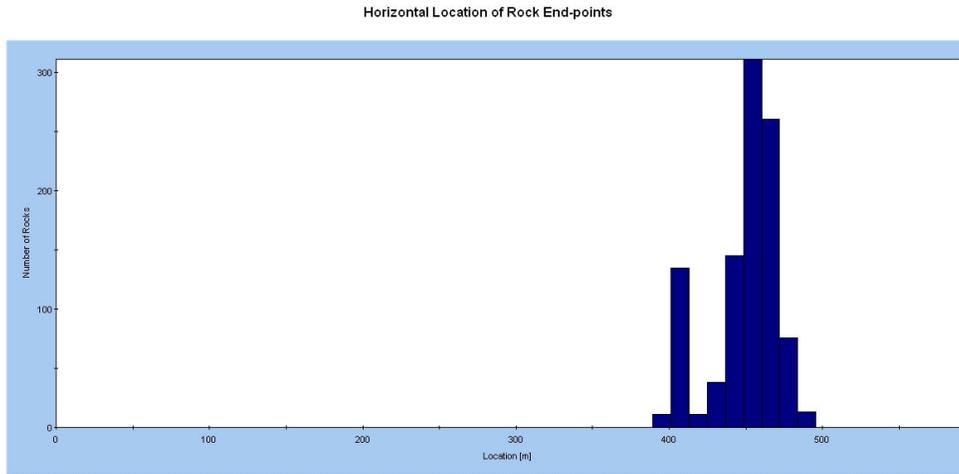


Figura 4.3 – Histograma de número de blocos e localização dos pontos de parada dos blocos.

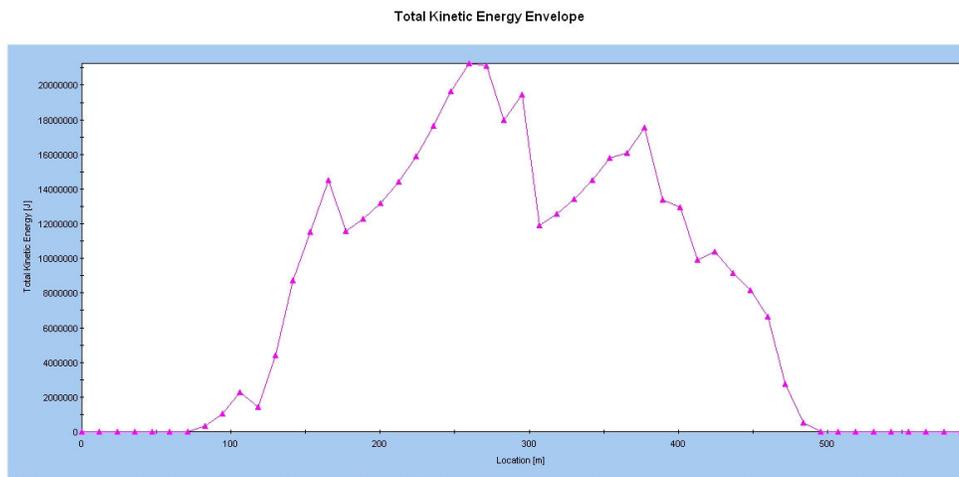


Figura 4.4 – Gráfico de distribuição da energia cinética total máxima dos blocos ao longo da encosta.

O gráfico da Figura 4.4 permite determinar a energia cinética total máxima que os blocos atingem em qualquer segmento da encosta. O valor de pico de energia máxima

e sua posição horizontal de ocorrência permitem uma comparação entre as simulações realizadas, para verificar a influência da variação dos parâmetros adotados no estudo.

4.3 MODELO BÁSICO ADOTADO PARA AS ANÁLISES

As análises paramétricas foram realizadas utilizando a seção transversal mais crítica da encosta do Morro do Escalavrado em relação à rodovia BR-116 (Figura 3.14). A encosta é constituída por um paredão vertical de granito seguido por face rochosa de gnaiss migmatítico e, próximo ao sopé, ocorre uma camada de solo coluvionar de espessura variável com blocos rochosos dispersos. Para o estudo foi adotado o conjunto de lascas 5, 6 e 7, situado na cota 840,00m, cujo volume calculado é igual a 6m³. Assumiu-se que os blocos e lascas apresentavam a forma geométrica mais crítica correspondente à ausência de cantos vivos, aproximando-se de geometrias ovóides e esféricas. Considerando-se o peso específico de 27kN/m³, pode-se calcular a massa do bloco adotado nas análises.

Na região superior do Morro do Escalavrado, o material da superfície da encosta foi admitido variar de rocha sã, sem recobrimentos vegetais e sem blocos, à rocha sã com depósito de blocos e lascas. Na região inferior, o material foi considerado variar da condição de rocha sã, rocha alterada com recobrimento vegetal até a condição de rocha com recobrimento de tálus com vegetação.

De modo a observar o comportamento e a influência do coeficiente de restituição, ângulo de atrito, rugosidade e velocidade inicial nas trajetórias dos blocos simulados, foram realizadas análises com a variação progressiva de um único parâmetro, considerando os demais constantes.

Os parâmetros adotados nas análises paramétricas obedeceram aos valores adotados por Nunes *et al.* (2008), selecionados através de estudo de campo e indicações encontradas na literatura.

Desta forma, na região superior do Morro do Escalavrado, o material foi admitido variar de rocha sã sem recobrimentos vegetais e sem blocos à rocha sã com depósito de blocos e lascas. Portanto, os coeficientes de restituição normal e tangencial variaram de 0,35 a 0,53 e 0,83 a 0,99, respectivamente. O ângulo de atrito foi adotado igual a

45° com desvio padrão de 5°, variando entre 40 e 50°, de forma a representar diferentes graus de alteração do maciço rochoso.

Na região inferior do Morro do Escalavrado, o material foi considerado variar da condição de rocha sã, rocha alterada com recobrimento vegetal até a condição de rocha com recobrimento de tálus com vegetação. Assim sendo, os coeficientes de restituição normal e tangencial variaram de 0,30 a 0,37 e 0,53 a 0,87, respectivamente. O ângulo de atrito foi adotado igual a 30° com desvio padrão de 5°, variando entre 25 e 35°, correspondendo a espessuras variadas de solo e quantidades diversas de blocos. Em todas as análises realizadas por Nunes *et al.* (2008), os blocos simulados partiram com velocidades iniciais iguais a 1 m/s e toda superfície do Morro do Escalavrado foi considerada lisa e planar com rugosidade nula.

Em relação às análises de variação do coeficiente de restituição, a partir dos valores de Nunes *et al.* (2008), os valores selecionados para o estudo paramétrico foram uniformemente distribuídos englobando a faixa proposta por Nunes *et al.* (2008) e resultando em 5 valores com aplicação de desvio padrão.

Desta forma, considerou-se que, na parte superior da encosta do Escalavrado, os coeficientes de restituição normal e tangencial adotados variaram de 0,36 a 0,52 e 0,83 a 0,99 respectivamente, com aplicação de desvio padrão de 0,02 para ambos os coeficientes.

Na parte inferior da encosta, os coeficientes de restituição normal e tangencial adotados variaram de 0,30 a 0,37 e de 0,53 a 0,85 respectivamente, com aplicação de desvio padrão de 0,01 para o coeficiente de restituição normal e de 0,04 para o coeficiente de restituição tangencial. Foram utilizados desvios padrões diferentes devido ao fato do intervalo de valores adotado para o coeficiente de restituição tangencial ser maior em relação ao coeficiente de restituição normal.

Em relação às análises de variação do ângulo de atrito, buscou-se adotar valores aproximados de Nunes *et al.* (2008), o que resultou em sete valores uniformemente distribuídos com aplicação de desvio padrão de forma a se garantir a completa varredura dos intervalos. Adotaram-se, na parte superior da encosta, valores variando de 35,0° a 50,0°, com aplicação de desvio padrão de 1°. Na parte inferior da encosta,

os valores do ângulo de atrito adotados variaram de 22,5° a 37,5°, com aplicação de desvio padrão de 1°.

Em relação às análises de variação da rugosidade, buscou-se adotar valores indicados na literatura, que reporta tipicamente rugosidades pouco elevadas. Portanto, foram adotados valores variando de 0° a 5° para toda superfície da encosta, distribuídos em 13 valores, e com atenção especial ao intervalo de 0° a 1°, representado pela ausência e presença de rugosidade, respectivamente.

Nas análises de variação da velocidade inicial do bloco, foram adotados sete valores uniformemente distribuídos, com aplicação de desvio padrão de forma a garantir uma varredura dos intervalos. Desta forma, as componentes de velocidade inicial horizontal e vertical variaram igualmente com pares de valores de 0 a 3 m/s, com aplicação de desvio padrão de 0,1 m/s.

A partir das características reais das lascas 5, 6 e 7 encontradas na encosta, cujo volume estimado é de 6m³, calculou-se a massa da lasca igual a 16.200 kg. De modo a verificar a influência do tamanho do blocos na simulação da trajetória, foram adotados três conjuntos de análises paramétricas utilizando blocos de massas distintas, partindo da mesma posição do conjunto de lascas 5, 6 e 7 do Morro do Escalavrado, ou seja, na cota 840m da seção transversal.

Primeiramente, foram realizadas análises adotando um bloco fictício de 1.620 kg, nomeado como Bloco 1, com massa 10 vezes menor ao bloco real original, correspondente às lascas 5, 6 e 7 mapeadas no Morro do Escalavrado. Posteriormente, foram realizadas as mesmas análises paramétricas utilizando o bloco original (lascas 5, 6 e 7), nomeado como Bloco 2, com massa equivalente a 16.200 kg. Por fim foram realizadas análises similares adotando um bloco fictício de 162.000 kg, nomeado como Bloco 3, apresentando uma massa 10 vezes maior ao bloco real original. A realização das análises utilizando os blocos fictícios possibilitou uma abordagem quanto à ordem de grandeza das lascas presentes no Morro do Escalavrado.

Por fim, o último conjunto de análises visou verificar a influência da quantidade de blocos na simulação da trajetória de queda. Foram realizadas análises paramétricas considerando o Bloco 2 (16.200 kg) e um conjunto de simulações com 100, 1.000 e

10.000 blocos. A variação progressiva de um único parâmetro, com os demais constantes, é a mesma adotada nas análises anteriores.

4.4 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE K_n / K_t

4.4.1 Condições das Análises

As análises de variação do coeficiente de restituição, consideraram uma variação uniformemente distribuída em ordem crescente a partir dos valores adotados por Nunes *et al.* (2008). Estas análises foram nomeadas por k1, k2, k3, k4 e k5. Na parte superior da encosta, os coeficientes de restituição normal e tangencial adotados variaram de 0,36 a 0,52 e 0,83 a 0,99 respectivamente, com aplicação de desvio padrão de 0,02 para ambos. Na parte inferior da encosta, os coeficientes de restituição normal e tangencial adotados variaram de 0,3 a 0,37 e 0,53 a 0,85 respectivamente, com aplicação de desvio padrão de 0,01 para o coeficiente de restituição normal e de 0,04 para o coeficiente de restituição tangencial.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Desta forma, os valores adotados foram os seguintes:

- (i) Velocidade inicial dos blocos: $v_x = 1,00$ m/s; $v_y = 0$ m/s; $v_{ang} = 0$ rad/s;
- (ii) Ângulo de atrito: $\varnothing = 45^\circ$ (parte superior); $\varnothing = 30^\circ$ (parte inferior);
- (iii) Rugosidade: 0° (parte superior e inferior).

Foram realizadas simulações considerando um total de 1.000 blocos, ou seja, 1.000 trajetórias de blocos para cada conjunto de análises. O número de blocos iguais a 1.000 foi selecionado a partir das análises realizadas com variação de 100, 1.000 e 10.000 blocos, conforme apresentado em detalhes no item 4.9. Este estudo indica que um total de 1.000 blocos é adequado tanto em sensibilidade à variação paramétrica, quanto ao tempo mais reduzido para a realização da simulação.

4.4.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg)

A Tabela 4.1 apresenta as análises realizadas adotando-se o Bloco 1 com variação progressiva dos coeficientes de restituição (K_n e K_t). São apresentados os valores de

energia cinética máxima do bloco (E_{max}) e sua posição de ocorrência em projeção horizontal a partir da crista da encosta (X_{max}), além da distância horizontal do intervalo onde se dá o maior número de blocos depositados (X_f) e o número de blocos depositados neste ponto ($\#blocos$).

Tabela 4.1 – Resultados das análises com variação do coeficiente de restituição – Bloco 1.

Análises	Variação de Parâmetros				Resultados			
	Parte Superior da Encosta		Parte Inferior da Encosta		Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	K_n	K_t	K_n	K_t	$E_{max}(kJ)$	$X_{max}(m)$	$X_f(m)$	$\#blocos$
k1	0,36	0,83	0,30	0,53	97	106	112	1000
k2	0,40	0,87	0,32	0,61	560	201	289	492
k3	0,44	0,91	0,34	0,69	1418	260	301	950
k4	0,48	0,95	0,36	0,77	1782	248	301	588
k5	0,52	0,99	0,37	0,85	2127	260	454	298

Como ilustração, a análise k1 com K_n e K_t iguais a 0,36 e 0,83 na parte superior da encosta e 0,30 e 0,53 na parte inferior resultou em uma energia cinética máxima (E_{max}) de 97 kJ, atingida a 106m de distância horizontal a partir da crista (X_{max}). A distância horizontal onde se dá a maior concentração de blocos depositados (X_f) é igual a 112m e um total de 1.000 blocos atingiu este ponto de parada do movimento.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados das análises através das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação dos coeficientes de restituição normal (K_n) e tangencial (K_t).

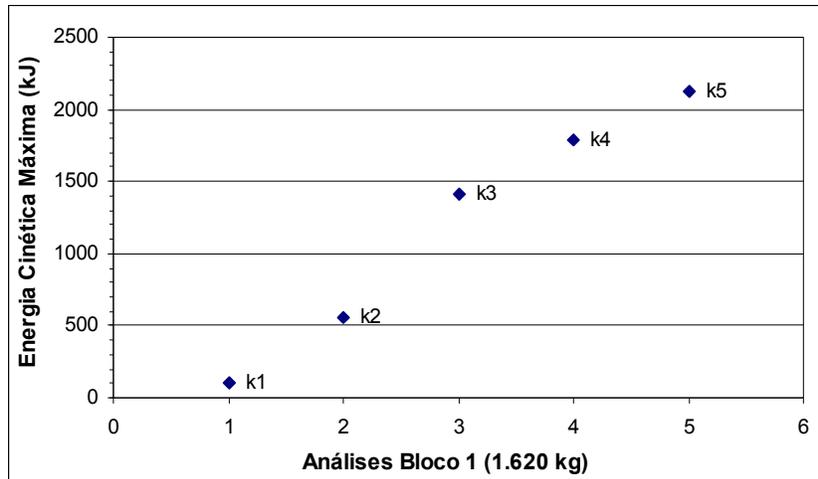


Figura 4.5 – Energia cinética máxima em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 1.

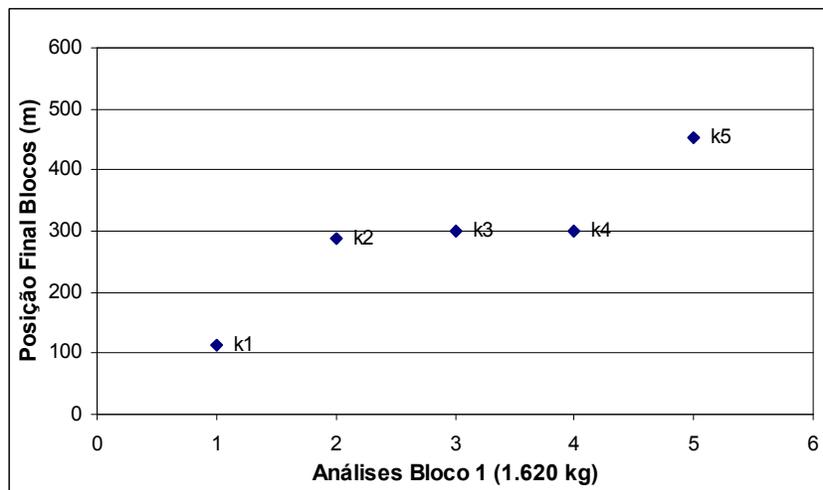


Figura 4.6 – Posição final dos blocos em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 1.

Na Tabela 4.1 e Figuras 4.5 e 4.6, observa-se que os menores valores de coeficiente de restituição correspondem às menores taxas de energia cinética máxima, distância horizontal de máxima energia e distância horizontal de parada dos blocos. O aumento de K_n e K_t produz aumento da energia cinética máxima e das distâncias de máxima energia e de parada dos blocos.

4.4.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg)

A Tabela 4.2 apresenta as análises realizadas adotando-se o Bloco 2 com variação progressiva dos coeficientes de restituição. De forma análoga às análises realizadas com o Bloco 1, apresentam-se os valores de energia cinética máxima (E_{max}) e sua distância horizontal a partir da crista (X_{max}), além da distância horizontal do intervalo onde se dá o maior número de blocos depositados (X_f) e o número de blocos depositados neste ponto (#blocos).

Tabela 4.2 – Resultados das análises com variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 2.

Análises	Variação de Parâmetros				Resultados			
	Parte Superior da Encosta		Parte Inferior da Encosta		Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	K_n	K_t	K_n	K_t	$E_{max}(kJ)$	$X_{max}(m)$	$X_f(m)$	#blocos
k1	0,36	0,83	0,30	0,53	982	106	112	1000
k2	0,40	0,87	0,32	0,61	5566	189	289	492
k3	0,44	0,91	0,34	0,69	14707	271	301	955
k4	0,48	0,95	0,36	0,77	17819	248	301	622
k5	0,52	0,99	0,37	0,85	21255	260	454	311

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os resultados das análises através de relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação dos coeficientes de restituição normal (K_n) e tangencial (K_t). Cada ponto das Figuras 4.7 e 4.8 refere-se às análises realizadas conforme apresentado na Tabela 4.2.

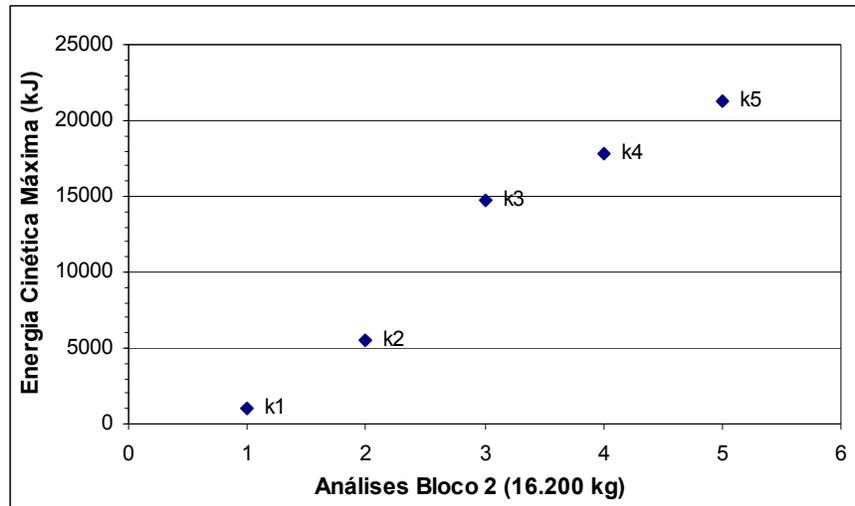


Figura 4.7 – Energia cinética máxima em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 2.

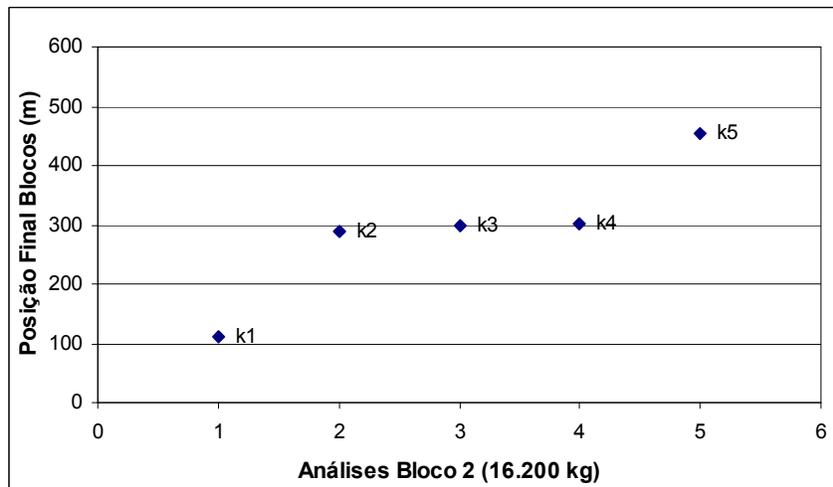


Figura 4.8 – Posição final dos blocos em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 2.

A Tabela 4.2 e Figuras 4.7 e 4.8 mostram variação similar às das análises do Bloco 1, com acréscimo da energia cinética máxima e sua distância horizontal, além do aumento da distância total de parada dos blocos em função do aumento dos coeficientes de restituição K_n e K_t .

4.4.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg)

A Tabela 4.3 apresenta as análises realizadas adotando o Bloco 3 com variação progressiva dos coeficientes de restituição de forma similar às Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.3 – Resultados das análises com variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 3.

Análises	Variação de Parâmetros				Resultados			
	Parte Superior da Encosta		Parte Inferior da Encosta		Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	K_n	K_t	K_n	K_t	$E_{max}(kJ)$	$X_{max}(m)$	$X_f(m)$	#blocos
k1	0,36	0,83	0,30	0,53	9707	106	112	1000
k2	0,40	0,87	0,32	0,61	54440	189	289	458
k3	0,44	0,91	0,34	0,69	141975	260	301	939
k4	0,48	0,95	0,36	0,77	181592	248	301	622
k5	0,52	0,99	0,37	0,85	225360	283	454	320

Analogamente, as Figuras 4.9 e 4.10 também apresentam os resultados das análises por meio das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação do coeficiente de restituição normal (K_n) e tangencial (K_t).

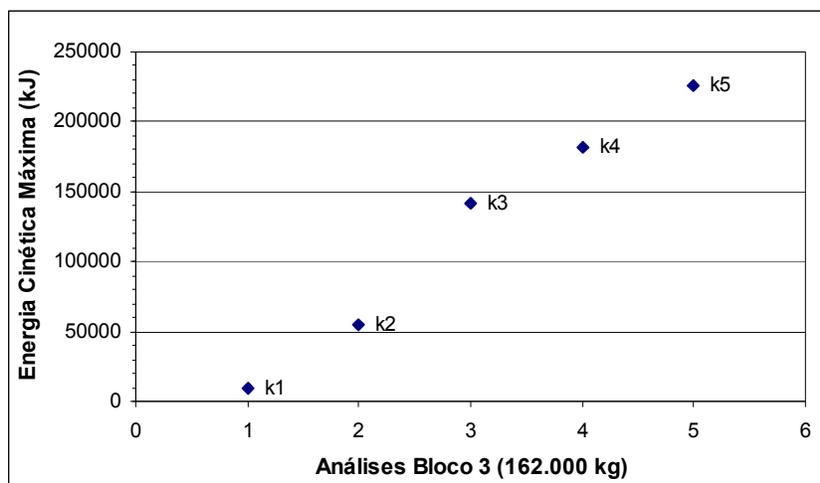


Figura 4.9 – Energia cinética máxima em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 3.

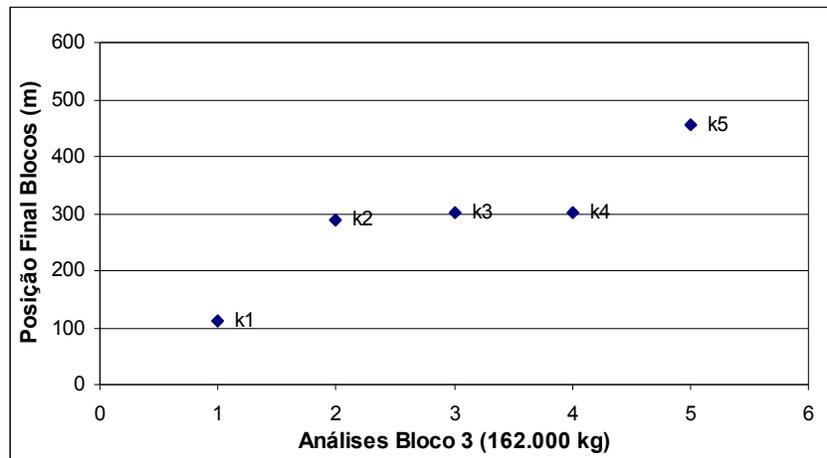


Figura 4.10 – Posição final dos blocos em função da variação dos coeficientes de restituição K_n e K_t – Bloco 3.

A Tabela 4.3 e Figuras 4.9 e 4.10 novamente indicam as mesmas tendências encontradas nos resultados dos Blocos 1 e 2.

4.4.5 Comentários

A partir das Figuras 4.5 a 4.10, constata-se que o coeficiente de restituição é um parâmetro de influência determinante na simulação das trajetórias de queda de blocos. Nas análises k1 a k5, a variação da energia cinética máxima para o Bloco 1 é de 2093%, para o Bloco 2 de 2064% e para o Bloco 3 de 2221%. Tais valores são altos, indicando que os resultados da simulação são extremamente sensíveis aos valores dos coeficientes de restituição.

Os resultados também mostram comportamentos similares das análises realizadas com blocos de massa diferentes. As variações observadas são relativamente equivalentes, exceto pelos valores tanto de energia cinética, quanto de distâncias horizontais de máxima energia e de parada do movimento que são tanto maiores quanto maior a massa do bloco. Ressalta-se que a energia cinética é função direta da massa do bloco.

As Figuras 4.6, 4.8 e 4.10 mostram que a variação da posição final dos blocos tem um comportamento similar para os 3 blocos analisados. A deposição dos blocos ocorre na mesma região da encosta para os três casos estudados (Blocos 1, 2 e 3). Ao contrário

da variação linear de energia cinética vs variação dos coeficientes de restituição, o gráfico de posição final dos blocos não é linear, e indica uma área preferencial de deposição dos blocos em função da seção transversal da encosta ser irregular.

4.5 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO (\emptyset)

4.5.1 Condições de Análises

A variação dos ângulos de atrito (\emptyset) foi realizada a partir dos valores adotados por Nunes *et al.* (2008). Os valores foram uniformemente aumentados resultando em 7 análises nomeadas por phi1, phi2, phi3, phi4, phi5, phi6 e phi7. Na parte superior da encosta, o valor do ângulo de atrito variou de 35,0° a 50,0°, com aplicação de desvio padrão de 1°. Na parte inferior da encosta, o valor do ângulo de atrito variou de 22,5° a 37,5°, com aplicação de desvio padrão de 1°.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar o resultado final dos estudos paramétricos.

Desta forma, foram adotados os seguintes valores:

- (i) Velocidade inicial dos blocos: $v_x = 1,00$ m/s; $v_y = 0$ m/s; $v_{ang} = 0$ rad/s;
- (ii) Rugosidade: 0° (parte superior e inferior);
- (iii) Coeficientes de restituição:
 - $K_n = 0,44$ e $K_t = 0,91$ (parte superior);
 - $K_n = 0,335$ e $K_t = 0,70$ (parte inferior).

Foram realizadas simulações com o total de 1.000 blocos para cada análise de variação dos ângulos de atrito.

4.5.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg)

A Tabela 4.4 apresenta as análises realizadas para o Bloco 1 com a variação progressiva dos ângulos de atrito. São apresentados os valores de energia cinética máxima (E_{max}), a distância horizontal a partir da crista da encosta onde ocorre o ponto de energia cinética máxima (X_{max}), posição correspondente a distância

horizontal de parada da maioria dos blocos (X_f) e a quantidade de blocos que atingiu este ponto (#blocos).

Tabela 4.4 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 1.

Análises	Variação de Parâmetros		Resultados			
	Parte Superior da Encosta	Parte Inferior da Encosta	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	\emptyset (°)	\emptyset (°)	$E_{max}(kJ)$	$X_{max}(m)$	$X_f(m)$	#blocos
phi1	35	22,5	1320	224	301	730
phi2	37,5	25	1323	224	301	1000
phi3	40	27,5	1308	224	301	1000
phi4	42,5	30	1299	224	301	1000
phi5	45	32,5	1286	224	301	739
phi6	47,5	35	725	224	289	879
phi7	50	37,5	574	201	112	887

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados das análises através das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação dos ângulos de atrito (ϕ). Os pontos dos gráficos são referentes às análises phi1 a phi7, realizadas conforme apresentado na Tabela 4.4.

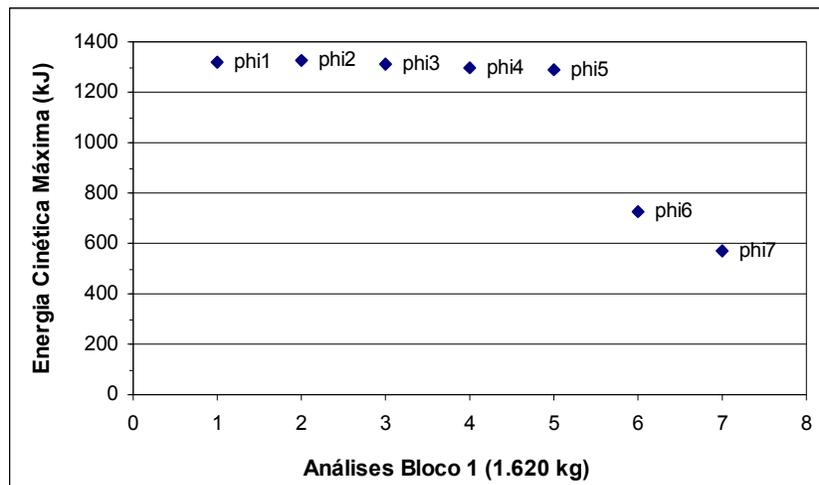


Figura 4.11 – Energia cinética máxima em função da variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 1.

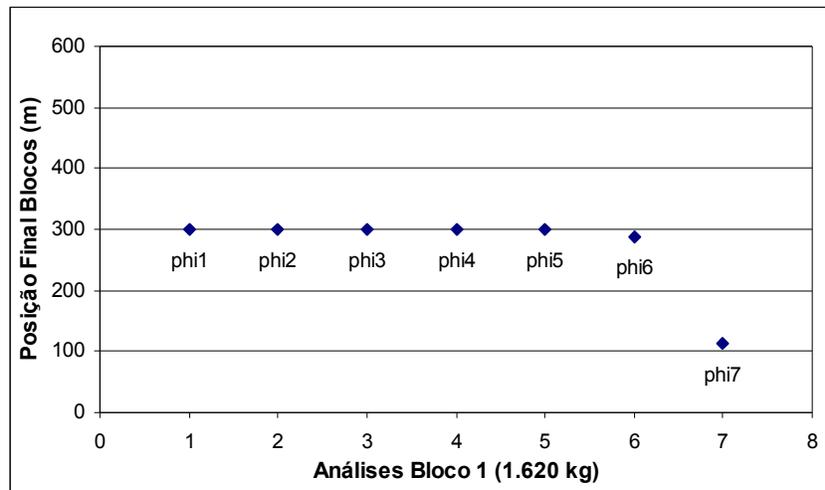


Figura 4.12 – Posição final dos blocos em função da variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco1.

A Tabela 4.4 e as Figuras 4.11 e 4.12 indicam uma variação insignificante da energia cinética máxima para valores de ângulo de atrito inferiores a 45° na parte superior e $32,5^\circ$ na parte inferior do Morro do Escalavrado. Acima destes valores, observa-se uma redução brusca da energia cinética máxima.

Em relação à distância horizontal de máxima energia e distância de parada dos blocos, nota-se que os valores são constantes para os ângulos de atrito inferiores a 45° na parte superior e $32,5^\circ$ na parte inferior do Morro do Escalavrado. Quanto ao número de blocos que atingem o ponto final de parada, a relação não parece ser definida, apesar da tendência dos 1.000 blocos atingirem o mesmo ponto final para ângulos de atrito inferiores a $42,5^\circ$ na parte superior e 30° na parte inferior da encosta.

4.5.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg)

A Tabela 4.5 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 com variação progressiva dos ângulos de atrito. Os resultados são sumariados de forma análoga aos das tabelas precedentes.

Tabela 4.5 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 2.

Análises	Variação de Parâmetros		Resultados			
	Parte Superior da Encosta	Parte Inferior da Encosta	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	\emptyset (°)	\emptyset (°)	Emáx(kJ)	Xmáx(m)	Xf(m)	#blocos
phi1	35	22,5	13229	224	301	714
phi2	37,5	25	13220	224	301	1000
phi3	40	27,5	13060	224	301	1000
phi4	42,5	30	12991	224	301	1000
phi5	45	32,5	12951	224	301	746
phi6	47,5	35	8542	224	289	865
phi7	50	37,5	5740	201	112	895

As Figuras 4.13 e 4.14 também apresentam os resultados por meio de relações gráficas de Energia cinética máxima (Emax) e Posição final dos blocos (Xf) vs Análises realizadas com variação dos ângulos de atrito (ϕ).

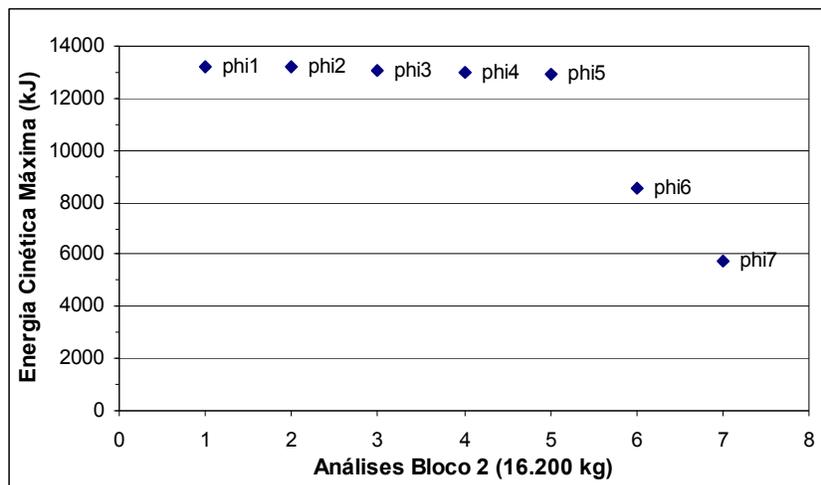


Figura 4.13 – Energia cinética máxima em função da variação do ângulo de atrito (\emptyset) – Bloco 2.

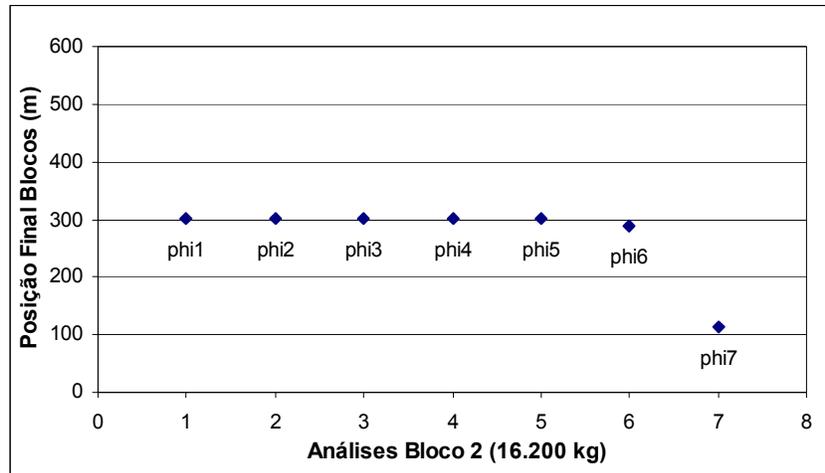


Figura 4.14 – Posição final dos blocos em função da variação do ângulo de atrito (ϕ) – Bloco 2.

A partir da Tabela 4.5 e Figuras 4.13 e 4.14, observam-se as mesmas tendências de variação apresentadas nas análises do Bloco 1.

4.5.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg)

A Tabela 4.6 apresenta as análises realizadas para o Bloco 3 com variação progressiva dos ângulos de atrito.

Tabela 4.6 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito (ϕ) – Bloco 3.

Análises	Variação de Parâmetros		Resultados			
	Parte Superior da Encosta	Parte Inferior da Encosta	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	ϕ (°)	ϕ (°)	$E_{max}(kJ)$	$X_{max}(m)$	$X_f(m)$	#blocos
phi1	35	22,5	132049	224	301	705
phi2	37,5	25	132325	224	301	1000
phi3	40	27,5	131013	224	301	1000
phi4	42,5	30	129907	224	301	1000
phi5	45	32,5	129636	224	301	768
phi6	47,5	35	82554	201	289	860
phi7	50	37,5	54626	212	112	905

As Figuras 4.15 e 4.16 também apresentam os resultados das análises através de relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação do ângulo de atrito (ϕ), de forma análoga às análises anteriores.

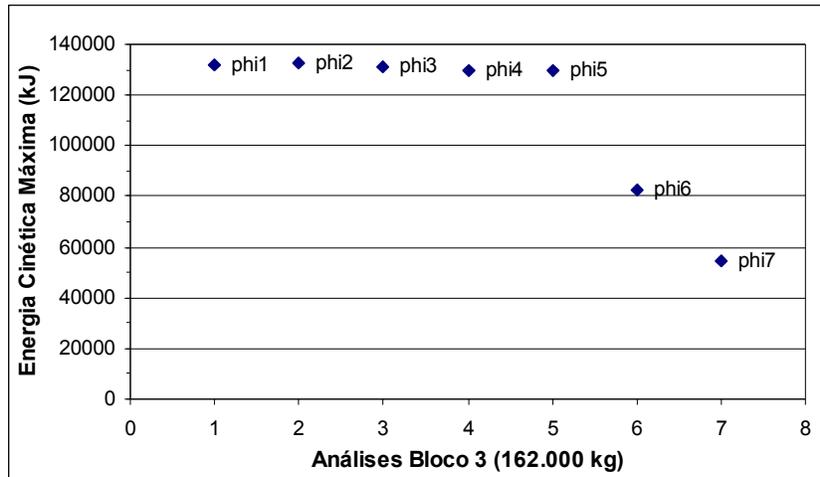


Figura 4.15 – Energia cinética máxima em função da variação do ângulo de atrito (ϕ) – Bloco 3.

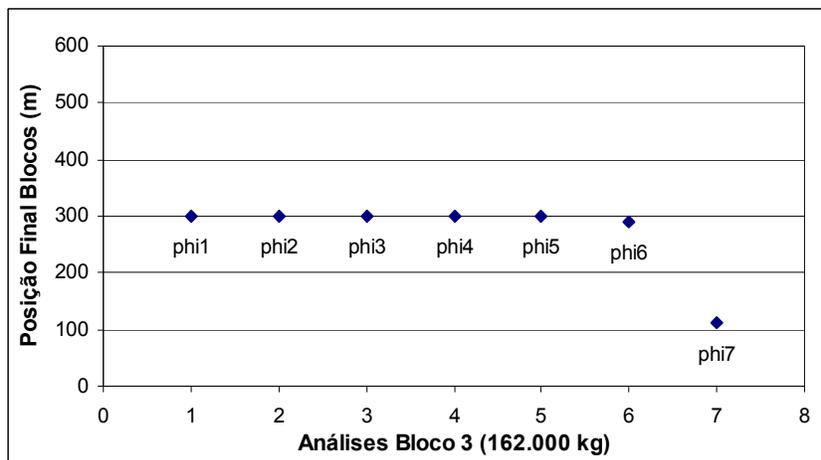


Figura 4.16 – Posição final dos blocos em função da variação do ângulo de atrito (ϕ) – Bloco 3.

Novamente, são observadas na Tabela 4.6 e Figuras 4.15 e 4.16 as mesmas tendências de variação obtidas das análises dos Blocos 1 e 2.

4.5.5 Comentários

Nas Figuras 4.11 a 4.16 constata-se que o ângulo de atrito pode afetar a simulação das trajetórias de queda de blocos. Considerando as análises phi1 a phi7, a variação da energia cinética total máxima para os Blocos 1 e 2 é de 130%, enquanto para o Bloco 3 é de 142%. No entanto, verifica-se que esta variação é insignificante, caso sejam desconsiderados os valores de ângulo de atrito superiores a 45° na parte superior rochosa e 32,5° na parte inferior com solo do Morro do Escalavrado.

Isto indica que a seleção de valores do ângulo de atrito da superfície da encosta com potencial de queda de blocos deve privilegiar valores médios em função do tipo de material de talude. Ângulos de atrito nesta faixa de variação não provocam variações expressivas da energia cinética máxima. Isto é válido para os três blocos analisados, cujos comportamentos de variação são semelhantes, exceto pelos valores de energia cinética máxima, maiores para blocos de maiores massas.

A deposição dos blocos ocorre na mesma região da encosta para os três casos. O número de blocos que atingem a posição de parada também não sofre variação significativa com a variação de massa dos blocos.

4.6 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE INICIAL (v)

4.6.1 Condições de Análises

As análises com variação da velocidade vertical e horizontal inicial dos blocos também consideraram valores distribuídos em ordem crescente e foram nomeadas como v1, v2, v3, v4, v5, v6 e v7. As componentes de velocidade inicial horizontal (v_x) e vertical (v_y) variaram igualmente com pares de valores de 0 a 3 m/s, com aplicação de desvio padrão de 0,1 m/s.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Desta forma, foram considerados os seguintes valores:

- (i) Velocidade inicial angular: $v_{ang} = 0$ rad/s;
- (ii) Ângulo de atrito: $\emptyset = 45^\circ$ (parte superior); $\emptyset = 30^\circ$ (parte inferior);

(iii) Rugosidade: 0° (parte superior e inferior);

(iv) Coeficientes de restituição:

$K_n = 0,44$ e $K_t = 0,91$ (parte superior);

$K_n = 0,335$ e $K_t = 0,70$ (parte inferior).

Foram adotadas simulações com um total de 1.000 blocos para cada análise realizada.

4.6.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg)

A Tabela 4.7 apresenta as análises realizadas para o Bloco 1 em função da variação crescente da velocidade inicial. De forma semelhante às análises anteriores, são apresentados os valores de energia cinética máxima, posição a partir da crista da encosta do ponto de energia cinética máxima, posição do intervalo onde ocorre maior deposição de blocos e o número de blocos depositados nesta posição.

Tabela 4.7 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial (v) – Bloco 1.

Análises	Variação	Resultados			
	Velocidade Inicial do Bloco	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	(m/s)	$E_{max}(kJ)$	$X_{max}(m)$	$X_f(m)$	#blocos
v1	$V_x=V_y=0$	715	224	301	861
v2	$V_x=V_y=0,5$	846	224	301	1000
v3	$V_x=V_y=1$	1285	260	301	1000
v4	$V_x=V_y=1,5$	1176	248	301	1000
v5	$V_x=V_y=2$	1299	224	301	1000
v6	$V_x=V_y=2,5$	1333	224	301	1000
v7	$V_x=V_y=3$	1368	224	301	1000

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os resultados das análises através das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação da velocidade inicial (v).

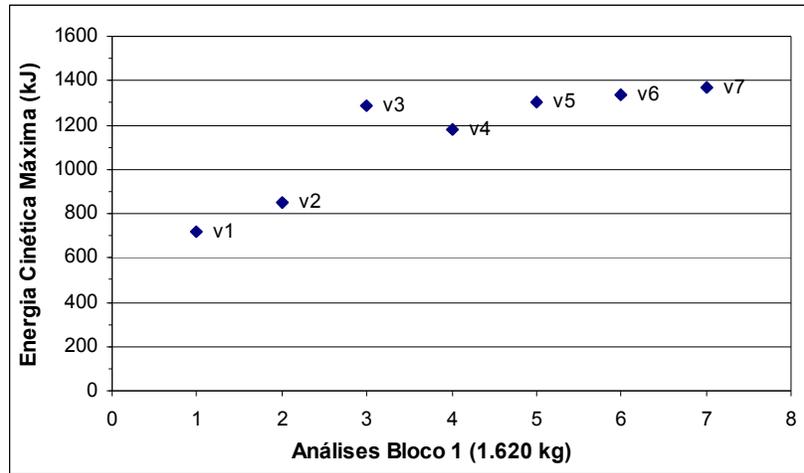


Figura 4.17 – Energia cinética máxima em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 1.

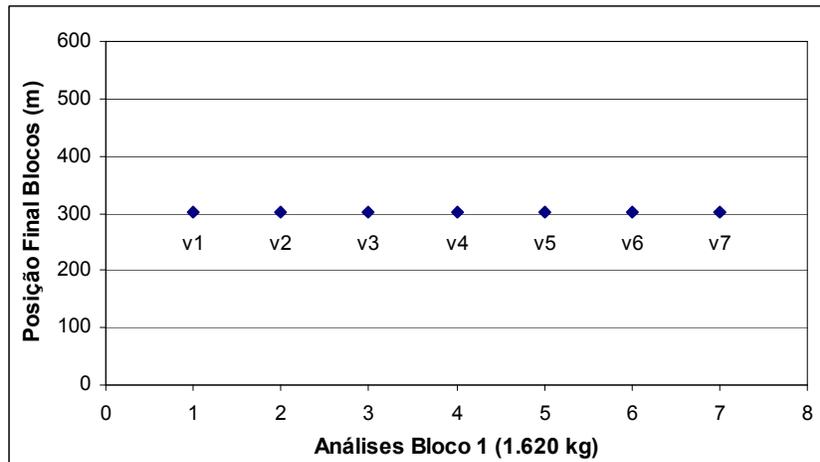


Figura 4.18 – Posição final dos blocos em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 1.

Pode-se observar da Tabela 4.7 e Figuras 4.17 e 4.18 que a variação das velocidades iniciais vertical e horizontal não influencia a distância horizontal de parada e o número de blocos depositados nesta posição, visto que os valores obtidos são constantes. A exceção é representada pela análise v1 com valores de velocidade nulos. O mesmo ocorre para a posição de energia cinética máxima, cujas distâncias não variam de forma expressiva. Em relação aos valores de energia cinética máxima, pode-se constatar que para velocidades inferiores a 0,5 m/s, são obtidos valores mais reduzidos do que o valor médio resultante das análises com velocidades variando entre 1,0 e 3,0 m/s.

4.6.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg)

A Tabela 4.8 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 com variação progressiva da velocidade inicial. Os resultados são apresentados de forma similar às análises anteriores.

Tabela 4.8 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial (v) – Bloco 2.

Análises	Variação	Resultados			
	Velocidade Inicial do Bloco	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	(m/s)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	X _f (m)	#blocos
v1	V _x =V _y =0	7154	224	301	854
v2	V _x =V _y =0,5	8464	224	301	1000
v3	V _x =V _y =1	12860	260	301	1000
v4	V _x =V _y =1,5	11752	248	301	1000
v5	V _x =V _y =2	12991	224	301	1000
v6	V _x =V _y =2,5	13333	224	301	1000
v7	V _x =V _y =3	13674	224	301	1000

São também apresentados os resultados por meio de relações gráficas nas Figuras 4.19 e 4.20.

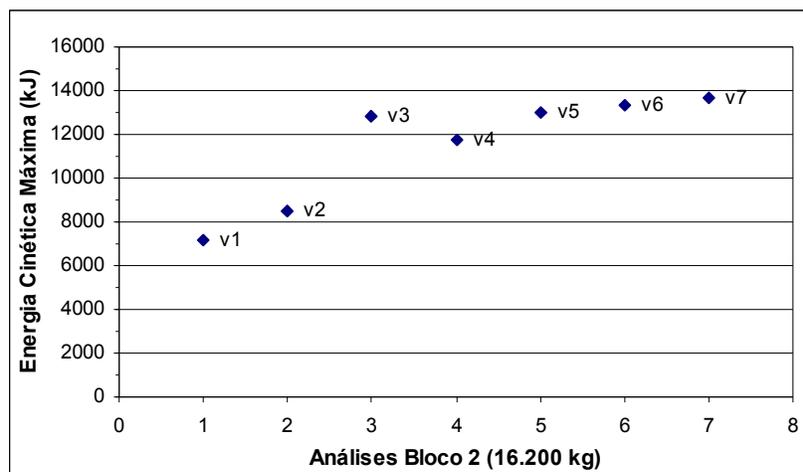


Figura 4.19 – Energia cinética máxima em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 2.

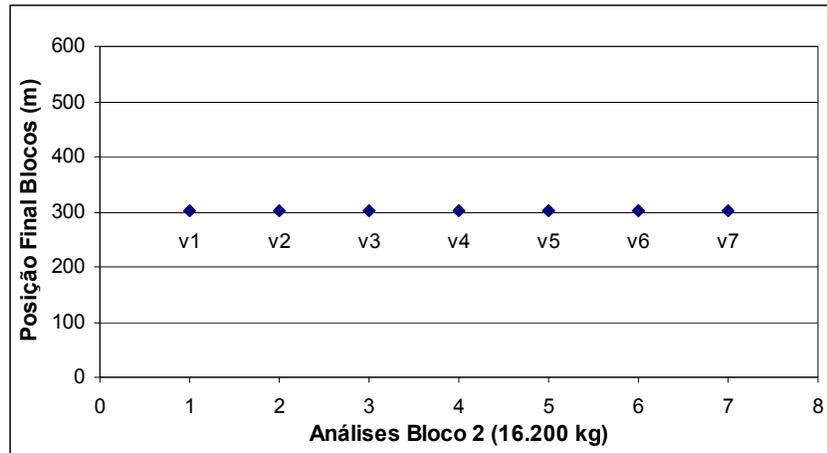


Figura 4.20 – Posição final dos blocos em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 2.

Os resultados mostrados na Tabela 4.8 e Figuras 4.19 e 4.20 indicam comportamento semelhante ao obtido nas análises do Bloco 1. As variações são desprezíveis em relação à posição final dos blocos, número de blocos depositados e distância na qual ocorre o pico de energia cinética. Igualmente, os valores de energia cinética máxima são próximos para velocidades iniciais compreendidas entre 1,0 e 3,0 m/s, variando respectivamente entre 12,86 e 13,67 MJ.

4.6.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg)

A Tabela 4.9 apresenta as análises realizadas para o Bloco 3 com variação progressiva da velocidade inicial. As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam os resultados das análises através das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação da velocidade inicial (v).

Tabela 4.9 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial (v) – Bloco 3.

Análises	Variação	Resultados			
	Velocidade Inicial do Bloco	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	(m/s)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	X _f (m)	#blocos
v1	V _x =V _y =0	71542	224	301	852
v2	V _x =V _y =0,5	84636	224	301	1000
v3	V _x =V _y =1	128524	260	301	1000
v4	V _x =V _y =1,5	117579	248	301	1000
v5	V _x =V _y =2	129915	224	301	1000
v6	V _x =V _y =2,5	133359	224	301	1000
v7	V _x =V _y =3	136523	224	301	1000

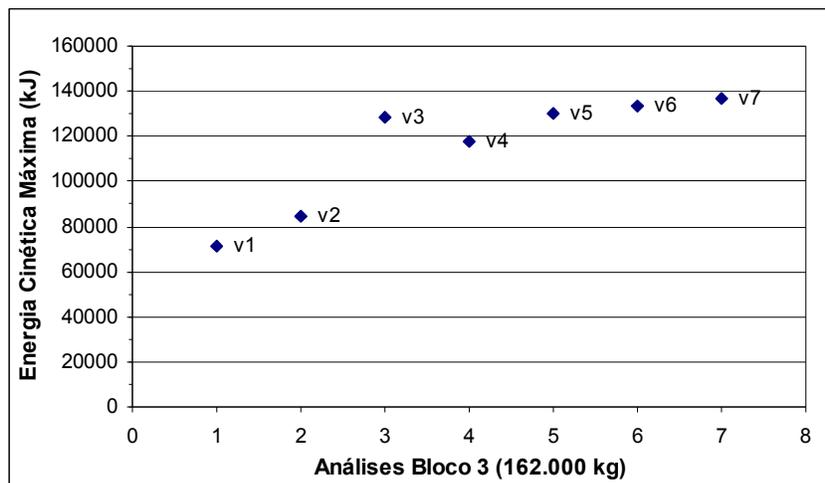


Figura 4.21 – Energia cinética máxima em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 3.

Analogamente às análises dos Blocos 1 e 2, os resultados obtidos das análises do Bloco 3 são similares, exceto pela magnitude dos valores de energia cinética máxima. Entretanto, a tendência observada nos estudos anteriores permanece a mesma.

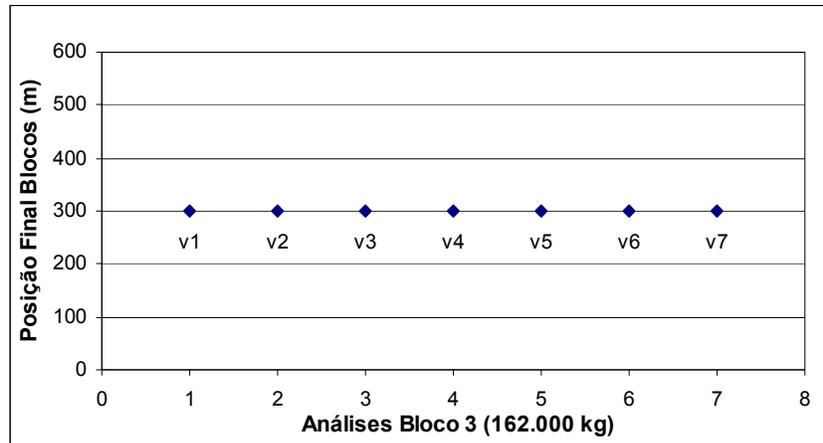


Figura 4.22 – Posição final dos blocos em função da variação da velocidade inicial (v) – Bloco 3.

4.6.5 Comentários

Considerando as Figuras 4.17 a 4.22 constata-se que a velocidade inicial do bloco é um parâmetro que pode influenciar a simulação de quedas de blocos, especialmente na determinação da magnitude da energia cinética máxima. Verificando as análises v1 a v7, a variação da energia cinética total máxima foi igual a 91,0% para os três blocos analisados. Esta variação se reduz a 6,5% para o Bloco1, 6,3% para o Bloco 2 e 6,2% para o Bloco 3 caso sejam desconsideradas as análises com velocidades iniciais menores a 1,0 m/s.

Os resultados também indicam que as análises realizadas com blocos de massas diferentes apresentam comportamentos semelhantes. As variações relativamente equivalentes mostram que a massa do bloco não influencia a tendência de comportamento das análises com variação das velocidades iniciais. A influência é notada na magnitude dos valores de energia cinética máxima, os quais são função direta da massa do bloco.

Os gráficos de Posição final dos blocos vs Análises dos blocos indicam que a variação da velocidade inicial e massa dos blocos não influenciaram na posição de deposição dos blocos ao longo da encosta e na quantidade de blocos depositados. Para todas as análises realizadas os blocos se depositaram na mesma região da encosta, independente das velocidades iniciais e das massas dos blocos.

Nos gráficos de energia cinética máxima, com exceção das análises v3 dos três blocos adotados, o comportamento observado foi de crescimento uniforme da energia com o aumento da velocidade inicial. O resultado da análise v3 pode ser devido a uma particularidade probabilística do programa.

4.7 ANÁLISES E RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE

4.7.1 Condições de Análises

As análises com variação da rugosidade consideraram valores crescentes em 13 análises nomeadas como rug1, rug2, rug3, rug4, rug5, rug6, rug7, rug8, rug9, rug10, rug11, rug12 e rug13. O valor adotado variou igualmente de 0° a 5° para a parte superior e inferior da encosta.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Assim sendo, as análises foram realizadas com os seguintes valores:

(i) Velocidade inicial dos blocos: $v_x = 1,00$ m/s; $v_y = 0$ m/s; $v_{ang} = 0$ rad/s;

(ii) Ângulo de atrito: $\emptyset = 45^\circ$ (parte superior); $\emptyset = 30^\circ$ (parte inferior);

(iii) Coeficientes de restituição:

$K_n = 0,44$ e $K_t = 0,91$ (parte superior);

$K_n = 0,335$ e $K_t = 0,70$ (parte inferior).

Análogo aos estudos anteriores, foram consideradas simulações com um total de 1.000 blocos para cada análise de variação da rugosidade.

4.7.2 Análises e Resultados – Bloco 1 (1.620 kg)

A Tabela 4.10 apresenta as análises realizadas para o Bloco 1 em função da variação progressiva da rugosidade.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os resultados das análises através das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação da rugosidade (rug).

Tabela 4.10 – Resultados das análises com variação da rugosidade da superfície – Bloco 1.

Análises	Variação de Parâmetros		Resultados			
	Parte Superior da Encosta	Parte Inferior da Encosta	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	Rugosidade (°)	Rugosidade (°)	Emax(kJ)	Xmax(m)	Xf(m)	#blocos
rug1	0	0	731	224	301	1000
rug2	0,25	0,25	1288	260	301	996
rug3	0,50	0,50	1295	224	301	960
rug4	0,75	0,75	1298	224	301	889
rug5	1,00	1,00	1330	260	301	804
rug6	1,50	1,50	1355	224	301	607
rug7	2,00	2,00	1370	224	289	525
rug8	2,50	2,50	1382	271	289	598
rug9	3,00	3,00	1381	271	289	653
rug10	3,50	3,50	1388	271	289	701
rug11	4,00	4,00	1380	271	289	720
rug12	4,50	4,50	1398	260	289	745
rug13	5,00	5,00	1394	260	289	733

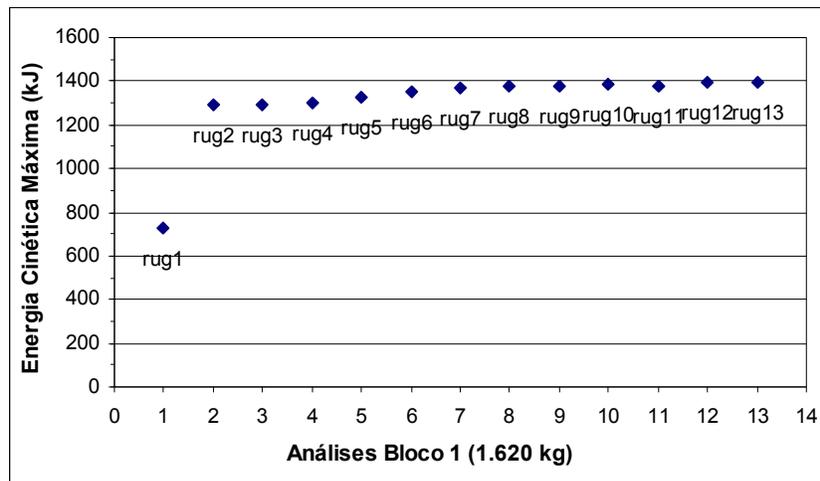


Figura 4.23 – Energia cinética máxima em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 1.

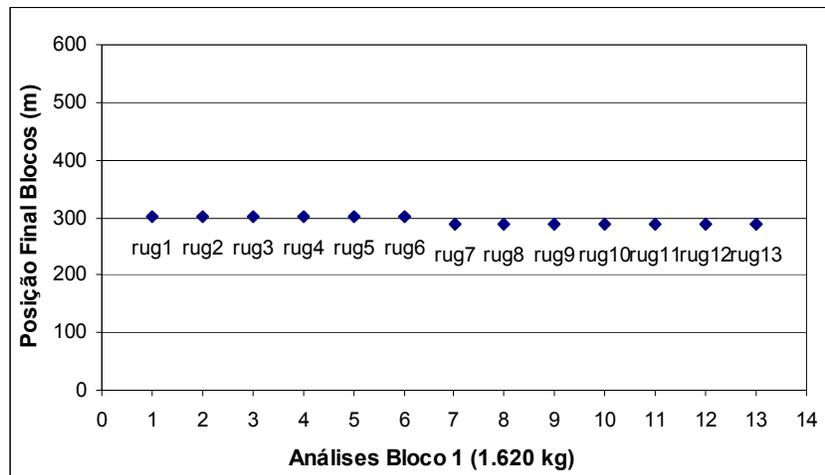


Figura 4.24 – Posição final dos blocos em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 1.

Pode-se observar a partir da Tabela 4.1 e Figuras 4.23 e 4.24 que o aumento da rugosidade provoca um acréscimo dos valores de energia cinética máxima e das distâncias nas quais ocorrem. O número de blocos depositados e a distância final de parada se reduzem com o aumento da rugosidade. Um ponto curioso é o representado pela análise rug1 com rugosidade nula (Figura 4.23), cuja energia cinética máxima representa 54% do valor médio obtido das análises rug2 a rug13.

Isto indica que a adoção da rugosidade nula, além de modelar inadequadamente a superfície de deslizamento da encosta, também acarreta um valor de energia cinética máxima bem inferior à média dos valores das outras análises com consideração da rugosidade e, portanto, gerando simulações contra a segurança.

4.7.3 Análises e Resultados – Bloco 2 (16.200 kg)

Similarmente às análises do Bloco 1, a Tabela 4.11 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 com variação progressiva da rugosidade. As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os resultados das análises em termos das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação da rugosidade.

Tabela 4.11 – Resultados das análises com variação da rugosidade da superfície – Bloco 2.

Análises	Variação de Parâmetros		Resultados			
	Parte Superior da Encosta	Parte Inferior da Encosta	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	Rugosidade (°)	Rugosidade (°)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	X _f (m)	#blocos
rug1	0	0	7311	224	301	1000
rug2	0,25	0,25	12884	260	301	990
rug3	0,50	0,50	12874	260	301	963
rug4	0,75	0,75	12923	224	301	862
rug5	1,00	1,00	13036	224	301	768
rug6	1,50	1,50	13470	260	301	614
rug7	2,00	2,00	13644	260	289	540
rug8	2,50	2,50	13967	271	289	608
rug9	3,00	3,00	13773	271	289	676
rug10	3,50	3,50	13553	260	289	712
rug11	4,00	4,00	14077	271	289	759
rug12	4,50	4,50	14084	271	289	749
rug13	5,00	5,00	14173	236	289	743

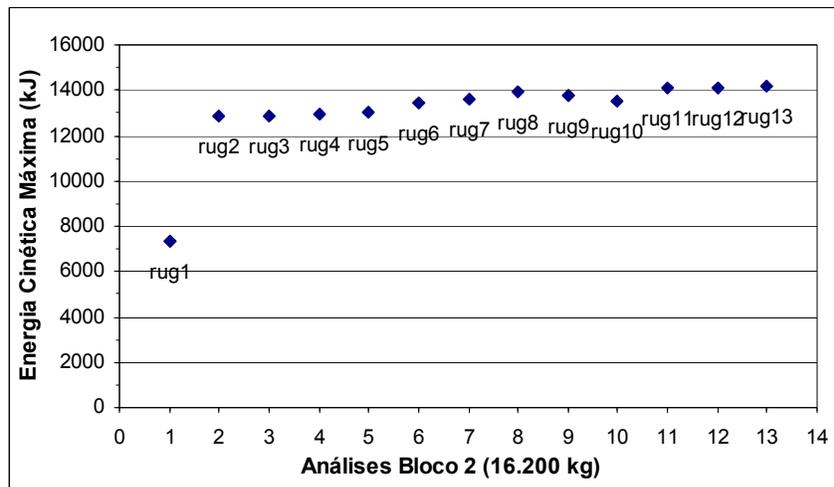


Figura 4.25 – Energia cinética máxima em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 2.

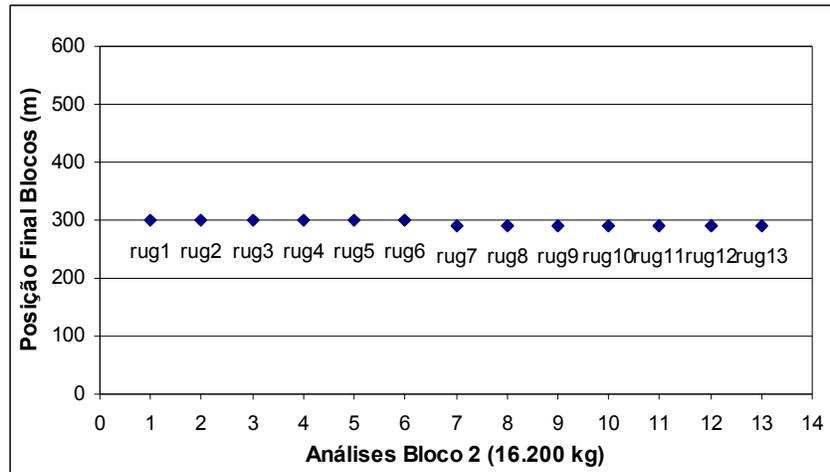


Figura 4.26 – Posição final dos blocos em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 2.

A Tabela 4.11 e Figuras 4.25 e 4.26 mostram as mesmas tendências observadas nas análises do Bloco 1. A diferença principal reside na magnitude dos valores de energia cinética máxima, proporcionais à maior massa do Bloco 2.

4.7.4 Análises e Resultados – Bloco 3 (162.000 kg)

A Tabela 4.12 apresenta as análises realizadas para o Bloco 3 com variação progressiva da rugosidade. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam os resultados das análises através das relações gráficas de Energia cinética máxima (E_{max}) e Posição final dos blocos (X_f) vs Análises realizadas com variação da rugosidade.

Tabela 4.12 – Resultados das análises com variação da rugosidade da superfície – Bloco 3.

Análises	Variação de Parâmetros		Resultados			
	Parte Superior da Encosta	Parte Inferior da Encosta	Energia Cinética Máxima		Posição Final do Bloco	
	Rugosidade (°)	Rugosidade (°)	Emax(kJ)	Xmax(m)	Xf(m)	#blocos
rug1	0	0	73109	224	301	1000
rug2	0,25	0,25	128695	260	301	993
rug3	0,50	0,50	129388	260	301	951
rug4	0,75	0,75	132485	224	301	878
rug5	1,00	1,00	133490	260	301	789
rug6	1,50	1,50	134181	260	301	595
rug7	2,00	2,00	135362	224	289	520
rug8	2,50	2,50	136435	271	289	596
rug9	3,00	3,00	139102	271	289	653
rug10	3,50	3,50	139311	271	289	694
rug11	4,00	4,00	137672	271	289	770
rug12	4,50	4,50	142246	224	289	758
rug13	5,00	5,00	142949	271	289	749

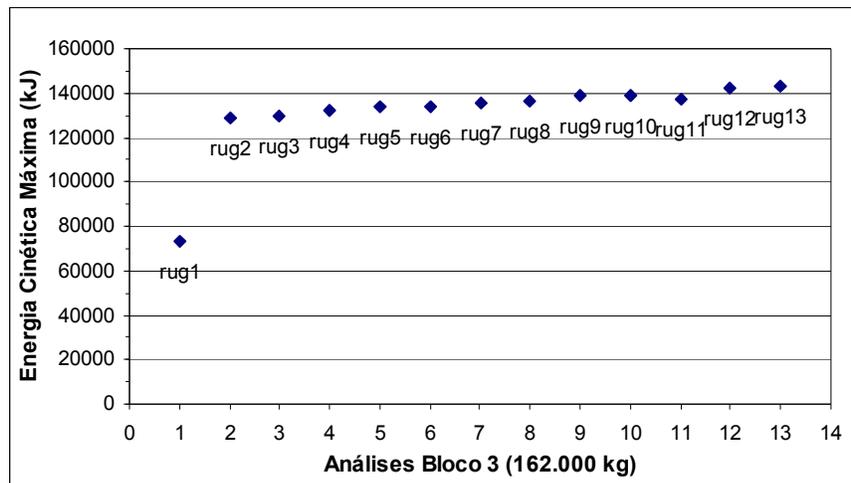


Figura 4.27 – Energia cinética máxima em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 3.

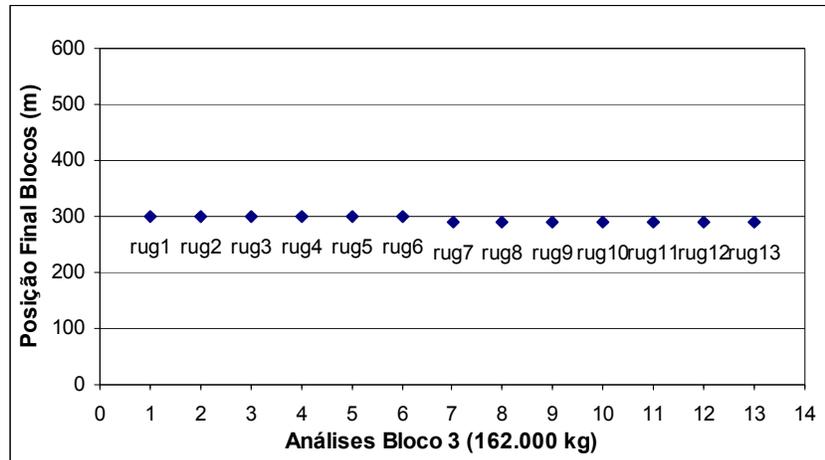


Figura 4.28 – Posição final dos blocos em função da variação da rugosidade da superfície – Bloco 3.

Os resultados da Tabela 4.12 e Figuras 4.27 e 4.28 mostram as mesmas tendências obtidas das análises dos Blocos 1 e 2, exceto pela magnitude de valores da energia cinética máxima atingida pelo Bloco 3.

4.7.5 Comentários

Considerando os resultados apresentados nas Figuras 4.23 e 4.28, constata-se que a rugosidade é um parâmetro que pode afetar a simulação de quedas de blocos. A análise rug1 com rugosidade igual a 0° mostra um comportamento completamente distinto das análises com rugosidades diferentes de 0° (rug2 a rug13).

Isto ocorre para as simulações dos 3 tipos de blocos, indicando que a massa do bloco não influencia a tendência de comportamento em função da variação da rugosidade.

Analisando o conjunto completo de simulações, de rugosidade igual a 0° (rug1) a rugosidade igual a 5° (rug13), constata-se que a variação da energia cinética máxima para o Bloco 1 é de 91%, para o Bloco 2 de 94% e para o Bloco 3 de 95%. Estes valores elevados são consequência das análises com rugosidade nula. Estas variações são reduzidas a 8% (Bloco 1), 10% (Bloco 2) e 1% (Bloco 3) quando se desconsidera a rugosidade nula. Isto indica que valores de rugosidade variando entre 0,25° a 5,0° não afetam de forma significativa os resultados das simulações, independentemente da massa do bloco.

Os resultados relativos à posição final dos blocos e a quantidade de blocos depositados, mostraram que as variações da rugosidade e da massa dos blocos não influenciaram os valores. Para todas as análises realizadas, os blocos se depositaram na mesma região da encosta.

4.8 ANÁLISES DOS TIPOS DE MOVIMENTOS DE QUEDA DOS BLOCOS

A característica dos movimentos desenvolvidos pelos blocos é um fator determinante na escolha e dimensionamento de um dispositivo de proteção e/ou redução de energia cinética.

De acordo com as análises realizadas no item anterior, onde o estudo focou na realização de simulações com variação dos parâmetros de entrada, constatou-se que essa variação também acarreta mudança dos resultados finais (energia cinética e posição final de parada dos blocos).

Entretanto, constatou-se que os comportamentos das trajetórias são similares para os blocos de massas distintas. Portanto, para o estudo dos tipos de movimentos de queda de blocos, foram selecionadas as análises iniciais e finais de cada parâmetro do Bloco 2 (16.200 kg), bloco correspondente às lascas 5, 6 e 7 do Morro do Escalavrado.

Esta seleção de análises permite ilustrar a variação dos tipos de movimento das trajetórias em função da variação de cada parâmetro.

4.8.1 Variação dos Coeficientes de Restituição (K_n e K_t)

Para comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos nas análises com variação do coeficiente de restituição foram utilizados as análises k1 e k5 do Bloco 2 com 1.000 trajetórias de blocos.

A Figura 4.29 apresenta a seção transversal da análise k1 e as trajetórias de queda com os menores coeficientes de restituição, $K_n = 0,36$ e $K_t = 0,83$ (parte superior) e $K_n = 0,30$ e $K_t = 0,53$ (parte inferior).

A Figura 4.30 apresenta a seção transversal da análise k5 e as trajetórias de queda com os maiores coeficientes de restituição, $K_n = 0,52$ e $K_t = 0,99$ (parte superior) e $K_n = 0,37$ e $K_t = 0,85$ (parte inferior).

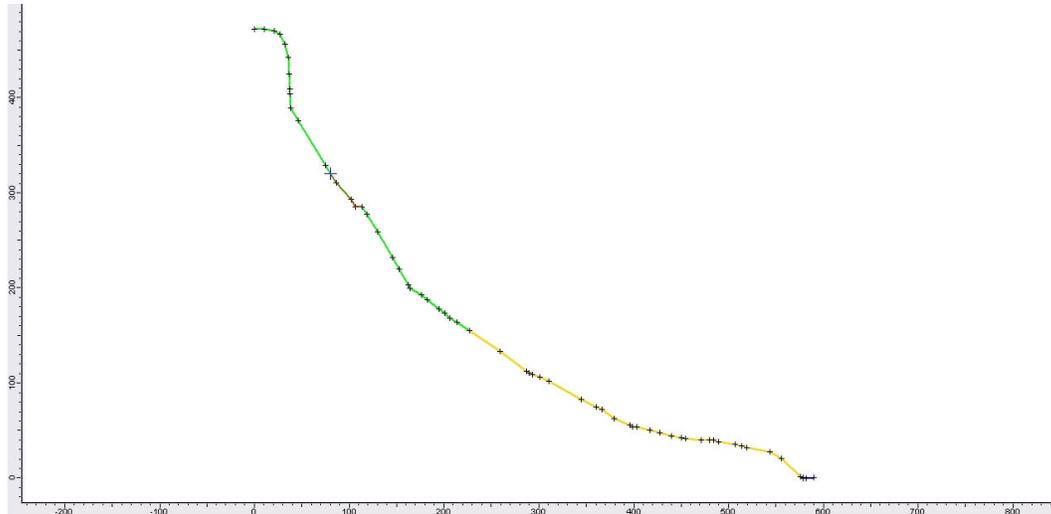


Figura 4.29 – Trajetórias de queda na análise k1 – Bloco 2.

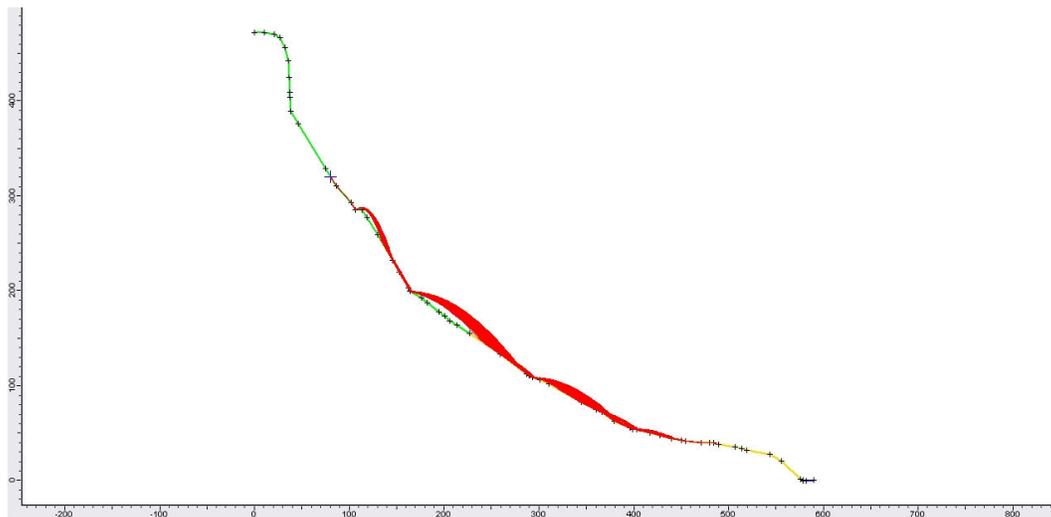


Figura 4.30 – Trajetórias de queda na análise k5 – Bloco 2.

Na Figura 4.29 os movimentos dos blocos são predominantemente de rolamento e/ou deslizamento, tal fato é explicado pelos baixos valores dos coeficientes de restituição. Como consequência, a superfície absorve grande parte da energia do bloco, inibindo os movimentos de saltos. Na Figura 4.31 o comportamento não é o mesmo, devido ao uso de valores de coeficientes de restituição altos. Nesta condição, a superfície absorve menos energia do bloco, resultando em movimentos tipo salto (queda livre) ao

longo da encosta. Ressalta-se que somente na base da encosta, com inclinação menor, os blocos desenvolvem movimentos tipo rolamento e/ou deslizamento.

4.8.2 Variação do Ângulo de Atrito (ϕ)

Para comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos nas análises com variação do ângulo de atrito foram utilizadas as análises phi1 e phi7 do Bloco 2 com 1.000 trajetórias de blocos.

A Figura 4.31 apresenta as trajetórias de bloco na seção transversal da análise phi1, com ângulos de atrito $\phi = 35^\circ$ (parte superior) e $\phi = 22,5^\circ$ (parte inferior). A Figura 4.33 apresenta os resultados da análise phi7, com ângulos de atrito $\phi = 50^\circ$ (parte superior) e $\phi = 37,5^\circ$ (parte inferior).

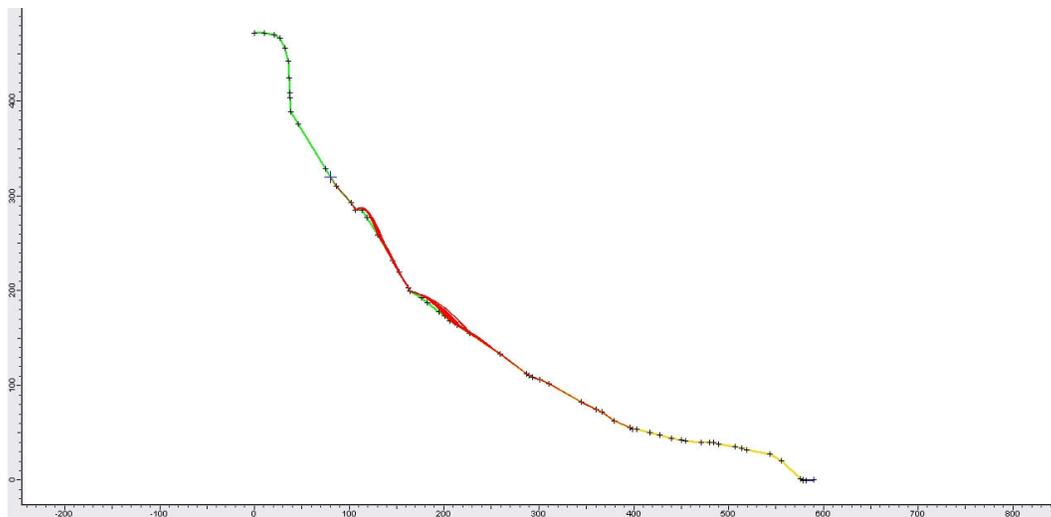


Figura 4.31 – Trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.

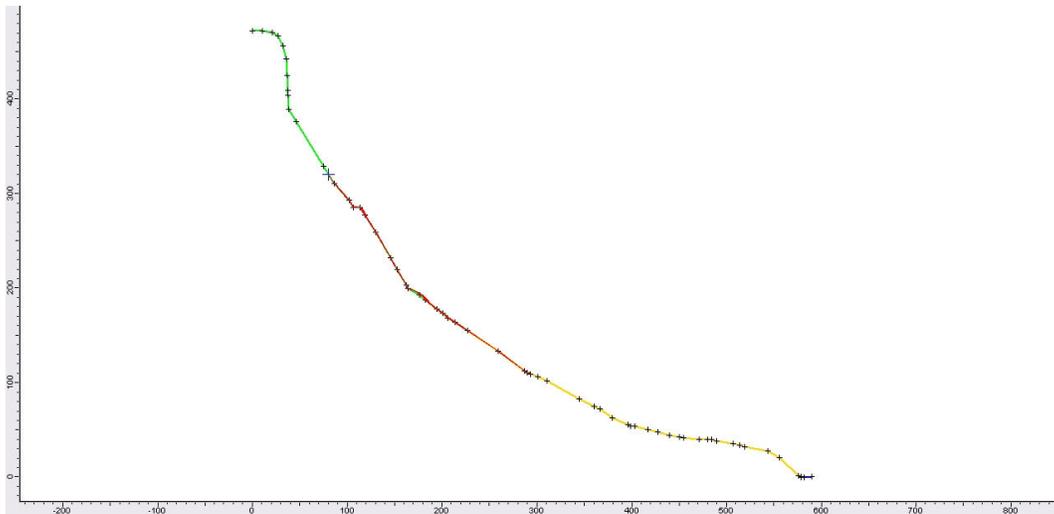


Figura 4.32 – Trajetórias de queda na análise phi7 – Bloco 2.

Na Figura 4.31 os blocos apresentaram movimentos tipo saltos, rolamentos e/ou deslizamento. Tal fato é explicado pelo baixo valor do ângulo de atrito considerado para a superfície da encosta, que permite o desenvolvimento de movimentos com menor ação da força de atrito, possibilitando ganho de energia que atingem o movimento de saltos. Na Figura 4.32 os tipos de movimentos dos blocos são predominantemente de rolamento e/ou deslizamento. Isto pode ser explicado pelo alto valor do ângulo de atrito da superfície da encosta, impossibilitando ganhos de energia ao ponto do bloco apresentar movimentos do tipo salto (queda livre).

4.8.3 Variação da Velocidade Inicial do Bloco (v)

A comparação dos tipos de movimentos das trajetórias de blocos com variação da velocidade inicial considerou as análises v1 e v7 do Bloco 2 com 1.000 trajetórias de blocos.

A Figura 4.33 apresenta as trajetórias de queda na seção transversal da análise v1 com velocidades iniciais horizontal e vertical do bloco nulas ($v_x = 0$ m/s, $v_y = 0$ m/s). A Figura 4.34 apresenta as trajetórias da análise v7, com velocidades iniciais horizontal e vertical do bloco iguais a 3 m/s ($v_x = 3$ m/s, $v_y = 3$ m/s).

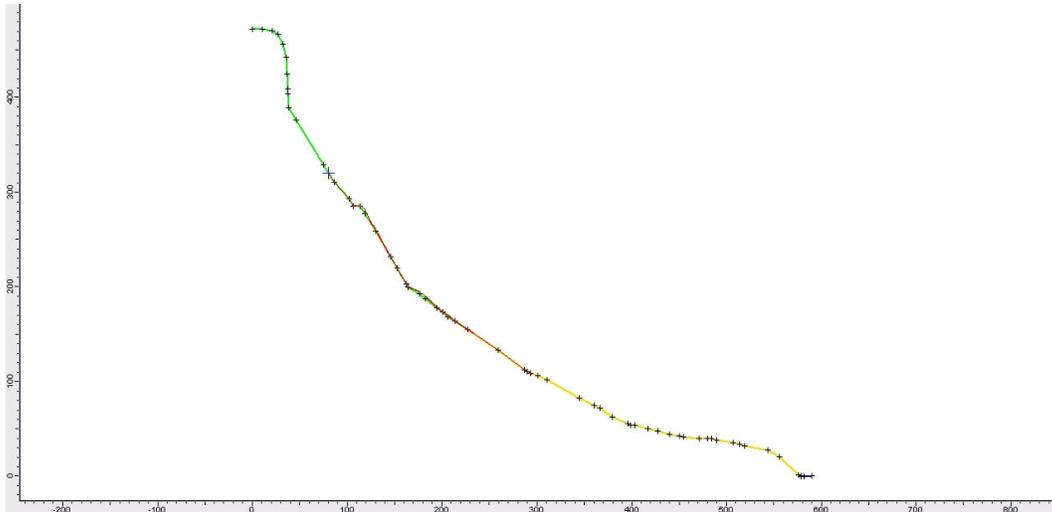


Figura 4.33 – Trajetórias de queda na análise v1 – Bloco 2.

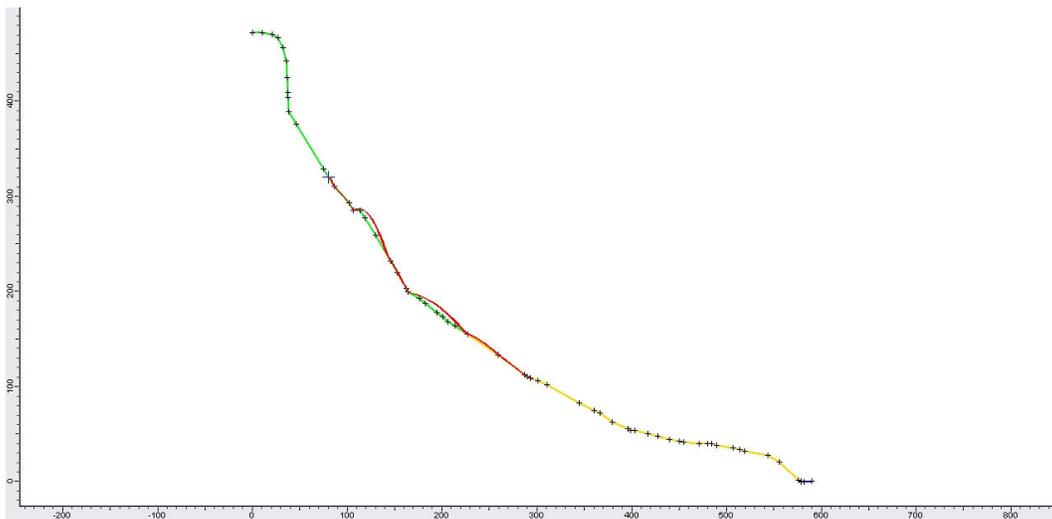


Figura 4.34 – Trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.

Na Figura 4.33 os blocos desenvolveram movimentos predominantemente do tipo rolamento e/ou deslizamento. Tal fato é explicado pelos valores nulos de velocidades iniciais do bloco. O bloco inicia sua trajetória partindo do estado de repouso e não há ganho de energia pela ação da gravidade suficiente para que o bloco desenvolva movimentos do tipo salto. Na Figura 4.34 os blocos apresentam movimentos do tipo saltos, rolamentos e/ou deslizamentos. A velocidade inicial de partida do bloco é considerável (3 m/s). A superfície da encosta é incapaz de absorver parte desta energia, possibilitando que o bloco desenvolva movimentos do tipo salto. Observa-se que o bloco somente desenvolve movimentos do tipo deslizamento e/ou rolamento na parte inferior da encosta, onde a inclinação é menor.

4.8.4 Variação da Rugosidade (rug)

A comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos considerando a variação da rugosidade foi realizada através das análises rug1 e rug13 do Bloco 2 com 1.000 trajetórias de blocos.

A Figura 4.35 apresenta as trajetórias na seção transversal da análise rug1, com rugosidade nula ($\text{rug} = 0^\circ$). A Figura 4.37 apresenta as trajetórias da análise rug13, com aplicação de rugosidade equivalente a 5° .

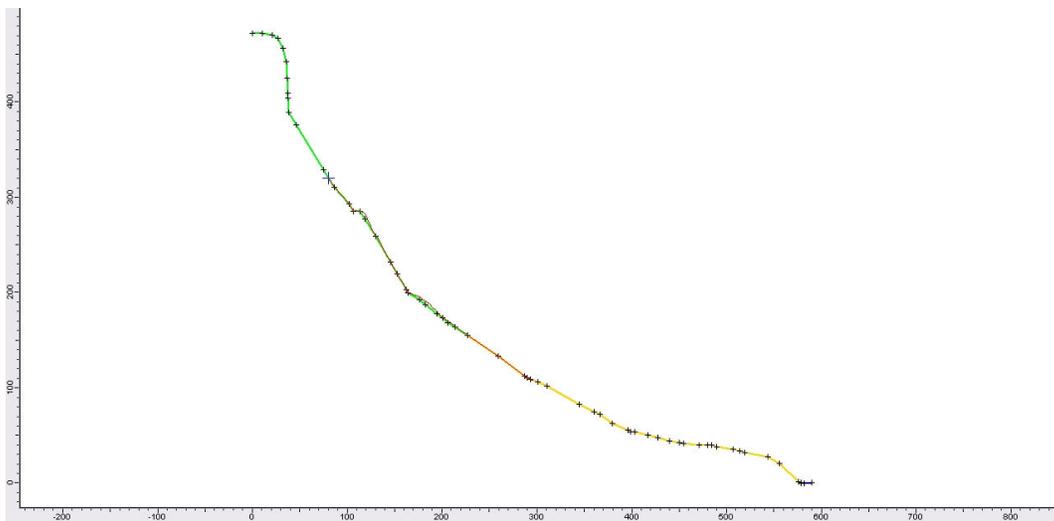


Figura 4.35 – Trajetórias de queda na análise rug1 – Bloco 2.

Observa-se na Figura 4.35 que os blocos apresentam movimentos predominantemente do tipo rolamento e/ou deslizamento. Tal fato é explicado pelo valor nulo da rugosidade, representando a superfície da encosta completamente lisa (sem ondulações). Esta condição elimina a possibilidade do bloco, no contacto com a superfície da encosta, saltar com ângulos de saída diversos. Na Figura 4.36, a análise com 5° de rugosidade da encosta indica que os blocos, ao tocarem a superfície, saltam com ângulos de saída diversos, proporcionando movimentos variados do tipo salto, rolamento e/ou deslizamento ao longo da encosta.

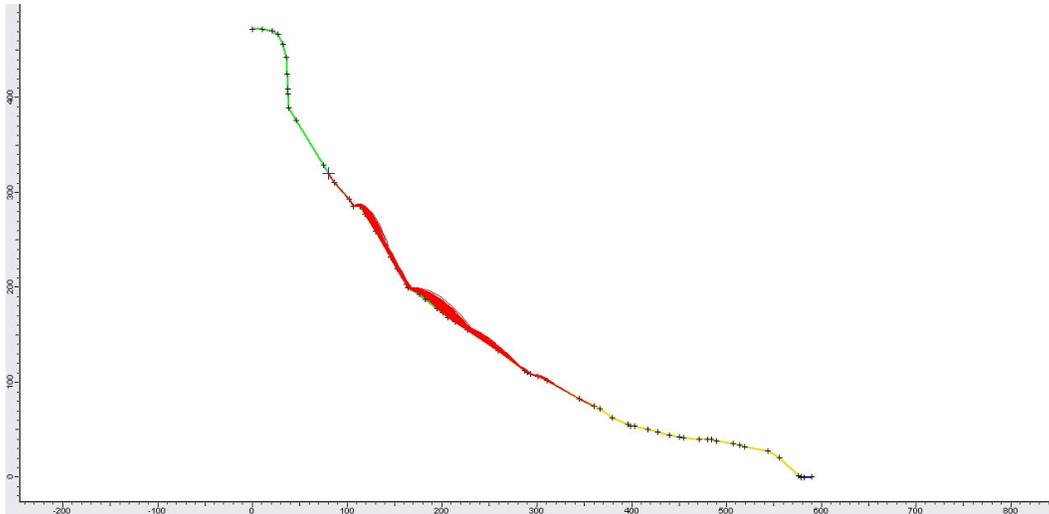


Figura 4.36 – Trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.

4.9 ANÁLISES DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE BLOCOS POR SIMULAÇÃO

O último conjunto de análises realizadas visa verificar a influência da quantidade de blocos na simulação das trajetórias de queda. Estas análises consideram o Bloco 2 (16.200 kg), representativo das lascas 5, 6 e 7 do Morro do Escalavrado, e número de blocos igual a 100, 1.000 e 10.000, correspondendo, portanto, a simulações com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias por cada análise. A variação progressiva dos parâmetros foi a mesma adotada nas análises anteriores.

4.9.1 Variação dos Coeficientes de Restituição K_n e K_t

Para as análises com variação do coeficiente de restituição, os valores foram uniformemente aumentados constituindo em 5 análises nomeadas por k_1 , k_2 , k_3 , k_4 e k_5 . Na parte superior da encosta, os coeficientes de restituição normal e tangencial variaram de 0,36 a 0,52 e 0,83 a 0,99 respectivamente, com desvio padrão de 0,02 para ambos. Na parte inferior da encosta, os coeficientes de restituição normal e tangencial variaram de 0,3 a 0,37 e 0,53 a 0,85 respectivamente, com desvio padrão de 0,01 para o coeficiente de restituição normal e de 0,04 para o coeficiente de restituição tangencial.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Desta forma, as análises foram realizadas com os seguintes valores:

(i) Velocidade inicial dos blocos: $v_x = 1,00$ m/s; $v_y = 0$ m/s; $v_{ang} = 0$ rad/s;

(ii) Ângulo de atrito: $\varnothing = 45^\circ$ (parte superior); $\varnothing = 30^\circ$ (parte inferior);

(iii) Rugosidade: 0° (parte superior e inferior).

A Tabela 4.13 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 considerando 100, 1.000 e 10.000 blocos por cada simulação. São apresentados os valores de energia cinética máxima e a distância horizontal na qual ocorrem. A análise realizada com 10.000 blocos foi considerada como referência ideal, ou seja, aquela que engloba maior número de trajetórias na simulação. Desta forma, apresenta-se uma coluna com a variação da energia cinética máxima das análises com 100 e 1.000 blocos em relação ao valor de energia obtido na análise de referência com 10.000 blocos (ΔE).

Tabela 4.13 – Resultados das análises com variação do coeficiente de restituição e do número de blocos simulados – Bloco 2.

Análises	Resultados das Simulações							
	100 blocos			1.000 blocos			10.000 blocos	
	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)
k1	928	106	8,2	982	106	2,9	1011	106
k2	5486	189	2,1	5566	189	0,7	5606	189
k3	12971	260	14,7	14707	271	3,3	15211	236
k4	17439	248	5,8	17819	248	3,8	18519	248
k5	21002	271	7,9	21255	260	6,8	22810	283

A Figura 4.37 apresenta os resultados das análises por meio da relação gráfica de Energia cinética máxima (E_{max}) vs Análises realizadas com variação dos coeficientes de restituição normal e tangencial (k). O gráfico apresenta os pontos referentes às análises conforme apresentado na Tabela 4.13.

Observando a Tabela 4.13 e a Figura 4.37, constata-se que o coeficiente de restituição é um parâmetro extremamente determinante para a simulação de quedas de blocos. Verifica-se que a variação da energia cinética total máxima (E_{max}) para a simulação com 100 trajetórias é de 2163%, para a simulação com 1.000 trajetórias é de 2064% e para a simulação com 10.000 trajetórias é de 2156%. Esses valores indicam que a

simulação da trajetória é extremamente sensível à variação dos coeficientes de restituição.

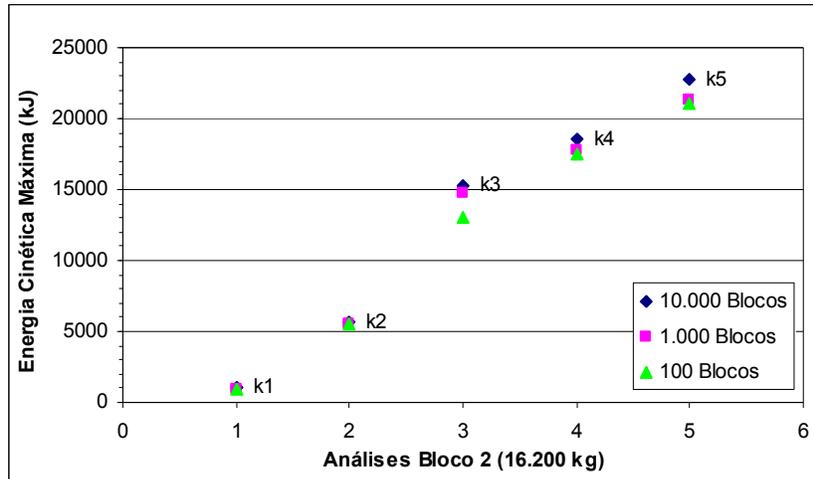


Figura 4.37 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação do coeficiente de restituição – Bloco 2.

Observando a variação dos valores de energia cinética máxima obtidos nas análises k1 a k5, as análises de 100 blocos fornecem valores mais reduzidos do que as análises de 10.000 blocos, com variação média de 7,7%. Comparando as análises k1 a k5 de 1.000 blocos com as de 10.000 blocos observa-se que novamente os valores de energia são menores, com variação média de 3,5%.

Estes valores de variação média entre os conjuntos de análises de 100, 1.000 e 10.000 blocos indicaram que as análises realizadas com 1.000 blocos são as que mais se aproximam da análise ideal (10.000 trajetórias), portanto, são as mais adequadas para a realização das simulações, apresentando rapidez na execução dos cálculos e mantendo o mesmo nível de segurança das análises com 10.000 trajetórias de blocos.

4.9.2 Variação do Ângulo de Atrito (ϕ)

Para as análises com variação do ângulo de atrito, os valores foram uniformemente distribuídos conforme aplicado nos itens anteriores em 7 análises nomeadas por phi1, phi2, phi3, phi4, phi5, phi6 e phi7. Na parte superior da encosta, o valor do ângulo de atrito variou de 35,0° a 50,0°, com desvio padrão de 1°. Na parte inferior da encosta, o valor do ângulo de atrito variou de 22,5° a 37,5°, com desvio padrão de 1°.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Desta forma, as análises foram realizadas com os seguintes valores:

(i) Velocidade inicial dos blocos: $v_x = 1,00$ m/s; $v_y = 0$ m/s; $v_{ang} = 0$ rad/s;

(ii) Rugosidade: 0° (parte superior e inferior);

(iii) Coeficientes de restituição:

$K_n = 0,44$ e $K_t = 0,91$ (parte superior);

$K_n = 0,335$ e $K_t = 0,70$ (parte inferior).

A Tabela 4.14 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 com resultados considerando 100, 1.000 e 10.000 blocos por cada simulação. São apresentados os valores de energia cinética máxima e das distâncias horizontal na qual ocorrem. Considerando a análise realizada com 10.000 blocos como referência, é apresentada uma coluna com a variação da energia cinética máxima dos valores obtidos nas análises com 100 e 1.000 blocos em relação ao valor obtido na análise referência com 10.000 blocos (ΔE).

Tabela 4.14 – Resultados das análises com variação do ângulo de atrito e do número de blocos simulados – Bloco 2.

Análises	Resultados das Simulações								
	100 blocos			1.000 blocos			10.000 blocos		
	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	
phi1	13167	224	1,70	13229	224	0,10	13238	224	
phi2	13216	224	0,20	13220	224	0,20	13242	224	
phi3	13033	224	0,90	13060	224	0,70	13157	224	
phi4	12989	224	0,02	12991	224	0,00	12991	224	
phi5	12816	260	1,30	12951	224	0,30	12985	224	
phi6	7136	212	15,40	8542	224	1,20	8441	224	
phi7	5427	212	11,40	5740	201	6,30	6126	212	

A Figura 4.38 apresenta os resultados das análises em termos gráficos com Energia cinética máxima (E_{máx}) vs Análises realizadas com variação do ângulo de atrito (ϕ). O gráfico apresenta os pontos referentes às análises realizadas conforme apresentado na Tabela 4.14.

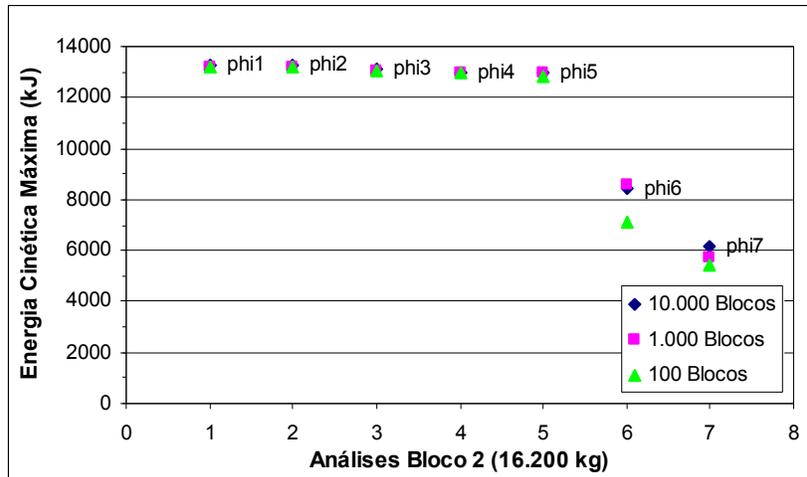


Figura 4.38 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação do ângulo de atrito – Bloco 2.

Observando a Tabela 4.14, constata-se que o ângulo de atrito é um parâmetro de influência para a simulação de quedas de blocos. A variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100 trajetórias é de 142%, para a simulação com 1.000 trajetórias é de 130% e para a simulação com 10.000 trajetórias é de 116%. Esses valores demonstram que o comportamento da simulação é sensível ao parâmetro.

Observando a variação dos valores de energia cinética máxima obtidos nas análises phi1 a phi7, pode-se constatar que os valores das variações são maiores para ângulos de atrito maiores (phi6 e phi7). O valor médio da variação apresentado nas análises com 100 blocos em relação às análises base de 10.000 blocos é igual a 4,4%, maior em relação ao valor médio apresentado nas análises com 1.000 blocos que é igual a 1,25%. De forma análoga, pode-se concluir que a adoção de análises com 1.000 blocos é mais adequada do que a de 100 blocos, visto que a variação apresenta menos impacto no resultado final das análises em função da variação do ângulo de atrito.

De forma análoga ao item anterior, pode-se concluir que a adoção de análises com 1.000 blocos é mais adequada do que a de 100 blocos.

4.9.3 Variação da Velocidade (v)

Para as análises com variação da velocidade vertical e horizontal inicial dos blocos, os valores foram distribuídos em 7 análises nomeadas como v1, v2, v3, v4, v5, v6 e v7. As componentes de velocidade inicial horizontal (v_x) e vertical (v_y) variaram igualmente com pares de valores de 0 a 3 m/s, com aplicação de desvio padrão de 0,1 m/s.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Desta forma, as análises foram realizadas com os seguintes valores:

- (i) Velocidade inicial angular: $v_{ang} = 0$ rad/s;
- (ii) Ângulo de atrito: $\varnothing = 45^\circ$ (parte superior); $\varnothing = 30^\circ$ (parte inferior);
- (iii) Rugosidade: 0° (parte superior e inferior);
- (iv) Coeficientes de restituição:
 - $K_n = 0,44$ e $K_t = 0,91$ (parte superior);
 - $K_n = 0,335$ e $K_t = 0,70$ (parte inferior).

A Tabela 4.15 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 considerando 100, 1.000 e 10.000 blocos por cada simulação. São apresentados os valores de energia cinética máxima e distância horizontal. Novamente, apresenta-se uma coluna com a variação da energia cinética máxima dos valores obtidos nas análises com 100 e 1.000 blocos em relação ao valor obtido na análise referência com 10.000 blocos (ΔE).

Tabela 4.15 – Resultados das análises com variação da velocidade inicial e do número de blocos simulados – Bloco 2.

Análises	Resultados das Simulações								
	100 blocos			1.000 blocos			10.000 blocos		
	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	
v1	7153	224	0,01	7154	224	0,00	7154	224	
v2	8464	224	0,01	8464	224	0,01	8465	224	
v3	12808	260	0,40	12860	260	0,01	12858	260	
v4	11703	248	0,80	11752	248	0,35	11793	260	
v5	12985	224	0,05	12991	224	0,01	12992	224	
v6	13318	224	0,15	13333	224	0,04	13338	224	
v7	13649	260	0,20	13674	224	0,02	13677	224	

A Figura 4.39 apresenta a relação gráfica de Energia cinética máxima (Emax) vs Análises realizadas com variação da velocidade inicial (v). O gráfico apresenta os pontos referentes às análises realizadas conforme apresentado na Tabela 4.15.

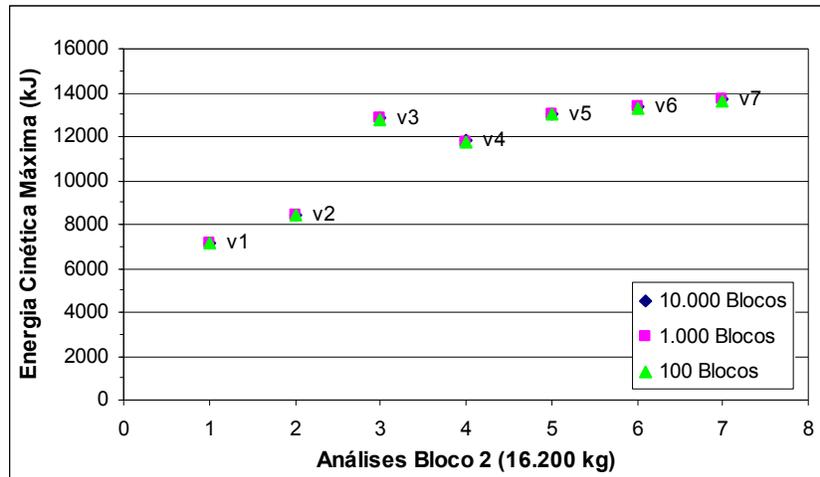


Figura 4.39 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação da velocidade inicial – Bloco 2.

Verificando as análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias, a variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100 trajetórias é de 91%, 1.000 trajetórias é de 91% e para a simulação com 10.000 trajetórias é de 91%.

Observando a variação dos valores de energia cinética máxima obtidos nas análises v1 a v7, o valor médio da variação apresentado nas análises com 100 blocos em relação às análises de 10.000 blocos é igual a 0,23%, ligeiramente maior do valor médio da variação apresentado nas análises com 100 blocos em relação às análises de 10.000 blocos é igual a 0,06%.

4.9.4 Variação da Rugosidade

Para as análises com variação da rugosidade, os valores foram distribuídos em 13 análises nomeadas por rug1, rug2, rug3, rug4, rug5, rug6, rug7, rug8, rug9, rug10, rug11, rug12 e rug13. O valor adotado variou igualmente de 0° a 5° para a parte superior e inferior da encosta.

Os demais parâmetros empregados na análise foram mantidos constantes, sem aplicação de desvio padrão, de modo a não influenciar no resultado final dos estudos.

Desta forma, as análises foram realizadas com os seguintes valores:

(i) Velocidade inicial dos blocos: $v_x = 1,00$ m/s; $v_y = 0$ m/s; $v_{ang} = 0$ rad/s;

(ii) Ângulo de atrito: $\varnothing = 45^\circ$ (parte superior); $\varnothing = 30^\circ$ (parte inferior);

(iii) Coeficientes de restituição:

$K_n = 0,44$ e $K_t = 0,91$ (parte superior);

$K_n = 0,335$ e $K_t = 0,70$ (parte inferior).

A Tabela 4.16 apresenta as análises realizadas para o Bloco 2 considerando 100, 1.000 e 10.000 blocos por cada simulação. São apresentados os valores de energia cinética máxima e da distância horizontal na qual ocorrem. A coluna ΔE apresenta a variação da energia cinética máxima dos valores obtidos nas análises com 100 e 1.000 blocos em relação ao valor obtido na análise referência com 10.000 blocos.

Tabela 4.16 – Resultados das análises com variação da rugosidade e do número de blocos simulados – Bloco 2.

Análises	Resultados das Simulações								
	100 blocos			1.000 blocos			10.000 blocos		
	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	ΔE (%)	E _{max} (kJ)	X _{max} (m)	
rug1	7311	224	0,0	7311	224	0,0	7311	224	
rug2	12856	260	0,5	12884	260	0,3	12921	260	
rug3	12866	260	0,8	12874	260	0,8	12973	260	
rug4	12971	224	1,4	12924	224	1,8	13161	260	
rug5	12821	260	4,8	13036	224	3,2	13473	260	
rug6	12997	260	6,8	13470	260	3,5	13952	271	
rug7	13330	260	4,5	13644	260	2,3	13963	271	
rug8	12930	224	7,6	13967	271	0,2	13992	271	
rug9	12846	260	8,5	13773	271	1,9	14041	271	
rug10	13255	224	4,9	13553	260	2,8	13945	224	
rug11	13269	224	6,7	14077	271	1,0	14217	271	
rug12	13541	224	5,9	14084	271	2,1	14386	224	
rug13	13427	224	10,6	14173	236	5,6	15016	224	

A Figura 4.40 apresenta a relação gráfica de Energia cinética máxima (Emax) vs Análises realizadas com variação da rugosidade (rug). O gráfico apresenta os pontos referentes às análises realizadas conforme apresentado na Tabela 4.16.

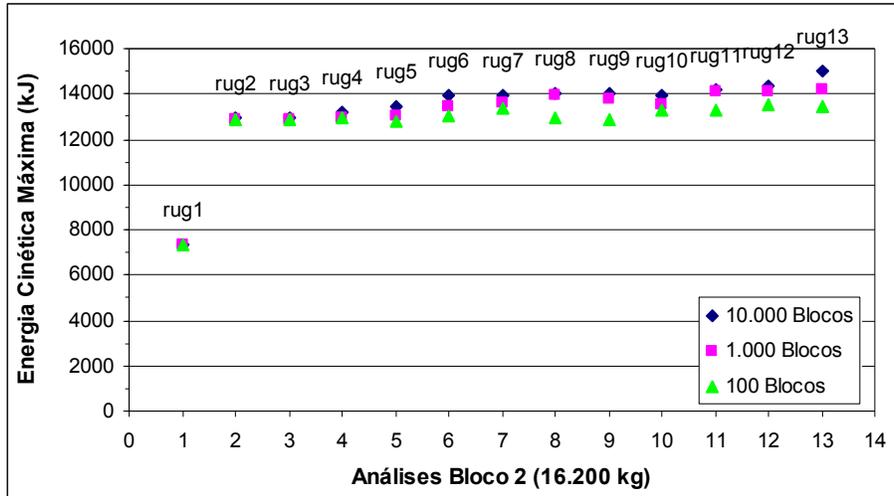


Figura 4.40 – Variação da energia cinética máxima em relação a análises com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias com variação da rugosidade – Bloco 2.

Observando a Tabela 4.16 e a Figura 4.40, constata-se que a rugosidade é um parâmetro determinante para a simulação de quedas de blocos, principalmente quando se trata da adoção ou não da rugosidade igual a 0° (superfície da encosta completamente lisa).

A comparação dos resultados das análises rug1 a rug13 indica uma variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias igual a 84%, 94% e 105%, respectivamente.

Desconsiderando a análise rug1, com rugosidade equivalente a 0° , as comparações entre as análises rug2 a rug13 indicam uma variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias igual a 4,5%, 10% e 16%, respectivamente.

Observa-se ainda que os valores de energia cinética máxima obtidos nas análises rug1 a rug13, o valor médio da variação apresentado nas análises com 100 blocos em relação às análises de 10.000 blocos é igual a 4,85%, maior comparando ao valor

médio da variação apresentado nas análises com 1.000 blocos em relação às análises de 10.000 blocos é igual a 1,96%.

4.9.5 Análise dos Tipos de Movimento de Queda dos Blocos

De acordo com as análises realizadas no item anterior, onde o estudo focou as simulações com variação da quantidade de blocos (100, 1.000 e 10.000 trajetórias), constatou-se que essa variação pode acarretar considerável mudança dos resultados finais (energia cinética máxima e posição na qual ocorre).

Portanto, para o estudo dos tipos de movimentos de queda de blocos em função do número de trajetórias, selecionaram-se as análises com a variação dos parâmetros referentes ao Bloco 2 (16.200 kg), bloco correspondente às lascas 5, 6 e 7 do Morro do Escalavrado.

(i) Coeficientes de Restituição (K_n e K_t)

Para comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos nas análises com variação da quantidade de blocos, foram utilizadas as análises k5 do Bloco 2 (16.200 kg) com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias de blocos (Figuras 4.41 a 4.43).

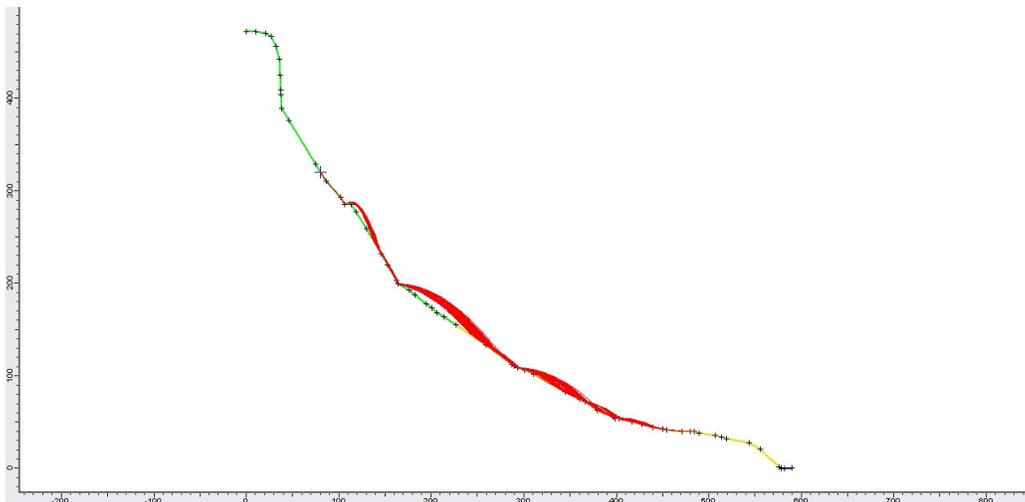


Figura 4.41 – 100 trajetórias de queda na análise k5 – Bloco 2.

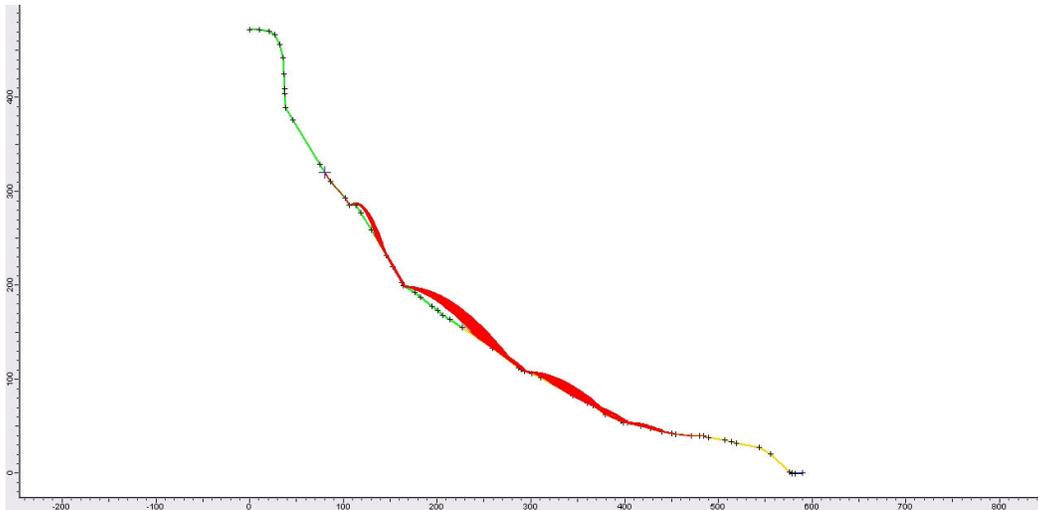


Figura 4.42 – 1.000 trajetórias de queda desenvolvidas na análise k5 – Bloco 2.

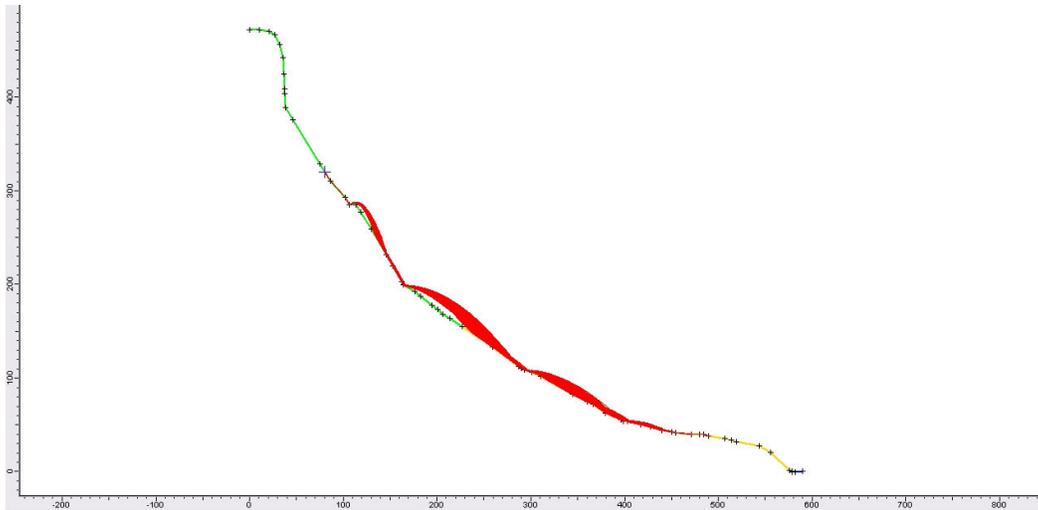


Figura 4.43 – 10.000 trajetórias de queda na análise k5 – Bloco 2.

Observando as Figuras 4.41 a 4.43, os movimentos dos blocos são de salto, deslizamento e/ou rolamento. O comportamento das trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos ao longo da seção da encosta são equivalentes para os três conjuntos de análises (100, 1.000 e 10.000 blocos). Tal fato mostra que a variação do número de blocos das análises não interfere no tipo de movimento das trajetórias dos mesmos.

(ii) Ângulo de Atrito (\emptyset)

Para comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos nas análises com variação da quantidade de blocos, foram utilizadas as análises phi1 do Bloco 2 (16.200 kg) com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias de blocos (Figuras 4.44 a 4.46).

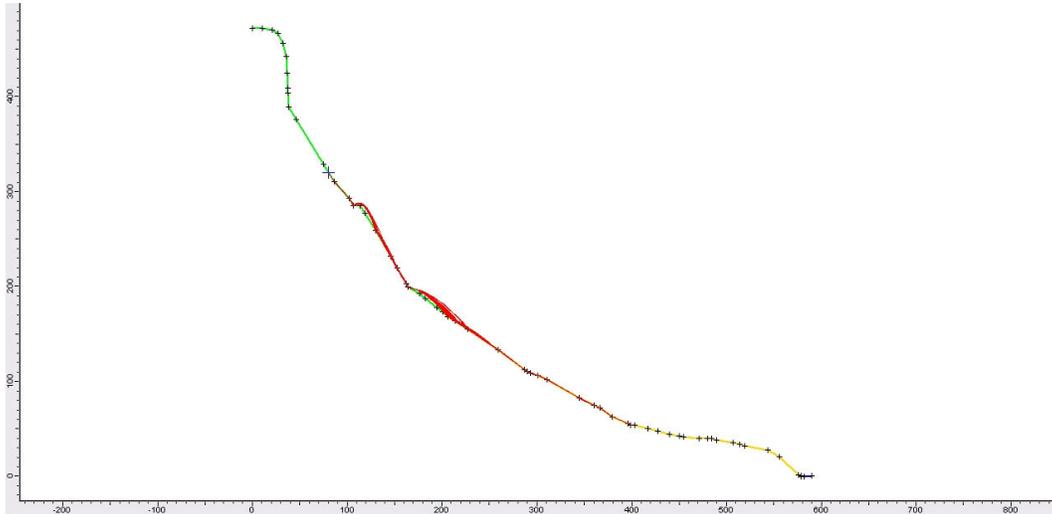


Figura 4.44 – 100 trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.

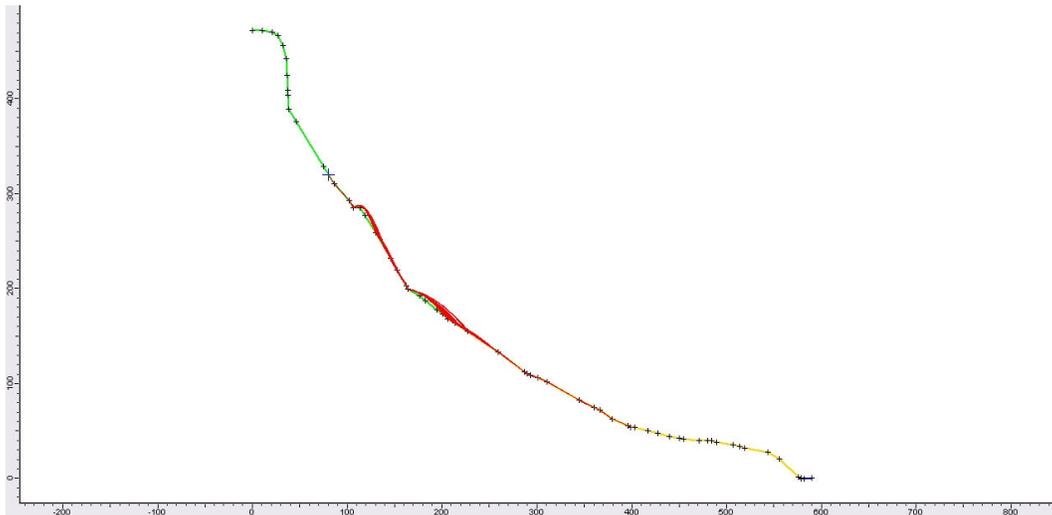


Figura 4.45 – 1.000 trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.

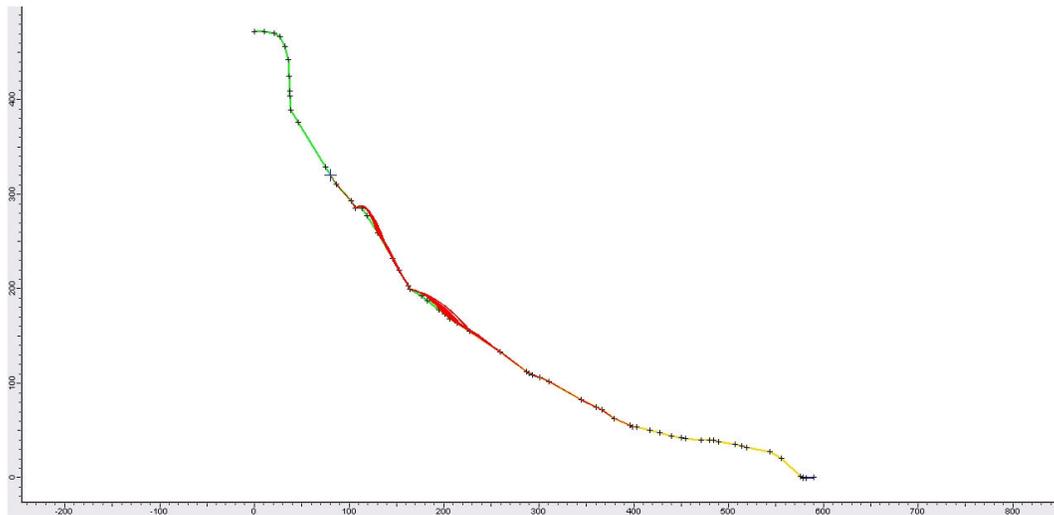


Figura 4.46 – 10.000 trajetórias de queda na análise phi1 – Bloco 2.

Observando as Figuras 4.44 a 4.46, os movimentos dos blocos são de salto, rolamento e/ou deslizamento. O comportamento das trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos ao longo da seção da encosta são equivalentes para os três conjuntos de análises (100, 1.000 e 10.000 blocos). Tal fato mostra que a variação do número de blocos não interfere no tipo de movimento das trajetórias dos mesmos.

(iii) Velocidade Inicial do Bloco (v)

Para comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos nas análises com variação da quantidade de blocos, foram utilizadas as análises v7 do Bloco 2 (16.200 kg) com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias de blocos. (Figuras 4.47 a 4.49).

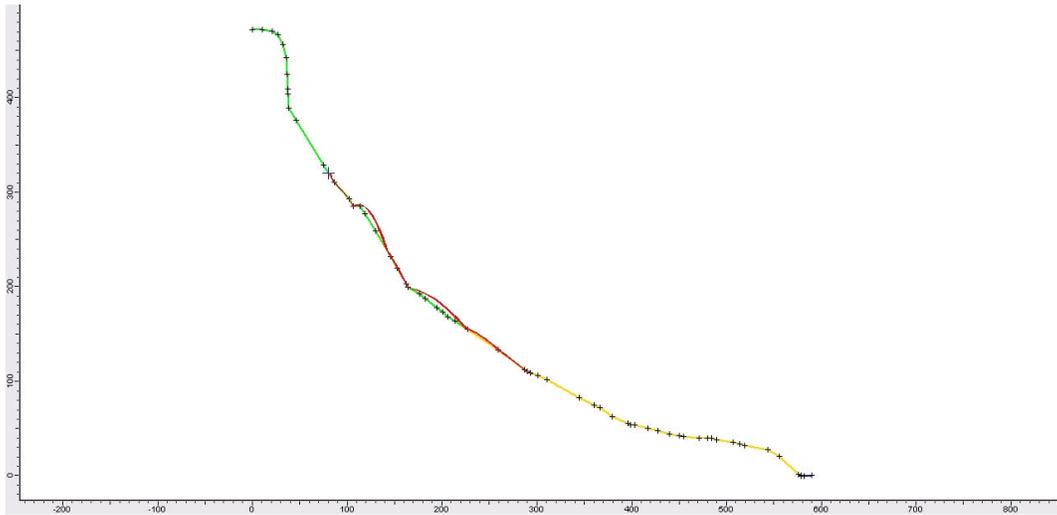


Figura 4.47 – 100 trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.

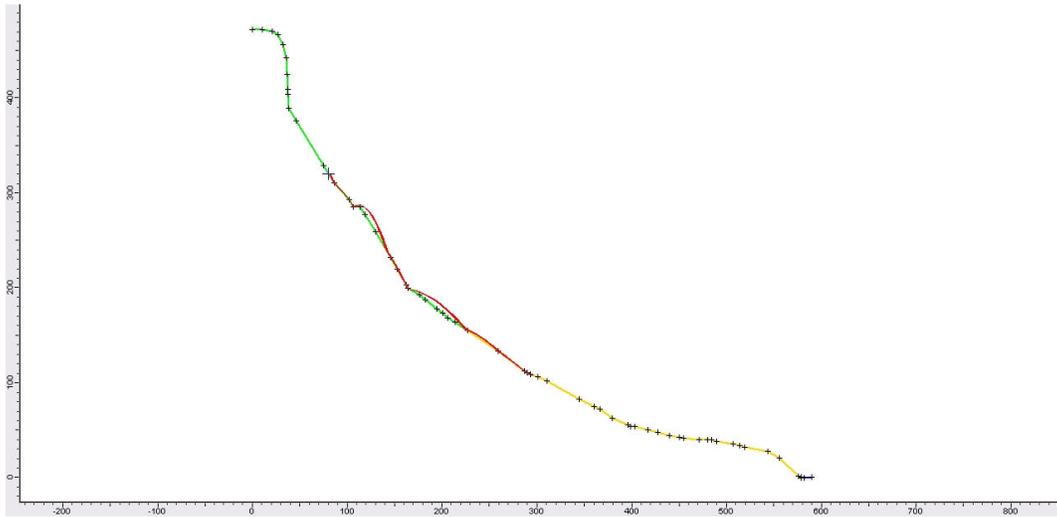


Figura 4.48 – 1.000 trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.

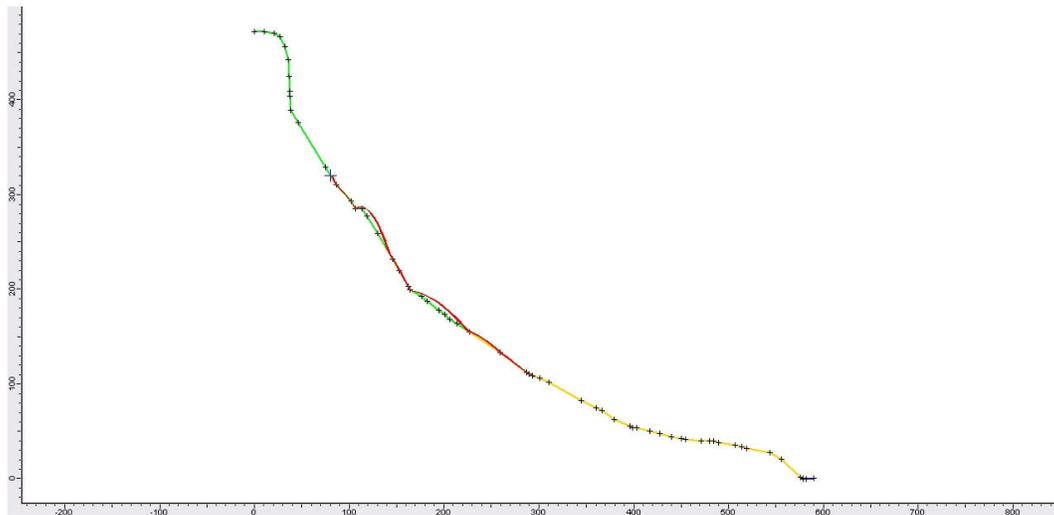


Figura 4.49 – 10.000 trajetórias de queda na análise v7 – Bloco 2.

Observando as Figuras 4.47 a 4.49, os movimentos dos blocos são de salto, deslizamento e/ou rolamento. Novamente, o comportamento das trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos ao longo da seção da encosta são equivalentes para os três conjuntos de análises (100, 1.000 e 10.000 blocos). Tal fato mostra que a variação do número de blocos aplicado nas análises não interfere no tipo de movimento das trajetórias dos mesmos.

(iv) Variação da Rugosidade (rug)

Para comparação dos tipos de movimentos desenvolvidos nas trajetórias de blocos nas análises com variação da quantidade de blocos foram utilizadas as análises rug13 do Bloco 2 (16.200 kg) com 100, 1.000 e 10.000 blocos simulados (Figuras 4.50 a 4.52).

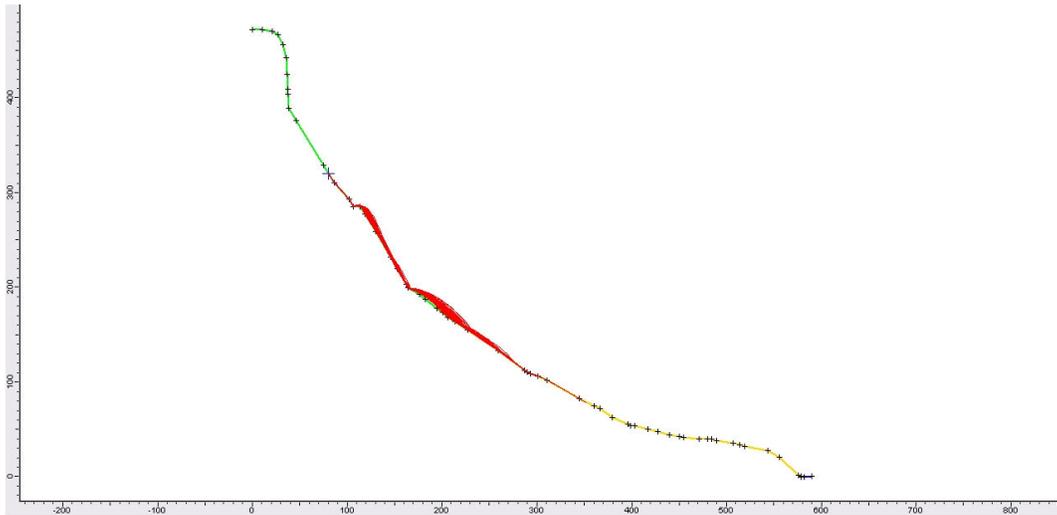


Figura 4.50 – 100 trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.

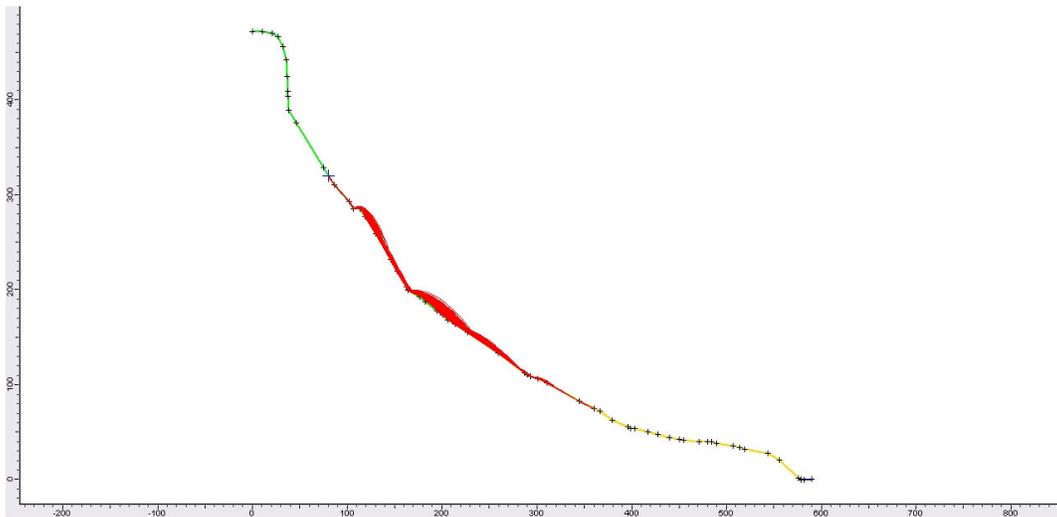


Figura 4.51 – 1.000 trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.

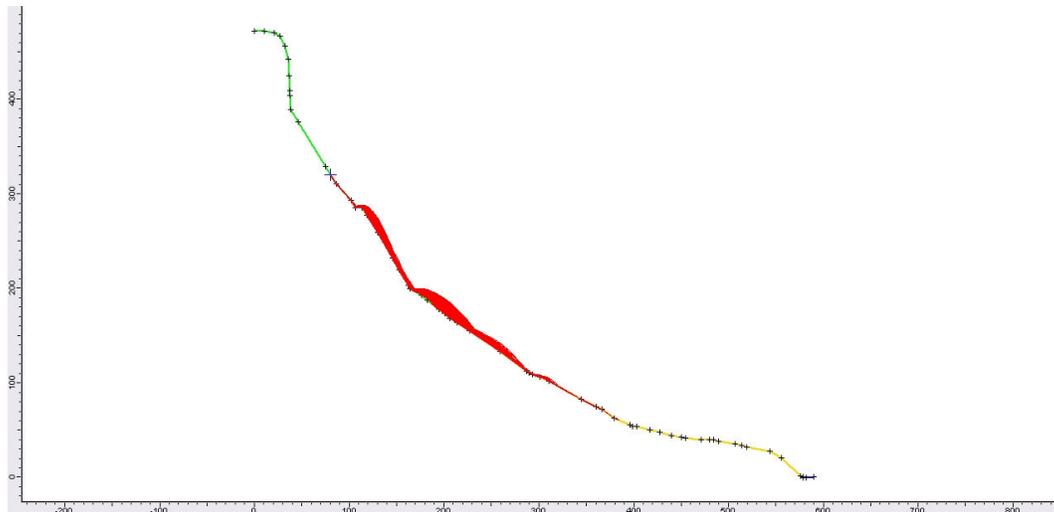


Figura 4.52 – 10.000 trajetórias de queda na análise rug13 – Bloco 2.

Observando as Figuras 4.50 a 4.52, os blocos ao tocarem a superfície da encosta, saltam a jusante com ângulos de saída diversos, proporcionando o desenvolvimento de movimentos variados, do tipo salto, rolamento e/ou deslizamento ao longo da encosta. O comportamento das trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos ao longo da seção da encosta são equivalentes para os três conjuntos de análises (100, 1.000 e 10.000 blocos). Tal fato mostra que a variação do número de blocos nas análises não interfere no comportamento das trajetórias dos mesmos, de forma similar aos itens anteriores.

4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi realizado o estudo das análises paramétricas da seção transversal mais crítica do Morro do Escalavrado, no Município de Teresópolis/RJ, em relação à rodovia BR-116, principal ligação entre as cidades de Rio de Janeiro e Além Paraíba/MG.

A primeira fase do estudo visou analisar o comportamento e a influência de parâmetros tais como os coeficientes de restituição normal e tangencial, ângulo de atrito, rugosidade e velocidade inicial nas trajetórias dos blocos simulados. Foram realizadas análises com a variação progressiva de um único parâmetro, mantendo-se os demais parâmetros constantes.

Nestas análises foram adotados três blocos distintos partindo do mesmo ponto da encosta: (i) Bloco 2 correspondendo ao bloco real referente às lascas 5, 6 e 7 do Morro do Escalavrado, com massa igual a 16.200 kg; (ii) Bloco 1 com massa 10 vezes menor ao bloco real; (iii) Bloco 3 com massa 10 vezes maior ao bloco real. A utilização de blocos fictícios (Blocos 1 e 3) possibilitou uma abordagem completa quanto à ordem de grandeza das lascas presentes no Morro do Escalavrado.

A Tabela 4.17 apresenta um resumo dos resultados de variação de energia cinética em função da massa dos Blocos 1, 2 e 3, considerando a variação dos coeficientes de restituição, ângulo de atrito, velocidade inicial e rugosidade. Constatou-se que os parâmetros analisados influenciam a simulação das trajetórias de queda, sendo os coeficientes de restituição os parâmetros mais relevantes no resultado final das simulações, seguidos pelo ângulo de atrito, rugosidade e velocidade inicial.

Tabela 4.17 – Resumo dos resultados de variação da energia cinética máxima das análises com variação de massa dos Blocos 1, 2 e 3 em função da variação dos coeficientes de restituição, ângulo de atrito, velocidade inicial e rugosidade.

	Variação da Energia Cinética Máxima – Emax (%)			
	Coeficientes de Restituição (K)	Ângulo de Atrito (Ø)	Velocidade Inicial (v)	Rugosidade (rug)
Bloco 1 (1.620 kg)	2093%	130%	91%	91%
Bloco 2 (16.200 kg)	2064%	130%	91%	94%
Bloco 3 (162.000 kg)	2221%	142%	91%	95%

A variação destes parâmetros também acarreta mudanças no comportamento das trajetórias de queda dos blocos. Entretanto, constatou-se que o comportamento das trajetórias é o mesmo para os blocos de massas distintas.

As Figuras 4.53 a 4.56 apresentam os gráficos referentes aos valores de energia cinética máxima dividido pela massa do bloco em relação às análises realizadas com variação dos parâmetros (coeficiente de restituição normal e tangencial, ângulo de atrito, velocidade e rugosidade). Em cada gráfico foi representado os pontos referentes aos blocos 1, 2 e 3 simultaneamente.

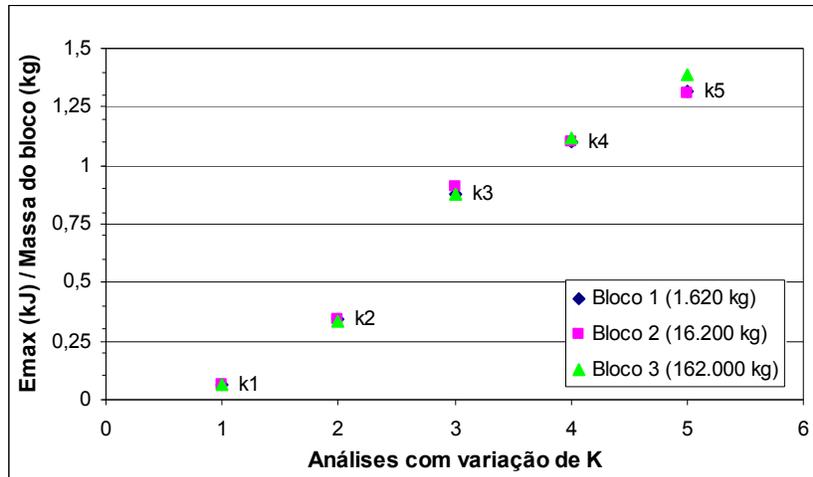


Figura 4.53 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação do coeficiente de restituição.

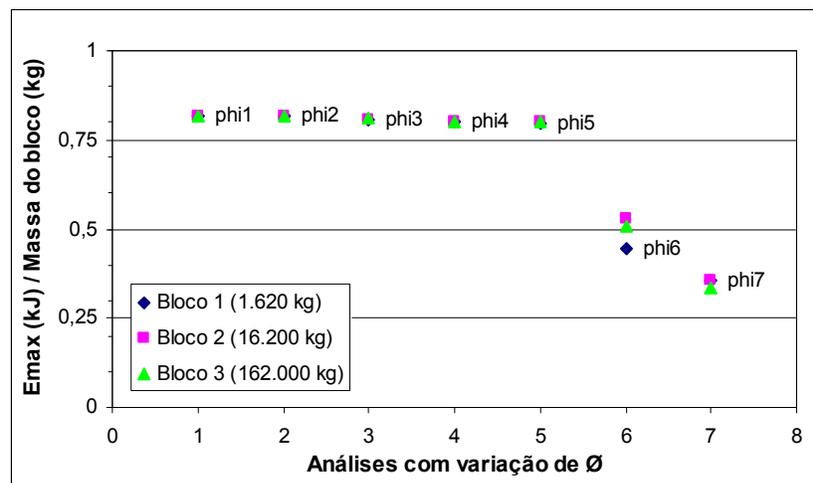


Figura 4.54 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação do ângulo de atrito.

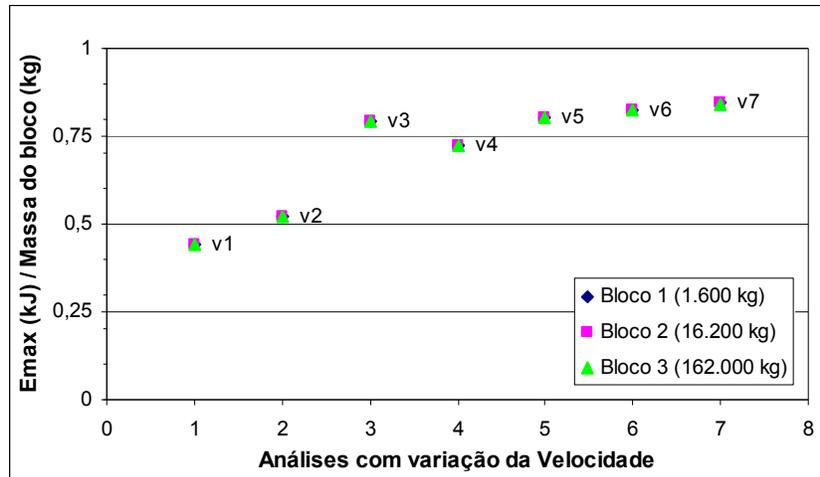


Figura 4.55 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação da velocidade inicial do bloco.

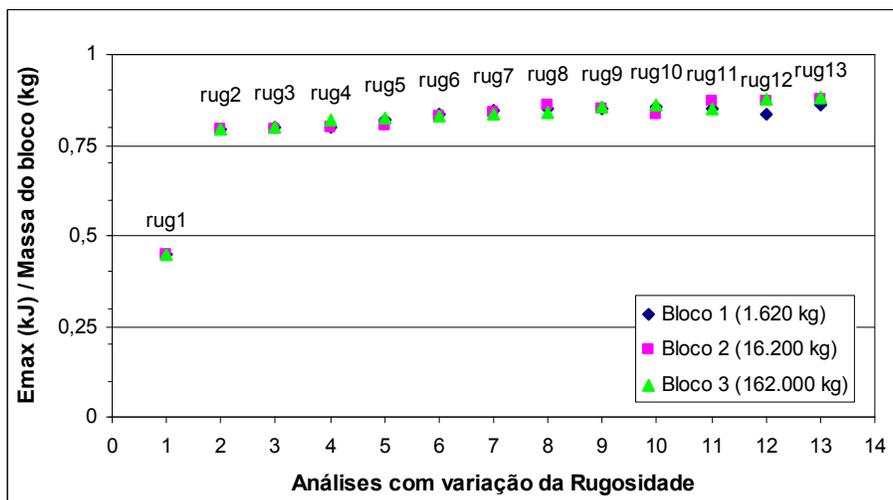


Figura 4.56 – Variação do valor da energia cinética máxima dividida pela massa do bloco em relação a análises com variação da rugosidade da superfície.

As Figuras 4.53 a 4.56 demonstraram que a variação relativa das análises em função da variação dos parâmetros adotados é equivalente para blocos de massa diferente.

Na segunda fase do estudo, a fim de verificar a influência da quantidade de número de blocos na simulação das trajetórias de queda, foram realizadas análises paramétricas adotando-se o Bloco 2 (16.200 kg) com 100, 1.000, e 10.000 trajetórias de blocos. Considerou-se também a variação progressiva de um único parâmetro com os demais constantes, conforme adotado na primeira fase do estudo.

A Tabela 4.18 apresenta um resumo dos resultados de variação de energia cinética máxima em função da variação dos parâmetros de influência considerando-se 100, 1.000 e 10.000 blocos para a simulação das trajetórias de queda. Constatou-se que a variação de energia cinética obtidas nas análises é semelhante, independente da quantidade igual a 100, 1.000 e 10.000 blocos para a simulação de trajetórias. Novamente, nota-se que o coeficiente de restituição é o parâmetro que maior influência no resultado final das simulações, seguido pelo ângulo de atrito, rugosidade e velocidade inicial.

Tabela 4.18 – Resumo dos resultados de variação da energia cinética máxima das análises realizadas com variação do número de blocos para simulação de trajetórias - Bloco 2.

Bloco 2 (16.200 kg)	Variação da Energia Cinética Máxima - Emax (%)			
	Coeficientes de Restituição (K)	Ângulo de Atrito (θ)	Velocidade Inicial (v)	Rugosidade (rug)
100 blocos	2163%	142%	91%	84%
1.000 blocos	2064%	130%	91%	94%
10.000 blocos	2156%	116%	91%	105%

O comportamento das trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos ao longo da seção da encosta são equivalentes para os três conjuntos de análises (100, 1.000 e 10.000 blocos). Tal fato mostra que a variação do número de blocos nas análises não interfere no comportamento das trajetórias dos mesmos.

O estudo comparativo entre as análises com número de trajetórias de blocos diferentes (100, 1.000 e 10.000 blocos), considerou a análise com 10.000 blocos como ideal, ou seja, aquela que engloba maior número de trajetórias na simulação.

A Tabela 4.19 apresenta o valor médio de variação da energia cinética máxima das análises (ΔE) realizadas com 100 e 1.000 blocos em relação às análises com 10.000 blocos.

Tabela 4.19 – Resumo dos resultados de variação da energia cinética máxima (ΔE) das análises realizadas com 100 e 1.000 blocos em relação às análises com 10.000 blocos – Bloco 2.

Bloco 2 (16.200 kg)	Variação da Energia Cinética Máxima das Simulações com 100 e 1.000 Blocos em Relação às Simulações Base de 10.000 blocos - ΔE (%)			
	Coefficientes de Restituição (K)	Ângulo de Atrito (\varnothing)	Velocidade Inicial (v)	Rugosidade (rug)
100 blocos	7,7%	4,4%	0,23%	4,85%
1.000 blocos	3,5%	1,25%	0,06%	1,96%

Os valores de variação média entre os conjuntos de análises de 100, 1.000 e 10.000 blocos indicaram que as análises realizadas com 1.000 blocos são as que mais se aproximam da análise ideal (10.000 trajetórias). Portanto, podem ser consideradas como as mais adequadas para a realização das simulações, com maior rapidez de execução dos cálculos e acurácia de resultados em relação às análises com 10.000 trajetórias de blocos.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Os taludes rochosos estão presentes em áreas urbanas e rurais, remotas e próximas das atividades humanas e industriais. Sua instabilização representa riscos e/ou prejuízos humanos e materiais de menor ou maior intensidade. Em consequência, a avaliação das condições de estabilidade de encostas a curto, médio e longo prazo é tarefa importante do engenheiro geotécnico.

Encostas rochosas fraturadas com descontinuidades apresentam um potencial de instabilização por queda de lascas e blocos. Este tipo de ruptura, geralmente abrupta e sem indícios de movimentação, envolve velocidades e energias cinéticas elevadas, resultando em danos materiais e prejuízos significativos, muitas vezes acompanhados de perdas de vidas. Visando a avaliação dos riscos inerentes a queda de blocos, a determinação da trajetória do movimento, energia de impacto e o alcance máximo do bloco em queda são fundamentais para o estudo e concepção de medidas mitigadoras.

Desta forma, este trabalho visou analisar a influência de parâmetros associados ao movimento de blocos rochosos instáveis nas análises de simulação da trajetória de queda de blocos por meio do programa *RocFall v.4.0 (Rocscience Inc.)*. Os parâmetros selecionados para o estudo da influência foram os seguintes: (i) Coeficientes de restituição normal e tangencial da superfície da encosta; (ii) Ângulo de atrito da superfície; (iii) Rugosidade da superfície e (iv) Velocidade inicial do movimento do bloco. Foram também consideradas as variações de massa do bloco e de número de blocos definidos para a simulação de trajetórias. O efeito da variação destes parâmetros é analisado através da trajetória de movimento, alcance e energia de impacto dos blocos simulados.

Este estudo foi realizado para uma seção crítica do Morro do Escalavrado situado no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, no Município de Teresópolis, estado do Rio de Janeiro. A seção selecionada é vizinha à rodovia BR-116. Considerou-se o conjunto de lascas denominadas lascas, 5, 6 e 7 por Nunes *et al.* (2008), situado na parte superior da encosta.

5.2 CONCLUSÕES

As análises realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa forneceram resultados que permitem ressaltar algumas conclusões. A primeira delas se refere ao programa *RocFall*, de fácil utilização, além da simplicidade de entrada de dados e rapidez de processamento.

Em relação às análises de variação dos parâmetros e seu impacto nos valores de energia cinética máxima, distância horizontal de máxima energia, distância horizontal do intervalo onde se dá o maior número de blocos depositados e o número de blocos depositados no intervalo, considerando os Blocos 1 (1.620kg), Bloco 2 (16.200kg) e Bloco 3 (162.000kg), pode-se concluir que:

(i) Variação dos Coeficientes de Restituição

1. Os menores valores de coeficiente de restituição correspondem às menores taxa de energia cinética máxima, distância horizontal de máxima energia e distância horizontal de parada dos blocos. O aumento de K_n e K_t produz aumento da energia cinética máxima e das distâncias de máxima energia e de parada dos blocos, independente da variação de massa dos blocos 1,2 e 3;
2. Os resultados da simulação são extremamente sensíveis aos valores dos coeficientes de restituição (análises K1 a K5), com variações da energia cinética máxima iguais a 2093%, 2064%, 2221% para os Blocos 1, 2 e 3, respectivamente;
3. Ao contrário da variação linear de energia cinética vs variação dos coeficientes de restituição, a posição final dos blocos não tem relação linear e indica uma área preferencial de deposição dos blocos, muito provavelmente devido à irregularidade da seção transversal da encosta. A deposição dos blocos ocorre na mesma região da encosta para os três blocos estudados (Blocos 1, 2 e 3).

(ii) Variação do Ângulo de Atrito

1. A variação do ângulo de atrito (análises phi1 a phi7) resulta em uma variação da energia cinética total máxima igual a 130% para os Blocos 1 e 2 e 142% para o Bloco

3. No entanto, verifica-se que esta variação é insignificante para valores de ângulo de atrito inferiores a 45° na parte superior e $32,5^\circ$ na parte inferior do Morro do Escalavrado;

2. Não há variação da distância horizontal de máxima energia e distância de parada dos blocos para os ângulos de atrito inferiores a 45° na parte superior e $32,5^\circ$ na parte inferior do Morro do Escalavrado, independente da variação da massa dos blocos;

3. A deposição dos blocos ocorre na mesma região da encosta para os três casos (Blocos 1, 2 e 3). O número de blocos que atingem a posição de parada também não sofre variação significativa com a variação de massa dos blocos.

(iii) Variação da Velocidade Inicial

1. A variação da velocidade inicial do bloco (análises v1 a v7) indica uma variação da energia cinética total máxima igual a 91,0% para os três blocos analisados. Esta variação se reduz a 6,5% para o Bloco1, 6,3% para o Bloco 2 e 6,2% para o Bloco 3, caso sejam desconsideradas as análises com velocidades iniciais menores a 1,0 m/s;

2. Não há variação dos valores de distância horizontal de parada e o número de blocos depositados nesta posição. O mesmo ocorre para a posição de energia cinética máxima, independente da massa dos blocos.

(iv) Variação da Rugosidade

1. A variação da rugosidade, desde 0° (rug1) a 5° (rug13), resultou em uma variação da energia cinética máxima igual a 91%, 94% e 95% para os Blocos 1, 2 e 3, respectivamente. Estes valores elevados são consequência das análises com rugosidade nula. Estas variações são reduzidas a 8% (Bloco 1), 10% (Bloco 2) e 1% (Bloco 3) quando se desconsidera a rugosidade nula. Isto indica que valores de rugosidade variando entre $0,25^\circ$ a $5,0^\circ$ não afetam de forma significativa os resultados das simulações, independentemente da massa do bloco;

2. A adoção da rugosidade nula, além de modelar inadequadamente a superfície de deslizamento da encosta, também acarreta em valor de energia cinética máxima inferior à média dos valores das outras análises com consideração da rugosidade;

3. Não há variação dos valores de posição final dos blocos e a quantidade de blocos depositados com a variação da rugosidade e da massa dos blocos. Para todas as análises realizadas, os blocos se depositaram na mesma região da encosta.

Em relação às análises de variação do número de blocos por simulação e seu impacto nos valores de energia cinética máxima, distância horizontal de máxima energia, distância horizontal do intervalo onde se dá o maior número de blocos depositados e o número de blocos depositados no intervalo, considerando o Bloco 2 (16.200kg) e simulações com números de blocos igual a 100, 1.000 e 10.000 trajetórias de blocos, pode-se concluir que:

(i) Variação dos Coeficientes de Restituição

1. A variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias é igual a 2163%, 2064% e 2156%, respectivamente. Esses valores indicam que a variação do número de trajetórias não influencia significativamente o comportamento das análises;

2. A variação média dos valores de energia cinética máxima das análises de 100 e 1.000 blocos comparadas às análises de 10.000 blocos é igual 7,7% e 3,5%, respectivamente. Isto sugere que análises realizadas com 1.000 blocos são mais adequadas para a realização das simulações do que as de 100 blocos, com a vantagem da rapidez de processamento dos cálculos.

(ii) Variação do Ângulo de Atrito

1. As variações da energia cinética total máxima para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias são iguais a 142%, 130% e 116%, respectivamente, indicando que uma influência desprezível da variação do número de trajetórias nas análises;

2. A variação da energia cinética máxima nas análises de 100 e 1.000 blocos comparadas às análises de 10.000 blocos é igual a 4,4% e 1,3%, respectivamente, sugerindo que o número de 1.000 blocos representa um valor adequado para as simulações de trajetórias com a vantagem do menor impacto no resultado final das análises em função da variação do ângulo, além da rapidez de processamento.

(iii) Variação da Velocidade Inicial

1. A variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias é igual a 91%, indicando que a variação do número de trajetórias não influencia as análises;

2. A variação da energia cinética máxima das análises com 100 e 1.000 blocos em relação às análises de 10.000 blocos é igual a 0,23% e 0,06%, respectivamente, indicando um impacto insignificante desta variação nas análises.

(iv) Variação da Rugosidade

1. A variação da energia cinética total máxima para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias é igual a 84%, 94% e 105%, respectivamente. Desconsiderando a análise com rugosidade igual a 0°, estes valores se reduzem a 4,5%, 10% e 16% para a simulação com 100, 1.000 e 10.000 trajetórias, respectivamente;

2. A variação média da energia cinética máxima em função da variação da rugosidade nas análises com 100 e 1.000 blocos em relação às análises de 10.000 blocos é igual a 4,85% e 1,96%, confirmando o menor impacto das análises realizadas com 1.000 trajetórias.

Em relação aos tipos de movimentos de queda de blocos, pode-se concluir que:

1. A variação dos coeficientes de restituição, ângulo de atrito, rugosidade e velocidade inicial influenciam o tipo de movimento do bloco, independente da variação de massa (Bloco 1, 2 e 3). Esta influência tem maior impacto para a variação dos coeficientes de restituição;

2. A variação da quantidade de número de blocos (100, 1.000 e 10.000) na simulação das trajetórias de queda não provoca variação significativa dos tipos de movimento de queda.

5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados e análises do presente trabalho, são apresentadas algumas sugestões e recomendações para estudos futuros:

1. Realização de estudos paramétricos em programas de simulação de trajetórias de queda de blocos tridimensionais;
2. Realização de estudos paramétricos em programas de simulação de trajetórias de queda de blocos bidimensionais que considerem forma, volume e massa dos blocos instáveis e comparação de resultados com as análises do programa *RocFall*;
3. Realização de estudos paramétricos em encostas com topografia e características geológico-geotécnicas diferentes para comparação com os resultados do caso adotado neste estudo;
4. Desenvolvimento de estudos de simulação de movimentos de queda de blocos em modelos reduzidos em laboratório.
5. Realização de ensaios de queda de blocos em campo experimental, variando-se forma, volume e massa dos blocos e topografia e superfície do plano de deslizamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2009). Estabilidade de Encostas. NBR 11682. Rio de Janeiro, 2009.
- ALEJANO, L. R., PONS, B., BASTANTE, F. G., ALONSO, E. & STOCKHAUSEN, H. W. (2007). Slope Geometry Design as a Means for Controlling Rockfalls in Quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, pp. 903-921.
- AZZONI, A., LA BARBERA, G. & ZANINETTI, A. (1995). Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 32, pp. 709-724.
- BAUTISTA, L. E. C. (2007). Influência das Tensões de Origem Térmica em Problemas de Estabilidade de Blocos Rochosos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, 71p.
- BOZZOLO, D. & PAMINI, R. (1986). Simulation of Rockfalls Down a Valley Side. *Acta Mechanica*, 63, pp. 113-130.
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. (1996) - Landslide types and processes, In: *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, Washington, USA, pp. 36-75.
- DE LUCA TUPPUTI SCHINOSA, F. (2003). La Valutazione della Stabilità di Versanti in Roccia: Aspetti Metodologici ed Applicazioni su Aree Campione del Territorio Campano. Dottorato di Ricerca in Analisi dei Sistemi Ambientali, Università Degli Studi di Napoli, Itália, 206p.

- DESCOEUDRES, F.; STOFFEL, S. M.; BOLL, A.; GERBER, W. & LABIOUSE, V. (1999). Disaster Resilient Infrastructure, Commissioned by the Secretariat for the International Decade for Natural Disaster Reduction, Chapter 9, Rockfalls, Secretariat Swiss Federal Institute of Technology. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie and Glaziologie (VAW). Geneve. pp. 37-47.
- 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. Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, Vol. 29 - 2 / 2006 pp. 149-167.
- DORREN, L. K. A. (2003). A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approches. Progress in Physical Geography, 27, USA, pp. 69-87.
- EVANS, S. G. & HUNGR, O. (1993). The Assessment of Rockfall Hazards at the Base of Talus Slopes. Canadian Geotechnical Journal, 30/4, pp. 620-636.
- GEOBRUGG (2004). TECCO Slope Stabilization System. Summary of Published Technical Papers in the Period of 1998 - 2004. Switzerland, 27p.
- GEOBRUGG (2009). Rockfall deflector protection Avers-Reno di Lei / Switzerland. Deflector protection / Photo documentation / March 2009, 4p.
- GEORIO (1999). Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1ª edição.
- GERBER, W. (2001). Guideline for the approval of rockfall protection kits. Environment in practice. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Swiss Federal Research Institute WSL. Berne. 39 p.

- GERBER, W. & HALLER, B. (1997). Safe and economical rockfall protection barriers. LEE, H.K., YANG, H.S.; CHUNG, S.K. (eds) Proceedings of the 1st Asian Rock Mechanics Symposium: ARMS 97. A regional Conference of ISRM / Seoul / Korea. Environmental and Safety Concerns in Underground Construction 2. Balkema: Rotterdam. pp. 915-920.
- 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.
- GUZZETTI, F., CROSTA, G., DETTI, R. & AGLIARDI, F. (2002). STONE: a Computer Program for the Three-Dimensional Simulation of Rock-Falls. Computers and Geosciences, 28, 9, pp. 1079-1093.
- HANSEN, M. J. (1987). Strategies for Classification of Landslides. In: Brunsten, D. & Prior, D. (eds), Slope Stability, pp.1-25.
- HEIM, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 77, 218 pp. (English translation by N. A. Skremer, Bitech Publishers, Vancouver, Canada.)
- HOEK, E. (2007). Practical Rock Engineering. Chapter 9, Analysis of Rockfall Hazards, Canada, 25p.
- MEISSL, G. (1998). Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28. Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Austria, 249p.
- NUNES, A. L. L. S. (2004). Geomecânica de Encostas, Publicação Didática, PEC-COPPE-UFRJ, 160p.

- NUNES, A. L. L. S. (2008). Estabilidades de Taludes Rochosos em Estradas. In: 6º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul - Geosul 2008,, 2008, Florianópolis. Anais do 6º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Geosul 2008. Florianópolis, ABMS, 11p.
- NUNES, A. L. L. S., RIOS FILHO, M., MUNIZ, L. F., SPADA, J. (2008). Instabilidade por Queda de Blocos no Morro do Escalavrado, RJ, 14º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cobramseg 2008, Búzios, Rio de Janeiro, ABMS, pp. 552-559.
- PEILA, D., PELIZZA, S., SASSUDELLI, F. (1998). Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests. Rock Mechanics and Rock Engineering, q Springer-Verlag, 24p.
- PFEIFFER, T. J. & BOWEN, T. (1989). Computer Simulation of Rockfalls. Bull Association Engineering Geology, 26(1), pp. 135-146.
- RIBEIRO, R. S., BARROSO, E.V., BORGES, A.F. (2008). Simulação do Alcance de Blocos Rochosos em Encosta Urbana Ocupada no Município de Petrópolis (RJ). In: 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2008, Porto de Galinhas. Desafios para o Crescimento Brasileiro, Porto de Galinhas (PE). Simulação do Alcance de Blocos Rochosos em Encosta Urbana Ocupada no Município de Petrópolis (RJ). São Paulo. ABGE, pp. 1-11.
- RITCHIE, A. M. (1963). Evaluation of Rockfall and its Control. Highway Research Record, USA, 17, pp. 13-28.
- ROCSCIENCE (2003). Advanced Tutorial – Determining Input Parameters for a Rocfall Analysis. RocNews Fall, 8p.
- RODRIGUEZ, T. T. (2005). Proposta de Classificação Geotécnica para Colúvios Brasileiros. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 370p.
- SHARPE, C. F. S. (1938). Landslides and Related Phenomena. Pageant Books, Inc., NewJersey, U.S.A., 137p.

- SKEMPTON, A. W. & HUTCHINSON, J. N. (1969). Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, State-of-the Art, ISSMGE, pp. 291-340.
- STEVENS, W. D. (1998). Rocfall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. Master Thesis of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 31p.
- TAGLIAVINI, F., REICHENBACH, P., MARAGNA, D., GUZZETTI, F. & PASUTO, A. (2008). Comparison of 2-D and 3-D Computer Models for the M. Salta Rock Fall, Vajont Valley, Northern Italy. *Geoinformatica*, Springer Science, 11p.
- 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.
- VIEIRA, B. C., VIEIRA, A.C.F., AMARAL, C.P., FERNANDES, N. F. (1997). Estudo Comparativo dos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1996 nas Bacias do Quitite e do Papagaio (RJ): Uma Abordagem Geomorfológica. In: COBRAE 2, Simpósio Pan-Americano de Escorregamentos de Terra. Rio de Janeiro. *Anais ABMS/ABGE/ISSME*, v.1, pp. 165-174.
- WIECZOREK, G. F., STOCK, G. M., REICHENBACH, P., SNYDER, J. B., BORCHERS, J. W. & GODT, J. W. (2008). Investigation and Hazard Assessment of the 2003 and 2007 Staircase Rock Falls, Yosemite National Park, California, USA. *Natural Hazards Earth System Science*, 8, pp. 421-432.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)