



Luan Pascoal dos Santos

**Análise Numérica de Queda de
Blocos de Rocha Através do
Método do Ponto Material**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Coorientador: Dr. Fabricio Fernández

Coorientador: Dr. Felipe Gobbi

Rio de Janeiro

Março de 2023



Luan Pascoal dos Santos

**Análise Numérica de Queda de
Blocos de Rocha Através do
Método do Ponto Material**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada Pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. Fabricio Fernández

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Felipe Gobbi Silveira

Coorientador

Geosoluções Engenharia Geotécnica e Ambiental Ltda

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Emilio Velloso Barroso

UFRJ

Rio de Janeiro, 22 de Março de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução total ou parcial do trabalho é proibida sem autorização da universidade, do autor e do orientador

Luan Pascoal dos Santos

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense – UFF (Niterói, Brasil) em 2018. No ano de 2019, ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, onde vem desenvolvendo investigações na linha de pesquisa de que de rochas e Método do Ponto Material

Ficha Catalográfica

Santos, Luan Pascoal dos

Análise numérica de queda de blocos de rocha através do Método do Ponto Material / Luan Pascoal dos Santos ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior ; coorientadores: Fabricio Fernández, Felipe Gobbi. – 2023.

183 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Método do Ponto Material. 3. Queda de blocos de rocha. 4. Mecânica das rochas. 5. RAMMS::Rockfall. I. Vargas Junior, Eurípedes A. II. Fernández, Fabricio. III. Gobbi, Felipe. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. V. Título.

CDD: 624

Para minha mãe e para minha tia Edinha,
por todo amor e por todo apoio

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me conceder a graça de finalizar esse trabalho com saúde e pelo socorro nos momentos de aflição e angústia. Agradeço à Virgem Maria, Mãe da Igreja, por sua intercessão e maternal compaixão.

Ao professor Vargas, por seus ensinamentos e sugestões, por sua compreensão, por sua dedicação e pelo acompanhamento contínuo durante toda essa etapa. Ao doutor Fabricio Fernández, por sua disponibilidade, pelas horas de conversas que tivemos, pelo seu zelo em ensinar e por sua preocupação em me fazer compreender de maneira clara todo o conhecimento que me foi transferido. Ao doutor Felipe Gobbi, por todo auxílio que me deu no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus pais, Maria e José Antonio (*In memoriam*) por todo amor e carinho que sempre tiveram por mim e por toda dedicação que sempre dispensaram a minha formação. À minha tia, madrinha e segunda mãe Edna Maria (*In memoriam*) por ter me escolhido e acolhido como seu filho. A todos os meus familiares, em especial às minhas avós (*In memoriam*) e às minhas tias Nice, Naná, Wania, Lea, Valmira e Silvia (*In memoriam*).

A todos os meus amigos que me ajudaram direta ou indiretamente durante essa etapa da minha vida: Marcelle, Patrick, João Victor, Tarcísio, Patrizi, Fernanda, Monica, William, Taiane, Tiago, Igor, Daniel, Maíra, Imirene, Alerson, Antonio e aos emocionados da Geotecnia PUC-Rio 2019.2.

À Geobrug e ao WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, por disponibilizarem a licença do RAMMS::Rockfall, fundamental para o desenvolvimento desse trabalho. À FGS Geotecnia, em especial ao William Nunes e ao Fabiano Madrid pela ajuda com o estudo de caso.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Pascoal, Luan; Vargas Jr, Eurípedes do Amaral (Orientador); Fernández, Fabricio (Coorientador); Gobbi, Felipe (Coorientador). **Analáse numérica de queda de blocos de rocha através do Método do Ponto Material**. Rio de Janeiro, 2022. 183p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O trabalho propõe uma análise comparativa de modelos numéricos computacionais para simulação de processos de queda de blocos de rocha, assim como um estudo paramétrico com diferentes geometrias para avaliar trajetória dos blocos e a dissipação de energia cinética durante o evento. Para as simulações foram utilizados o software RAMMS:Rockfall e o Método do Ponto Material (MPM). Ambos os métodos serão aplicados na análise de casos hipotéticos e reais de quedas de blocos na região sudeste do Brasil. módulo Rockfall do RAMMS, utiliza um algoritmo de corpo rígido para simular a queda dos blocos sobre um terreno tridimensional, utilizando-se de conceitos de dinâmica não suave com uma modelagem de contatos com restrições unilaterais e considerando a penetração do bloco na superfície através de uma abordagem simplificada. O MPM é um método numérico que combina as abordagens Lagrangeana e Euleriana, no qual o domínio geomecânico é discretizado em um conjunto de pontos materiais que armazenam as informações Lagrangeanas do problema, tais como velocidade e tensão, durante o processo de deformação e o espaço de análise é definido por uma malha Euleriana. Uma vez que, a cada passo de tempo, a malha retorna à configuração inicial, o MPM é livre de distorções, sendo adequado para análise de problemas de grandes deformações, como queda de blocos de rocha. Para a resolução dos problemas através do Método do Ponto Material, será utilizado o simulador numérico computacional MPM-PUCRio, desenvolvido por Fernández (2020), onde as equações de movimento são resolvidas por meio de integrações explícitas.

Palavras-chave

Método do Ponto Material; queda de blocos de rocha; Mecânica das Rochas; RAMMS::Rockfall

Abstract

Pascoal, Luan; Vargas Jr, Eurípedes do Amaral (Advisor); Fernández, Fabricio (Co-advisor); Gobbi, Felipe (Co-advisor). **Numerical Analysis of Rockfalls using Material Point Method**. Rio de Janeiro, 2022. 183p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation puts forward a comparative analysis of computational numerical models to the simulation of rockfall processes, as well as a parametric study with different geometries, to evaluate the trajectory of the blocks and the dissipation of kinetic energy during the event. For the simulations, the RAMMS::Rockfall software and the Material Point Method (MPM) are operationalized. Both methods are applied in the analysis of hypothetical and real cases of rockfalls in Southeast Brazil. The RAMMS::Rockfall module employs a rigid body algorithm to simulate the rockfall on a three-dimensional terrain, exploring concepts of non-smooth dynamics with a contact modeling with unilateral constraints and considering the penetration of the block in the surface through a simplified approach. MPM is a numerical method that combines the Lagrangian and Eulerian approaches, in which the geomechanical domain is discretized into a set of material points that store the Lagrangian information of the problem, such as velocity and tension, during the deformation process, and the analysis space is defined by an Eulerian mesh. Once, at each time step, the mesh returns to the initial configuration, MPM is distortion-free, being suitable for the analysis of large deformation problems, such as rockfalls. In order to solve problems using the Material Point Method, the numerical computational simulator MPM-PUCRio, developed by Fernández (2020) is mobilized. In this equipment, the equations of motion are solved through explicit integrations.

Keywords:

Material Point Method; Rockfall; Rock Mechanics; RAMMS::Rockfall

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Métodos numéricos para problemas de grandes deformações	19
1.2	Justificativa e relevância da pesquisa	20
1.3	Estrutura do trabalho	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Movimentação de blocos de rocha	26
2.1.1	Queda de blocos	27
2.1.2	Tipos de mecanismos e trajetórias de queda	29
2.1.2.1	Deslizamento	30
2.1.2.2	Rolamento	30
2.1.2.3	Saltos	31
2.1.2.4	Queda livre	31
2.1.3	Trajetoórias	31
2.1.4	Simulação da trajetória e do alcance dos blocos	32
2.2	Método do Ponto Material	33
2.2.1	Introdução ao MPM	33
2.2.2	Abordagem Lagrangeana x Abordagem Euleriana	34
2.2.3	Discretização e ciclo computacional	35
2.2.4	Formulação Matemática	37
2.2.5	O Simulador MPM-PUCRio	42
2.3	RAMMS::Rockfall	46
2.3.1	Equações governantes de movimento	48
2.3.2	Forças impulsivas	49
2.3.3	Forças de atrito e de arraste	50
2.3.4	Atrito e deslizamento de Coulomb	50
2.3.5	Força de arraste viscoplástico	52
2.3.6	Força de arraste de floresta/vegetação	53
2.3.7	Material do terreno	54
2.3.8	Modelagem dos blocos de rocha	54
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
3.1	Análises paramétricas	56
3.1.1	Modelo	56
3.1.2	Simulações	58
3.1.3	Efeito da coesão na trajetória do bloco	61
3.1.4	Efeito do ângulo de atrito na trajetória do bloco	64
3.1.5	Efeito do módulo de elasticidade na trajetória do bloco	67
3.1.6	Influência do formato do bloco na trajetória	72
3.1.7	Influência da velocidade e do ângulo de impacto na trajetória do bloco	76
3.2	Comparação RAMMS::Rockfall x MPM-PUC-Rio	82
3.2.1	Modelo de atrito – RAMMS::Rockfall	82
3.2.2	Dados de entrada – RAMMS::Rockfall	85
3.2.3	Geometria do talude – 2D e 3D	86
3.2.4	Material do terreno	88
3.2.5	Dados dos blocos	91
3.2.6	Condições de contorno para o modelo MPM – 3D	94
3.2.7	Resultado das comparações entre o RAMMS e MPM-PUCRio -2D	94

3.2.8	Resultado das comparações entre o RAMMS e MPM-PUCRio -3D	101
3.2.9	Análise paramétrica da influência dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb nas trajetórias e na dissipação de energia	123
3.2.10	Simulações 3D com blocos irregulares	132
3.3	Conclusões	149
4	ESTUDO DE CASO – TALUDE FERROVIÁRIO EM VASSOURAS/RJ	151
4.1	Modelagem do terreno	154
4.2	Simulações - MPM-PUC-Rio	155
4.2.1	Gerador de partículas PUC-Rio/MPM-Particle-Generator	155
4.2.2	Discretização MPM do talude ferroviário de Vassouras-RJ	157
4.2.3	Material do terreno	159
4.2.4	Modelagem do bloco - MPM	159
4.2.5	Dados de entrada	160
4.3	Simulações – RAMMS::Rockfall	161
4.4	Resultados	163
4.5	Discussões e conclusões	167
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	170
5.1	Conclusões gerais	170
5.2	Sugestões para futuros trabalhos futuros	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174

Lista de figuras

1.1	Desmonte de um bloco que atingiu área residencial em Petrópolis, 2022	20
1.2	Cicatriz do deslizamento à esquerda; à direita: destruição das casas. Petrópolis, 2019	21
1.3	Vista superior do deslizamento de rocha no Morro Boa Esperança. Niterói, 2018	21
1.4	Resgate de um jovem soterrado após sua casa ser destruída por um deslizamento de rocha. Rio de Janeiro, 2022	22
1.5	Trecho da BR-393 parcialmente interditado após deslocamentos em talude. Vassouras, 2019	22
1.6	Blocos de desprendem da encosta e atingem pista da RJ-125. Vassouras, 2022	23
1.7	Trecho da BR-116 parcialmente interditado após blocos de rocha atingiram a pista. Teresópolis, 2019	23
2.1	Relação entre a inclinação do talude e o tipo de trajetória de queda	29
2.2	Abordagem Euleriana x Abordagem Lagrangeana	35
2.3	Discretização de um domínio em pontos materiais	36
2.4	Ciclo computacional do método do ponto material	37
2.5	Exemplo de arquivo de entrada	43
2.6	Terminal de linhas de comando durante a execução do programa	44
2.7	Modelo MPM da esfera atingindo uma superfície plana e as deformações plásticas após o impacto	45
2.8	Cicatrizes típicas do impacto da rocha em solo macio	51
2.9	Esquema de interação rocha-solo implementado no RAMMS::ROCKFALL	51
2.10	Força de arraste de floresta agindo no centro de gravidade do bloco na altura Z	53
2.11	Exemplos de maciços rochosos e o formato dos blocos originados	55
2.12	Processo de varredura e criação de um modelo de bloco representativo de uma rocha real	55
3.1	Geometria e condições de contorno do talude homogêneo na etapa elástica (a) e na etapa plástica (b)	57
3.2	Campo de deslocamentos verticais – Etapa Elástica	59
3.3	Deslocamentos verticais de um ponto de controle na região de máximos deslocamentos- parte elástica- para diferentes módulos de elasticidade	60
3.4	Evolução dos deslocamentos verticais no ponto de controle P– Caso B1	61
3.5	Alcance horizontal dos blocos	62
3.6	Configuração final – $t = 5s$	63
3.7	Influência do ângulo de atrito na região plastificada – Casos B e C	66
3.8	Influência do ângulo de atrito na região plastificada – Caso A	67
3.9	Influência do Módulo de elasticidade no alcance horizontal	70
3.10	Influência do Módulo de elasticidade no alcance horizontal – Caso C2	70
3.11	Evolução do movimento de queda do bloco em relação ao módulo de elasticidade	71
3.12	Geometria e condições de contorno do talude homogêneo elastoplástico, etapa plástica– Bloco esférico	72
3.13	Comparação entre as deformações plásticas e o alcance horizontal para blocos de geometria circular e quadrada	75

3.14	Influência da velocidade de impacto nas deformações plásticas do talude e no alcance de blocos que impactam o talude verticalmente	78
3.15	Vetor velocidade resultante para $\alpha_b = 45^\circ$	78
3.16	Deformações plásticas geradas após o impacto em diferentes ângulos para $v_i = 15\text{m/s}$	79
3.17	Gráficos de evolução da energia cinética e do alcance dos blocos considerando ângulos de incidência $\alpha_b = 30^\circ$ e $\alpha_b = 45^\circ$ em relação a horizontal e velocidades $v_i = 10\text{m/s}$, $v_i = 20\text{m/s}$ e $v_i = 25\text{m/s}$	81
3.18	Coeficiente de atrito do modelo RAMMS::Rockfall em relação ao comprimento da cicatriz de impacto	83
3.19	Modelo planialtimétrico da superfície do terreno no QGIS	85
3.20	Superfície inserida no RAMMS	86
3.21	Geometria do caso bidimensional - RAMMS	87
3.22	Geometria do caso tridimensional com inclinação de 30° - RAMMS	87
3.23	Geometria do caso tridimensional com inclinação de 50° - RAMMS	88
3.24	Programa de simulações RAMMS	93
3.25	Trajetoórias dos blocos para as categorias do RAMMS	96
3.26	Posição final dos blocos para cada material escolhido - MPM	97
3.27	Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: <i>Medium Soft</i> – 30°	98
3.28	Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: <i>Medium</i> – 30°	98
3.29	Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: <i>Medium Hard</i> – 30°	99
3.30	Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: <i>Hard</i> – 30°	99
3.31	Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: <i>Extra Hard</i> – 30°	100
3.32	Comparação entre a trajetória RAMMS x MPM – 3D – 30° - Cenário 1	102
3.33	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Medium Soft</i> – 30° - Cenário 2	103
3.34	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Medium</i> – 30° - Cenário 2	104
3.35	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Medium Hard</i> – 30° - Cenário 2	105
3.36	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Hard</i> – 30° - Cenário 2	106
3.37	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Extra Hard</i> – 30° - Cenário 2	107
3.38	Comparação entre a trajetória RAMMS x MPM – 3D – 50° - Cenário 1	108
3.39	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Medium Soft</i> – 50° - Cenário 2	109
3.40	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Medium</i> – 50° - Cenário 2	110
3.41	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Medium Hard</i> – 50° - Cenário 2	111
3.42	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Hard</i> – 50° - Cenário 2	112
3.43	Trajetoórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: <i>Extra Hard</i> – 50° - Cenário 2	113

3.44	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Medium Soft – Cenário 1	116
3.45	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Medium – Cenário 1	117
3.46	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Medium Hard – Cenário 1	117
3.47	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Hard – Cenário 1	118
3.48	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Extra Hard – Cenário 1	118
3.49	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Medium Soft – Cenário 2	120
3.50	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Medium – Cenário 2	120
3.51	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Medium Hard – Cenário 2	121
3.52	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Hard – Cenário 2	121
3.52	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30º (a) e 50º (b) – 3D – Categoria: Extra Hard – Cenário 2	122
3.54	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 60% da resistência do material – Cenário 1 (a); considerando 60% da resistência do material – Cenário 2 (b) e considerando 40% da resistência em comparação com a trajetória R1 do RAMMS (c) – 30º - Categoria: Medium Soft	124
3.55	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 60% e 40% da resistência do material – Cenário 1 (a) e considerando 60% e 40% da resistência em comparação com a trajetória R10 do RAMMS – Cenário 2 (b) - 30º - Categoria: Medium	125
3.56	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 40% da resistência do material – Cenário 1 (a) e considerando 40% da resistência em comparação com a trajetória R2 do RAMMS – Cenário 2 – 30º - Categoria: Medium Hard	126
3.57	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 40% da resistência do material – Cenário 1 (a) e considerando 40% da resistência em comparação com a trajetória R2 do RAMMS – Cenário 2 (b) – 30º - Categoria: <i>Hard</i>	126
3.58	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 80% da resistência do material (a) e considerando 40% da resistência do material (b) – 30º - Categoria: Hard	127
3.59	Área de influência do impacto – Solo residual de granito	129
3.60	Área de influência do impacto – Solo residual de gnaiss	129

3.61	Área de influência do impacto – Solo laterítico compactado	130
3.62	Área de influência do impacto – Filito Alterado	130
3.63	Área de influência do impacto – Monzonito	131
3.64	Etapas da modelagem de um bloco irregular desde o RAMMS até simulador MPM-PUCRio	133
3.65	Orientação inicial de lançamento dos blocos no MPM	135
3.66	Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) – Cenário 1 - Categoria: <i>Medium</i>	136
3.67	Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) – Cenário 1 - Categoria: <i>Hard</i>	137
3.68	Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) – Cenário 2 - Categoria: <i>Medium</i>	139
3.69	Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) – Cenário 2 - Categoria: <i>Hard</i>	140
3.70	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) - Cenário 1 - Categoria: <i>Medium</i>	141
3.71	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) - Cenário 1 - Categoria: <i>Hard</i>	142
3.72	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) - Cenário 2 - Categoria: <i>Medium</i>	143
3.73	Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) - Cenário 2 - Categoria: <i>Hard</i>	144
3.74	Variação da energia cinética em relação a orientação de saída dos blocos <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) - Categoria: <i>Medium</i>	147
3.75	Variação da energia cinética em relação a orientação de saída dos blocos <i>equant</i> (a) <i>long</i> (b) e <i>flat</i> (c) - Categoria: <i>Hard</i>	148
4.1	Talude rochoso às margens da linha férrea	151
4.2	Vista superior da área de estudo	152
4.3	Área crítica de escorregamento e hachurada a lasca com 7m ³	152
4.4	Bloco com risco de desprendimento	153
4.5	Curvas de nível do terreno	154
4.6	Raster do terreno	155
4.7	Fluxo de trabalho para configurar modelos tridimensionais heterogêneos de escala geológica	156
4.8	Recorte e reprojeção do raster	157
4.9	Extrato do arquivo de entrada do modelo MPM do terreno	157
4.10	Modelo MPM discretizado da área de estudo do talude de Vassouras/RJ – Elevações das partículas	159
4.11	Modelagem do bloco: (a) volume criado a partir da nuvem de pontos fornecida pela ferramenta Rock Builder; (b) malha auxiliar de elementos finitos e; (c) distribuição dos pontos materiais	160
4.12	Orientações iniciais do bloco - MPM	161
4.13	Modelo digital de elevação do terreno inserido no RAMMS	162
4.14	Orientações iniciais do bloco - RAMMS	162
4.15	Energia cinética do bloco – MPM x RAMMS	163
4.16	Trajectoria do bloco – MPM x RAMMS	164
4.17	Médias e desvios padrão – MPM x RAMMS	165
4.18	Deformações plásticas decorrentes dos impactos do bloco contra o talude	166

Lista de tabelas

3.1	Parâmetros gerais do problema	57
3.2	Parâmetros de Mohr-Coulomb utilizados nas simulações	58
3.3	Parâmetros particulares do problema para blocos esféricos	72
3.4	Casos para a análise paramétrica da influência do formato do bloco	73
3.5	Casos para as análises paramétricas da influência da velocidade e do ângulo de impacto do bloco	76
3.6	Parâmetros do modelo de atrito do RAMMS::Rockfall	83
3.7	Parâmetros utilizados para cada categoria de terreno	91
3.8	Propriedades dos blocos	92
3.9	Posição inicial do centroide dos blocos	93
3.10	Distância percorrida - em metros - pelos blocos cúbicos para cada trajetória	115
3.11	Trajетórias RAMMS escolhidas para as comparações – Cenário 2	119
3.12	Distância percorrida - em metros - pelo bloco para cada trajetória considerando fatores de redução da resistência	123
3.13	Distância percorrida - em metros - pelos blocos para cada trajetória	135
3.14	Média e desvio-padrão do alcance horizontal das trajetórias RAMMS e MPM	145
4.1	Dados da simulação - MPM	161
4.2	Resultados da simulação - MPM	167
4.3	Resultados da simulação - RAMMS	167

Lista de símbolos

∇ – Operador Nabla

σ, σ_{ij} – Tensor de tensões de Cauchy

ρ – Densidade de massa

$\dot{\mathbf{v}}, \ddot{u}_i$ – Vetor de acelerações

$\mathbf{b}, b_i$ – Vetor de forças de corpo por unidade de massa

$\mathbf{u}_i$ – Vetor de deslocamentos

δu_i – Deslocamentos virtuais

$\delta u_{i,j}$ – Derivadas j dos deslocamentos virtuais

Ω – Domínio material

Γ – Contorno do domínio

t_i – Força de tração no contorno

σ_{ij}^* – Tensão específica

$\mathbf{x}_p$ – Vetor posição da partícula

m_p – Massa da partícula

m_{IJ} – Matriz de massa

c – Coesão d material

ϕ – Ângulo de atrito

g – Gravidade

E – Módulo de Young

ν – Coeficiente de Poisson

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – Dimensões da malha Euleriana

θ – Ângulo de inclinação do talude

α_b – Ângulo de impacto do bloco

v_i – Velocidade inicial do bloco

u_{x0}, u_{y0} e u_{z0} – Posição inicial do bloco

E_c – Energia cinética

$\mathbf{M}$ – Matriz diagonal contendo a massa e os três momentos de inércia

$\dot{u}$ – Vetor de velocidades rotacionais e translacionais referentes aos três eixos do bloco

F_g – Força gravitacional sobre o bloco

D – Força de arraste da vegetação

G – Forças giroscópicas

λ – Multiplicadores Lagrangeanos

λ_N – Força de contato normal

λ_{T1} e λ_{T2} – Forças de contato tangencial

ε_N – Coeficiente de restituição normal

ε_T – Coeficiente de restituição tangencial

μ – Coeficiente de atrito

$\mu(s)$ – Atrito dependente do deslizamento

F_v – Força de arraste viscoplástica

C_v – Coeficiente de arraste viscoplástico

F_{df} – Força de arraste de vegetação

θ_f – Coeficiente de arraste de floresta

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

MPM – *Material Point Method*

FEM – *Finite Element Method*

DEM – *Discrete Element Method*

FDM – *Finite-Difference Method*

ALE – *Arbitrary Lagrangian Eulerian*

CEL – *Coupled Eulerian-Lagrangian*

SPH – *Smooth Particle Hydrodynamics*

PFEM – *Particle Finite-Element Method*

FEMLIP – *Finite-Element with Lagrangian Integration Points*

EFG – *Element-Free Galerkin*

PIC – *Particle in Cell Method*

FLIP- *Fluid Implicit Particle Method*

RAMMS – *Rapid Mass Movement System*

MDE – Modelo Digital de Elevação

Introdução

As quedas de blocos de rocha são eventos relativamente inesperados, de baixa previsibilidade e muitas vezes com consequências desastrosas que afetam regiões próximas a maciços rochosos com compartimentação desfavorável. Quando instabilizados, por algum agente deflagrador ou pelo conjunto deles, os blocos e as lascas movimentam-se de maneira abrupta, sem dar indícios de ruptura, alcançando altas velocidades.

Além da ausência de sinais premonitórios, o que dificulta a previsão do início dos movimentos e do alcance dos blocos, os processos de queda de bloco, podem ser deflagrados até em períodos de ausência ou de baixa precipitação pluviométrica [1-2]. Grandes amplitudes térmicas em período seco podem criar tensões com magnitude suficiente para provocar a propagação das fraturas pré-existentes no maciço [3-4]. A erosão dos materiais de sustentação dos blocos, o alívio das tensões de origem tectônicas, vibrações e terremotos também são agentes desencadeadores desses movimentos [5-6].

Devido às altas velocidades e ao grande volume de rocha envolvido, torna-se difícil a adoção de medidas mitigadoras após o início do movimento [3], o que representa uma ameaça significativa à vida humana e risco material às infraestruturas rodoviárias e ferroviárias que margeiam taludes susceptíveis a processos de queda. Além da desestabilização das infraestruturas, as quedas de blocos podem acarretar em perda de maquinário, restrições de velocidade e interrupção de tráfego em ferrovias e rodovias [5].

A dinâmica de queda de rochas é, especialmente a quantificação da dissipação de energia durante a complexa interação rocha-solo, ainda pouco conhecida [7]. A caracterização dos eventos de queda de rochas e o entendimento de seu desencadeamento são pré-requisitos para qualquer solução de engenharia. A simulação da provável trajetória de queda ajuda a descrever o movimento que esses blocos ou lascas irão desenvolver durante o processo e determinar seu alcance. A mitigação de movimentos de queda de rocha envolve uma interação sutil entre pesquisas de campo, modelagem numérica e experiência. A combinação de boas práticas e, se disponíveis, fatos históricos é um pré-requisito vital para estabelecer um zoneamento de risco reproduzível e preciso [7].

Para tal, é necessário o conhecimento da encosta, dos materiais que a compõem e da sua geometria. A consciência da dependência do formato dos blocos está bem estabelecida, mas atualmente, existe pouca base experimental sobre como o risco de queda de rochas aumenta com a massa, tamanho e formato da rocha [7]. Por meio de mapeamento geológico-geotécnico, é possível determinar os possíveis pontos de instabilidade, o grau de risco da encosta e os parâmetros necessários para análise das trajetórias dos blocos que, eventualmente, venham à ruptura. Após o levantamento detalhado da área, deve-se avaliar quais medidas serão tomadas para a estabilização do talude.

O método para prever trajetórias de queda de rochas, bem como as velocidades finais de impacto, posições e forças é de grande importância prática projetos de estruturas de mitigação. O fenômeno de queda de rochas envolve uma variedade de movimentos, como queda-livre, saltos, rolamento e deslizamento. Além disso, cada modo de movimento tem diferentes condições de disparo, que são determinados pelo estado cinemático da rocha em queda e pela interação entre rocha e terreno. Portanto, uma moderna abordagem de previsão de trajetória de queda de rochas deve estar dentro de uma estrutura 3D, incluindo formas arbitrárias de rochas caindo, a interação de contato entre rocha e terreno, e os quatro movimentos de queda de rochas mencionados acima, bem como a transição entre eles [8].

1.1

Métodos numéricos para problemas de grandes deformações

Eventos de queda de blocos de rocha são movimentos caracterizados por grandes deformações e deslocamentos durante a evolução do processo. A modelagem de um sólido geomecânico pode ser dividida em um enfoque discreto, como no caso do Método dos Elementos Discretos (DEM), e em um enfoque contínuo [7]. O Método dos Elementos Finitos (FEM) apresenta uma certa predominância entre os métodos de modelagem numérica de problemas geotécnicos para meios contínuos, tanto na indústria quanto na academia [8], contudo o método apresenta o inconveniente emaranhamento da malha para problemas de grandes deformações [7, 9].

Os métodos numéricos para problemas de grandes deformações podem ser classificados entre os que são baseados em malhas (Método dos Elementos Finitos – FEM; Método das Diferenças Finitas – FDM; Método Euleriano Lagrangeano Arbitrário – ALE; Método Euleriano-Lagrangeano Acoplado – CEL) e métodos sem malhas (Método do Ponto Material – MPM; Método da Hidrodinâmico de Partículas Suavizadas – SPH; Método dos Elementos Finitos e Partículas – PFEM; Método dos Elementos Finitos com pontos de integração Lagrangeanos – FEMLIP; Método do Elemento Livre Galerkin – EFG) [7, 9-10].

O Método do Ponto Material vem sendo desenvolvido para simular problemas de grandes deformações. No MPM, o corpo contínuo é representado por um conjunto de pontos Lagrangeanos, chamados pontos materiais. Os pontos materiais se movem através de uma malha computacional Euleriana e armazenam em si as propriedades físicas do contínuo [11]. O MPM é capaz de simular problemas de grandes deformações sem a inconveniente distorção da malha [7, 12] e pode ser um grande aliado dos engenheiros geotécnicos no estudo de processos de queda de blocos de rocha e de seus efeitos.

1.2. Justificativa e relevância da pesquisa

Muitas áreas urbanas, rurais, industriais, estradas e ferrovias no estado do Rio de Janeiro estão próximas de encostas rochosas susceptíveis a eventos de queda de blocos. O eventual desprendimento de um bloco ou lasca implica em prejuízos humanos e materiais. Nos últimos cinco anos, muitas ocorrências desse tipo de movimento foram relatadas no estado do Rio de Janeiro. O estado possui parte de sua população habitando em encostas e a geomorfologia do estado é favorável a eventos desta natureza, o que os tornam mais recorrentes. Em locais onde o risco de movimentos de solo ou rochas for alto, o poder público deve agir e garantir a realocação da população em locais seguros.

Em fevereiro de 2022, a cidade de Petrópolis viveu a maior tragédia de sua história. As fortes chuvas causaram inundações, deslizamento de terra, corrida de detritos e queda de blocos de rocha. Muitos blocos se desprenderam e atingiram casas, ruas e estabelecimentos comerciais (Figura 1.1). Também em Petrópolis, em janeiro de 2019, uma grande lasca de 50 toneladas deslizou de uma altura de 100 metros e blocos atingiram seis casas no bairro do Ingá (Figura 1.2) [13].



Figura 1.1 – Desmonte de um bloco que atingiu área residencial em Petrópolis, 2022 [14]



Figura 1.2 – Cicatriz do deslizamento à esquerda; à direita: destruição das casas.
Petrópolis, 2019 [13]

Em novembro de 2018, no Morro Boa Esperança, na cidade de Niterói, um bloco de grandes proporções deslizou do topo de um talude de 20m de altura acarretando a morte de 15 pessoas e desalojando 22 famílias. (Figura 1.3). Em abril de 2022, na capital, um jovem ficou soterrado após blocos deslizarem e atingirem sua residência. Felizmente, a vítima foi resgatada com vida (Figura 1.4).



Figura 1.3 – Vista superior do deslizamento de rocha no Morro Boa Esperança. Niterói, 2018 [15]



Figura 1.4 – Resgate de um jovem soterrado após sua casa ser destruída por um deslizamento de rocha. Rio de Janeiro, 2022 [16]

Além dos riscos à vida e dos danos materiais aos moradores de áreas vulneráveis, as quedas de rocha também podem atingir e causar grandes acidentes em ferrovias e rodovias. Em abril de 2019, blocos atingiram a BR-393, no município de Vassouras bloqueando um dos sentidos da pista (Figura 1.5). Também em Vassouras, em janeiro de 2022, uma grande quantidade de blocos rolou da encosta que margeia a RJ-125, bloqueando parcialmente o tráfego (Figura 1.6). Em agosto de 2019, blocos se desprenderam do talude e interditou parcialmente um trecho da BR-116, na altura de Teresópolis (Figura 1.7). Nos três casos, não houve feridos.



Figura 1.5 – Trecho da BR-393 parcialmente interditado após deslocamentos em talude. Vassouras, 2019 [17]



Figura 1.6 – Blocos de desprendem da encosta e atingem pista da RJ-125. Vassouras, 2022 [18]



Figura 1.7 –Trecho da BR-116 parcialmente interditado após blocos de rocha atingiram a pista. Teresópolis, 2019 [19]

Os exemplos expostos são apenas alguns casos selecionados para explicitar a importância do estudo desse tipo de evento. Existem ferramentas que permitem verificar, caso haja um deslizamento, o alcance do volume de rochas mobilizadas, demarcando, dessa forma, zonas de segurança para moradia. Em áreas que podem ser afetadas por uma eventual queda de rochas, podem ser construídas contenções para interceptar blocos que se desprendam do maciço.

Algumas ferramentas de simulação de queda de rochas geralmente usam uma abordagem probabilística para prever a energia e as trajetórias de blocos caindo ao longo de taludes potencialmente instáveis [20]. Dessa forma, o estudo de métodos numéricos capazes de simular eventos de queda de blocos, suas possíveis trajetórias e a energia cinética alcançada pela rocha durante o evento é crucial na avaliação do risco de queda de rochas e no projeto de intervenções de mitigação.

Inúmeras pesquisas sobre ferramentas numéricas para simulação do processo de quedas de rochas, considerando a geometria e o formato do bloco, vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos. Volkwein *et al* [37] e Leine *et al.* [23] apresentam uma técnica de simulação levando em consideração o formato da rocha, mecânica-não-suave com leis de contato rígido e terreno tridimensional, que posteriormente foi inserida no software RAMMS::ROCKFALL. Valente [6] comparou o modelo implementado no RAMMS:: ROCKFALL com o uma análise do processo de queda de blocos através do método dos elementos discretos. O objetivo do presente trabalho é estudar e analisar esses eventos a partir do Método do Ponto Material, aplicando-o a casos hipotéticos e a casos reais e comparando os resultados obtidos com o software RAMMS::Rockfall [21].

1.3. Estrutura do trabalho

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

Este primeiro (Capítulo 1) dedica-se a introduzir de maneira geral o tema principal do estudo: queda de rochas e suas particularidades. O capítulo também discorre sobre a relevância e o objetivo da pesquisa apresentando alguns casos recentes de eventos de queda de blocos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica e é subdividido em três seções principais. A primeira seção contempla a descrição da movimentação de blocos de rochas, os tipos de mecanismos e trajetórias de queda. A segunda seção do capítulo é dedicada ao MPM abordando, dentre outras coisas, a discretização, o

ciclo computacional, a formulação matemática do método e apresentando o simulador MPM-PUCRio. A última seção do capítulo descreve a teoria da ferramenta numérica RAMMS::Rockfall.

O Capítulo 3 é dividido em duas seções: A primeira seção estuda a influência dos parâmetros de modelagem na trajetória do bloco através do MPM. A segunda seção apresenta a comparação dos resultados obtidos com o MPM com os resultados obtidos com o RAMMS::Rockfall para diferentes casos teóricos.

O Capítulo 4 é o estudo de caso de um processo de queda de bloco de rocha através do Método do Ponto Material em um talude ferroviário no município de Vassouras no Estado do Rio de Janeiro. O estudo tem como objetivo verificar a necessidade de estabilização ou não de uma lasca.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais e conclusões gerais desta dissertação, assim como recomendações para estudos futuros. Por fim, são listadas todas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Movimentação de blocos de rocha

As rupturas em maciços rochosos ocorrem de acordo com a distribuição das discontinuidades geológicas. A análise de um talude submetido a vários mecanismos de falhas deve considerar a geometria da encosta, a estrutura geológica, os estados de tensões na rocha, as condições hidrogeológicas e as características da massa rochosa [24]. No processo de instabilização, ou seja, a tendência ao movimento descendente da massa do maciço, a gravidade desempenha o papel principal [25].

Para Vallejo et al. (2002) [26] a estabilidade de um talude (seja de solo ou rochoso) é determinada por fatores geométricos (altura e inclinação), fatores geológicos (presença de planos de fraqueza e anisotropia no talude), fatores hidrogeológicos (presença de água) e fatores geotécnicos ou relacionados ao comportamento mecânico do terreno (resistência e deformabilidade). Os autores ressaltam que no caso de maciços rochosos competentes o principal fator condicionante é a estrutura geológica.

A estrutura do maciço é definida pela distribuição espacial dos sistemas de discontinuidade com blocos que se mantêm unidos entre si por características e propriedades resistentes das discontinuidades. A existência desses planos de fraqueza, inclinados em direção à face do talude, supõe a existência de potenciais planos de deslizamentos e superfícies de ruptura [26].

As causas da movimentação de blocos de rocha estão ligadas a uma cadeia de eventos, muitas vezes de caráter cíclico que se origina na formação da rocha e inclui toda a história geológica e geomorfológica da região, envolvendo movimentos tectônicos, erosão, ação antrópica, etc [27]. A Geologia Estrutural deve ser considerada parte fundamental no estudo de casos isolados e em abordagens regionais sobre o potencial de ocorrência de escorregamentos numa determinada área. Como fator predisponente destes processos, as estruturas exercem enorme influência sobre outras condicionantes controladoras de sua deflagração (perfil de solo, forma das encostas, fluxo d'água subterrânea e superficial, escavabilidade dos materiais superficiais) [28].

Guidicini & Nieble (1984) [29] classificam como agentes predisponentes ou efetivos os condicionantes que atuam de forma mais direta e imediata na deflagração do movimento de blocos de rochas. Os fatores predisponentes compreendem o complexo geológico, o complexo morfológico, o complexo climático-hidrológico, a gravidade, o calor solar e o tipo de vegetação, ou seja, características intrínsecas do maciço, sem a participação de ações antrópicas. São ainda fatores específicos para determinar a queda de blocos: tipos de rochas e grau de alteração das unidades litológicas, foliação das rochas e descontinuidades (sistemas de juntas, falhas e fraturas de alívio). Os fatores efetivos são definidos como aqueles que agem diretamente na dinâmica que desencadeia a queda de blocos e subdividem-se em preparatórios climáticos, preparatórios antrópicos e imediatos.

2.1.1

Queda de blocos

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 [30].

O movimento de blocos rochosos se faz ao longo de superfícies inclinadas, com esses blocos geralmente se encontrando parcialmente imersos em matriz terrosa, destacando-se dos taludes e encostas por perda de apoio. No caso dos deslocamentos ocorre o desprendimento de lascas ou placas de rocha que se

formam a partir de estruturas (xistosidade, acamamento, entre outras), devido às variações térmicas, ou por alívio de tensão [31].

Os principais agentes deflagradores estão relacionados às variações térmicas diárias ou sazonais e consequentes variações volumétricas e intemperismos físicos e químicos. Terremotos, explosões e tráfego pesado são fatores que também podem gerar quedas ou contribuir para a ocorrência de fraturas [32].

Segundo Nunes & Rocha (2010) [30] a queda de blocos ou lascas é uma instabilidade agravada pela ocorrência de chuvas intensas. Os autores ressaltam que a ação de intemperismos químicos e físicos nas descontinuidades (fraturas, falhas, juntas e acamamento) da rocha causam alterações das forças atuantes e da resistência dos maciços rochosos, as quais podem dar origem a blocos instáveis.

Como visto anteriormente, as quedas de blocos de rocha são geralmente iniciadas por algum evento climático ou biológico. Hoek (2006) [33] destaca que em um ambiente de construção ativo, o potencial para iniciação mecânica de uma queda de rochas, provavelmente, será da ordem de duas vezes a magnitude dos eventos de iniciação climática e biológica. Segundo Wyllie & Mah (2004) [34] um talude produzido por um corte rodoviário, pode manter por décadas quedas constantes de blocos decorrentes de processos de intemperismo.

As quedas de rochas constituem um risco físico e econômico. A proteção e mitigação contra a queda de rochas é um elemento importante na proteção e segurança de obras de infraestrutura, obras de minas, e de construção civil. Mesmo pequenas quedas de rochas podem prejudicar essas obras gerando efeitos econômicos intensos além do transtorno imediato. Isso também se aplica a edifícios ou outras instalações sob risco de dano causado por queda de rochas [35]. Nas situações em que as quedas possam constituir fatores de perigo para as populações, caso não seja possível conter totalmente os blocos, sempre será melhor evitar a ocupação das áreas localizadas dentro de suas respectivas trajetórias de queda [32].

2.1.2

Tipos de mecanismos e trajetórias de queda

Os blocos de rocha destacam-se de taludes ou encostas íngremes e deslocam-se ao longo da encosta em movimentos do tipo queda livre, deslizamento, rolamento e salto ao longo de superfícies inclinadas como pode ser visto na Figura 2.1. Após a ruptura, o movimento do bloco ou lasca irá depender da inclinação do talude [30]. Segundo Gálvez (2012) [32], a trajetória será dada em função da energia desenvolvida pelo bloco em movimento e da sua geometria, assim como da topografia da superfície de contato, decorrente da combinação de diferentes mecanismos básicos de queda, para os quais existem procedimentos de análise claramente diferenciados.

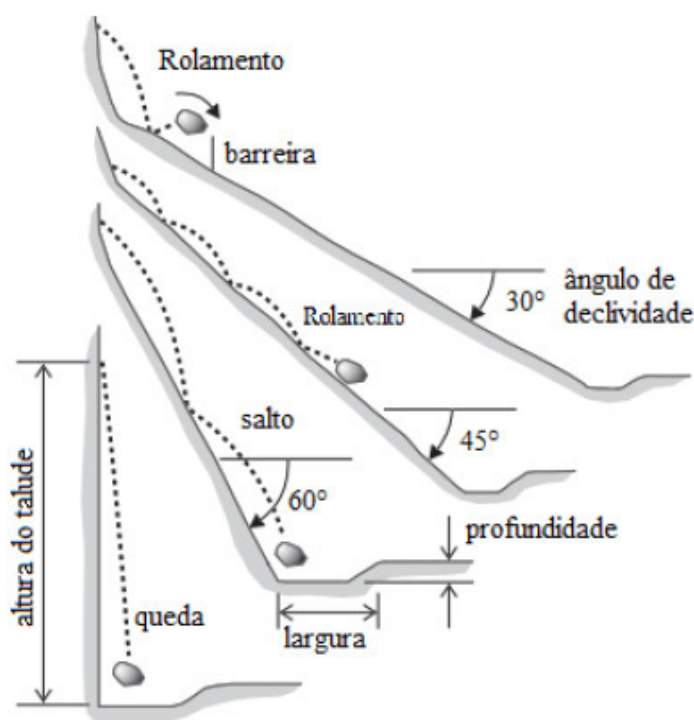


Figura 2.1 - Relação entre a inclinação do talude e o tipo de trajetória de queda [36]

2.1.2.1

Deslizamento

Os deslizamentos tendem a acontecer em blocos com formatos aplanados até prismático quando a topografia da superfície do talude e sua textura forem suficientemente lisas para não gerarem saltos. Este tipo de movimento ocorre em condições nas quais a resultante das forças atuantes sobre o bloco é mantida dentro do plano de contato com a superfície do talude e as forças normais à superfície da encosta sejam suficientemente pequenas em relação às tangenciais, evitando que o bloco descreva trajetórias parabólicas ou execute saltos [32].

2.1.2.2

Rolamento

O rolamento ocorre em encostas com inclinações médias inferiores a cerca de 45°, onde um bloco em salto transforma seu movimento gradualmente para rolamento, mantendo o lado de maior dimensão em contato com a encosta. Caso não haja mudanças na inclinação da superfície, o que desenvolveria movimentos saltos ou queda livre, o bloco permanece em movimento de rolamento até sua paralização completa, devido à grande perda de energia por fricção com a superfície [30].

Segundo Wolkwein et al. (2011) [37] o “rolamento puro” é um fenômeno raro e a distinção entre este tipo de movimento com o deslizamento é difícil de ser realizada, uma vez que pode ocorrer uma combinação dos dois em um mesmo evento. Os autores também afirmam que devido à irregularidade da superfície e o formato dos blocos, o movimento de rolamento é, na verdade, uma sucessão de pequenos saltos.

2.1.2.3 **Saltos**

Os saltos ocorrem quando o bloco em queda colide com a superfície do talude. A altura do salto depende de alguns parâmetros que caracterizarão as condições de impacto. Dentre os tipos de movimentos, os saltos são os mais difíceis de prever [37]. Quando o bloco em queda livre está em movimento de rotação e colide com a superfície, pode saltar em um sentido inesperado. Além disso, na primeira colisão, o bloco pode quebrar, acarretando perdas de energia [38].

2.1.2.4 **Queda livre**

O movimento de queda livre ocorre em encostas muito íngremes ou em encostas que apresentem variações abruptas de sua geometria [32]. Durante a queda livre, o bloco pode sofrer movimentos de translação, de rotação ou ambos [39].

2.1.3 **Trajetórias**

A trajetória do bloco após a ruptura estará relacionada à inclinação da encosta e, conseqüentemente, ao tipo de movimento desenvolvido durante a queda. Além da inclinação, o material de cobertura da encosta (solo, blocos rochosos e vegetação) são fatores determinantes na trajetória final de um evento de queda de bloco [30].

A vegetação de grande porte é capaz de absorver energia cinética do bloco, seja por fricção do bloco com o solo, seja pelo contato do bloco com os troncos das árvores. Este tipo de vegetação funciona como barreira natural e pode interromper o movimento do bloco [30]. No caso de encostas sem vegetação, os blocos não encontram obstáculos que absorvam parte de sua energia, alcançando grandes distâncias a jusante das encostas.

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 infraestrutura urbana, representando riscos e/ou prejuízos humanos e materiais de menor ou maior intensidade [40].

2.1.4

Simulação de trajetória e do alcance dos blocos

A simulação da trajetória de blocos e o alcance que essa massa de blocos pode alcançar permite estimar o quanto uma construção qualquer, por exemplo, se encontra exposta a um possível evento [41]. Nas quedas de blocos, além dos movimentos sofridos pelo elemento rochosos, ocorre interação com os materiais das diferentes superfícies por ele impactadas. Dessa forma, é necessária a caracterização de todos os elementos envolvidos e o conhecimento prévio dos possíveis mecanismos a serem desenvolvidos em cada caso [32]. Para determinar os níveis de energia em determinado evento de queda de rocha os dados de entrada principais são: a geometria do talude; posição, tamanho e formato dos blocos de rocha; parâmetros dos materiais do talude e; histórico de eventos passados [7, 42]

A análise da trajetória consiste em gerar um alto número de trajetórias variando as condições iniciais e introduzindo variáveis aleatórias controláveis nas colisões com o terreno. Dessa maneira, é possível fazer uma previsão de onde os blocos irão parar, seus prováveis caminhos, suas alturas máximas em uma determinada posição e assim em diante [6].

2.2

Método do Ponto Material - MPM

2.2.1

Introdução ao MPM

O MPM é um dos mais recentes métodos de partícula em célula (PIC). A primeira técnica PIC foi desenvolvida nos anos 1950 como um método de cálculo para problemas hidromecânicos envolvendo grandes distorções [43-44]. O PIC representa um fluido como pontos de massa Lagrangeanos, chamados de partículas, movendo-se através de uma grade computacional [45]. No método PIC clássico somente a massa e a posição são atribuídas a cada partícula [46].

Nas primeiras implementações, o PIC apresentou dissipação excessiva de energia. A introdução do método FLIP (*Fluid Implicit Particle Method*) [47-48] superou a limitação apresentada pelo PIC, além disso, no FLIP são atribuídas a cada partícula todas as propriedades do fluido, incluindo-se a quantidade de movimento e a energia [45]. O FLIP, utilizado para aplicações a problemas de mecânica dos fluidos, foi modificado e adaptado para aplicação em mecânica dos sólidos [45, 49]. Desde então, este método, baseado no FLIP, tem sido referido como Método do Ponto Material (MPM) [50].

Os métodos numéricos usualmente utilizados para modelagem de problemas geomecânicos são agrupados de acordo com o tipo de abordagem: contínua ou discreta. O Método dos Elementos Discretos (DEM) representa o domínio geomecânico discretizado por partículas que interagem entre si, computando-se primeiramente, a força de contato entre os elementos, em seguida, pela formulação do princípio fundamental da dinâmica, a aceleração resultante e, por fim, derivando-se a aceleração, são determinadas a velocidade e a posição de cada partícula. Esse ciclo repete-se até o término da simulação [6, 9].

No Método dos Elementos Finitos (FEM) o domínio geomecânico é representado através de uma abordagem contínua, através de uma malha onde as equações de deslocamento são resolvidas para cada nó. Em função do deslocamento relativo de cada nó, são obtidas as deformações nos nós e as tensões associadas a

cada elemento. Dessa forma, o método apresenta uma descrição do estado tensão-deformação e deslocamento do domínio.

Assim como o Método dos Elementos Finitos, o Método do Ponto Material (MPM) é baseado em uma abordagem contínua, entretanto não utiliza uma malha para discretizar o domínio. No MPM, o domínio é discretizado em pontos, chamados pontos materiais, que representam cada um deles um subdomínio daquele contínuo.

2.2.2

Abordagem Lagrangeana x Abordagem Euleriana

Um meio contínuo em movimento pode apresentar mudanças nas suas variáveis de estado (tensão, velocidade, por exemplo) [11]. Essas variações podem ser descritas através de um modelo Lagrangeano ou Euleriano. No modelo Lagrangeano, as variáveis de estado são expressas como função das coordenadas dos elementos numa configuração de referência fixa e do tempo [51], ou seja, a malha está fixa aos elementos que compõem o meio contínuo, movendo-se e distorcendo-se com o material. Esse modelo é usado no método dos elementos finitos. [52]. No modelo Euleriano, as mudanças das variáveis de estado são observadas em posições fixas [51]. As equações governantes são resolvidas em uma malha fixa e o material se move na malha. O modelo Euleriano é usado no método dos elementos discretos. A Figura 2.2 apresenta uma comparação esquemática entre a abordagem Lagrangeana e a abordagem Euleriana.

Segundo Moraes et. al (2018) [52], o modelo Euleriano apresenta como vantagem principal a habilidade de lidar com movimentos distorcidos, entretanto apresenta dificuldade em materiais dependentes do histórico de tensões e na definição dos limites do material. A abordagem Lagrangeana, para problemas de grandes deformações, ainda não se encontra bem formulada, resultando no emaranhamento da malha [10-11].

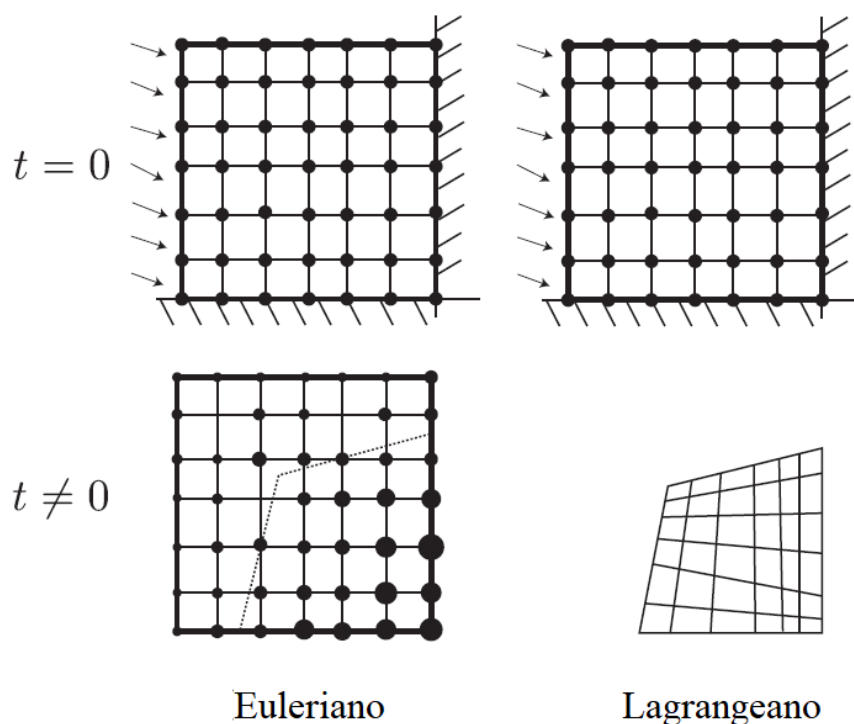


Figura 2.2: Abordagem Euleriana x Abordagem Lagrangeana [53]

Há também alguns métodos híbridos que combinam as vantagens das descrições Lagrangeana e Euleriana, evitando as suas desvantagens, como o método Lagrangeano-Euleriano Arbitrário (ALE – *Arbitrary Lagrangean-Eulerian*). No ALE, a malha computacional é movida continuamente, independente da deformação do material, para otimizar as formas dos elementos e descrever os limites com precisão. O Método do Ponto Material surgiu como um método ALE simples [52-53]. O método do ponto material agrupa em si as vantagens de métodos Lagrangeanos e Eulerianos.

2.2.3 Discretização e ciclo computacional

No modelo MPM, o domínio geomecânico é discretizado em subdomínios representados por pontos materiais que armazenam e transportam as propriedades de interesse do meio (velocidade, tensão, deformação, massa, volume e quaisquer outras variáveis de estado internas necessárias para o modelo constitutivo). Assim sendo, esses pontos materiais fornecem uma descrição Lagrangeana do corpo

contínuo [53]. Tais pontos se movimentam livremente em uma malha computacional Euleriana fixa que cobre todo o domínio do problema, bem como a região onde se espera que o corpo se mova. As equações de movimento são resolvidas na malha fixa. A Figura 2.3 apresenta uma ilustração gráfica da discretização do MPM, onde as linhas pontilhadas denotam os domínios físicos de cada partícula.

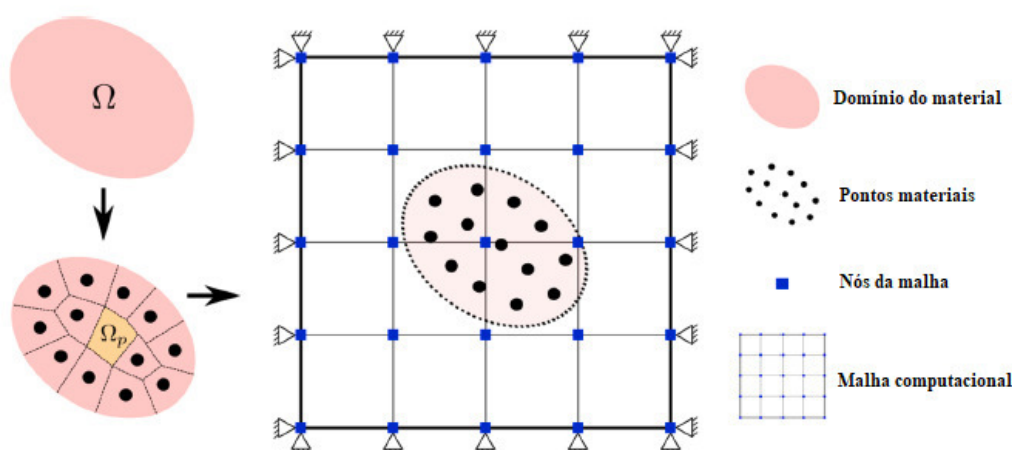


Figura 2.3 – Discretização de um domínio em pontos materiais [54]

A Figura 2.4 representa o ciclo computacional do método do ponto material. As informações inicialmente armazenadas nas partículas são interpoladas para os nós da malha Euleriana (a). Uma vez que se tenha todas as informações nos nós da malha computacional, onde são impostas as condições de contorno, resolve-se as equações de movimento (b). Obtendo-se a solução nos nós da malha Euleriana, essas informações são novamente interpoladas para os pontos materiais (c) e as partículas movimentam-se atualizando suas posições (d). As variáveis armazenadas na malha não são requeridas no passo seguinte da análise, sendo, portanto, descartadas e as variáveis da malha são reiniciadas para a configuração original, o que torna o método livre de distorções [9, 55-56].

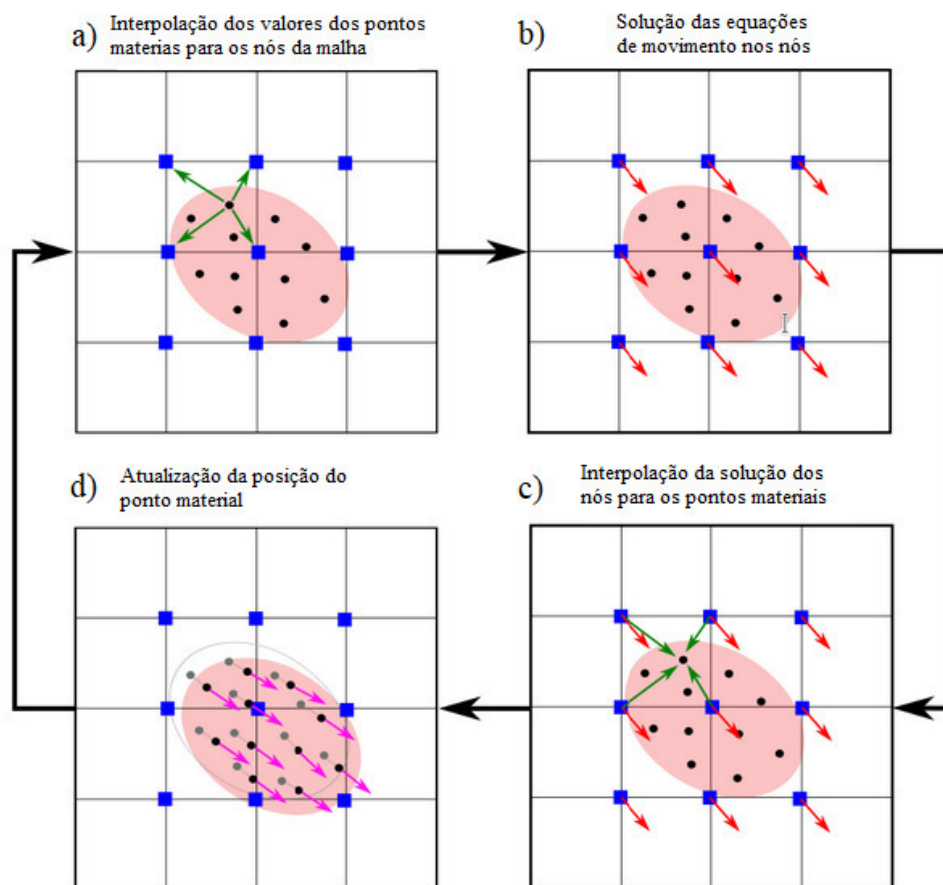


Figura 2.4: Ciclo computacional do método do ponto material [54]

2.2.4 Formulação Matemática

A formulação matemática do MPM baseia-se na mecânica do contínuo [9]. Um meio contínuo satisfaz as leis fundamentais de conservação da termodinâmica, sendo estas a conservação de massa, a conservação de quantidade de movimento (ou momentum) e a conservação de energia. Devem ser satisfeitas as condições iniciais e as condições de contorno. Além disso, também são necessárias as equações constitutivas, que caracterizam a relação tensão-deformação do material contínuo [13]. As equações governantes estão sumarizadas a seguir [14].

(Conservação de momentum linear)	$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = \rho \dot{\mathbf{v}}$	(Eq.:2.1)
(Conservação de massa)	$\rho \dot{\mathbf{J}} = \dot{\mathbf{J}}_0$	(Eq.:2.2)
(Conservação de energia)	$\rho \dot{e} = \mathbf{D} : \boldsymbol{\sigma} + \rho s + \nabla \cdot (k \nabla T)$	(Eq.:2.3)
(Relações constitutivas)	$\boldsymbol{\sigma}^\nabla = \boldsymbol{\sigma}^\nabla(\mathbf{D}, \sigma, \varepsilon, \dots)$	(Eq.:2.4)
(Taxa de deformação)	$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} + \mathbf{L}^T)$	(Eq.:2.5)
(Condições de contorno)	$\begin{cases} (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) _{\Gamma_t} = \bar{\mathbf{t}} \\ \mathbf{v} _{\Gamma_u} = \bar{\mathbf{v}} \end{cases}$	(Eq.:2.6)
(Condições iniciais)	$\begin{cases} v(X, 0) = v_0(X) \\ u(X, 0) = u_0(X) \end{cases}$	(Eq.:2.7)

As equações governantes anteriormente apresentadas resultam em equações diferenciais parciais que descrevem o movimento de um contínuo. Essas equações podem ser resolvidas de maneira exata para problemas simples, entretanto para problemas mais complexos, são resolvidas numericamente. Há dois tipos de métodos numéricos para resolver essas equações. O primeiro seria uma solução aproximada das equações com suas condições iniciais e de contorno através do método das diferenças finitas, por exemplo. O segundo método seria estabelecer uma forma fraca equivalente das equações originais com suas condições iniciais e de contorno e resolvê-la numericamente [14]. A formulação do MPM é baseada na forma fraca equivalente da Equação 2.1 [14]. A equação de conservação de momentum linear é equivalente à segunda Lei de Newton [14].

A forma fraca equivalente da Equação 2.1 é obtida através da multiplicação de todos os termos da equação por funções arbitrárias de ponderação, também chamadas de deslocamentos virtuais, e integrando-os no domínio material Ω ; aplica-se a integração por partes sobre o **termo** do tensor $\boldsymbol{\sigma}$, reduzindo a ordem das derivadas, e por fim são introduzidas as condições de contorno Γ . A Equação 2.8 representa a forma fraca equivalente.

A formulação matemática do método e a discretização das equações de movimento é apresentada a seguir de acordo com o trabalho de Fernández (2020) [9].

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = \rho \dot{\mathbf{v}} \quad (\text{Eq.:2.1})$$



$$\int_{\Omega} \rho \ddot{u}_i \delta u_i dV + \int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dV - \int_{\Omega} \rho b_i \delta u_i dV - \int_{\Gamma} t_i \delta u_i dA = 0 \quad (\text{Eq.:2.8})$$

Sendo, na Equação 2.1, ∇ o vetor gradiente, $\boldsymbol{\sigma}$ o tensor de tensões, ρ é a densidade de massa, $\mathbf{b}$ é o vetor das forças por unidade de massa atuando no contínuo e $\dot{\mathbf{v}}$ é o vetor das acelerações. Na Equação 2.8, u_i é o vetor de deslocamento em notação de índices ($i = x, y, z$), δu_i são deslocamentos arbitrários, t_i é uma tensão aplicada no contorno Γ e $\delta u_{i,j}$ são as derivadas j dos deslocamentos virtuais [9]. Até esse ponto, os algoritmos de solução do MPM são idênticos aos do método dos elementos finitos. A principal diferença é que o domínio total do material é descrito como um conjunto de pontos materiais, entretanto os pontos materiais podem se mover através da malha computacional [13].

Uma quantidade constante de massa está concentrada em cada ponto material para todo o tempo. Uma vez que o número de partículas não muda durante as simulações, a conservação de massa é automaticamente satisfeita [53]. A discretização padrão do MPM expressa o campo de densidade de massa do meio conforme a Equação 2.9

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_{p=1}^{n_p} m_p \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \quad (\text{Eq.:2.9})$$

onde m_p é a massa da partícula p , $\mathbf{x}_p$ é a coordenada espacial da partícula p e δ é a função delta de Dirac com dimensão igual ao inverso do volume [9, 52]. Da Equação 3.9, quando $\mathbf{x} = \mathbf{x}_p$, o delta de Dirac $\delta = 1$, ou seja, a densidade é dada pela massa da partícula sobre o seu volume, caso contrário ($\mathbf{x} \neq \mathbf{x}_p$), a densidade $\rho(\mathbf{x}) = 0$.

Introduzindo a Equação 2.9 na Equação 2.8 e definindo tensões específicas $\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}/\rho$ e $t_i^* = t_i/\rho$, a forma fraca da equação de quantidade de movimento pode ser descrita como:

$$\sum_{p=1}^{n_p} m_p \ddot{u}_{ip} \delta u_{ip} + \sum_{p=1}^{n_p} m_p \sigma_{ijp}^S \delta u_{ip,j} - \sum_{p=1}^{n_p} m_p b_{ip} \delta u_{ip} - \sum_{p=1}^{n_p} m_p t_{ip}^* \delta u_{ip} = 0 \quad (\text{Eq.:2.10})$$

Para interpolar os deslocamentos virtuais δu_i , os deslocamentos das partículas u_{ip} e suas derivadas $u_{ip,j}$ são utilizadas as funções de interpolação de modo que

$$\ddot{u}_{ip} = N_{Ip} \ddot{u}_{Il} \quad (\text{Eq.:2.11})$$

$$\delta u_{ip} = N_{Ip} \delta u_{Il} \quad (\text{Eq.:2.12})$$

sendo I um nó da malha Euleriana e $N_{Ip} = N_I(\mathbf{x}_p)$ é a função de interpolação que relaciona um valor nodal a uma partícula no interior da célula na posição $\mathbf{x}_p$. Dessa forma os valores desconhecidos ficam expressos em variáveis nodais da malha Euleriana.

Assim, introduzindo as aproximações expressas pelas Equações 2.11 e 2.12 na Equação 2.10, tem-se a expressão

$$\dot{p}_{Il} = f_{Il}^{int} + f_{Il}^{ext} \quad (\text{Eq.:2.13})$$

onde $\dot{p}_{Il}$ é a derivada no tempo da quantidade de movimento e os termos da Equação 2.13 são expressos como

$$\dot{p}_{Il} = m_{Il} \ddot{u}_{Il} \quad (\text{Eq.:2.14})$$

$$f_{Il}^{int} = - \sum_p N_{Ip,j} \sigma_{ijp} \frac{m_p}{p_p} \quad (\text{Eq.:2.15})$$

$$f_{Il}^{ext} = \sum_p m_p N_{Ip} b_{ip} + \sum_p N_{Ip} t_{ip} \frac{m_p}{p_p} \quad (\text{Eq.:2.16})$$

O termo m_{IJ} da equação 2.14 é representa a matriz de massa definido na Equação 2.17

$$m_{IJ} = \sum_p m_p N_{Ip} N_{Jp} \quad (\text{Eq.:2.17})$$

Admitindo-se que o valor de massa de uma partícula p associada a um nó I depende somente da distribuição de massa da partícula conforme a sua posição, independentemente do valor de massa de qualquer outro nó J , é conveniente expressar a matriz de massa no nó I como

$$m_I = \sum_J m_{IJ} = \sum_p m_p N_{Ip} \quad (\text{Eq.:2.18})$$

Então, reescrevendo a Equação 2.13, têm-se a equação 2.19

$$m_I \ddot{u}_{ij} = f_{il}^{int} + f_{il}^{ext} \quad (\text{Eq.:2.19})$$

similar a segunda Lei de Newton e da qual se define que a divisão do somatório das forças internas e externas pela massa do nó resulta na aceleração daquele nó.

A Equação 2.13 representa um sistema de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem em relação ao tempo no qual a solução pode ser aproximada de forma implícita ou explícita. O MPM tem sido implementado por métodos explícitos tanto por sua facilidade quanto por sua aplicação à problemas dinâmicos, em que o passo de tempo requerido para o fenômeno resulta menor que o crítico [9].

2.2.5

O Simulador MPM-PUCRio

O simulador MPM-PUCRio [9] é uma ferramenta numérica computacional do Método do Ponto Material no qual as equações de movimento são resolvidas através de integração explícita no tempo baseado em diferenças finitas centrais. O método do contato implementado no programa incorpora uma lei de atrito que permite registrar a dissipação de energia entre dois corpos. O programa está escrito na linguagem de programação C++, incorpora técnicas de paralelização de memória de multiprocessador e é multiplataforma, podendo ser executado nos sistemas operacionais *Linux* e *Windows* [9].

Para gerar um modelo MPM no simulador, são utilizadas palavras-chave que definem, basicamente, a malha Euleriana, o tempo, as cargas, a geometria, os materiais e as condições de contorno. Outras inúmeras funcionalidades implementadas no simulador também podem ser ativadas a partir das palavras-chaves para definir características específicas de cada simulação. O manual do simulador MPM-PUCRio [57] apresenta uma lista com todas as palavras-chave.

O programa permite definir materiais de diferentes modelos constitutivos simulando comportamento mecânico dos tipos elástico, elastoplástico e viscoso, como os modelos elástico linear, Mohr-Coulomb, Drucker Prager, Cam Clay, Burgers, entre outros. A geometria do modelo pode ser criada a partir de caixas definidas por dois pontos, de esferas definidas por seu centro e seu raio e também pela extrusão de um polígono ou de um círculo em um determinado eixo. Os pontos materiais são distribuídos automaticamente, de acordo com a dimensão da malha. Os modelos também podem ser definidos mediante uma lista de partículas, criados desde uma malha de elementos finitos para geometrias irregulares, ou ainda a partir de um gerador de partículas para casos mais complexos.

Após a instalação do programa e antes de executar a simulação, é preciso que todas as informações necessárias para o modelo sejam escritas no arquivo de entrada através de um processador de texto plano utilizando-se das palavras chaves. O arquivo de entrada deve ser salvo com a extensão **.mpm*. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de arquivo de entrada para a simulação de uma esfera de material linear elástico atingindo uma superfície plana composta por um material elastoplástico do tipo Mohr-Coulomb. A descrição da função de cada palavra-chave, pode ser verificada no manual do simulador [57].

```

1  *LIMITS
2  0.0 0.0 0.0 8.0 8.0 8.0
3
4  *GRIDCELL
5  0.5 0.5 0.5
6
7  *TIME
8  1.0
9
10 *PRINT.RESULTS
11 10
12
13 *RESULTS.OUT
14 3
15 U Epeff V
16
17 *MATERIALS
18 2
19
20 *MATERIAL.LINEAR
21 1
22 1 0.10e9 0.2 2700
23
24 *MATERIAL.MOHR.COULOMB
25 1
26 2 20e6 0.3 1800 20e3 30.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
27
28 *BOUNDARY.FIXED
29 1 1 1 1 1 1
30
31 *BODY.SPHERE
32 1
33 4.0 4.0 6.0 1.0
34 1
35
36 *BODY.BOX
37 1
38 2
39 0.0 0.0 0.0 8.0 8.0 3.0
40
41 *GRAVITY.ACTIVE

```

Figura 2.5: Exemplo de arquivo de entrada

[illegible]

Figura 2.6 – Terminal de linhas de comando durante a execução do programa.

No diretório onde o simulador foi executado, são escritos os arquivos contendo os resultados. A energia cinética do modelo durante a simulação é gravada no arquivo *energy.csv*. No arquivo *mpm.log* são salvas as informações sobre a discretização do modelo. O diretório *grid* contém a malha Euleriana do modelo. Na pasta *results* são escritos os resultados parciais *results.*.vtu* e o arquivo *results.pvd* contendo todos os resultados da simulação.

O arquivo *results.pvd* pode ser carregado em um visualizador científico como o ParaView [58], permitindo ao usuário ver e interagir com modelo criado. A Figura 2.7 apresenta a visualização do resultado da simulação do exemplo da esfera de material linear elástico atingindo uma superfície plana composta por um material elastoplástico e as deformações plásticas oriundas do impacto.

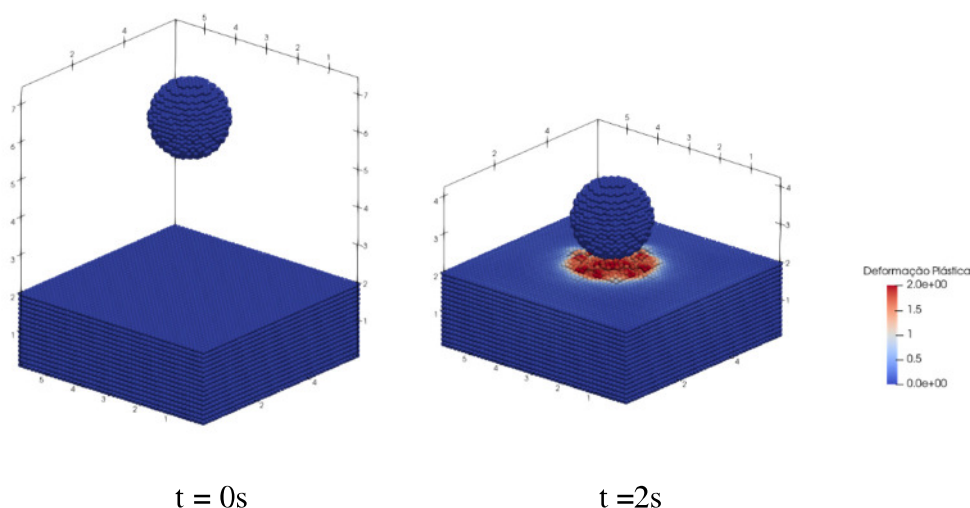


Figura 2.7 – Modelo MPM da esfera atingindo uma superfície plana e as deformações plásticas após o impacto.

2.3

RAMMS::Rockfall

O RAMMS (*Rapid Mass Movement System*) é uma ferramenta numérica desenvolvida por especialistas do *WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF* e do *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research* para simular perigos naturais impulsionados pela gravidade, como avalanches, fluxo de detritos e queda de rochas. O software permite ao usuário analisar problemas que não podem ser resolvidos com os modelos unidimensionais existentes. Os módulos do pacote RAMMS facilitam uma comparação direta da influência das medidas de mitigação em vários processos diferentes, além de exibirem interativamente os resultados da intensidade dos processos que servem de apoio para a geração de mapas de risco [59]

O módulo RAMMS::Rockfall, segundo seu manual, é utilizado para estudar o movimento de blocos de rocha em queda e suas trajetórias em terrenos diversos. As trajetórias dos blocos em queda são governadas pela interação da rocha com o terreno. Diferentemente dos módulos para avalanches e fluxo de detritos, o módulo RAMMS::Rockfall não simula um processo de fluxo, baseando-se em uma abordagem mecânica Lagrangeana de corpo e contato rígido.

O processo de queda de rocha envolve uma série de impactos e contatos entre a superfície do talude e bloco, resultando em movimentos de deslizamento, rolamento, saltos e queda livre, a depender do formato do bloco e da inclinação do terreno. O software aplica um algoritmo de contato para modelar quedas de rochas, ao contrário da maioria dos outros programas de simulação de queda de rochas que dependem exclusivamente de coeficientes de restituição. O modelo leva em conta formas de rocha reais, computando sua trajetória em um terreno tridimensional, incluindo suas alturas de salto, velocidade, velocidade de rotação, rotação e energia cinética total [59-60].

O elemento chave de qualquer programa de simulação de queda de rochas é a implementação da interação rocha-solo e seus mecanismos de dissipação de energia. A suposição básica no modelo RAMMS::Rockfall difere drasticamente do conceito onipresente de coeficiente de restituição adaptado aos problemas de queda de rochas. Os modelos com coeficiente de restituição reduzem toda a interação rocha-solo a um único ponto no tempo e no espaço, onde a dissipação de energia é governada por relações estocásticas sofisticadas entre vetores de velocidade de entrada e saída [61-64].

Leine et al (2014) [23] propuseram um método de simulação de queda de bloco de rocha, que foi implementado no software RAMMS, com as seguintes características:

- simulação totalmente tridimensional com base no método de mecânica não-suave com leis de contato rígido;
- modelagem de formas complexas que consistem em um poliedro convexo e arbitrário, logo, sem restrições ao formato dos blocos;
- terreno baseado em um modelo digital de elevação de alta resolução;
- uma lei de atrito especializada para queda de rochas que permita a descrição do comportamento cicatricial (ou seja, as rochas tendem a deslizar sobre o terreno antes do salto);
- um modelo de força de arrasto para interação com a floresta,
- uma técnica numérica de integração temporal energeticamente consistente, que garante que não há aumento de energia durante as fases de voo.

As características do programa serão discutidas ao longo desse capítulo de acordo com informações contidas no manual do software.

2.3.1

Equações governantes de movimento

Para modelar a trajetória de queda de blocos em terrenos tridimensionais, são aplicados conceitos de mecânica não-suave [65-70] juntamente com leis de contato rígido [23, 71]. Devido à condição de impenetrabilidade dos contatos é necessário um conjunto de leis de força (lei de Signorini e pela lei do atrito de Coulomb) e leis de impactos instantâneos (do tipo Newton ou Poisson) que, para um determinado tempo de colisão, alteram instantaneamente as velocidades de todos os corpos em contato [23, 59, 71].

A inclusão do movimento de rotação das rochas tanto na fase aerotransportada, quanto na fase de interação com o solo é outra característica do RAMMS::Rockfall. O módulo inclui forças giroscópicas induzidas por rotação que costumam ser responsáveis por desvios na trajetória. Modelar blocos de geometria arbitrária e velocidade de rotação requer métodos para rastrear com precisão a orientação da rocha em relação ao solo. O RAMMS::Rockfall emprega conceitos de álgebra quaternária para esse propósito.

Durante a queda livre, o movimento do bloco é governado pela equação:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{Eq.:2.20})$$

onde $\mathbf{M}$ é a matriz diagonal constante que contém a massa e os três momentos de inércia. O vetor $\dot{\mathbf{u}}$ as velocidades rotacionais e translacionais referentes aos três eixos do bloco. Os termos do vetor força ($\mathbf{h}$) são em função da posição ($\mathbf{q}$) e da velocidade ($\mathbf{u}$) da rocha:

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} F_g + D \\ G \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.:2.21})$$

a força gravitacional F_g atua globalmente no bloco. A força de arraste D é implementada para representar o efeito das árvores, da vegetação e da deformação do solo e a componente G representa as forças giroscópicas.

Na detecção do contato entre o bloco e o terreno, as forças de contato λ e as forças de atrito F_c agem no ponto de contato e podem mudar a direção da trajetória.

Para o caso de contato, a equação governante do movimento se torna:

$$M\ddot{u} - h(q, u) = \lambda W(q) \quad (\text{Eq.:2.22})$$

onde a direção das forças é dada por $W(q)$. As forças de contato, indicadas pela letra grega λ , são multiplicadores Lagrangeanos que impõem a restrição de não penetrabilidade.

As forças de contato são modeladas como restrições unilaterais rígidas com atrito de Coulomb usando abordagens da dinâmica do contato suave [65, 67, 72]. A combinação das forças de contato e suas direções permitem simular complexos movimentos de rotação e desvios na trajetória que são inerentes ao processo de queda de blocos de rocha. No ponto de contato C, agem uma componente da força de contato normal λ_N e duas componentes tangenciais λ_{T1} e λ_{T2} . A componente normal garante a restrição de não penetração, enquanto as componentes da força tangencial ocorrem devido ao atrito de Coulomb e são regidas pelas leis de contato.

2.3.2 Forças impulsivas

A relação constitutiva entre a força de contato impulsiva e as grandezas cinemáticas, que caracterizam a velocidade do salto é chamado de lei de impacto. A lei de impacto adotada neste trabalho é baseada na clássica lei de impacto Newtoniano [23, 67, 72] na qual as velocidades normais relativa dos pares de contato antes e depois do impacto são governadas pelo coeficiente de restituição normal (ε_N). Se $\varepsilon_N = 1$, ocorre a restituição total da velocidade normal e quanto menor o valor de ε_N maior será a dissipação de energia do sistema. De modo geral, esse valor é sempre definido como muito baixo. A Lei da ação e reação é sempre cumprida.

Forças de contato impulsivas normais induzem forças de atrito impulsivas tangenciais. No modelo constitutivo do RAMMS:: Rockfall, $\varepsilon_T = 0$ para a interação rochosa com o terreno, pois tais efeitos elásticos estão claramente ausentes.

2.3.3

Forças de atrito e de arraste

Duas forças fisicamente diferentes se opõem ao movimento de uma rocha em trajetória de queda: o atrito deslizante e a força de arraste. O atrito deslizante atua em pontos da superfície da rocha que estão em contato com o solo; é o atrito do tipo Coulomb associado à distância em que a rocha desliza no solo. Quando a rocha não está mais em contato com a superfície, esse atrito cessa. Porém, como esse atrito atua em um ponto da superfície da rocha, ele vai gerar torques que iniciam movimentos rotacionais. A parametrização da força de atrito é de grande importância, pois controla quando a rocha desliza, rola ou salta.

O arrasto, por outro lado, atua no centro de massa da rocha e, portanto, não cria momentos de rotação adicionais. Essa força age na direção oposta ao movimento da rocha. Existem duas forças de arrasto no modelo RAMMS::Rockfall. O primeiro se aplica ao arrasto da vegetação e o segundo é o arrasto viscoplástico devido à deformação do terreno durante o contato com o bloco.

2.3.4

Atrito e deslizamento de Coulomb

Observações de campo após eventos de queda de rochas revelam o chamado fenômeno de “cicatrices”. Após o impacto, a rocha penetra na cobertura do terreno e deixa uma cicatriz na superfície do solo ao deslizar e a rocha posteriormente se desprende do terreno. Um traço no terreno com um comprimento de cicatriz finito pode então ser visto (Figura 2.8)



Figura 2.8 – Cicatrizes típicas do impacto da rocha em solo macio [74]

A interação solo-rocha pode ser dividida em três etapas (Figura 2.9). Na fase de cicatrização, ao entrar em contato com o solo, rocha é penetrante, isto é, compacta o solo até atingir a profundidade máxima da cicatriz. A dissipação de energia é causada pela ação da força de arrasto. Na fase deslizamento, após a compactação máxima, a rocha desliza ao longo do plano de rebote. Além da força de arrasto de cicatrização, uma força de atrito de deslizamento atua na rocha. Este coeficiente de atrito aumenta durante o deslizamento, ou seja, com a distância de deslizamento, criando um torque adicional que leva ao salto. Na fase de recuperação, forças voltadas para a direção principal de deslocamento causam torques e comportamento de rebote. A fase termina após o desprendimento completo da camada cicatricial. O comprimento final da cicatriz na superfície do terreno indica o alcance efetivo da interação rocha-solo [60].

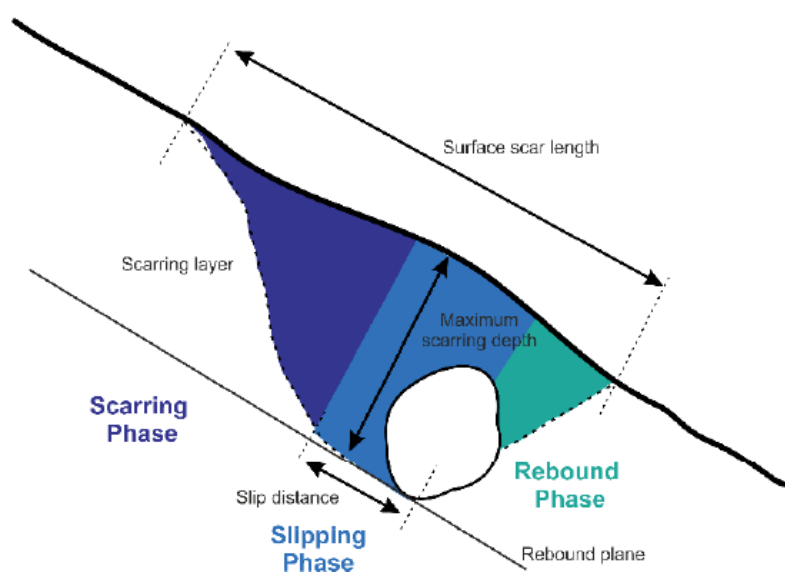


Figura 2.9 – Esquema de interação rocha-solo implementado no RAMMS::Rockfall [60]

Para simular a deformação do solo dentro de uma estrutura de contato rígido, é necessária a introdução de um modelo de atrito dependente do comprimento do plano de ruptura e que atue durante o deslizamento, sendo responsável pelo aumento do atrito devido ao acúmulo de material a frente do corpo da rocha conforme ela desliza ao longo da cicatriz. O atrito dependente do deslizamento é uma extensão do modelo de atrito de Coulomb no qual o valor do atrito μ é dado em função da distância (s) de escorregamento percorrida pelo centro de massa.

O atrito dependente do deslizamento é uma extensão do modelo de atrito de Coulomb no qual o valor do atrito μ é dado em função da distância (s) de deslizamento percorrida pelo centro de massa, sendo definido como:

$$\mu(s) = \mu_{min} + \frac{2}{\pi}(\mu_{max} - \mu_{min})\arctan(\kappa s) \quad (\text{Eq.:2.23})$$

onde, μ_{min} , μ_{max} e κ são parâmetros do modelo de atrito. No instante do impacto da rocha, a distância de deslizamento é $s = 0$ e o atrito deslizante é dado por μ_{min} ; quando $s > 0$, o atrito aumenta de acordo com o coeficiente κ . Em algum ponto o atrito máximo μ_{max} é atingido. Após o contato, o atrito diminui exponencialmente com o coeficiente β . Portanto β descreve o quão rápido o atrito é liberado assim que o bloco deixa a cicatriz, estando relacionado à profundidade de penetração do bloco no solo. Solos mais macios estão associados a menores valores de β . O parâmetro k controla a taxa de mudança de μ_{min} para μ_{max} . Mantendo o valor de k baixo, o bloco desliza por mais tempo, enquanto altos valores de k levam o bloco a se desprender mais facilmente da superfície, levando a altos valores de sobressaltos e velocidade das rochas (Glover, 2015).

2.3.5 Força de arraste viscoplástico

Uma força adicional dependente do deslizamento é introduzida para compensar as deformações viscoplásticas que ocorre em solos macios durante o impacto dos blocos. Grandes deformações viscoplásticas também ocorrem em materiais mais rígidos, como o cascalho, nos quais o atrito entre os grãos dissipa energia. A força de arraste viscoplástica do solo é dada por:

$$F_v = -\frac{m}{2} C_v v_s^2 \quad (\text{Eq.:2.24})$$

sendo m , a massa da rocha; v_s , a velocidade do bloco e C_v , o coeficiente de arrasto. A força de arraste atua quando a rocha está em contato com o solo conforme a rocha desliza na superfície. Rochas mais rápidas e mais pesadas experimentarão maior resistência que rochas menores e mais lentas à medida que penetram a superfície do solo. A força de arraste viscoplástico é proporcional à energia cinética total da rocha. O coeficiente de arrasto C_v varia entre 0.0 m^{-1} (rígido) e 1.0 m^{-1} (macio).

2.3.6

Força de arraste de floresta/vegetação

A força de arraste de floresta age no centro de massa da rocha quando ela está localizada abaixo da altura Z_h (Figura 2.10) A força é linearmente proporcional à velocidade da rocha. A floresta é parametrizada pela altura efetiva da camada de vegetação Z_h , bem como pelo coeficiente de arrasto θ_f . Valores típicos para Z_h estão entre 5m e 30m (o valor padrão é de 30m) e os valores típicos de θ_f estão entre 100kg/s e 1000kg/s. A força de arraste de floresta é dada por:

$$F_{df} = -C_f v_s ; C_f = \begin{cases} \theta_f & \text{se } Z \leq Z_h \\ 0 & \text{se } Z > Z_h \end{cases} \quad (\text{Eq.:2.25})$$

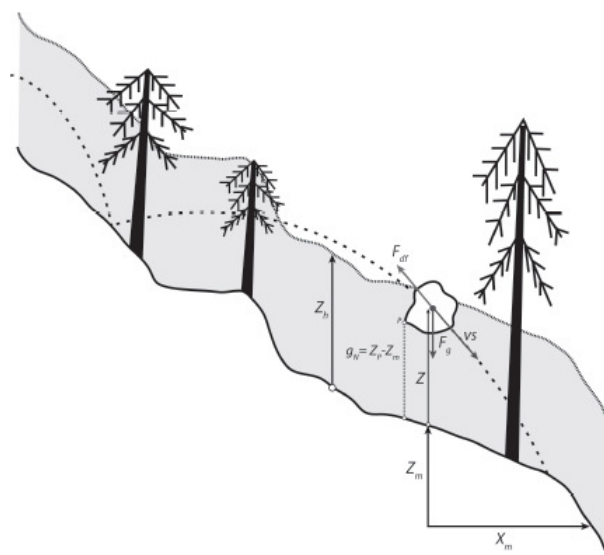


Figura 2.10 – Força de arraste de floresta agindo no centro de gravidade do bloco na altura Z [75]

2.3.7

Material do terreno

O material do terreno tem forte influência no resultado das simulações. A seleção do material do terreno mais apropriado é a principal tarefa do engenheiro de riscos. O RAMMS::Rockfall possui 8 categorias de terreno pré-definidas: *extra soft*; *soft*; *medium soft*; *medium*; *medium hard*; *hard*; *extra hard* e *snow*. A partir do uso de *shapefiles* é possível delimitar áreas com materiais específicos. O manual apresenta descrição e sugestões preliminares de materiais que se encaixam em cada categoria. A escolha do material do terreno será melhor detalhada na Seção 3.2.4.

2.3.8.

Modelagem dos blocos de rocha

A caracterização dos maciços rochosos é de grande importância na mitigação dos riscos envolvendo queda de rochas devido ao número de formas e tamanhos de rocha possíveis que podem ser gerados. A litologia e a geologia têm uma forte influência no pré-condicionamento do tamanho e blocos destacáveis de rochas. Além dos processos de intemperismo, as relações geométricas de discontinuidades (juntas, fraturas, acamamentos, xistossidades) do maciço rochoso governam o formato, o tamanho e o mecanismo de liberação do bloco [75-78].

O tamanho e o formato dos blocos são definidos fundamentalmente pela orientação, persistência, número de famílias e espaçamento [34]. As formas podem ser tanto geometrias simples como esferas e cubos como geometrias complexas.

O RAMMS::Rockfall define três tipos padrão de geometria: *equant*, *platy* (ou *flat*) e *elongate* (ou *long*). Glover (2015) [75] exemplifica alguns maciços rochosos e suas formas agregadas (Figura 2.11). Arenitos expostos a um regime de deformação extensional com família de juntas primárias quase que igualmente espaçadas e ortogonais entre si geram blocos de formato *equant* aproximadamente cúbico. Maciços dobrados e bem estratificados de calcário formam placas que se destacam em formatos do tipo *platy* (ou *flat*). Basaltos com juntas colunares, produzem blocos alongados (*elongate* ou *long*). Maciços de granodiorito famílias de juntas complexas resultam em blocos de rocha altamente irregulares e angulares.

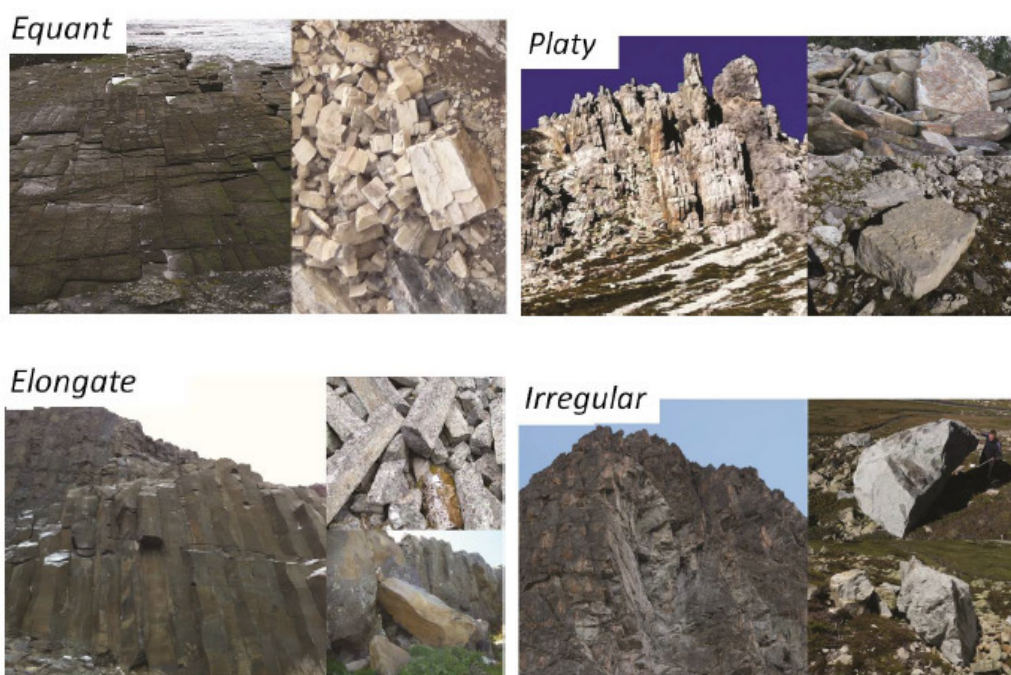


Figura 2.11 – Exemplos de maciços rochosos e o formato dos blocos originados [75]

No RAMMS, os blocos de rocha são modelados como um corpo rígido, poliédrico, indestrutível, tridimensional que, eventualmente, entram em contato friccional com uma superfície tessellada. Uma característica única do RAMMS é que a geometria real da rocha, obtida a partir de varreduras a laser durante as investigações de campo, pode ser modelada e utilizada na simulação. O formato do bloco é definido a partir de uma nuvem de pontos que delimitam a geometria da superfície do bloco e a partir desses pontos, o programa cria um poliedro convexo representativo do formato da rocha (Figura 2.12).

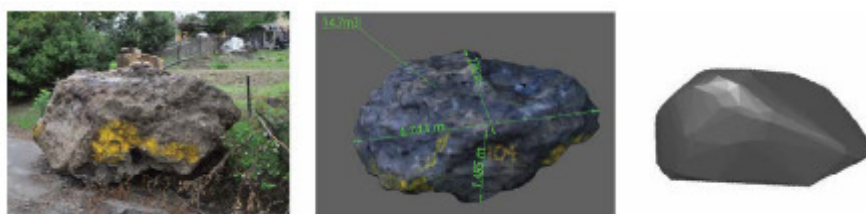


Figura 2.12 – Processo de varredura e criação de um modelo de bloco representativo de uma rocha real [79]

3 Resultados e Discussões

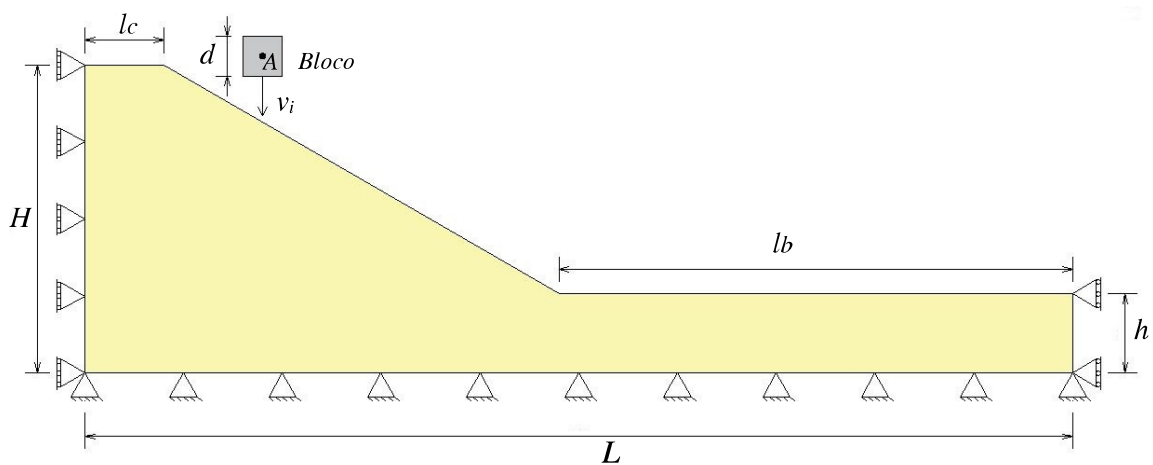
3.1 Análises paramétricas

Nesta seção será analisada a sensibilidade dos parâmetros utilizados na simulação de queda de rochas mediante o Método do Ponto Material. Além dos parâmetros elastoplástico de Mohr-Coulomb, também será estudada a influência do formato do bloco, da velocidade e do ângulo de impacto com o talude para casos bidimensionais.

3.1.1 Modelo

Para o programa de simulações e análises paramétricas, foi estabelecido um modelo plano de talude elastoplástico homogêneo. A Figura 3.1 mostra a geometria do modelo. O material do talude foi definido como sendo do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. O ângulo de inclinação do talude é de $\theta = 30^\circ$. O bloco cai de uma posição $u_{x0} = 5\text{m}$ e $u_{z0} = 8\text{m}$.

a)



b)

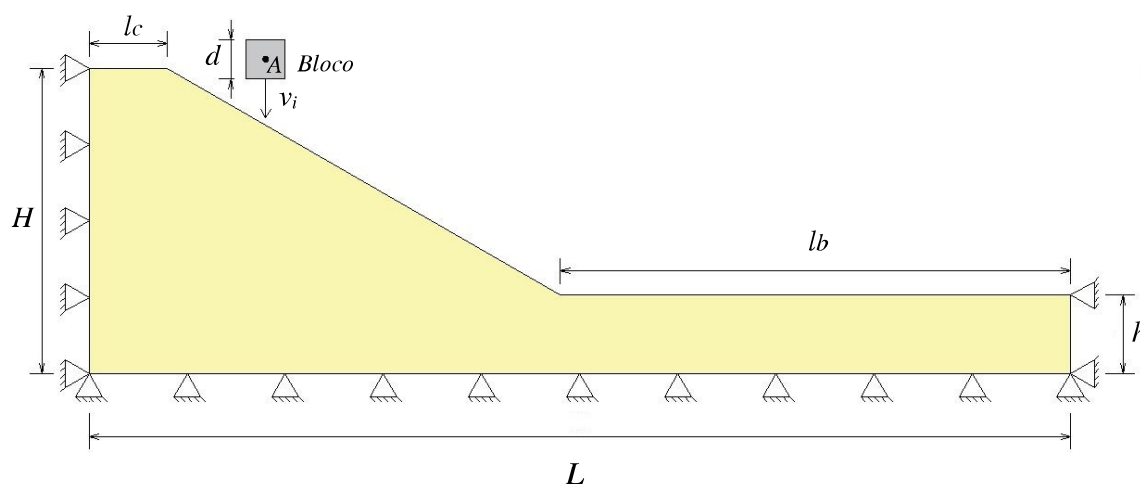


Figura 3.1 – Geometria e condições de contorno do talude homogêneo na etapa elástica (a) e na etapa plástica (b)

Inicialmente, foi avaliada a influência dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb na trajetória, no alcance e na dissipação de energia de um bloco de rocha em queda. O ponto A, localizado no centroide do bloco, foi definido como ponto de controle. Na Tabela 3.1, estão apresentados os parâmetros do talude. O baixo valor de Módulo de Young utilizado para a rocha foi um artifício numérico para reduzir o tempo de simulação com o MPM.

Tabela 3.1 – Parâmetros gerais do problema

Altura do talude	H	7.8	m
Altura da base do talude	H	2	m
Comprimento horizontal total	L	25	m
Comprimento da base	Lb	13	m
Comprimento da crista	Lc	2	m
Dimensão do bloco	D	1	m
Malha Euleriana	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	0.25	m
Inclinação	θ	30	°
Aceleração da gravidade	G	9.81	m/s ²
<i>Parâmetros do solo</i>			
Módulo de Young	E	20	MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.3	-
Massa específica	ρ	1800	kg/m ³
<i>Parâmetros da Rocha</i>			
Módulo de Young	E	1000	MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.2	-
Massa específica	ρ	2700	kg/m ³

3.1.2 Simulações

O modelo utiliza um algoritmo de contato para que a interação entre os corpos ocorra sem que haja a interpenetração dos materiais permitindo o rolamento e o deslizamento com fricção, ou seja o modelo considera o atrito entre o solo e o bloco durante o evento de queda. Ao atingir o talude, a condição de contato entre o bloco e a superfície do talude permite a dissipação de energia cinética a partir de deformações plásticas e por atrito no solo.

Os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb do material do talude utilizados nas simulações foram definidos conforme a Tabela 3.2. Um solo com coesão de 20kPa e ângulo de atrito de 30°, por exemplo, conforme a Tabela 3.2, será identificado como C3.

Tabela 3.2 – Parâmetros de Mohr-Coulomb utilizados nas simulações

Parâmetros de Mohr-Coulomb	Coesão	Casos			
		A	B	C	D
		1kPa	5kPa	20kPa	50kPa
	Ângulo de atrito	Casos			
		1	2	3	4
		20°	25°	30°	35°

Cada uma das simulações foi dividida em duas fases: uma fase inicial para considerar um estado de tensões iniciais no talude e uma fase de queda para avaliar o alcance dos blocos, as deformações plásticas no talude e a dissipação de energia do bloco durante sua trajetória. A fase inicial compreende um estado elastoplástico estático e é subdividida em duas etapas: uma etapa elástica e outra plástica. As condições de contorno na etapa elástica, conforme o exposto na Figura 3.1(a), devem permitir o deslocamento vertical nas laterais para que não ocorra acúmulo de tensões, enquanto na etapa plástica as laterais são fixadas.

Na primeira etapa da fase inicial, são consideradas somente as variáveis elásticas do talude e ativa-se a gravidade para que o talude alcance a condição de equilíbrio. Na segunda etapa, consideram-se as variáveis elastoplásticas. Nas duas partes dessa etapa inicial, a velocidade do bloco foi definida como nula ($v_i = 0\text{m/s}$). Para alcançar a condição de equilíbrio sem influência inercial na distribuição inicial

de tensões, foi considerado um amortecimento por relaxação dinâmica em ambas as etapas da fase inicial. Na etapa plástica, as condições de contorno são fixadas, impedindo deslocamento da base e das laterais do modelo.

Um ponto de controle P foi definido na região de maior deslocamento vertical para verificar se a condição de equilíbrio estático é alcançada. O tempo da etapa elástica foi de 1s. A Figura 3.2 apresenta o campo de deslocamentos verticais para a etapa elástica, de acordo com os parâmetros elásticos do solo anteriormente estabelecidos na Tabela 3.1. Essa etapa é comum para todas as simulações que possuem os mesmos parâmetros elásticos.

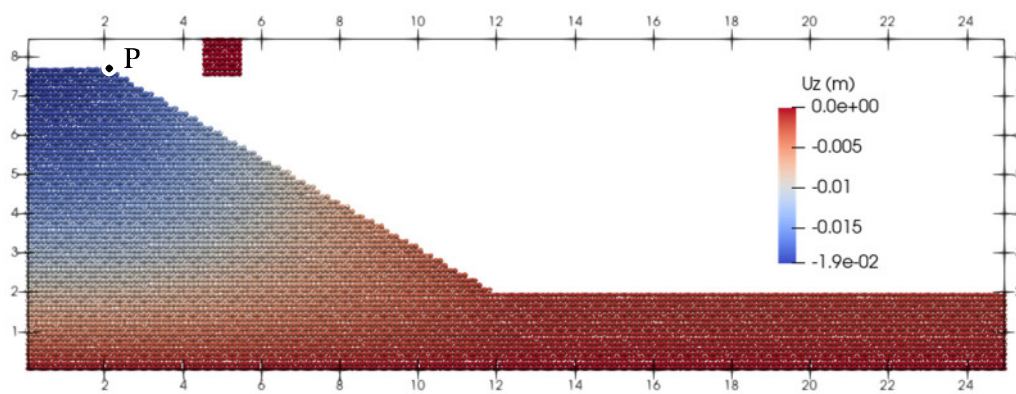


Figura 3.2 – Campo de deslocamentos verticais – Etapa Elástica

A Figura 3.3 mostra os deslocamentos verticais do ponto de controle da região de máximos deslocamentos com o tempo de simulação. A solução quase-estática da etapa elástica é alcançada, uma vez que os deslocamentos verticais alcançam o equilíbrio e se aproximam de um valor constante. O mesmo procedimento é adotado para todos os demais casos. Como, posteriormente, será tratada a influência do módulo de elasticidade do solo na trajetória e no alcance dos blocos, também foram plotados os resultados para $E = 5\text{MPa}$ e $E = 60\text{MPa}$.

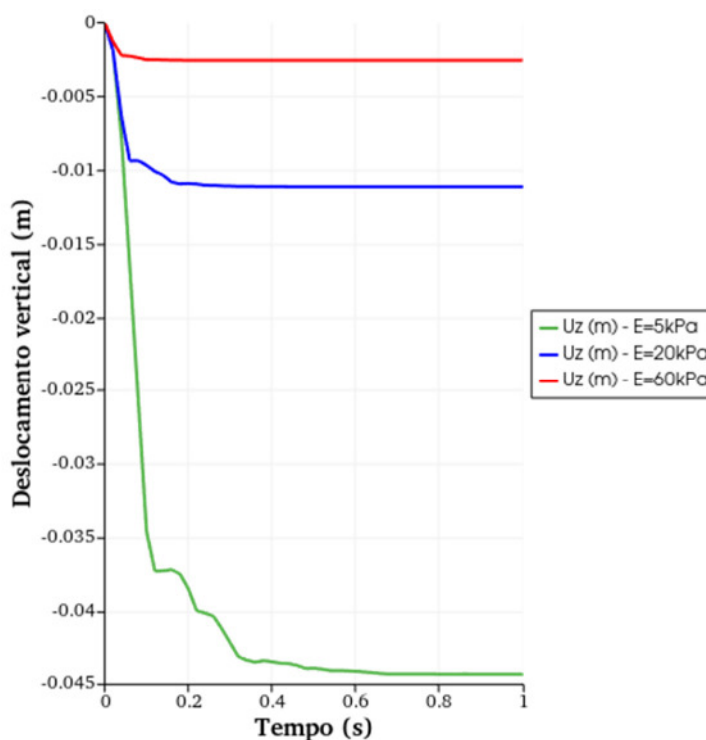


Figura 3.3 – Deslocamentos verticais de um ponto de controle na região de máximos deslocamentos- parte elástica- para diferentes módulos de elasticidade

Na segunda etapa da fase inicial, o estado elástico é carregado e ativa-se a plasticidade do material do talude. O mesmo ponto P que foi usado para avaliar os deslocamentos verticais no passo elástico é utilizado no passo seguinte. Eventualmente, algumas combinações de coesão e ângulo de atrito resultam em materiais de baixa resistência e, conseqüentemente, na ruptura do talude.

É necessário verificar se para solos mais coesivos, como o do caso B, porém com valores baixos de ângulo de atrito, ocorre a ruptura do talude. O gráfico da Figura 3.4 apresenta os deslocamentos verticais do ponto de controle P para solos de coesão $c = 5\text{kPa}$ e ângulo de atrito $\phi = 20^\circ$. Os valores de deslocamento sugerem a estabilidade do talude, sendo possível inferir que todos os demais casos alcançam a condição de equilíbrio sem alterações consideráveis na geometria.

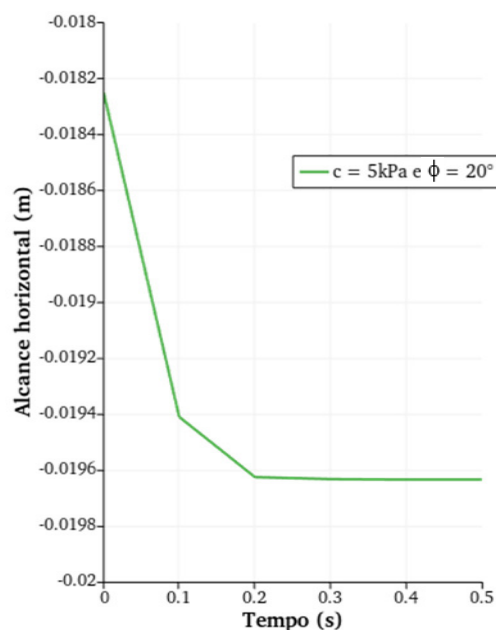


Figura 3.4 – Evolução dos deslocamentos verticais no ponto de controle P– Caso B1

Na segunda etapa da simulação, o estado de tensões iniciais no talude é carregado e define-se uma velocidade inicial do bloco. Os deslocamentos e as deformações plásticas da primeira etapa da simulação foram descartados, uma vez que essas deformações não possuem relevância na avaliação do evento de queda de blocos. Inicialmente, as simulações consideraram casos de blocos que partem com velocidade inicial de $v_i = -20$ m/s e o vetor velocidade na vertical. Serão analisados casos para velocidades superiores e inferiores e casos nos quais o bloco impacta o talude com diferentes ângulos. Os parâmetros elastoplásticos do material do talude são variados para avaliar a influência de cada variável no alcance e na trajetória do bloco.

3.1.3 Efeito da coesão na trajetória do bloco

Para avaliar a influência da coesão na trajetória e alcance do bloco, foram comparados os casos A3 ($c = 1\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$), B3 ($c = 5\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$), C3 ($c = 20\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$) e D3 ($c = 50\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$). O talude rompe localmente de acordo com as propriedades de resistência do solo, sendo possível identificar uma zona de plastificação na região do impacto. Durante o impacto, o bloco perde energia em

função dos parâmetros do talude. Quanto maior a zona rompida, menor é o alcance do bloco uma vez que menor é a energia disponível para o bloco se movimentar.

O gráfico da Figura 3.5 compara os alcances horizontais dos blocos cúbicos em taludes que possuem o mesmo ângulo de atrito (30°) entretanto com diferentes valores de coesão. O Ponto A (Figura 3.1), localizado aproximadamente no centróide do bloco é definido como ponto de controle.

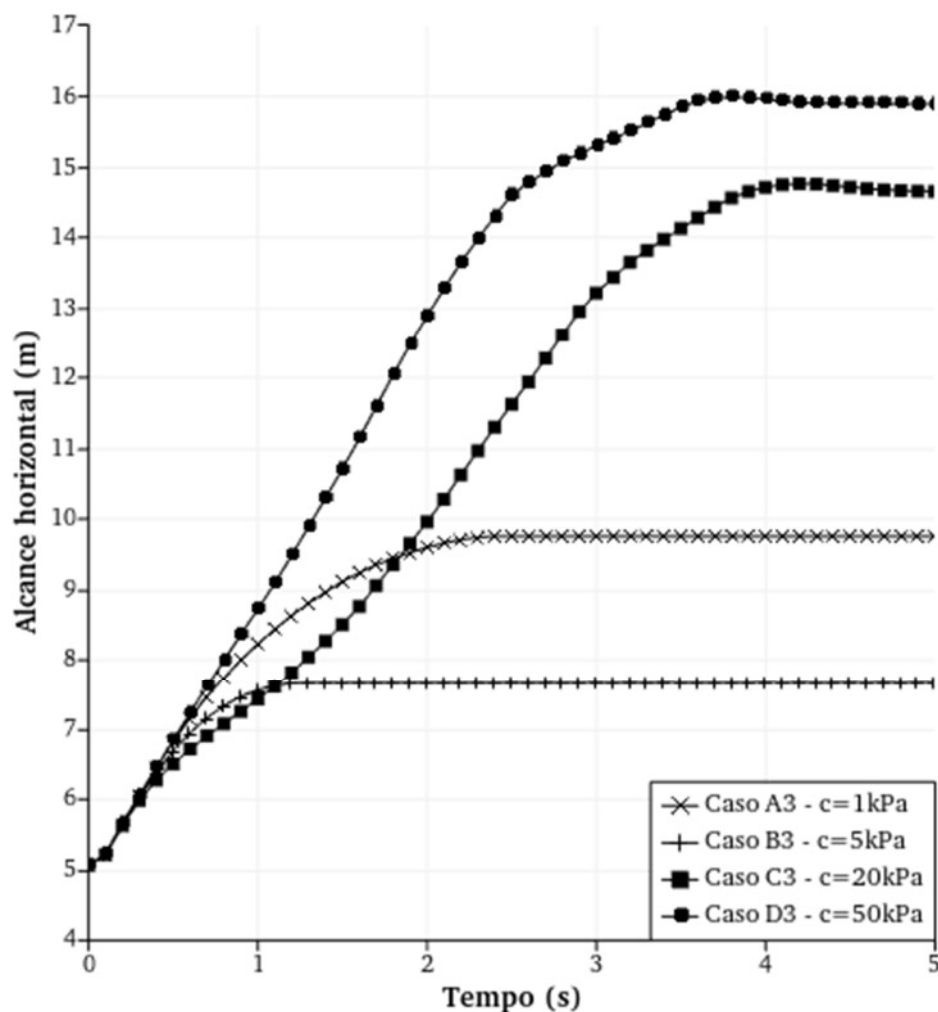


Figura 3.5 – Alcance horizontal dos blocos.

A Figura 3.6 mostra a configuração final do sistema bloco + talude para os quatros casos. Em todos os casos, o bloco se encontra em equilíbrio

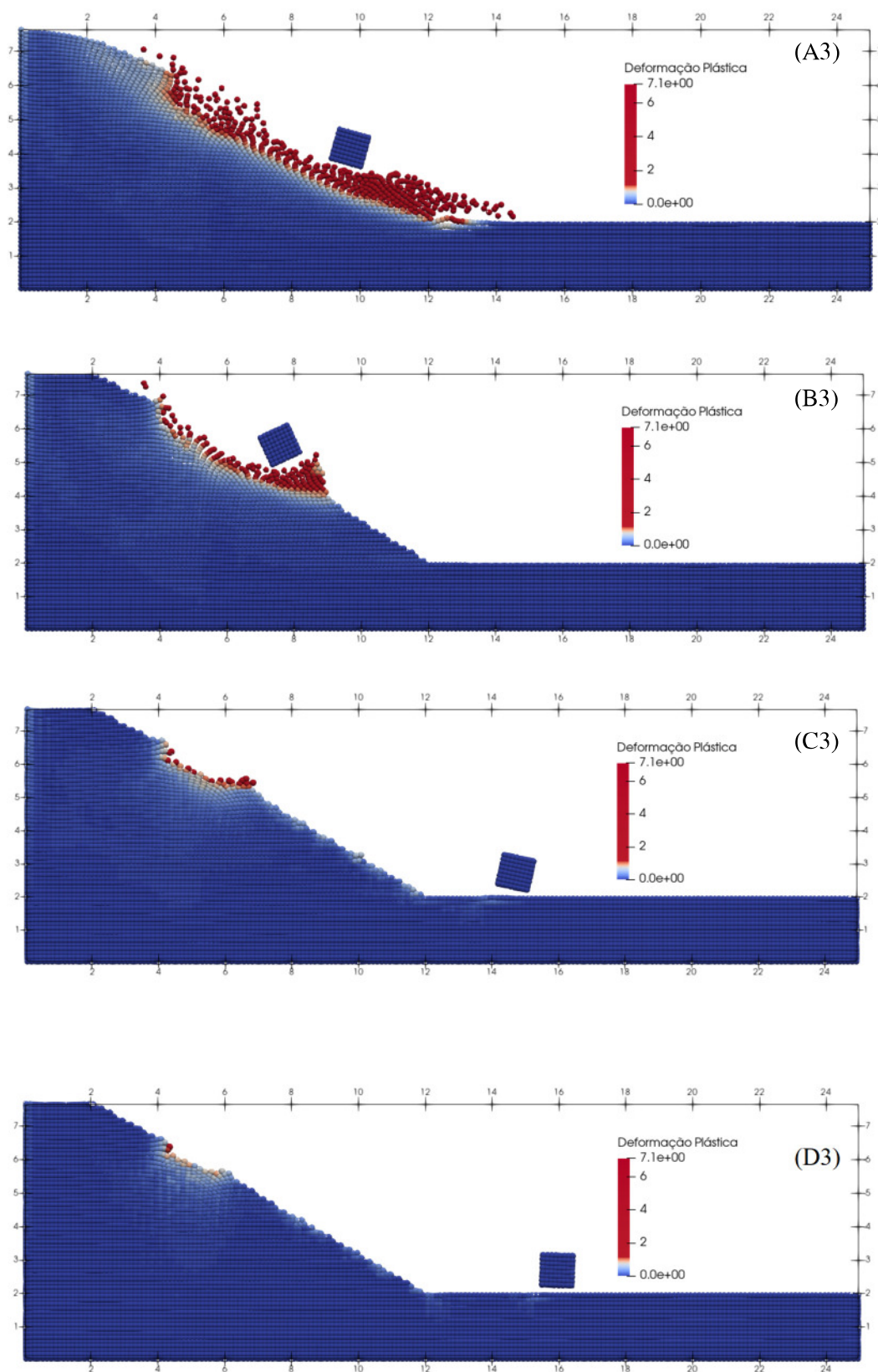


Figura 3.6 – Configuração final – $t = 5s$

Para um material pouco coesivo (caso A3), o impacto do bloco causa uma maior zona de ruptura em comparação com as demais, e as deformações plásticas se estendem por quase toda a extensão do talude, dissipando a maior parte da energia disponível para o movimento. Uma vez que o material do caso B3 é mais resistente que o material do caso A3, era esperado que, no segundo exemplo, o bloco alcançasse uma maior distância horizontal, o que não ocorre. O maior alcance do bloco no caso A3 em relação ao caso B3 se dá pelo fato de que, após o impacto, ocorre um deslizamento no material do talude, arrastando o bloco. No caso B3, não ocorre a ruptura global do talude; o impacto causa uma cicatriz na superfície e a dissipação é tal que o bloco não dispõe de energia suficiente para transpor o material que se depositou à jusante da cicatriz. Para materiais mais coesivos, logo, mais resistentes, como os dos casos C3 e B3, após o impacto, as cicatrizes são menos profundas e os blocos ainda possuem energia cinética para rolar ao longo do talude, ocasionando pequenas zonas de plastificação nos locais de contato do bloco com o solo, ao passo que a energia cinética do bloco se dissipa pelo atrito entre o bloco, em rolamento, e a superfície.

Na configuração final, nesses casos e em todos os seguintes, o sistema bloco + talude se encontra em equilíbrio. Como visto na Seção 2.2.3, as partículas representam um domínio, dessa forma, a partícula não é exatamente o limite do corpo. As distâncias observadas entre o bloco e a superfície e as posições aparentemente instáveis são relacionadas ao método de contato do MPM. Ma *et al.* (2010) [80] propõem uma correção para essa condição, calculando a distância real entre dois corpos. Esse método não foi considerado neste trabalho por uma questão de eficiência e por não influenciar significativamente nos resultados.

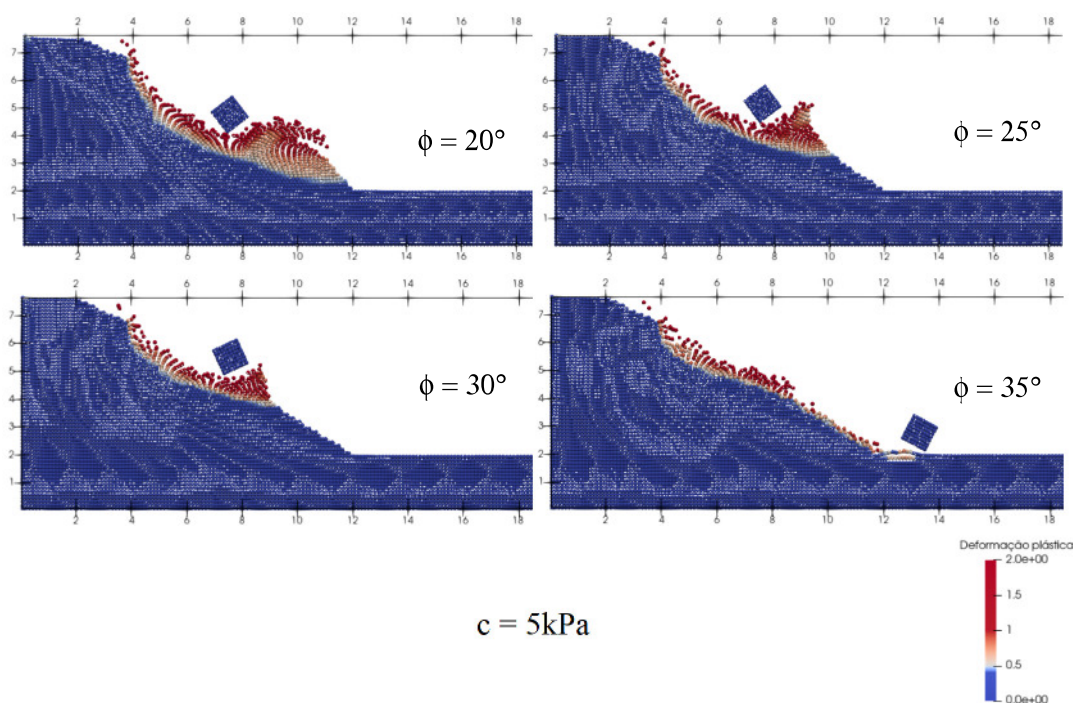
3.1.4

Efeito do ângulo de atrito na trajetória do bloco

Para a verificação da influência do ângulo de atrito no alcance e na dissipação de energia do bloco, foram comparados os casos nos quais materiais com a mesma coesão apresentam diferentes ângulos de atrito. Para solos de menor valor de coesão, como o caso B – 5kPa, a influência do ângulo de atrito se nota no grau de penetração do bloco extensão da zona plastificada.

Nos casos $\phi = 20^\circ$, $\phi = 25^\circ$ e $\phi = 30^\circ$, o bloco desliza na superfície acumulando o material rompido na extremidade da cicatriz sem ter, entretanto, energia suficiente para romper ou transpor a pequena barreira formada. Já no caso $\phi = 35^\circ$, o bloco possui energia suficiente para romper a barreira de material acumulado e rolar sobre o talude.

No caso C – 20kPa, para o valor de $\phi = 20^\circ$, é verificado comportamento semelhante aos do caso B1, B2 e B3 ($\phi = 20^\circ$, $\phi = 25^\circ$ e $\phi = 30^\circ$, respectivamente. Para $\phi = 25^\circ$, o bloco transpõe a rampa formada no extremo da cicatriz, sem rompê-la, uma vez que o solo apresenta maior coesão. Materiais com maior valor de ângulo de atrito irão apresentar menor grau de penetração do bloco na superfície. Em solos onde a parcela de resistência é dada em sua maior parte pela coesão (como no caso D), o ângulo de atrito pouco influencia no movimento do bloco, que rola pela superfície do talude causando pequenas deformações plásticas nos pontos de impacto. A Figura 3.7 apresenta a influência do ângulo de atrito na dissipação de energia dos blocos em queda.



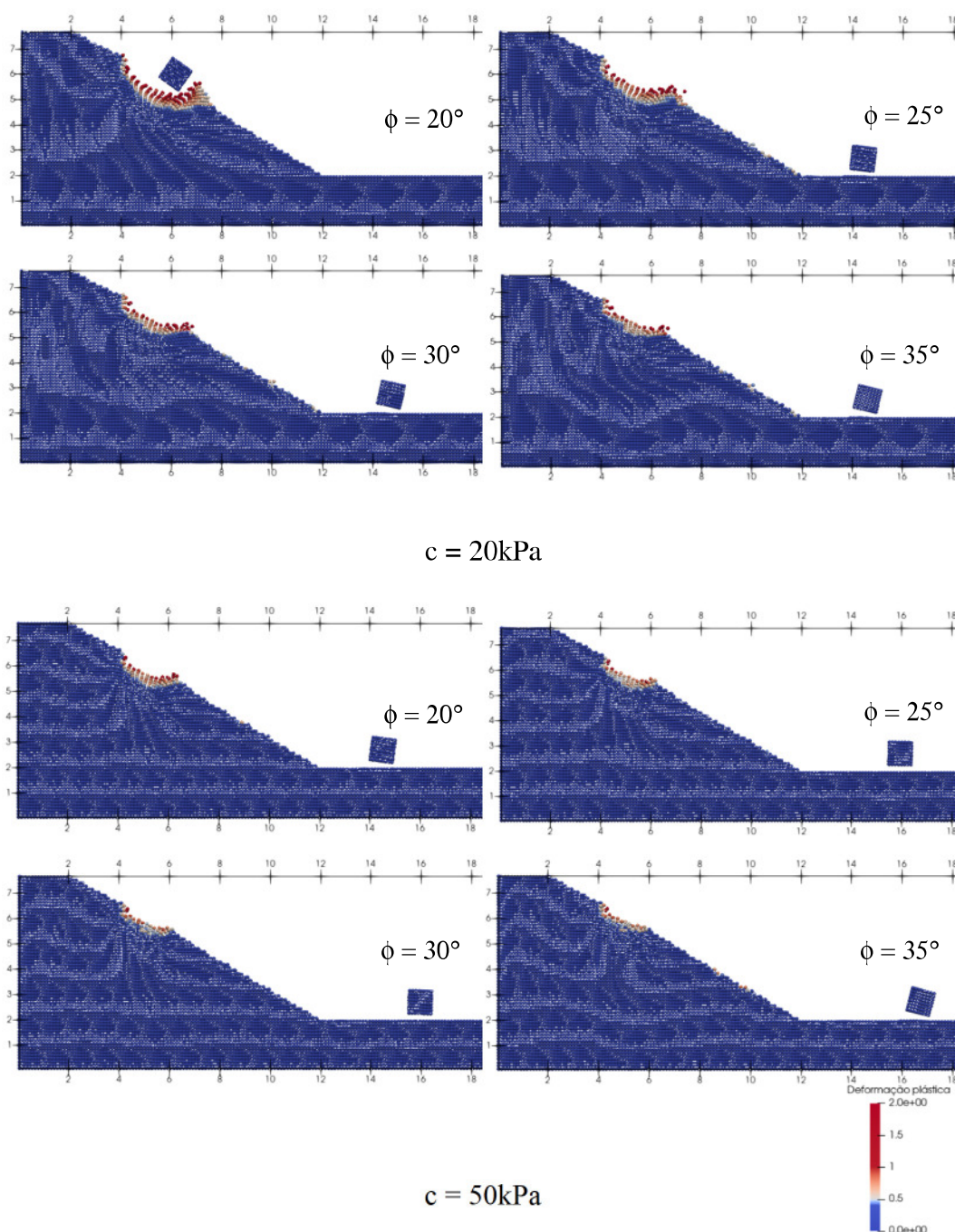


Figura 3.7 – Influência do ângulo de atrito na região plastificada – Casos B e C

Em solos menos coesivos, é de se esperar a maior influência do ângulo de atrito nos resultados, como visto no caso B. Esse comportamento é mais nítido nos casos A3 e A4. Nesses casos, é perceptível como a alteração do ângulo de atrito modifica a extensão da região plastificada e a quantidade de massa movimentada, que é inversamente proporcional ao valor de ângulo de atrito (ver Figura 3.8). Os blocos, em ambos os casos, se encontram em equilíbrio sobre o material rompido, também em equilíbrio.

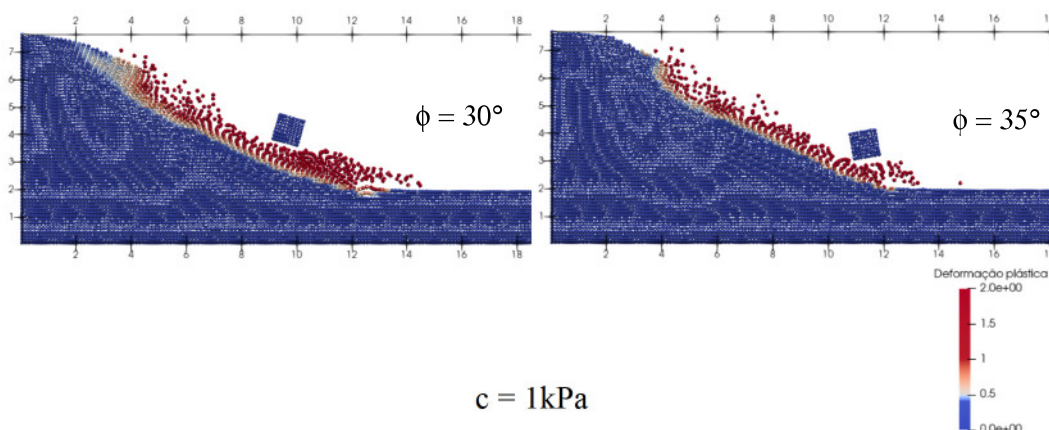


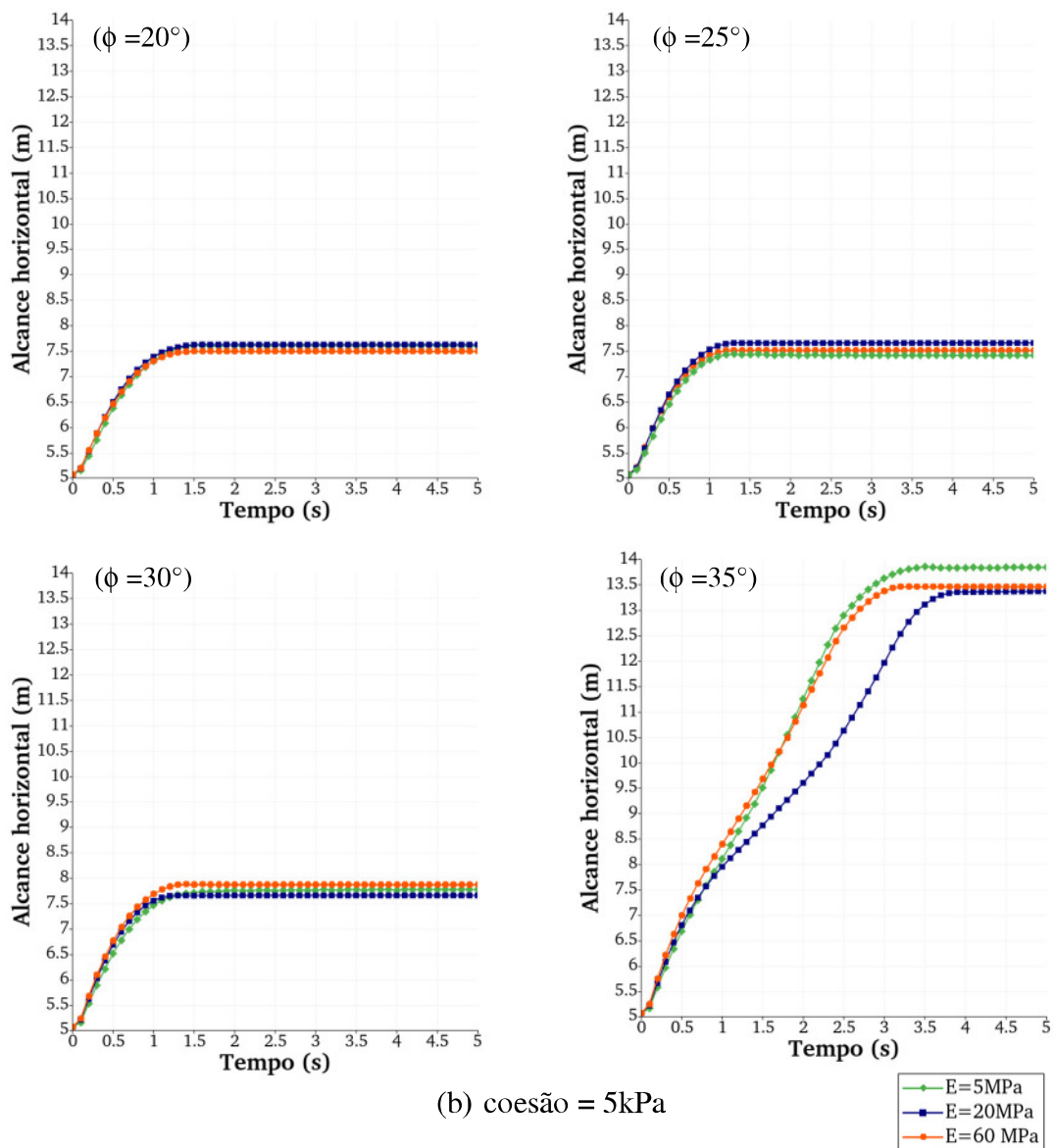
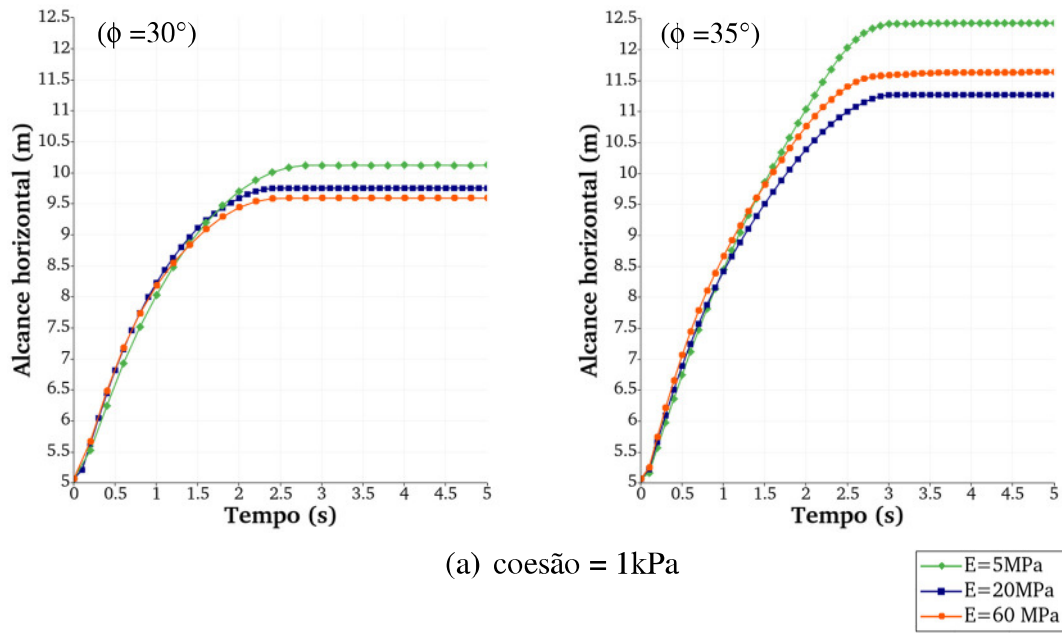
Figura 3.8 – Influência do ângulo de atrito na região plastificada – Caso A

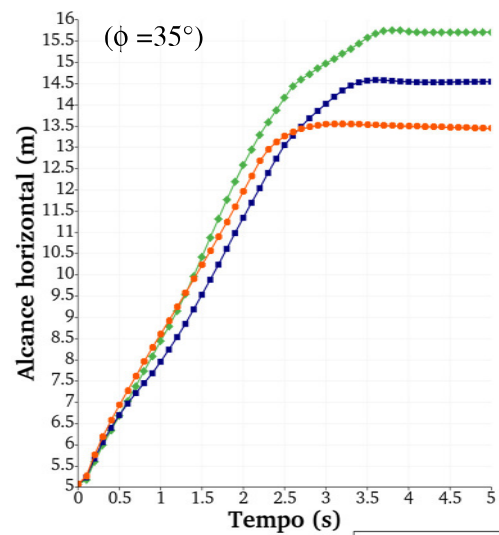
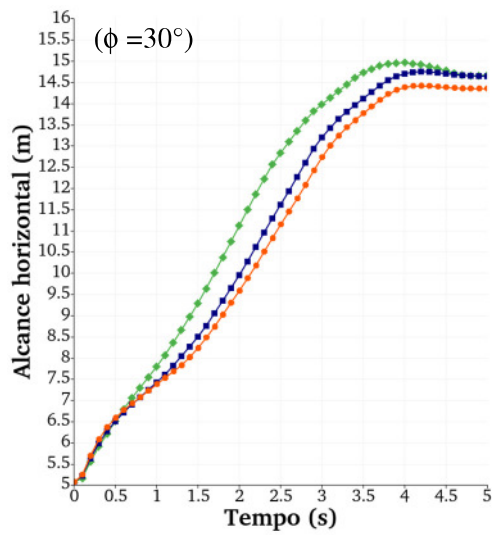
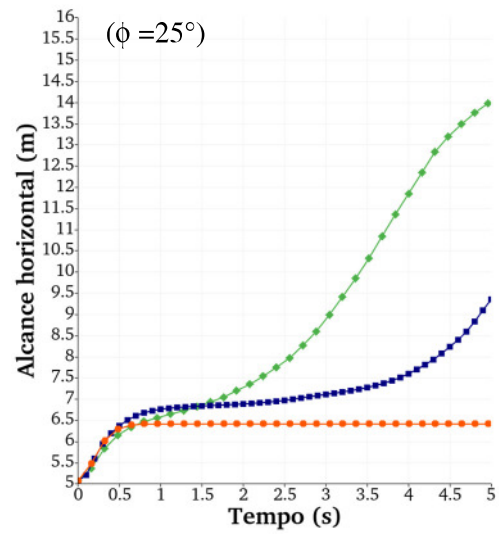
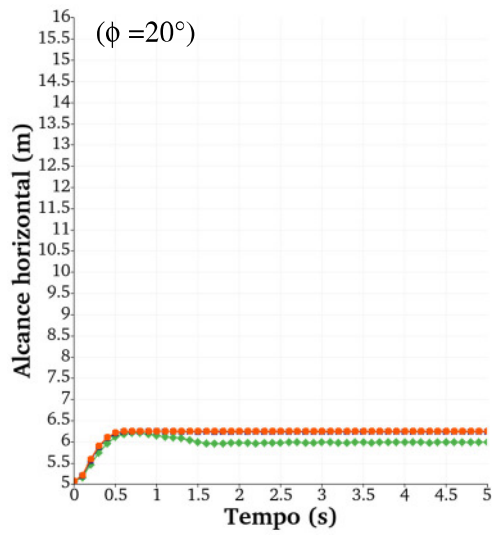
3.1.5

Efeito do módulo de elasticidade na trajetória do bloco

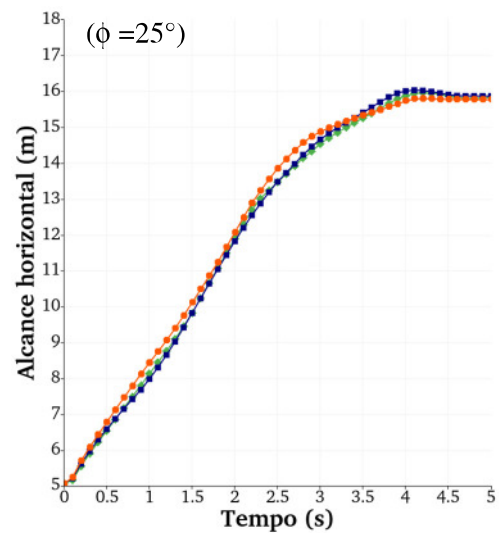
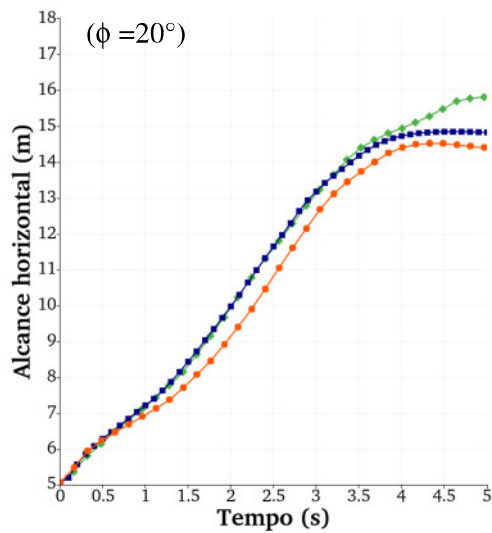
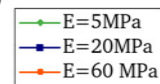
Considerando a variabilidade do módulo de elasticidade dos diversos tipos de solos, foi verificada a influência desse parâmetro na trajetória dos blocos para três diferentes valores: 5MPa, 20MPa e 60MPa. Para a verificação, foram considerados materiais com os mesmos parâmetros de resistência da Tabela 2. Os gráficos da Figura 3.9 apresentam o alcance do ponto de controle para cada simulação.

O módulo de elasticidade do material do talude, em geral, não apresenta influência considerável no alcance dos blocos para a maioria dos casos estudados, principalmente como se observa em solos macios, onde o bloco penetra o talude e desliza acumulando material a sua frente sem, contudo, ter energia suficiente para transpor a rampa formada (Casos B1, B2, B3 e C1 – 5kPa/20°; 5kPa/25°; 5kPa/30°; 20kPa/35°, respectivamente). Para solos mais resistentes à penetração, nos quais, após o impacto, os blocos seguem sua trajetória ao longo do talude, alguns casos apresentam convergência nos alcances ou os valores são relativamente próximos (Casos B4, C3 e D1). Nos casos em que há maiores diferenças nos alcances, é verificado que menores valores de módulo de elasticidade implicam em maiores alcances.





(c) coesão = 20kPa



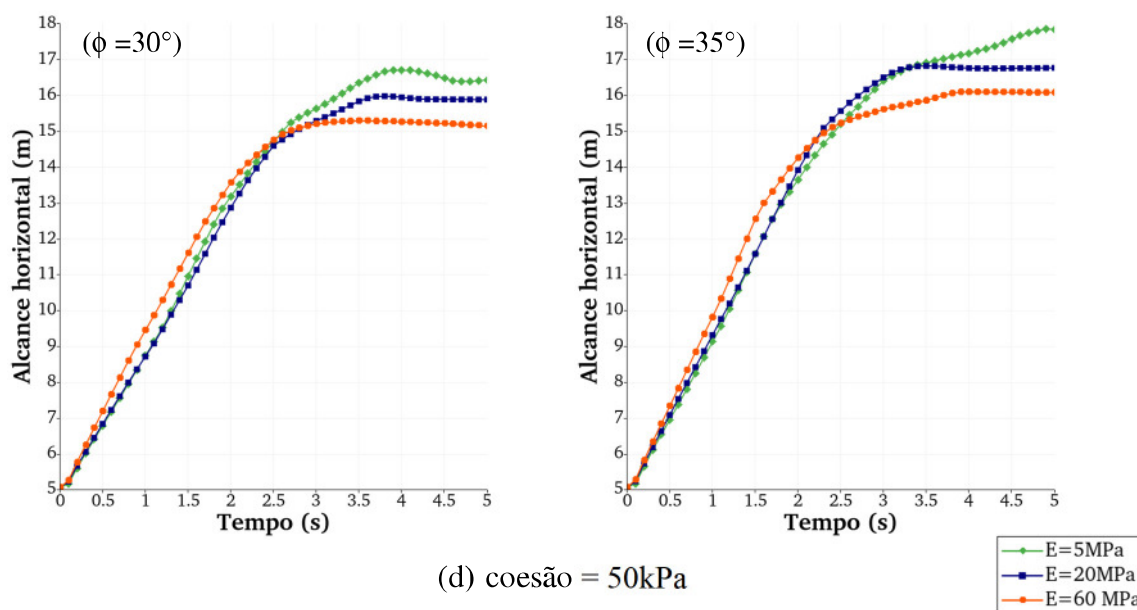


Figura 3.9 – Influência do Módulo de elasticidade no alcance horizontal

O tempo de simulação definido para esses exemplos foi de 5 segundos, porém, em alguns cenários, os blocos não atingiam o repouso, transcorrido esse tempo, conforme se verifica nos casos C2 (20kPa/25°) e D1(50kPa/20°). No caso D1, as curvas com decréscimos suaves no alcance descrevem o comportamento do bloco que, sem energia suficiente para continuar rolando, ou seja, quando sua velocidade é nula e sua posição é instável, retorna para uma condição de equilíbrio. Para alcançar o equilíbrio do bloco, foi necessário aumentar o tempo de simulação do caso C2 (ver Figura 3.10).

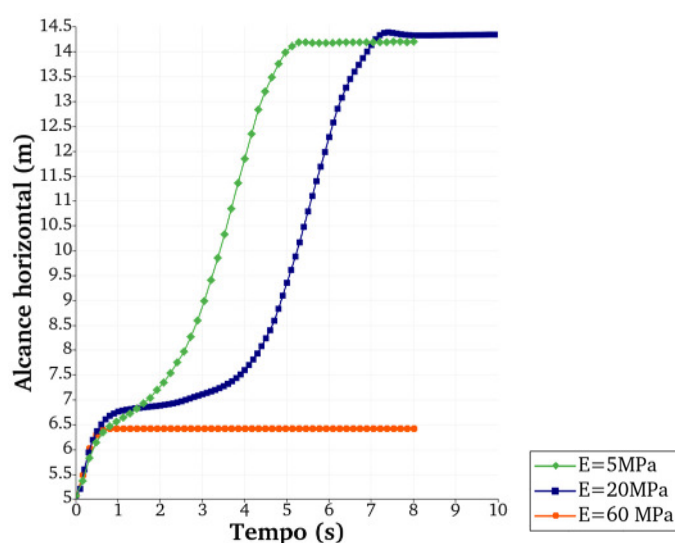


Figura 3.10 – Influência do Módulo de elasticidade no alcance horizontal – Caso C2

Nos casos C4 (20kPa/35°), D1 (50kPa/20°), D3 (50kPa/30°) e D4 (50kPa/30°) são visíveis pequenas diferenças nos alcances de acordo com o módulo de elasticidade. Entretanto, essa evidência é mais explícita no caso C2 (20kPa/25°), em que a diferença do alcance para $E = 20\text{MPa}$ e $E = 60\text{MPa}$ é de aproximadamente 8 metros. A Figura 3.11 mostra o que ocorre no caso C2 para os dois dos módulos de elasticidade analisados. O bloco, ao penetrar o solo com maior módulo de elasticidade, causa maiores deformações ao longo da cicatriz de deslizamento sem que a rampa formada à frente do bloco se rompa. Nos solos mais frágeis, as deformações são menores e o material acumulado se rompe permitindo o movimento do bloco.

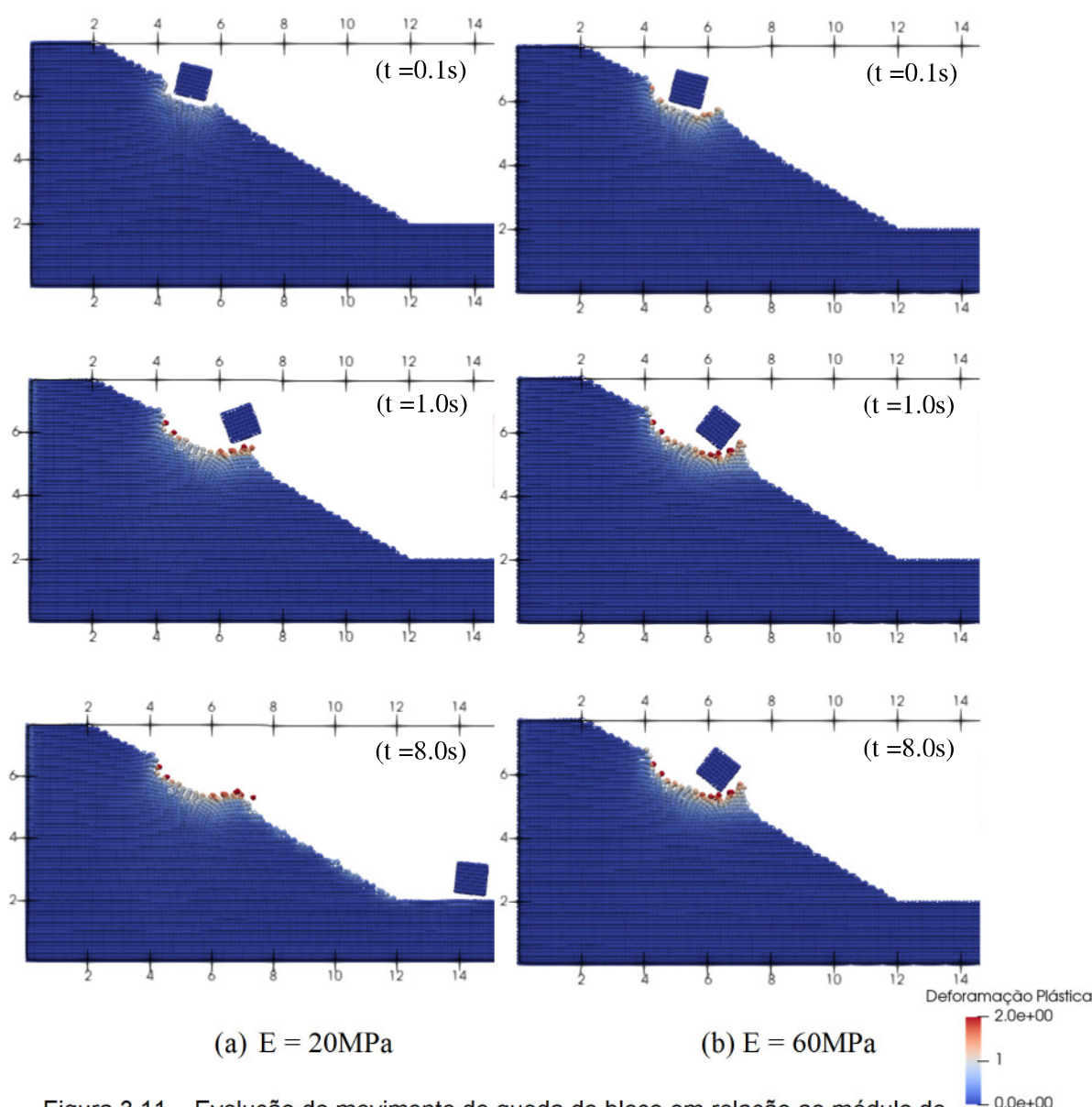


Figura 3.11 – Evolução do movimento de queda do bloco em relação ao módulo de elasticidade

3.1.6

Influência do formato do bloco na trajetória

Além do fato de que as propriedades do material do terreno e as condições de impacto serem incertas e variáveis, a modelagem de queda de blocos também deve considerar a variabilidade na geometria dos blocos, associada à diversidade geológica das regiões de queda de rocha. Para avaliar a influência do formato do bloco no alcance horizontal, considerou-se o modelo com blocos esféricos (Figura 3.12) em comparação com um modelo de bloco cúbicos, sem alterar as dimensões do talude.

Os parâmetros apresentados na Tabela 3.1, para blocos cúbicos, são, em sua maioria, utilizados também nas simulações para bloco esférico. Todavia alguns parâmetros precisaram ser modificados para adequar o modelo. O bloco esférico foi modelado a partir da extrusão de uma circunferência. Foi necessário alterar a massa específica do bloco para que as massas, para ambas as geometrias, não fossem diferentes. O erro de discretização oriundo da representação de um círculo com um conjunto de subdomínios quadrados (domínios das partículas) foi pouco significativo. Os parâmetros que sofreram alterações em relação à Tabela 3.1 estão listados na Tabela 3.3.

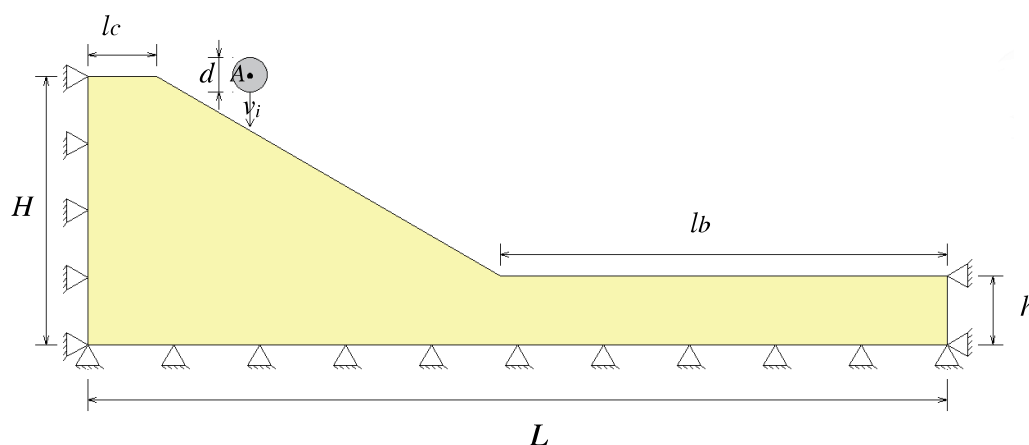


Figura 3.12 – Geometria e condições de contorno do talude homogêneo elasto-plástico, etapa plástica– Bloco esférico

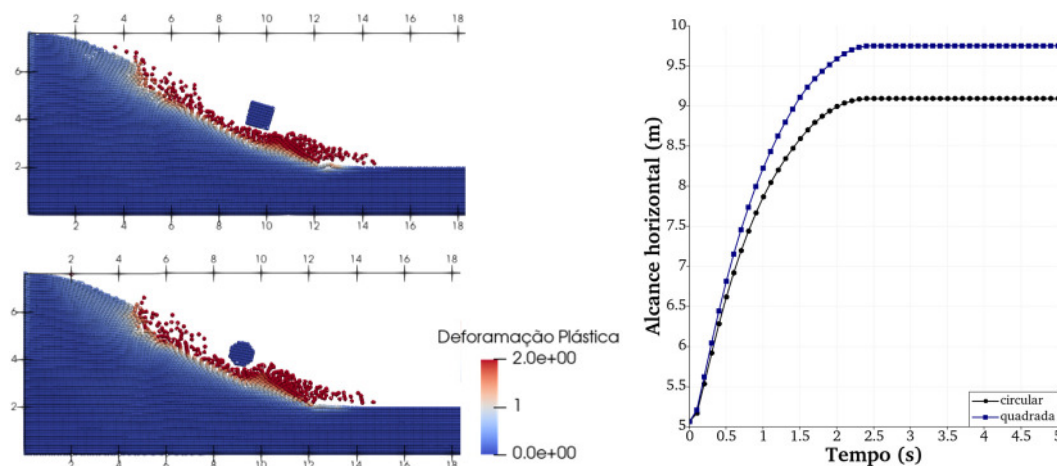
Tabela 3.3 – Parâmetros particulares do problema para blocos esféricos

Dimensão do bloco	d	1.0	m
Malha Euleriana	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	0.25	m
Parâmetros da Rocha			
Massa específica	ρ	3323	kg/ m ³

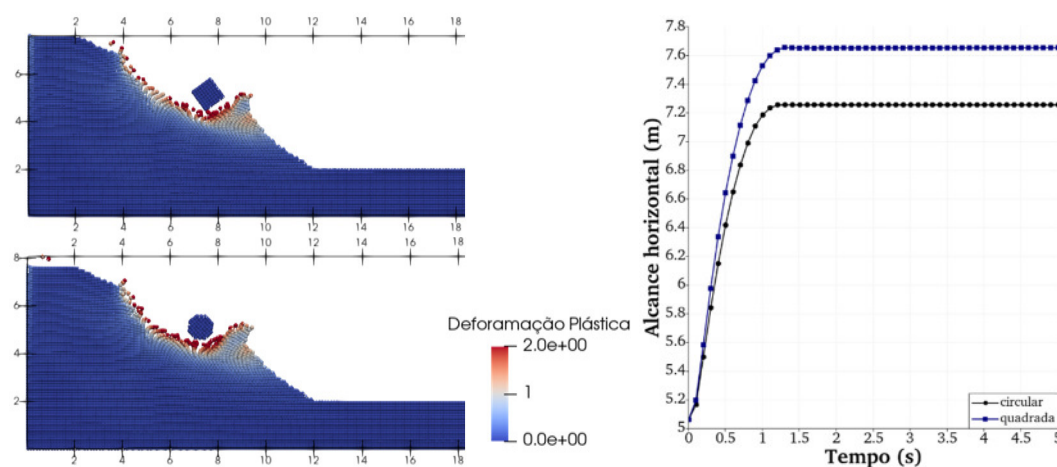
Para as simulações foram utilizados os mesmos parâmetros elásticos do solo apresentados na Tabela 3.1. Foram considerados diferentes tipos de solo para cada uma das simulações, de acordo com os casos apresentados na Tabela 3.2 e, dentre estes, foram selecionados 7 casos para análise, conforme exposto na Tabela 3.4. Os blocos de geometria circular e quadrada impactam o talude verticalmente com a mesma velocidade. A Figura 3.13 apresenta a comparação entre as deformações plásticas e o alcance horizontal para cada uma das geometrias.

Tabela 3.4 – Casos para a análise paramétrica da influência do formato do bloco

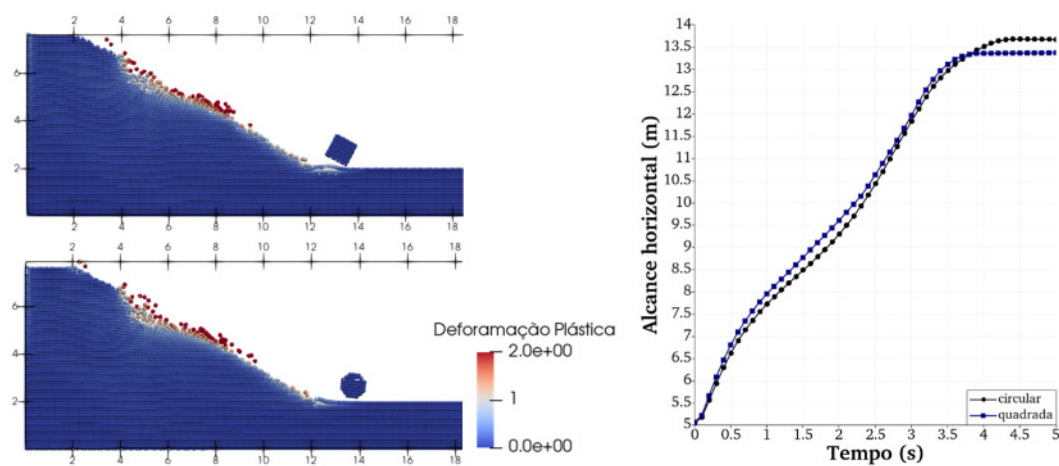
Parâmetros de Mohr-Coulomb	Casos						
	A3	B2	B4	C2	C4	D1	D3
Coesão	1kPa	5kPa	5kPa	20kPa	20kPa	50kPa	50kPa
Ângulo de Atrito	30°	25°	35°	25°	35°	20°	30°



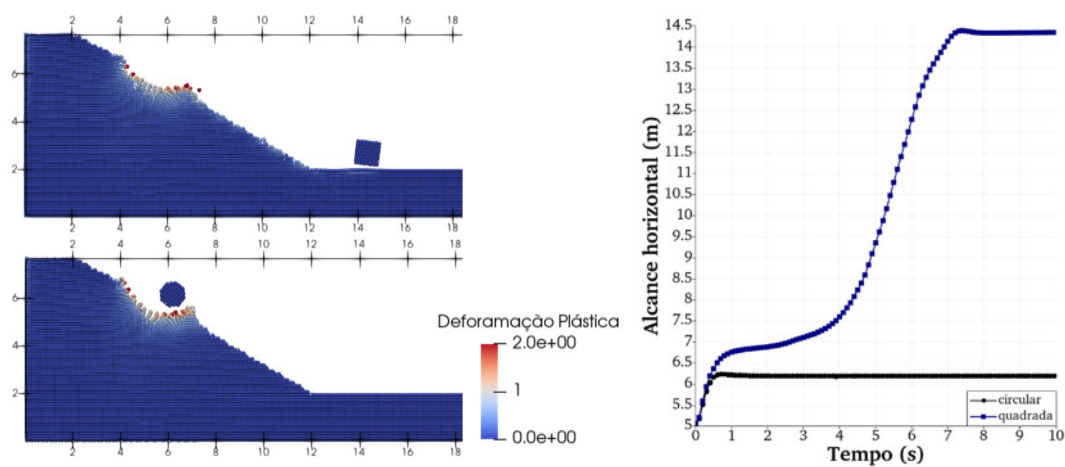
a) Caso A3 – $c = 1\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$



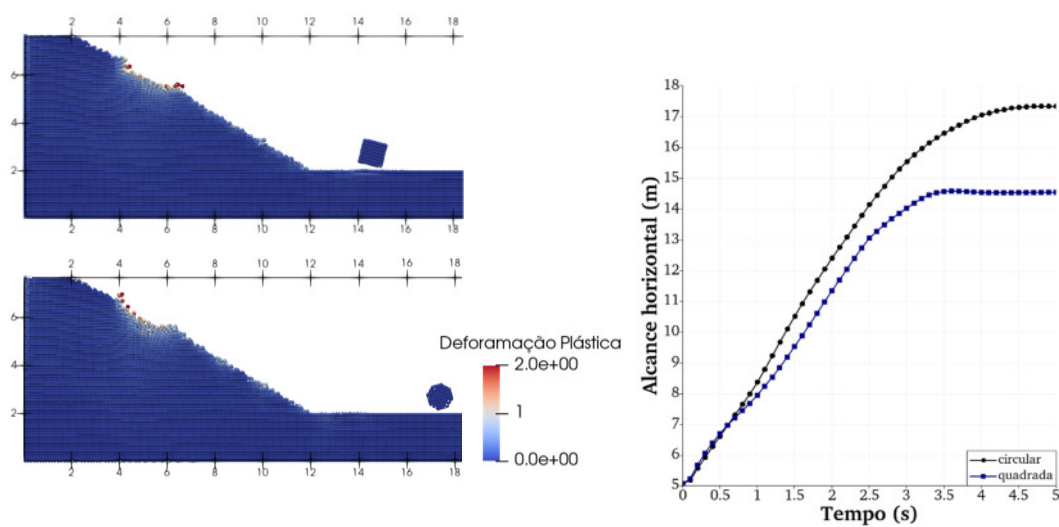
b) Caso B2 – $c = 5\text{kPa}$; $\phi = 25^\circ$



c) Caso B4 – $c = 5\text{kPa}$; $\phi = 35^\circ$



d) Caso C2 – $c = 20\text{kPa}$; $\phi = 25^\circ$



e) Caso C4 – $c = 20\text{kPa}$; $\phi = 35^\circ$

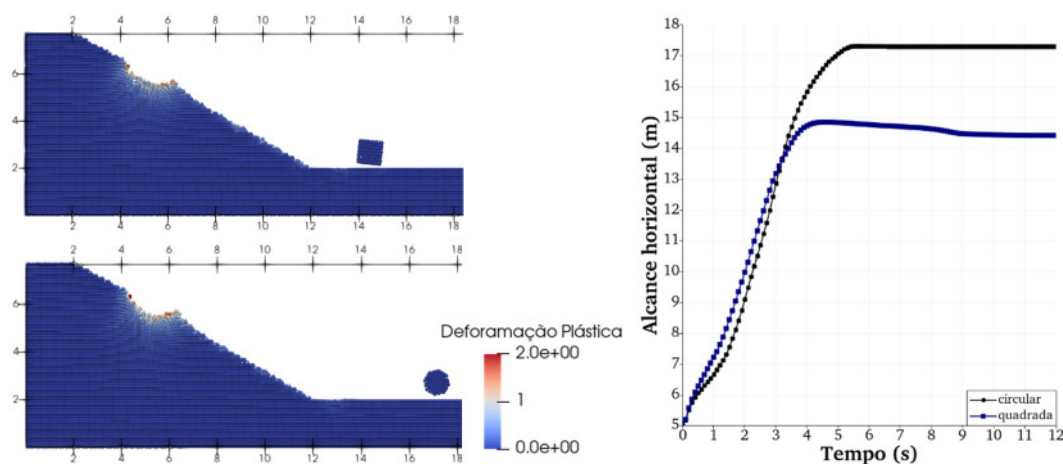
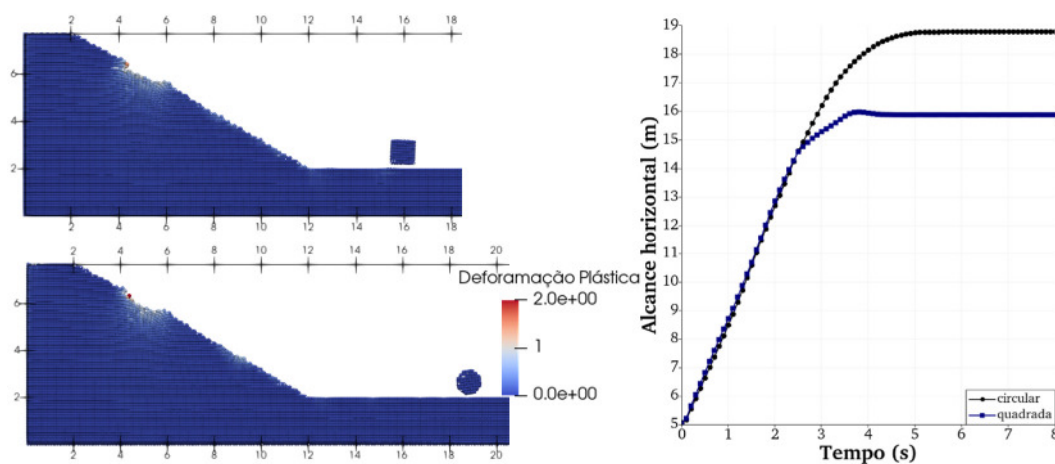
f) Caso D1 – $c = 50\text{kPa}$; $\phi = 20^\circ$ g) Caso D3 – $c = 50\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$

Figura 3.13 - Comparação entre as deformações plásticas e o alcance horizontal para blocos de geometria circular e quadrada

Os blocos de geometria circular, em geral, alcançam maiores distâncias que os blocos de geometria quadrada. Contudo, chama atenção o caso C2, no qual o bloco circular, ao atingir o talude, penetra o solo alcançando o equilíbrio. O impacto do bloco com o solo gera deformações plásticas na superfície do talude, deixando cicatrizes de dimensões variadas dependendo da energia de colisão e, também, como sugerem os experimentos numéricos até então apresentados, do formato do bloco. Mesmo com a mesma energia de colisão do bloco quadrado, o bloco circular penetra mais no solo, gerando uma maior zona de plastificação e dissipando mais energia, de modo que não consegue transpor a rampa de sobressalto.

3.1.7

Influência da velocidade e do ângulo de impacto na trajetória do bloco

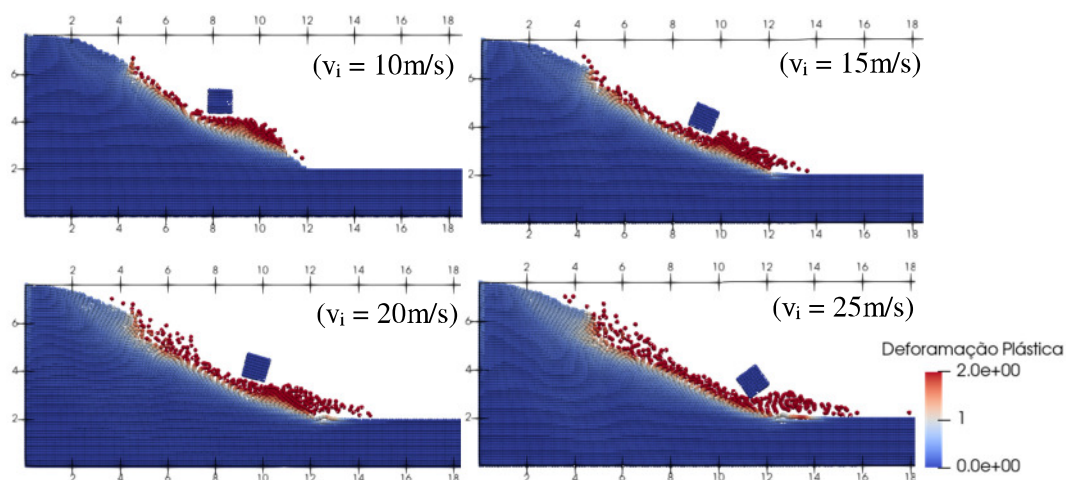
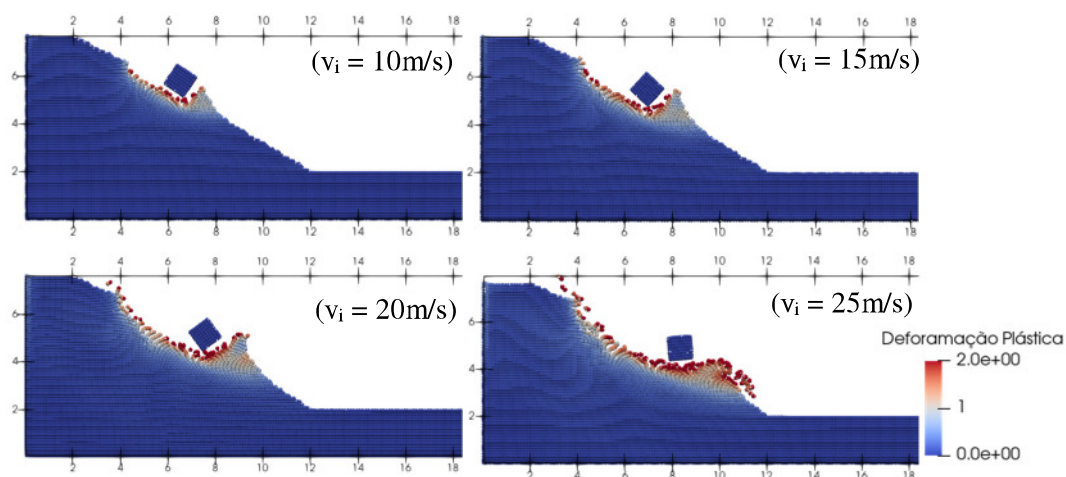
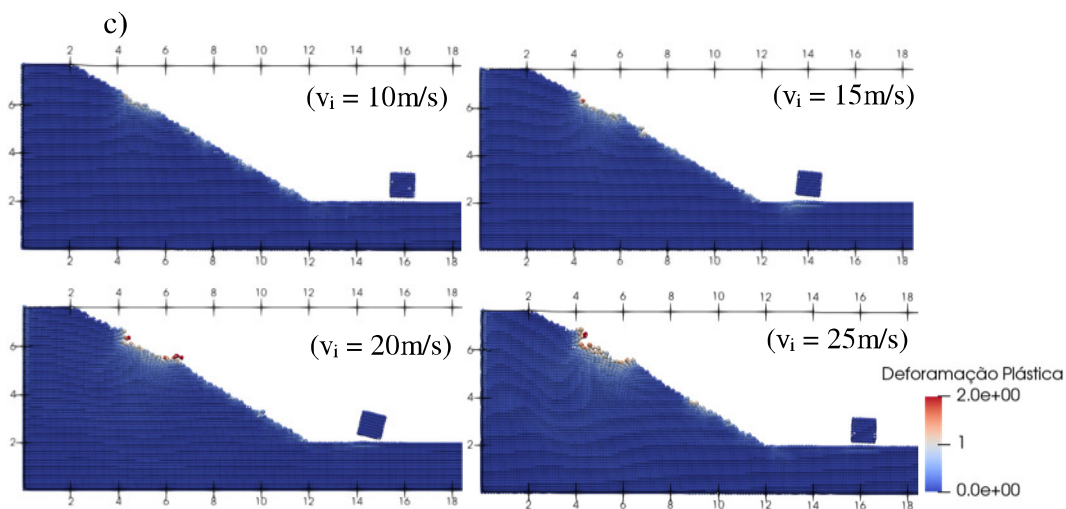
Ao impactar a superfície, o bloco pode compactar, espalhar ou cisalhar o solo do talude, a depender da resistência do solo e do formato da rocha, conforme visto nas seções anteriores. Porém a velocidade e o ângulo impacto também podem definir as consequências do impacto. As simulações até então realizadas consideravam um bloco em queda livre, seguindo uma trajetória perfeitamente vertical, com velocidade inicial de 20m/s.

Nos eventos naturais de queda de rochas, a velocidade do material se encontra entre 10 a 20m/s, podendo atingir até 25m/s [77] e impactar o talude em diferentes ângulos. Essas variáveis possuem grande influência no alcance do bloco, uma vez que uma maior velocidade implica em uma maior energia cinética, e na sua trajetória.

Dentre os casos apresentados na Tabela 3.4, para que os resultados apresentados não ficassem muito extensos, foram selecionados alguns, conforme a Tabela 3.5, para avaliar a influência da velocidade no alcance e nas deformações plásticas. Foram consideradas velocidades de impacto de 10m/s, 15m/s, 20m/s e 25m/s, inicialmente, seguindo uma trajetória vertical e em seguida, variando o ângulo de impacto. A Figura 3.14 apresenta o resultado da variação da velocidade vertical de impacto do bloco no talude.

Tabela 3.5 – Casos para as análises paramétricas da influência da velocidade e do ângulo de impacto do bloco

Parâmetros de Mohr-Coulomb	Casos			
	A3	B2	C4	D3
Coesão	1kPa	5kPa	20kPa	50kPa
Ângulo de Atrito	30°	25°	35°	30°

a) Caso A3 – $c = 1\text{kPa}$; $\phi = 30^\circ$ b) Caso B2 – $c = 5\text{kPa}$; $\phi = 25^\circ$ d) Caso C4 – $c = 20\text{kPa}$; $\phi = 35^\circ$

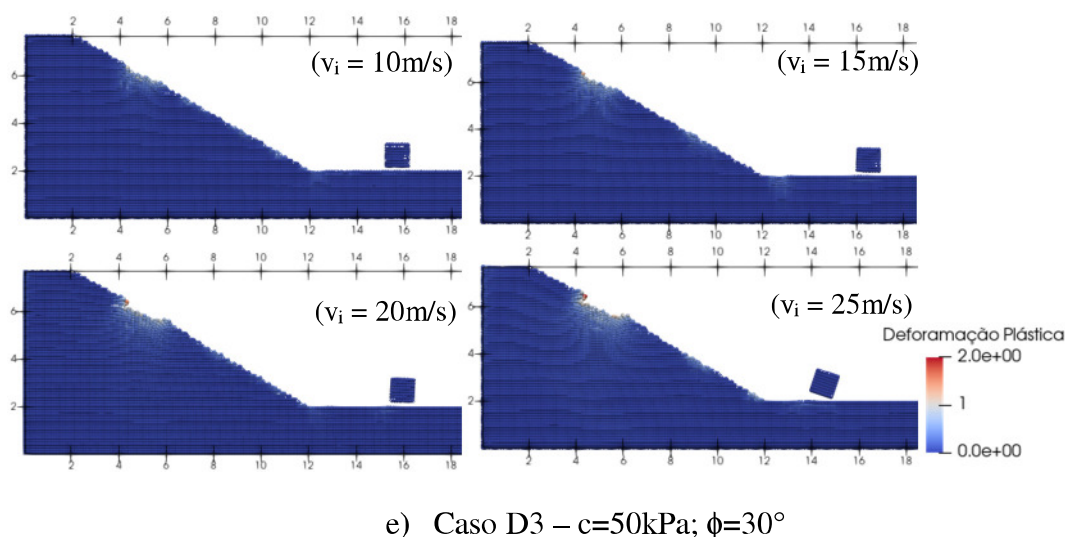


Figura 3.14 – Influência da velocidade de impacto nas deformações plásticas do talude e no alcance de blocos que impactam o talude verticalmente

Para avaliar o impacto do bloco seguindo diferentes trajetórias de incidência, os ângulos foram variados de $\alpha_b = 30^\circ$ e $\alpha_b = 45^\circ$ em relação à horizontal, conforme o exemplo da Figura 3.15. Foram atribuídos valores de velocidade nos componentes vertical e horizontal do vetor de velocidade, de modo que o vetor resultante tivesse direção, sentido e magnitude pré-estabelecidos. A seguir, são apresentados os comparativos de alguns modelos para diferentes ângulos e velocidades.

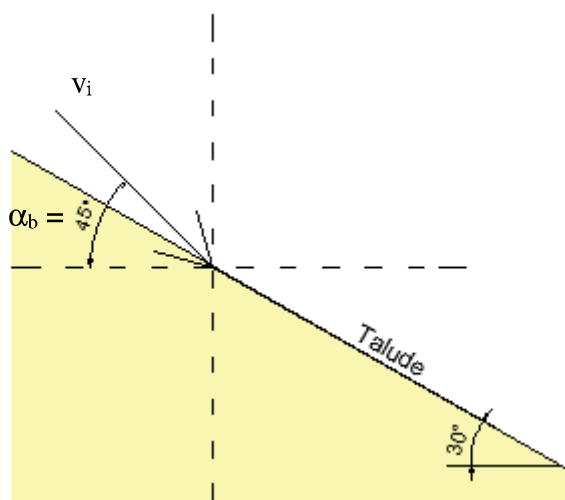


Figura 3.15 – Vetor velocidade resultante para $\alpha_b = 45^\circ$

Para os casos nos quais a velocidade $v_i = 15$ m/s, são apresentados os modelos com as deformações plásticas para os diferentes tipos de solos avaliados (Figura 3.16). Para os demais casos, são apresentados gráficos que correlacionam a distância percorrida e energia cinética com a energia cinética para o tempo de simulação (Figura 3.17).

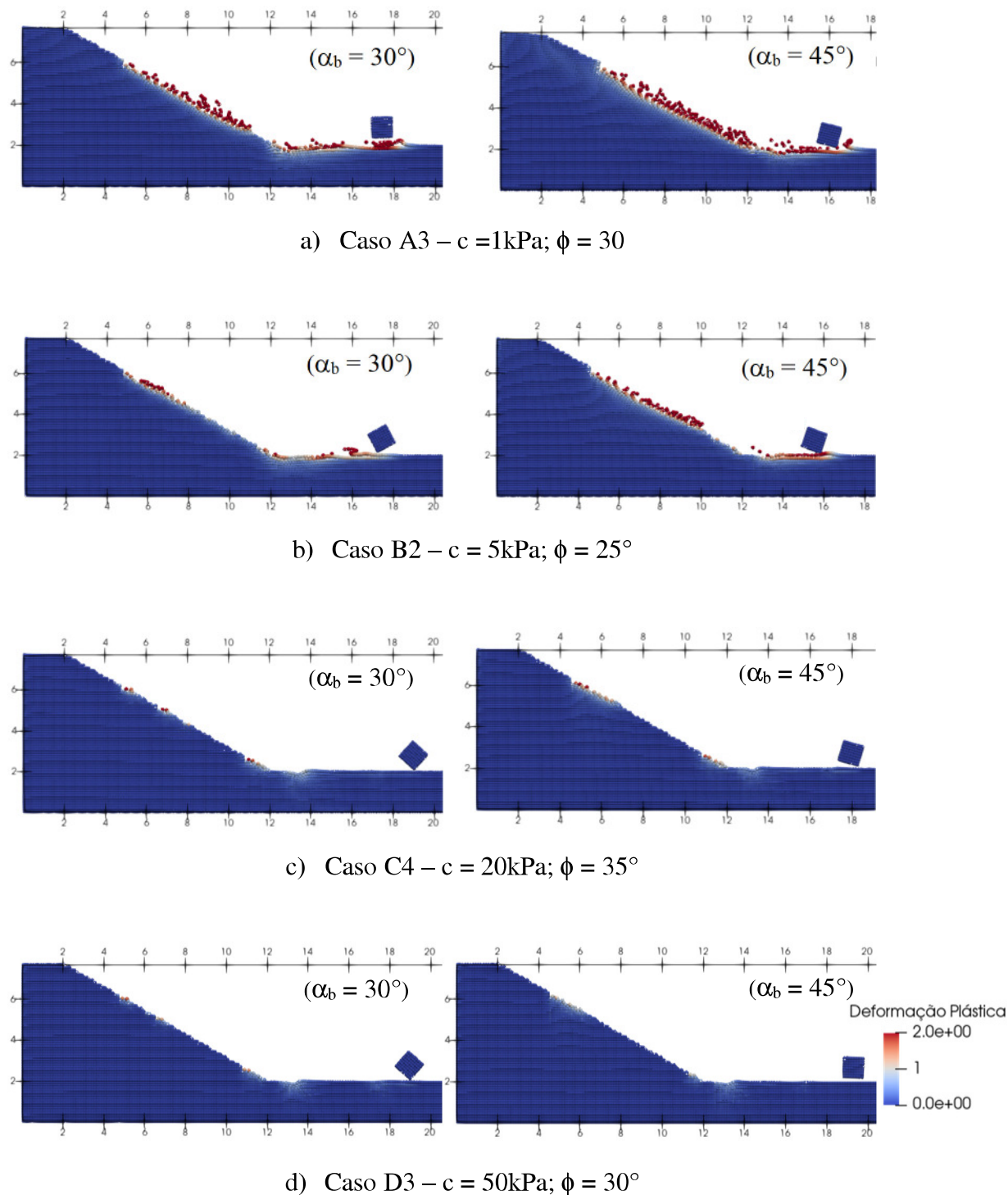
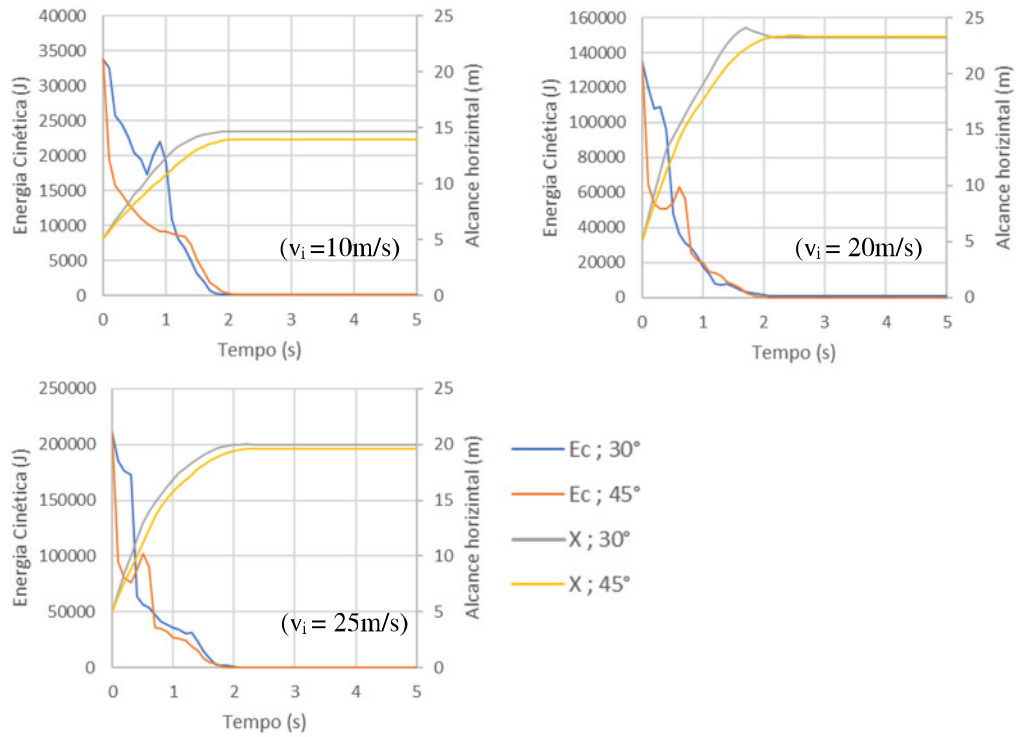
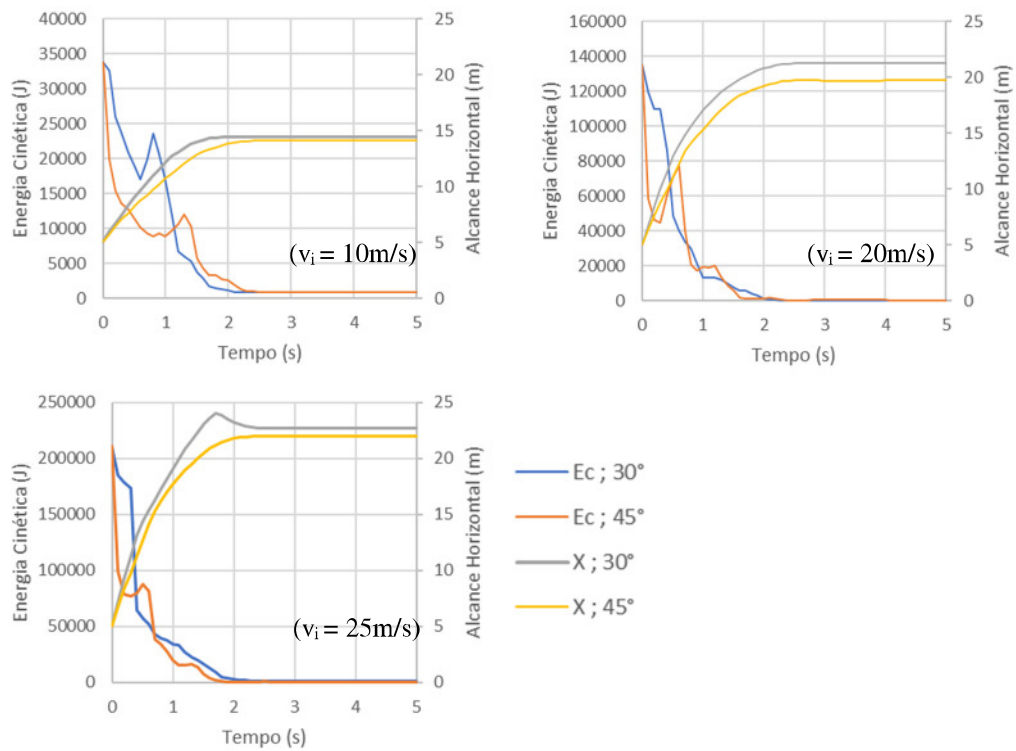
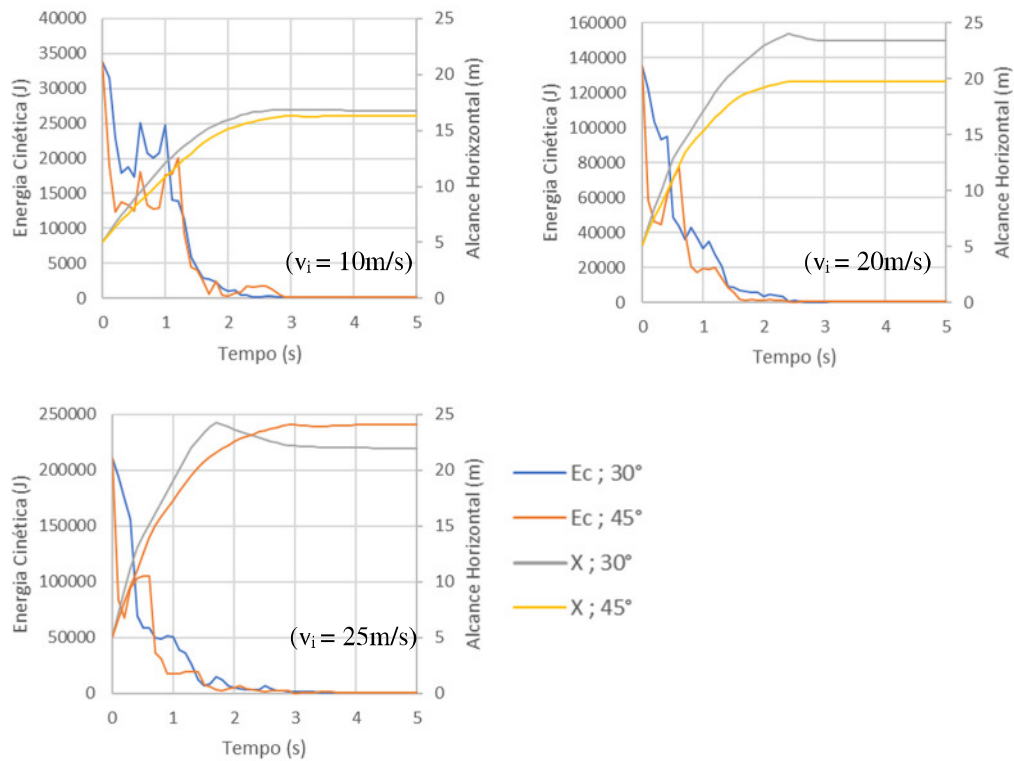
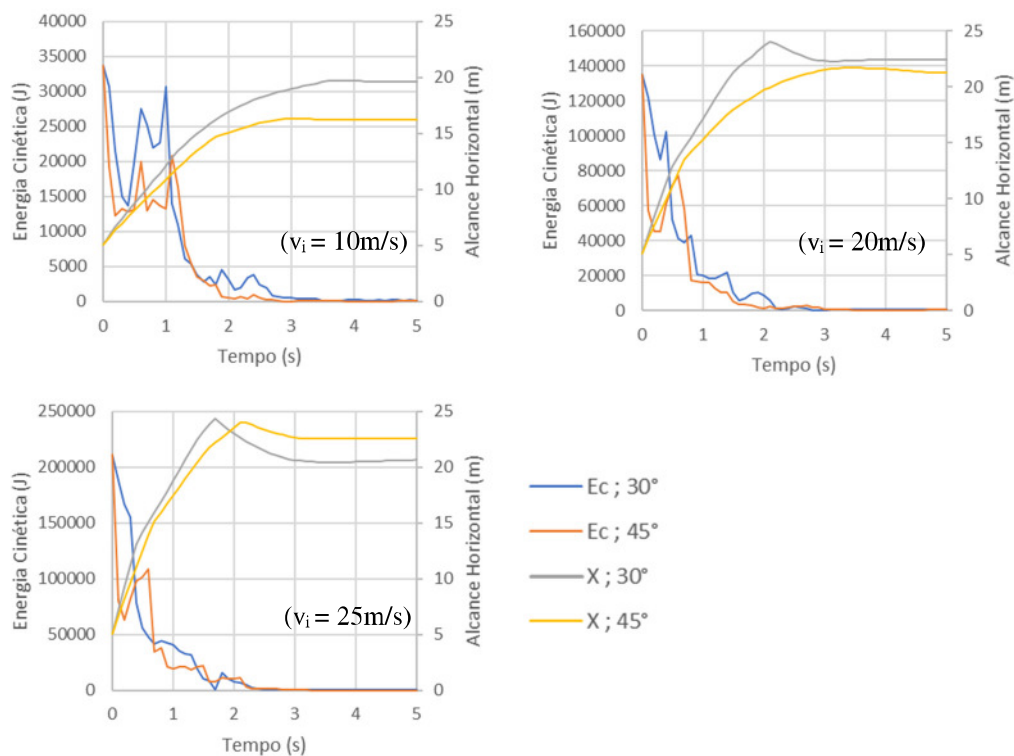


Figura 3.16 – Deformações plásticas geradas após o impacto em diferentes ângulos para $v_i = 15\text{m/s}$

a) Caso A3 – $c = 1 \text{ kPa}$; $\phi = 30$ b) Caso B2 – $c = 5 \text{ kPa}$; $\phi = 25^\circ$



c) Caso C4 – $c = 20 \text{ kPa}$; $\phi = 35^\circ$



d) Caso D3 – $c = 50 \text{ kPa}$; $\phi = 30^\circ$

Figura 3.17 – Gráficos de evolução da energia cinética e do alcance dos blocos considerando ângulos de incidência $ab = 30^\circ$ e $ab = 45^\circ$ em relação a horizontal e velocidades $v_i = 10 \text{ m/s}$, $v_i = 20 \text{ m/s}$ e $v_i = 25 \text{ m/s}$

3.2

Comparação RAMMS::Rockfall x MPM-PUCRio

Nessa seção, serão comparados os resultados das simulações de queda entre o MPM e o RAMMS::Rockfall para modelos 2D e 3D. A seção também irá abordar a influência de alguns formatos típicos de blocos nas suas trajetórias.

3.2.1

Modelo de atrito – RAMMS::Rockfall

Ao longo do movimento de queda, os impactos do bloco com o terreno geram cicatrizes na superfície do solo, que variam de acordo com a energia de impacto e dos parâmetros de resistência do terreno [81]. Durante essa interação entre o bloco e o terreno, ocorre a dissipação da energia cinética tanto pelas deformações plásticas quanto pelo atrito da rocha com a superfície e o solo pode ser cisalhado, espalhado ou compactado, dependendo do ângulo de impacto da rocha, das velocidades de translação e de rotação da rocha, de sua massa e de seu formato [74].

No MPM há duas fontes de dissipação de energia: o atrito friccional e as deformações elasto-plásticas. O atrito friccional ocorre durante o contato entre o bloco e o solo, no qual a componente tangencial do deslocamento se opõe ao movimento do bloco. Essa força tangencial é proporcional à força normal através do coeficiente de atrito friccional. A segunda fonte de dissipação de energia é decorrente das deformações elasto-plásticas, uma vez que ao impactar o talude, o bloco deforma o solo.

No RAMMS:Rockfall, a dissipação de energia decorre de três forças que se opõem ao movimento de queda dos blocos: uma força de atrito deslizante e duas forças de arraste. A força de atrito deslizante atua somente no contato entre a rocha e o terreno. O modelo de atrito deslizante do RAMMS é uma modificação do atrito de Coulomb, porém o valor do atrito é dependente da distância de deslizamento percorrida pelo bloco, ascendendo do início da cicatriz do escorregamento e tendendo a um valor mais alto final da cicatriz. Esse artifício é utilizado para simular a deformação do solo e principalmente a resistência que o acúmulo de

material à frente do bloco, conforme ele penetra a superfície, impõe ao seu movimento.

A Equação 1 expressa a relação entre o coeficiente de atrito (μ) e a distância de deslizamento percorrida (s):

$$\mu(s) = \mu_{min} + \frac{2}{\pi}(\mu_{max} - \mu_{min})\arctan(\kappa s) \quad (\text{Eq.:2.23})$$

onde, μ_{min} , μ_{max} e κ são parâmetros do modelo de atrito previamente definidos para cada categoria de solo, de acordo a Tabela 3.6 abaixo.

Tabela 3.6: Parâmetros do modelo de atrito do RAMMS::Rockfall

Terreno	μ_{min}	μ_{max}	β	κ	Arraste
Medium soft	0.3	2	125	1.5	0.7
Medium	0.35	2	150	2	0.6
Medium hard	0.4	2	175	2.5	0.5
Hard	0.55	2	185	3	0.4
Extra hard	0.8	2	200	4	0.3

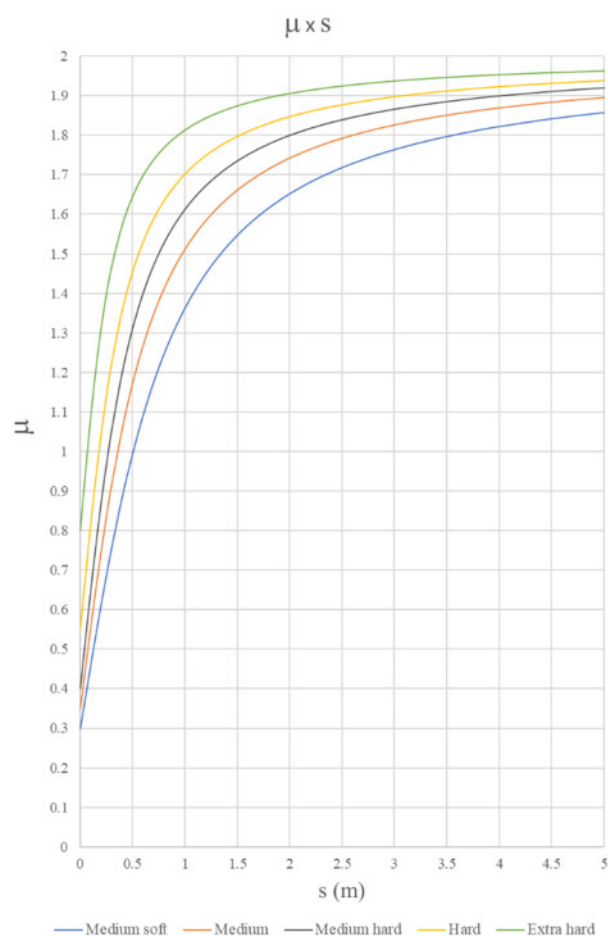


Figura 3.18 – Coeficiente de atrito do modelo RAMMS::Rockfall em relação ao comprimento da cicatriz de impacto

Cicatrizes de pequenos comprimentos em solos deformáveis já são suficientes para mobilizar um aumento no valor do coeficiente de atrito no trecho final do deslizamento (ver Figura 3.18). Por exemplo, o coeficiente de atrito de um solo da categoria *medium soft* varia, para uma cicatriz de comprimento $s = 0.5\text{m}$, de 0.3 a 1.0 do início ao fim do deslizamento. Caso o bloco deslize por mais 0.5m, essa variação de coeficiente seria menor dentro de um intervalo de 1.0 até aproximadamente 1.35. Categorias de terreno mais resistentes possuem coeficientes de atrito mínimo maiores do que solos deformáveis. Contudo, a variação do coeficiente de atrito não é muito expressiva, uma vez que as cicatrizes nesses terrenos são pequenas.

Quanto à força de arraste, esta é adicionada para compensar a dissipação de energia oriunda de deformações visco-plásticas nos solos moles após o impacto da rocha, mas que também ocorre em materiais mais duros onde a fricção entre os grânulos dissipa energia. A força de arraste é proporcional à energia cinética total da rocha através do coeficiente de arraste.

Há ainda uma terceira força adicional que se opõe ao movimento de queda da rocha: o arrasto de floresta. O arrasto de floresta leva em consideração a influência da vegetação na dissipação de energia do bloco em queda. Essa força não foi considerada neste trabalho.

Como o modelo utilizado no RAMMS não possui deformação, essas forças em função da distância de deslizamento e em função da velocidade do bloco são adicionadas para representar as deformações. No MPM o modelo deforma elastoplasticamente, não sendo necessário considerar forças adicionais. As deformações já estão embutidas na formulação do método, uma vez que a teoria da plasticidade garante que o sistema seja termodinamicamente conservativo em equilíbrio.

Compreendendo-se as diferenças entre os modelos de dissipação de energia dos métodos utilizados, as seções seguintes abordam a concepção básica, porém suficiente nesta etapa do trabalho, de um projeto no software RAMMS:Rockfall, desde os dados de entrada, escolha do tipo do terreno e a geometria dos blocos.

3.2.2

Dados de entrada – RAMMS::Rockfall

Para iniciar um projeto no RAMMS, o requisito de entrada mais importante são os dados topográficos, uma vez que o alcance, o tipo de movimento do bloco, sua altura de salto, velocidade e energia cinética são influenciados pela interação da rocha com o solo. Para modelar a topografia do terreno no software, é necessário um Modelo Digital de Elevação (MDE) no sistema de coordenadas cartesianas.

Para modelar uma superfície similar a que foi usada nas simulações anteriores, um arquivo de texto com os dados planialtimétricos que definam a topografia deve ser carregado em um software de georreferenciamento. Nesse trabalho foi usado o QGIS [82]. Os pontos carregados devem ser salvos como uma camada *shapefile* (.shp) e em seguida interpolados. Para a interpolação foi usado o método IDW que considera a ponderação pelo inverso da distância. Esse processo gera um arquivo com valores de cota em cada um dos seus pixels e, a partir desse arquivo, é criado um *raster* formado por uma matriz de células que contêm os dados altimétricos da região representada. Os resultados do arquivo *raster* são salvos em formato de grade regular ASCII XYZ (.xyz).

O RAMMS aceita dados topográficos de entrada como uma grade ESRI ASCII; contudo, o software dispõe de uma ferramenta que converte os dados de espaço único ASCII XYZ em uma grade ESRI. Dessa forma é modelada a topografia do problema no RAMMS, a partir de um arquivo de pontos de coordenadas planialtimétricas. A Figura 3.19 mostra o exemplo da modelagem de uma superfície no QGIS que será utilizada em exemplos tridimensionais. A Figura 3.20 apresenta a mesma superfície inserida no RAMMS.

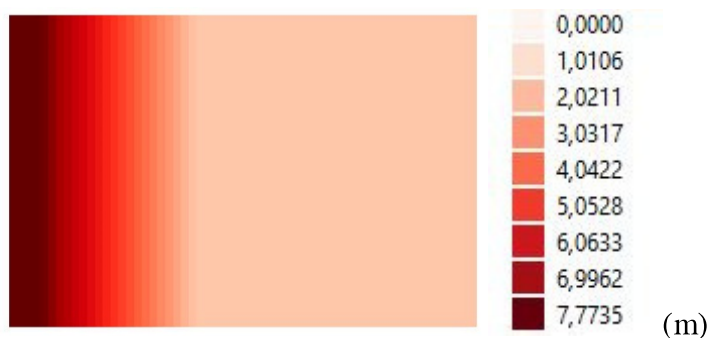


Figura 3.19 – Modelo planialtimétrico da superfície do terreno no QGIS

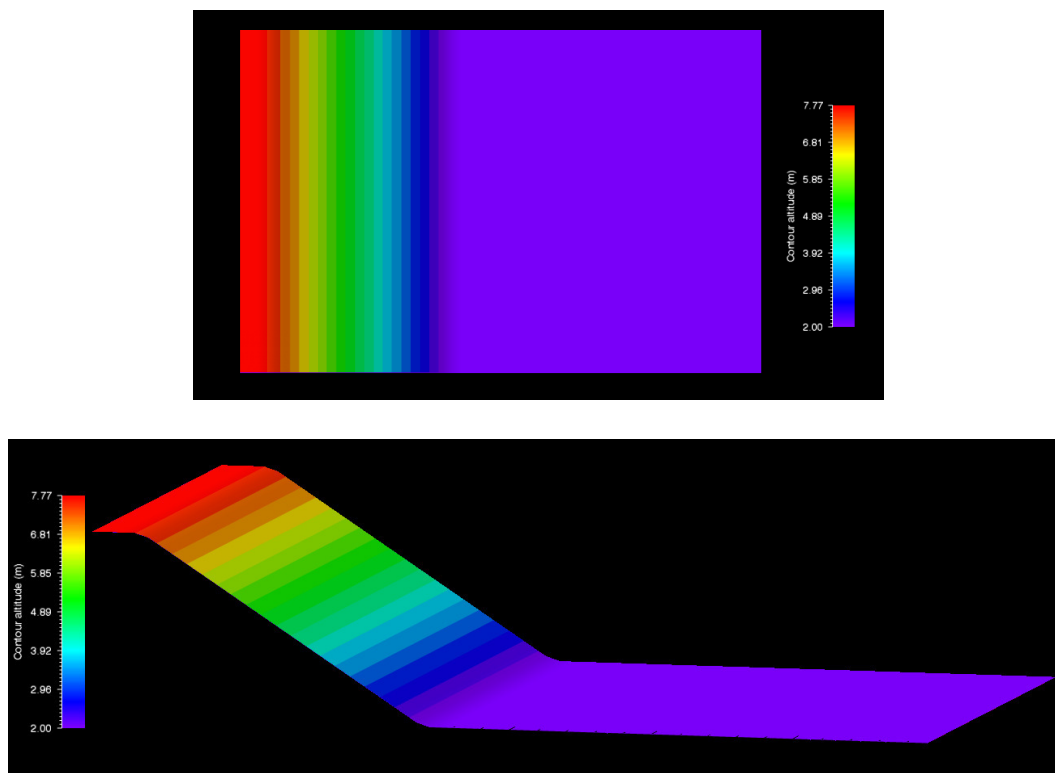


Figura 3.20 – Superfície inserida no RAMMS

3.2.3 Geometria do talude – 2D e 3D

A série de experimentos numéricos foi conduzida em superfícies planas sem rugosidade com inclinação de 30° , no caso bidimensional (Figura 3.21), e 30° e 50° nos casos tridimensionais (Figuras 3.22 e 3.23). A geometria da encosta do caso bidimensional é idêntica à geometria utilizada nas simulações com o MPM. A seguir são apresentadas as dimensões de cada modelo usado. A barra de cor em cada um dos modelos expressa a altitude daquele ponto.

As mesmas geometrias utilizadas nos casos tridimensionais no RAMMS foram reproduzidas no MPM para as duas inclinações consideradas. No MPM, em alguns casos, algumas dimensões foram reduzidas para otimizar o tempo computacional.

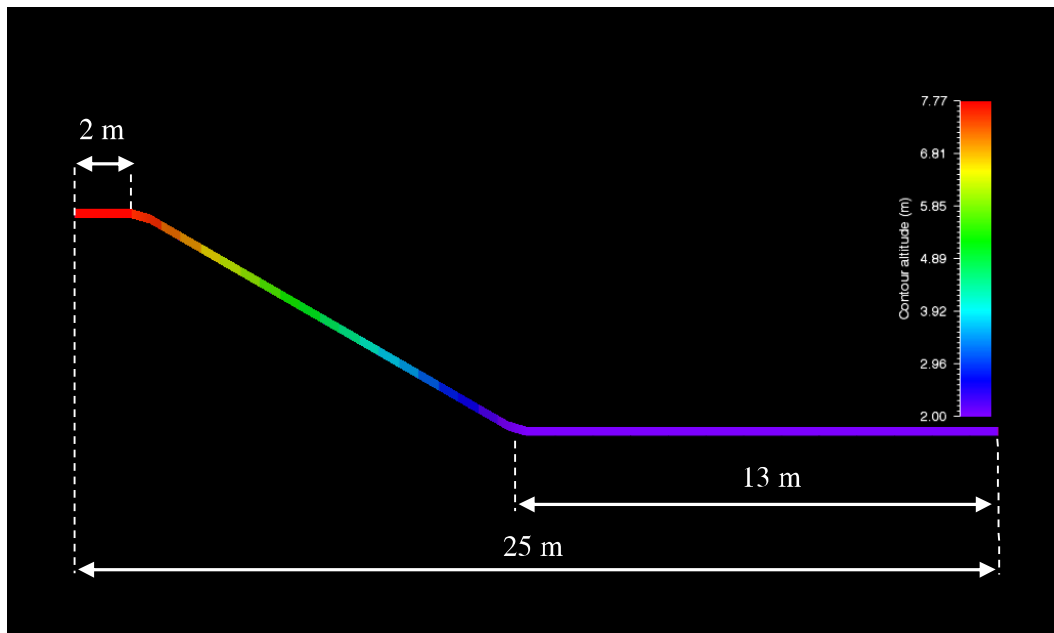


Figura 3.21 – Geometria do caso bidimensional - RAMMS

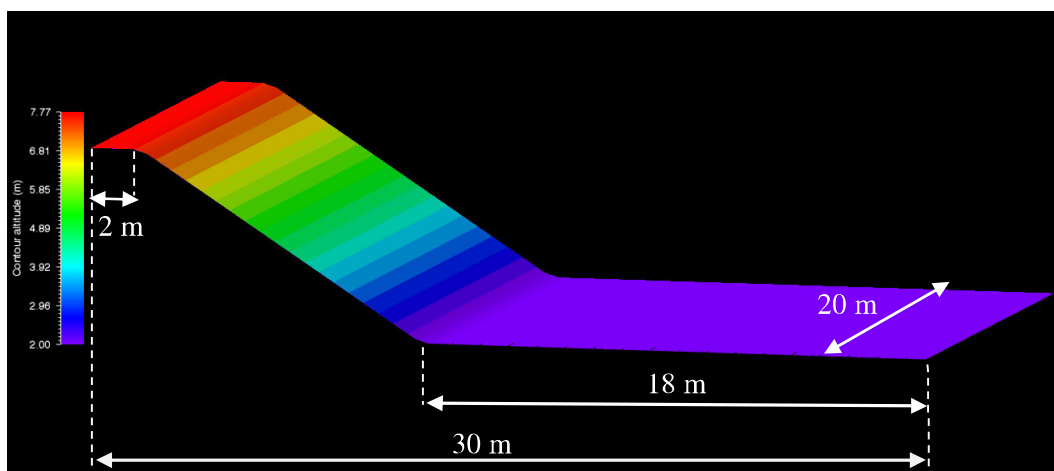


Figura 3.22 – Geometria do caso tridimensional com inclinação de 30° - RAMMS

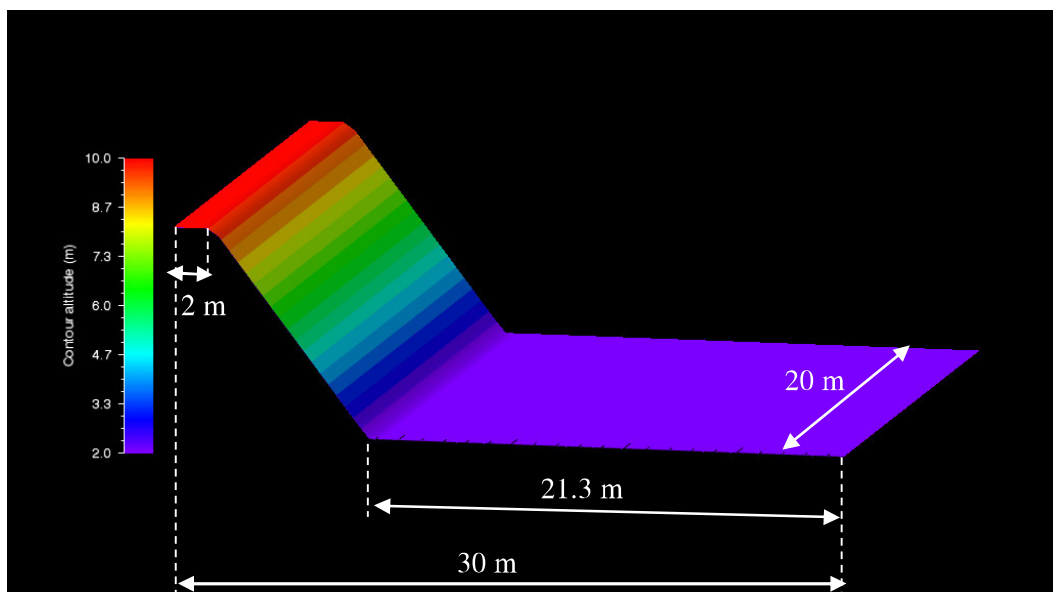


Figura 3.23 – Geometria do caso tridimensional com inclinação de 50° - RAMMS

3.2.4

Material do terreno

Para as simulações no MPM-PUCRio foram utilizados materiais elastoplásticos de Mohr-Coulomb. Entretanto, o RAMMS::Rockfall possui oito categorias de terreno predefinidas: *Extra Soft*; *Soft*; *Medium Soft*; *Medium*; *Medium Hard*; *Hard*; *Extra Hard*; *Snow*. Cada uma dessas categorias possui parâmetros próprios do software que as define.

O manual do RAMMS apresenta para cada categoria de terreno uma descrição de suas características e um exemplo do tipo de solo ou dos tipos de solos que aquela categoria abrange. Dessa forma, tem-se:

Extra Soft – terreno encharcado; não é possível a travessia sem afundar; sem vegetação alta. Exemplos: pântano; turfa; gleissolo.

Soft – solo macio, profundo e com muitas camadas; não contém grandes fragmentos de rocha; muitas vezes úmido; áreas de inundação permanentes e visíveis; camada de solo úmida e profunda. Exemplos: prados úmidos.

Medium Soft – as rochas penetram na superfície deixando cicatrizes do impacto; o solo é profundo e com poucos fragmentos de rochas; vegetação rasteira. Exemplos: prados.

Medium – prados profundos, porém contém fragmentos de rocha; pode ser coberto com vegetação; solo de profundidade média; vegetação rasteira. Exemplos: prados.

Medium hard – pequena profundidade de penetração; terreno liso; detritos de rocha presentes; camada de solo rasa; pouca vegetação normalmente. Exemplos: estradas de montanha não pavimentadas; prados montanhosos; seixos.

Hard – as rochas saltam sobre o terreno; mistura de grandes e pequenos fragmentos de rocha; geralmente sem nenhuma vegetação. Exemplos: tálus; seixos; estradas pavimentadas.

Extra Hard – o terreno é muito duro e infimamente deformável pelas rochas; sem vegetação e sem solo superficial. Exemplos: taludes rochosos; penhascos.

Snow – as rochas deslizam sobre a superfície coberta com neve – Exemplo: Neve.

Nas simulações para a comparação, foram considerados somente as categorias de solo *medium soft*, *medium*, *medium hard*, *hard* e *extra hard*. Seguindo a descrição de cada categoria e seus exemplos, foram escolhidos parâmetros elastoplásticos de Mohr-Coulomb que pudessem melhor representar aquele tipo de terreno.

As categorias *medium soft*, *medium* e *medium hard* podem ser usadas para representar prados. Geograficamente, prados ou pradarias - também chamado de estepes em locais de clima semiárido, longe da influência marinha e com vegetação mais esparsa - são domínios morfoclimáticos que apresentam solos particularmente profundos, escuros e férteis com vegetação composta por gramíneas. Esse tipo de solo ocorre no meio-oeste dos EUA, Mongólia, norte da China, Cazaquistão, sul e sudoeste da Rússia, sul do Brasil, Argentina, Uruguai e leste europeu [83-85].

No Brasil, esse domínio compreende a chamada região dos pampas, onde, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos [86] ocorrem chernossolos e vertissolos. Seguindo a correlação Geo-pedológica sugerida por Antunes et al. (2013) [87], chernossolos são solos residuais não saturados onde predominam argilominerais do tipo 2:1 nas frações finas e vertissolos são solos expansivos de origem sedimentar ou residual. Como os vertissolos ocorrem em relevos planos e os chernossolos ocupam relevos forte-ondulados, o significado geotécnico deste foi utilizado para considerar parâmetros elastoplásticos de Mohr-Coulomb que representem os prados.

Os parâmetros utilizados para as simulações com o MPM-PUCRio são oriundos de uma compilação de dados encontrados sobre solos residuais [88]. Portanto foram comparados alguns casos já estudados com os resultados obtidos do RAMMS. Para os demais, casos foram considerados parâmetros encontrados na literatura para diversos tipos de materiais que poderiam se encaixar em cada uma das categorias.

Na categoria *medium hard* também estão incluídas as estradas de terra não pavimentadas. Para representar esse tipo de terreno, foram utilizados parâmetros de resistência de solos lateríticos, usualmente utilizados como camadas de pavimentação, considerando módulos de elasticidade de solos compactados.

Para representar a categoria *hard*, foram utilizados parâmetros de uma rocha alterada, mais precisamente de um filito. O maciço, segundo a classificação do ISRM (1981) [89], possui grau R2 de resistência e W4 de alterabilidade, sendo, dessa forma, considerado fraco e extremamente alterado (saprolito), ou seja, um maciço de baixa qualidade geomecânica. Para a categoria *extra hard*, que engloba taludes rochosos e penhascos, foram utilizados parâmetros de um maciço rochoso de monzonito pouco fraturado.

A Tabela 3.7 apresenta os parâmetros utilizados em cada uma das categorias, conforme alguns exemplos encontrados na literatura.

Tabela 3.7 – Parâmetros utilizados para cada categoria de terreno

Categoria	Descrição	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	Local	Referência
<i>Medium Soft</i>	Solo residual de granito	1800	20	0.3	13.6	30	São Paulo, São Paulo	Pinto <i>et al.</i> , 1993 [92]
<i>Medium</i>	Solo residual de gnaiss	1800	70	0.3	53	26.8	São Paulo, São Paulo	ABEF, 1989 [93]
<i>Medium hard</i>	Solo laterítico compactado	2000 ¹	455 ¹	0.3 ¹	112 ²	34 ²	Brasília, Distrito Federal	Assis <i>et al.</i> , 2018 ¹ [94]; Martins, 2016 ² [95]
<i>Hard</i>	Filito alterado	2000 ¹	1000 ²	0.25 ¹	159 ¹	33.7 ¹	Santa Bárbara, Minas Gerais	Lopes <i>et al.</i> , 2007 ¹ [96]; Guerra, 2011 ² [97]
<i>Extra Hard</i>	Monzonito	2600	1740	0.25	980	41.9	Cusco, Peru	Cervantes, 2011 [98]

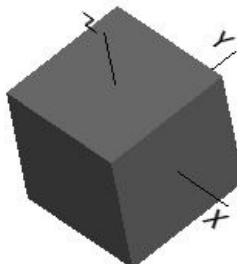
3.2.5 Dados dos blocos

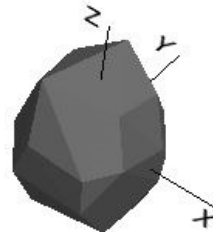
O RAMMS permite a modelagem de blocos com os mais diversos formatos. Uma simulação tridimensional de queda de rochas permite verificar a influência da geometria da rocha na distância percorrida, nas alturas de salto e na dispersão lateral da trajetória.

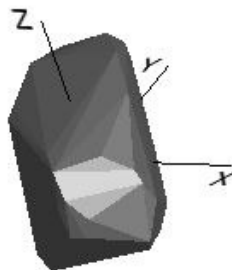
Nas simulações bidimensionais, o bloco possui a geometria de um quadrado com dimensões de 1,0m x 1,0m, massa específica $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, velocidade inicial $v_i = -20 \text{ m/s}$, massa $m = 675 \text{ kg}$, e posição inicial $u_{x0} = 5 \text{ m}$ e $u_{z0} = 8 \text{ m}$. Ou seja, foi reproduzido no RAMMS exatamente o modelo já estabelecido no MPM.

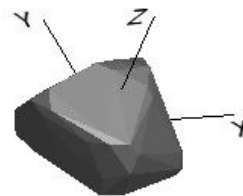
Nos casos tridimensionais, os blocos foram representados por poliedros convexos com geometria próxima de blocos reais e um bloco perfeitamente cúbico. A tabela a seguir apresenta a geometria de cada bloco e os parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 3.8 – Propriedades dos blocos

Cubóide		
Massa específica (kg/m³)	2700	
Volume (m³)	1.0	
Massa (kg)	2700	
Dimensões (x,y,z) (m)	1.0/1.0/1.0	

Equant		
Massa específica (kg/m³)	2700	
Volume (m³)	0.6	
Massa (kg)	1618.7	
Dimensões (x,y,z) (m)	1,0/1.0/1.0	

Elongat		
Massa específica (kg/m³)	2700	
Volume (m³)	0.6	
Massa (kg)	1616.2	
Dimensões (x,y,z) (m)	1.10/1.41/0.95	

Flat		
Massa específica (kg/m³)	2700	
Volume (m³)	0.6	
Massa (kg)	1628.5	
Dimensões (x,y,z) (m)	1.35/1.12/0.85	

Os blocos partem da posição inicial com velocidade inicial constante $v_i = 10\text{m/s}$, sujeitos a um campo de aceleração gravitacional $g = -9.8\text{m/s}^2$ e velocidade angular nula. A posição inicial dos blocos muda de acordo com a topografia, conforme apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Posição inicial do centroide dos blocos

Inclinação (°)	Posição inicial (m)		
	u_{x0}	u_{y0}	u_{z0}
30	5	10	8
50	4	10	10

Inicialmente, foi considerada apenas uma trajetória, a fim de que a orientação do bloco no RAMMS e no simulador MPM-PUCRio sejam idênticas. Em seguida, a orientação de liberação do bloco de rocha foi alterada. As orientações foram criadas de maneira estocástica no próprio software, gerando 10 trajetórias para cada formato, nas diferentes categorias de solo e para as topografias definidas. Dessa forma, a deposição dispersiva dos blocos gerada pela variação da orientação de liberação pode ser considerada nos estudos comparativos. A Figura 3.24 esquematiza o programa de simulações. No total, para as simulações tridimensionais foram geradas 440 trajetórias.

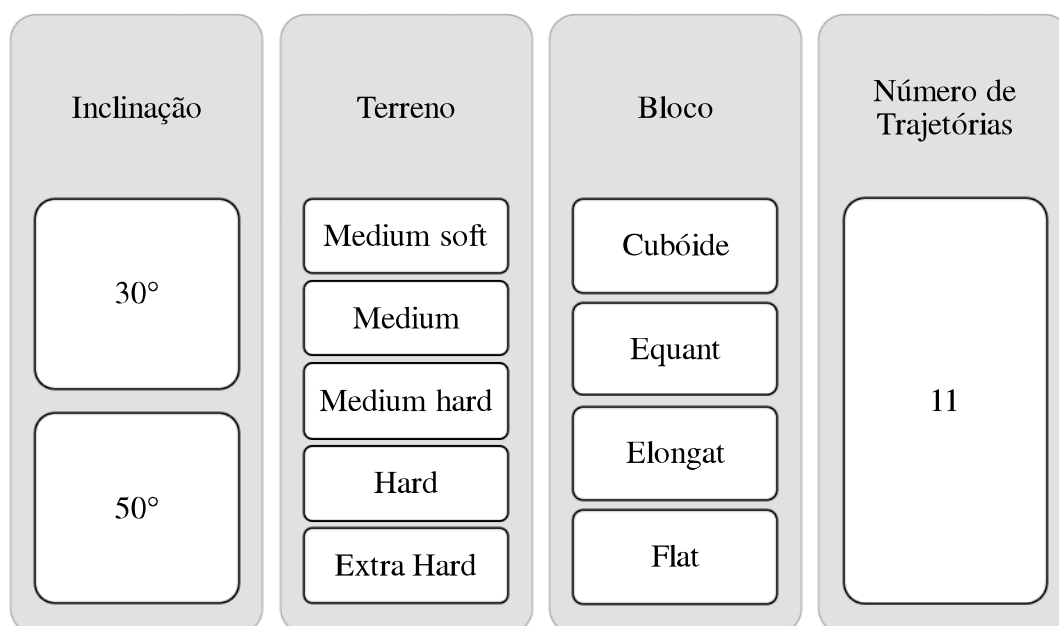


Figura 3.24 – Programa de simulações RAMMS

3.2.6

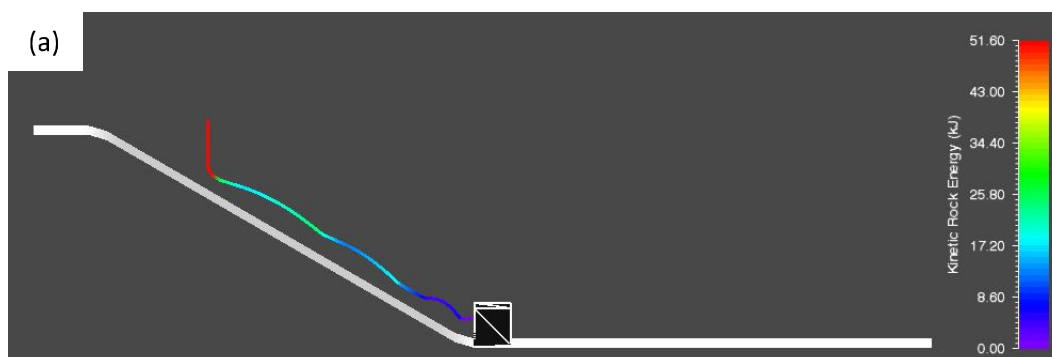
Condições de contorno para o modelo MPM – 3D

No modelo bidimensional, utilizado até então nas análises paramétricas, como se tratava de um estado de deformação plana, foram consideradas para a etapa elastoplástica condições de contorno fixas na direção perpendicular e livre na direção tangencial ao plano, considerando-se, dessa forma, um talude infinito. No modelo tridimensional, os planos y_0 (que passa pela origem ou pelo menor valor definido como limite da malha Euleriana e tem sua direção normal contrária ao eixo y) e y_n possuem condições de contorno fixas.

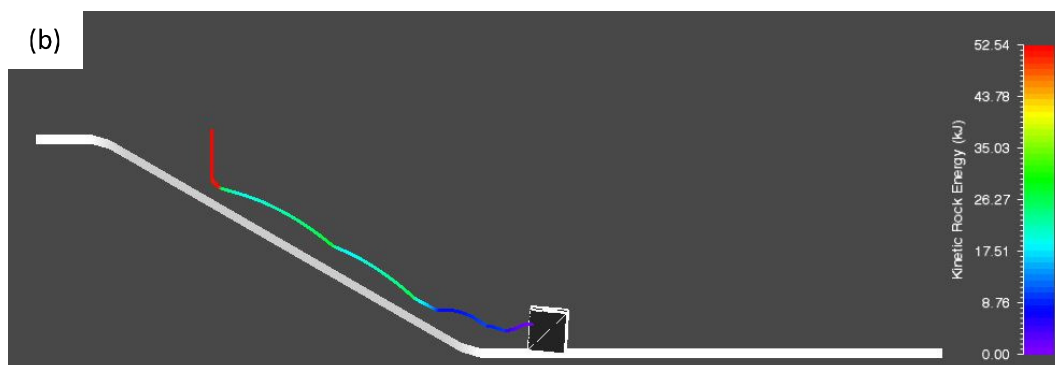
3.2.7

Resultado das comparações entre o RAMMS e MPM-PUCRio -2D

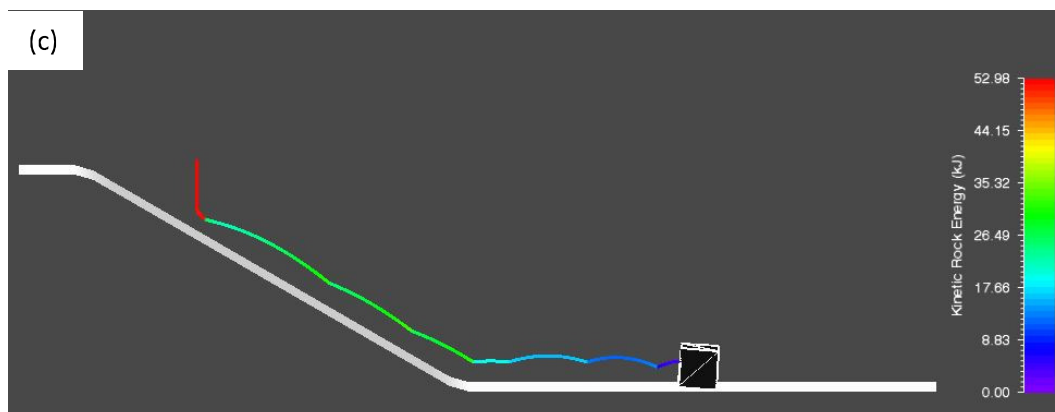
Inicialmente, foram comparados modelos 2D utilizando blocos de geometria quadrada. Foi inserido no RAMMS um modelo digital de elevação com geometria idêntica à que fora utilizada para as análises paramétricas do simulador MPM-PUCRio (Figura 3.1). Foram realizadas simulações idênticas para cada uma das categorias de solo. Em todos os casos, a inclinação do talude é de $\theta=30^\circ$. Os blocos são lançados orientações aleatórias. A Figura 3.25 apresenta a trajetória para cada uma das simulações.



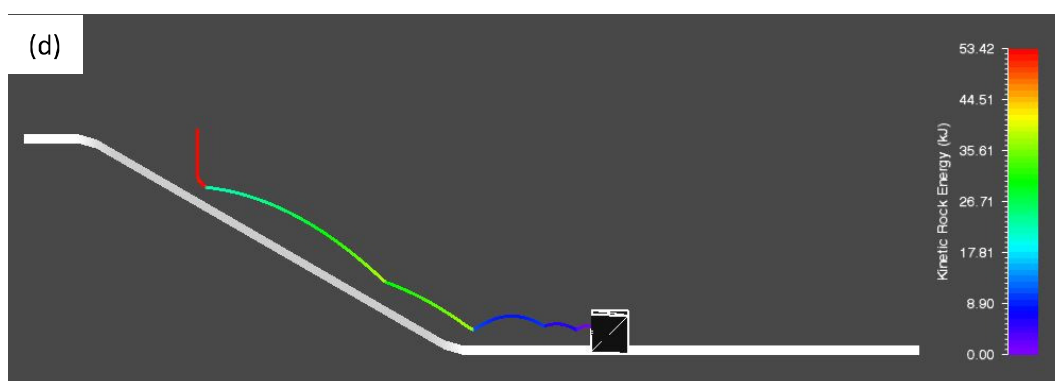
Medium Soft



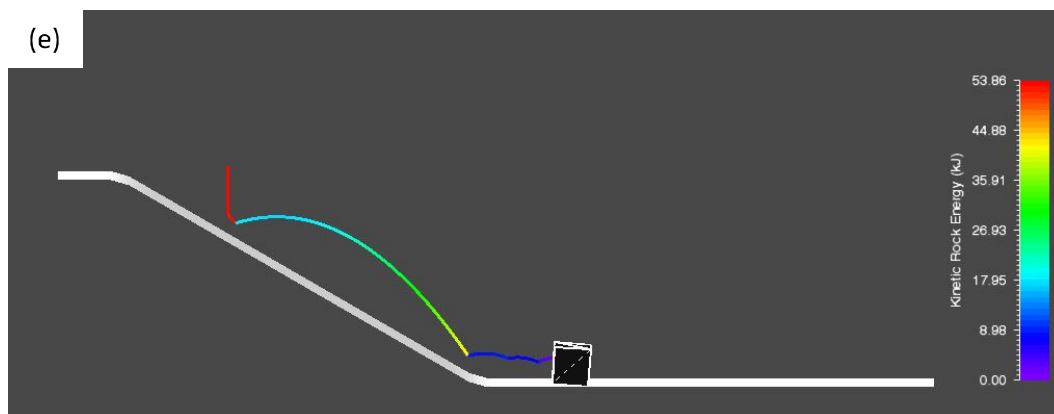
Medium



Medium hard



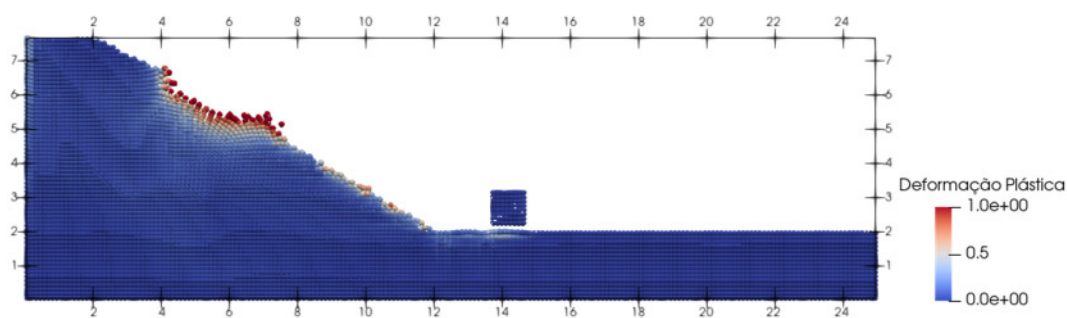
Hard



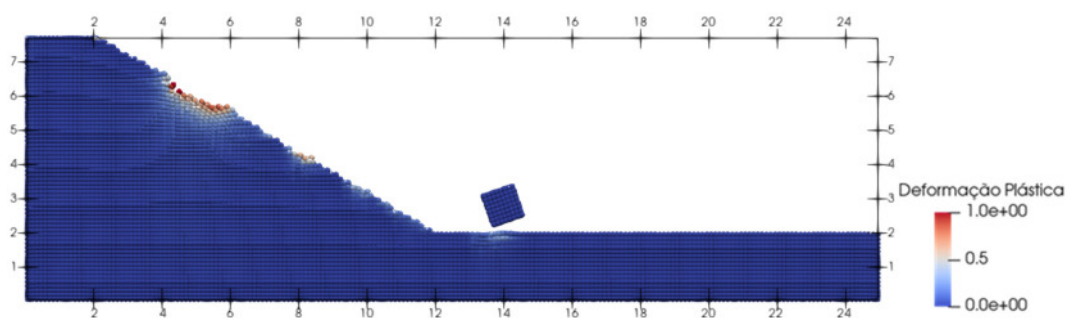
Extra Hard

Figura 3.25 – Trajetórias dos blocos para as categorias do RAMMS.

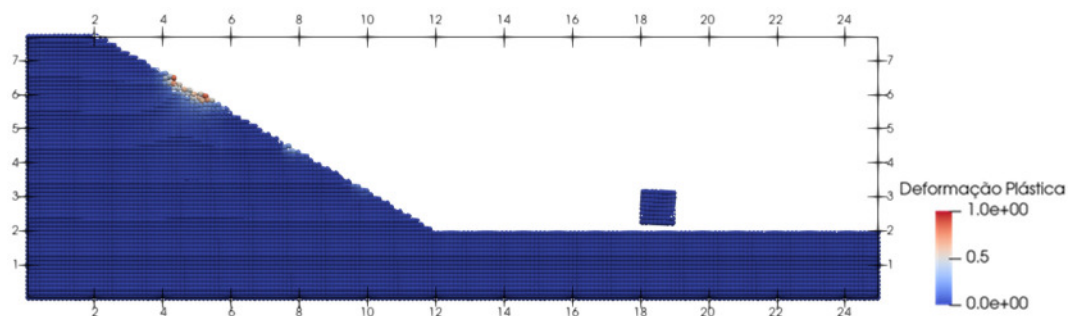
Do mesmo modo, para cada um dos tipos de materiais escolhidos para representar as cinco categorias de terrenos estudadas, foram obtidas as seguintes configurações finais, através do método do ponto material (Figura 3.26):



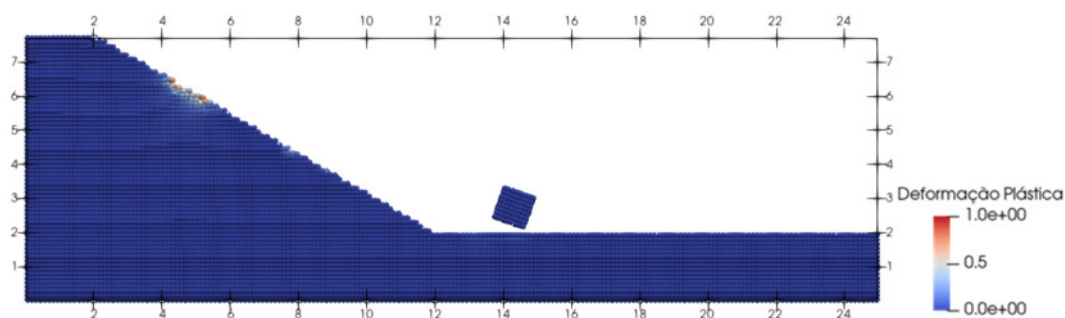
(a) Solo residual de granito



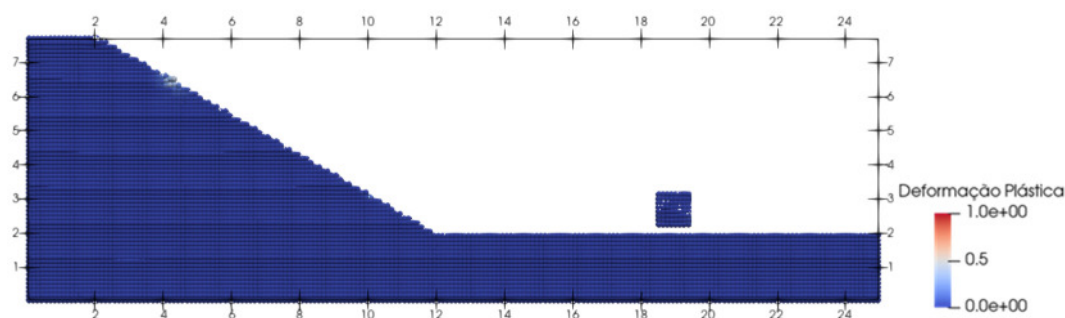
(b) Solo residual de gnaiss



(c) Solo laterítico compactado



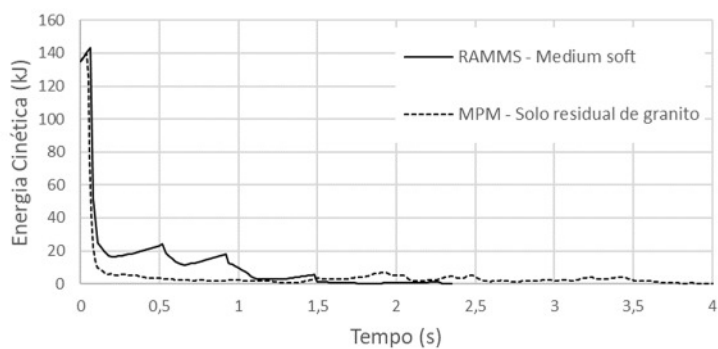
(d) Filito Alterado



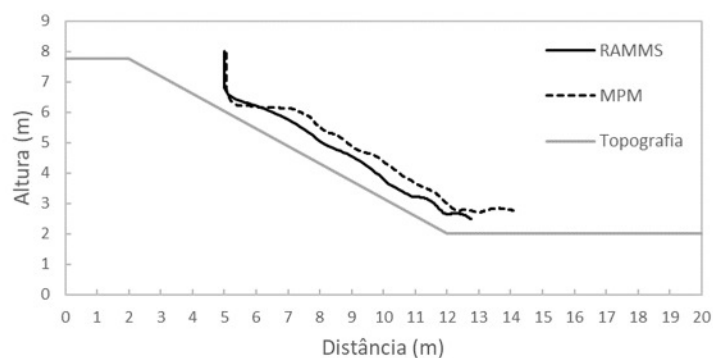
(e) Monzonito

Figura 3.26 – Posição final dos blocos para cada material escolhido - MPM

Nas Figuras 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31 são apresentadas a comparação entre as curvas de energia cinética dos blocos obtidas através do RAMMS e do MPM, assim como a trajetória descrita pela rocha durante o movimento de queda para as cinco categorias de material do terreno consideradas nas análises.

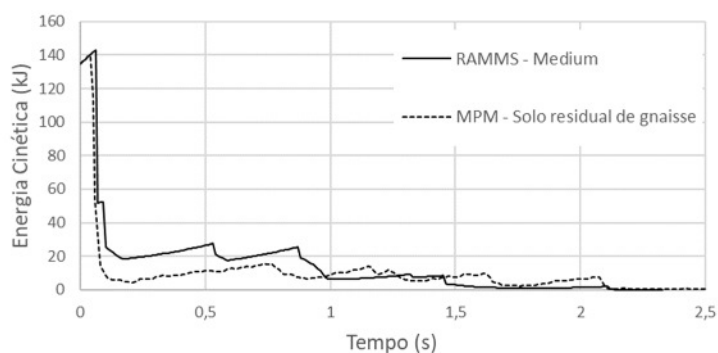


(a)

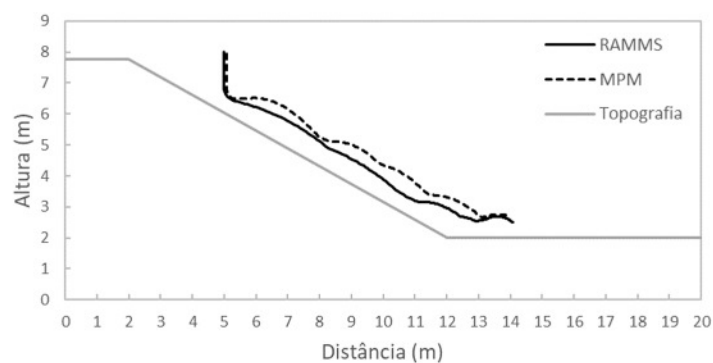


(b)

Figura 3.27: Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: *Medium Soft* – 30°

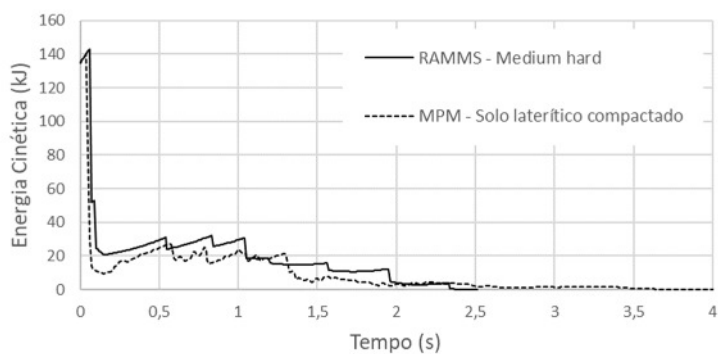


(a)

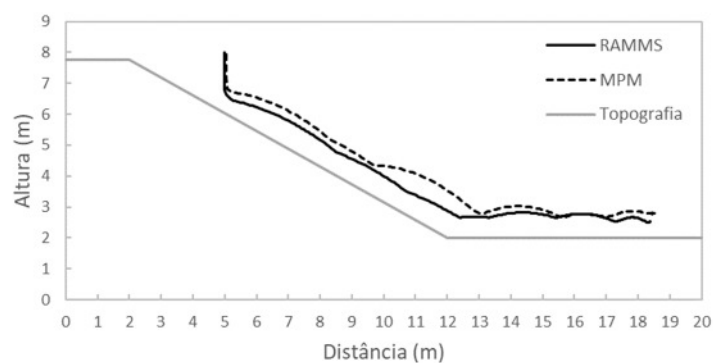


(b)

Figura 3.28: Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: *Medium* – 30°

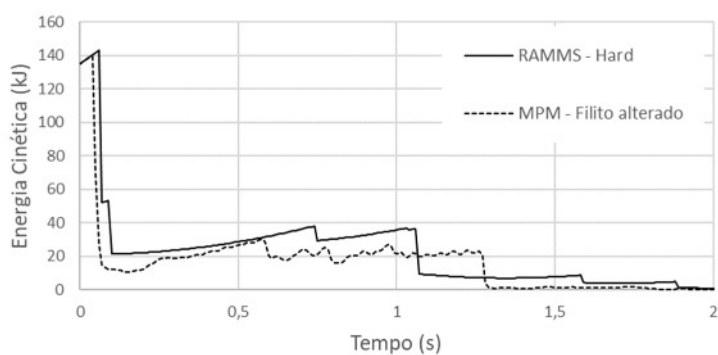


(a)

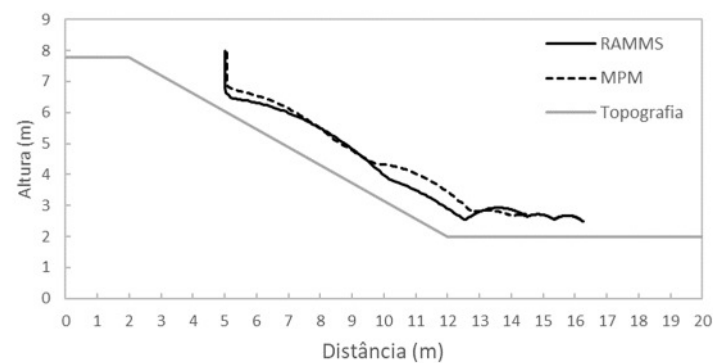


(b)

Figura 3.29: Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: Medium Hard – 30°



(a)



(b)

Figura 3.30: Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: Hard – 30°

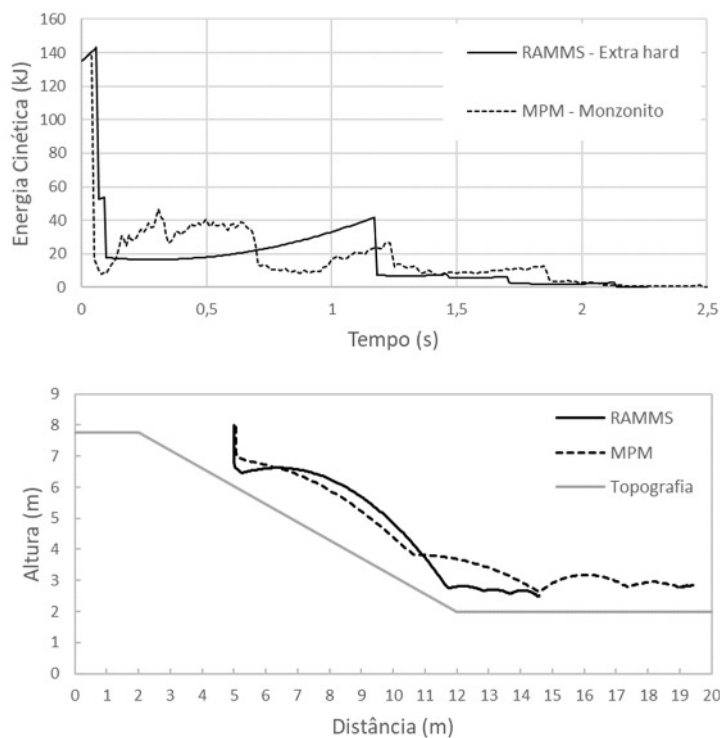


Figura 3.31: Comparação entre as curvas de energia cinética (a) e as trajetórias (b) RAMMS x MPM (b) – 2D – Categoria: Extra Hard – 30°

Das comparações entre as trajetórias e as curvas de energia para os dois métodos, verifica-se que os parâmetros elastoplásticos escolhidos para representar no MPM cada uma das categorias de material do terreno (*Medium Soft*, *Medium*, etc) consegue exprimir, em geral, de maneira próxima o comportamento do RAMMS para um estado de deformações planas. Os tipos de movimentos desenvolvidos durante a queda também são representados: nas categorias menos resistentes (*Medium Soft* e *Medium*), os blocos rolam e apresentam pequenos saltos durante a trajetória, conforme o material da superfície se torna mais competente os blocos saltam durante a queda.

3.2.8

Resultado das comparações entre o RAMMS e MPM-PUCRio -3D

Nas simulações tridimensionais com o MPM, foram utilizados os mesmos parâmetros representativos de cada categoria, conforme a Tabela 3.6. As simulações no MPM consideraram o coeficiente de atrito correspondente à categoria representada. Para o módulo de elasticidade do bloco, foi utilizado um valor de $E = 0.1$ GPa para reduzir o tempo de simulação e o módulo de elasticidade do terreno, para valores maiores que o do bloco, foi definido como sendo igual ao do bloco. O material do bloco foi considerado como linear elástico e o material do talude como elastoplástico, tal qual nas simulações bidimensionais.

Conforme o modelo definido no MPM para o lançamento, o bloco impacta o talude sempre na mesma posição e com a face inferior do cubo paralela ao plano horizontal e, conseqüentemente, no mesmo ângulo do talude. No RAMMS, os blocos podem atingir o talude em diferentes ângulos de modo aleatório de acordo com a quantidade de trajetórias definidas na simulação. Essa funcionalidade do RAMMS permite de maneira prática avaliar as diferentes trajetórias que o bloco pode assumir durante o movimento de queda. Por outro lado, no MPM-PUCRio é possível modelar um bloco para atingir o talude exatamente no ângulo desejado.

A seguir, são apresentadas as trajetórias obtidas através do RAMMS e a comparação entre as trajetórias RAMMS e a trajetória do MPM para cada material representativo considerado, levando em conta as topografias adotadas. Os resultados obtidos do RAMMS são divididos em dois cenários: Cenário 1, considerando apenas uma única trajetória na qual o bloco possui a mesma orientação de saída da simulação com o MPM (Figuras 3.32 e 3.38), e Cenário 2, considerando 10 trajetórias aleatórias (Figuras 3.33 a 3.37 e 3.39 a 3.43).

Inicialmente são comparados os resultados obtidos com o RAMMS no cenário de trajetória única, identificadas como RU, com os obtidos através do MPM. Em seguida são apresentados os resultados do RAMMS para diferentes orientações de liberação do bloco. Como no cenário de uma única trajetória não há dispersão na direção do bloco durante a queda e os desvios no MPM são pouco significativos, a comparação entre os métodos foi realizada no plano, possibilitando a avaliação das alturas de salto para cada método.

- Inclinação: 30°

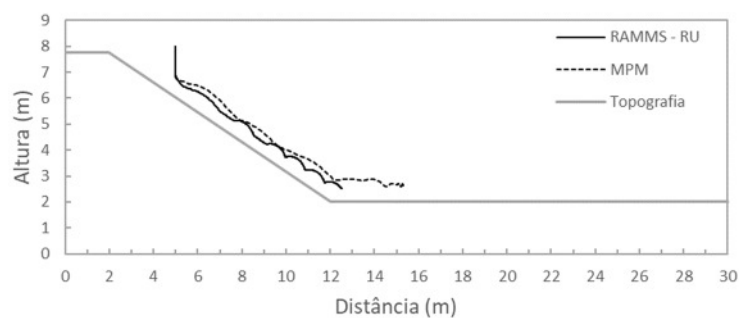
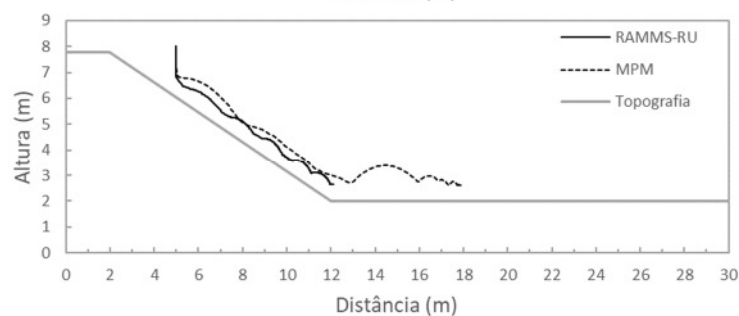
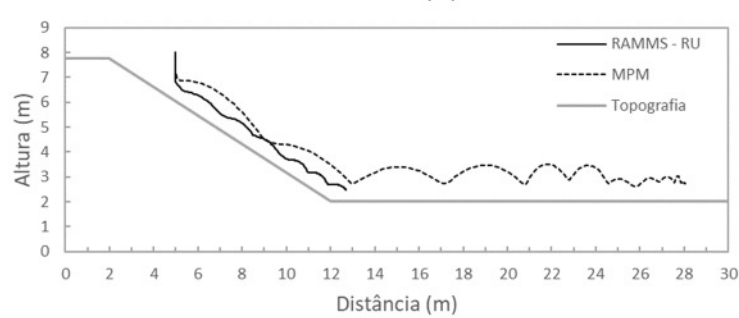
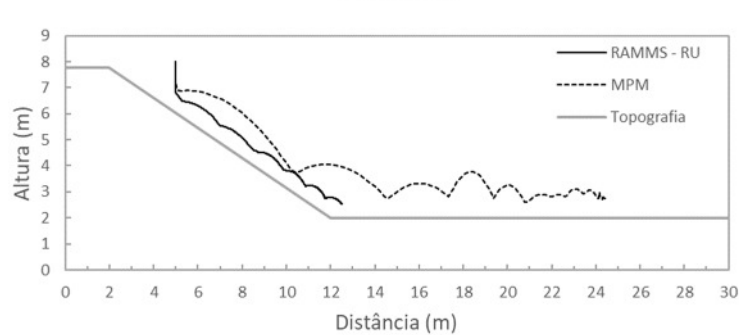
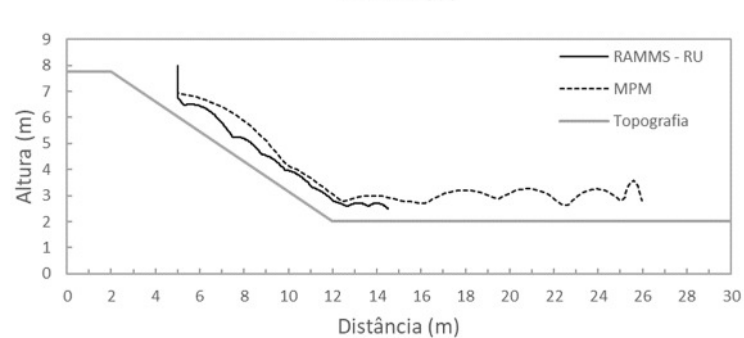
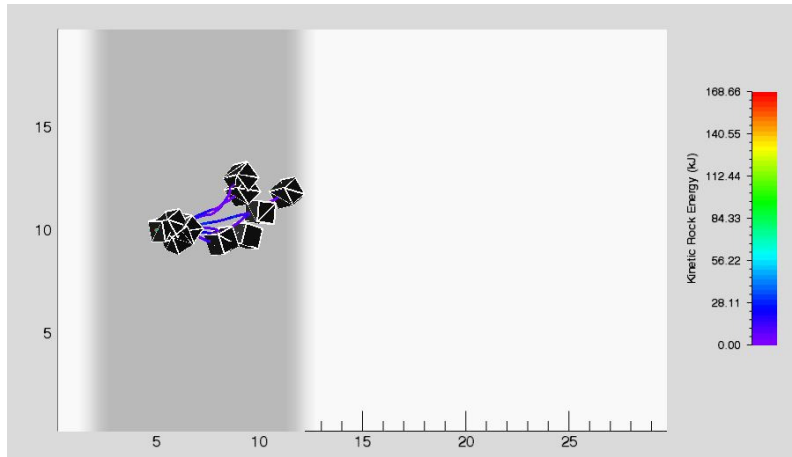
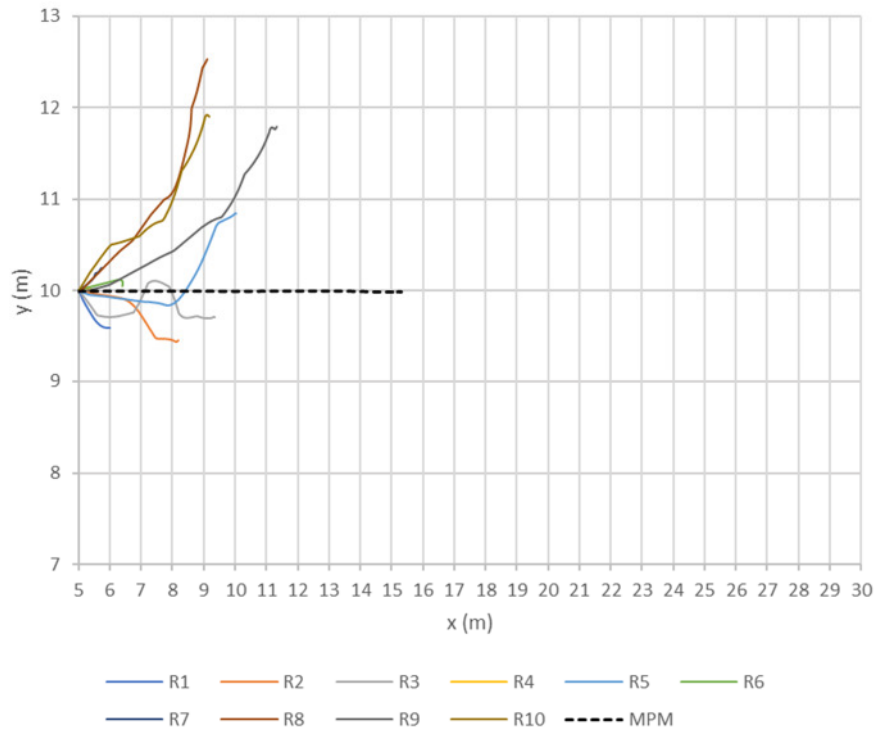
(a) *Medium Soft*(b) *Medium*(c) *Medium Hard*(d) *Hard*(e) *Extra Hard*

Figura 3.32 - Comparação entre a trajetória RAMMS x MPM – 3D – 30° - Cenário 1

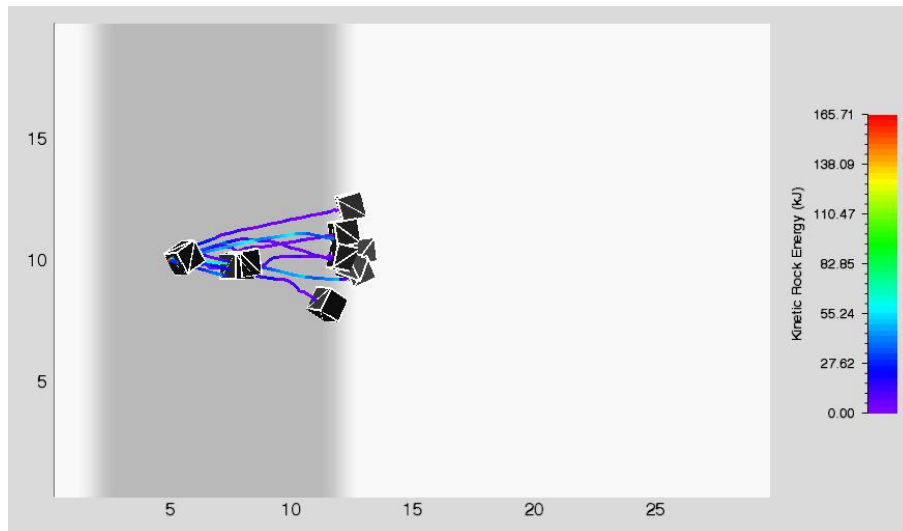


(a)

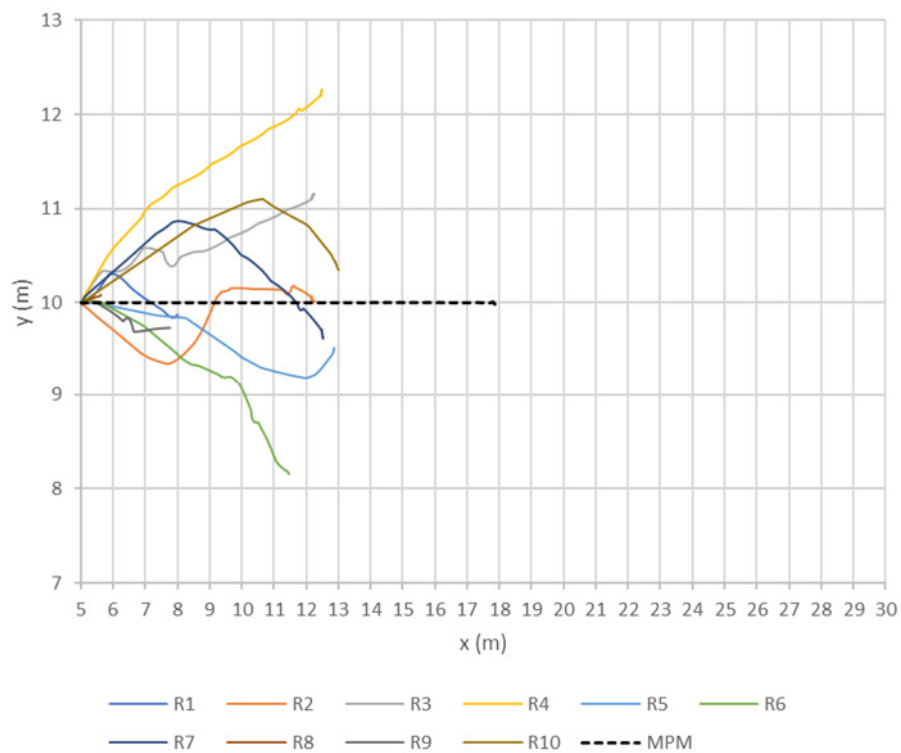


(b)

Figura 3.33: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Medium Soft – 30° - Cenário 2

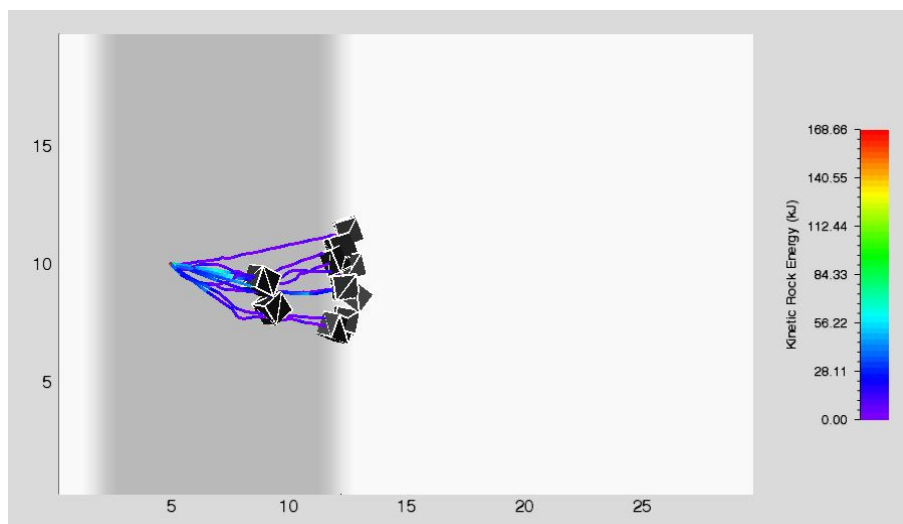


(a)

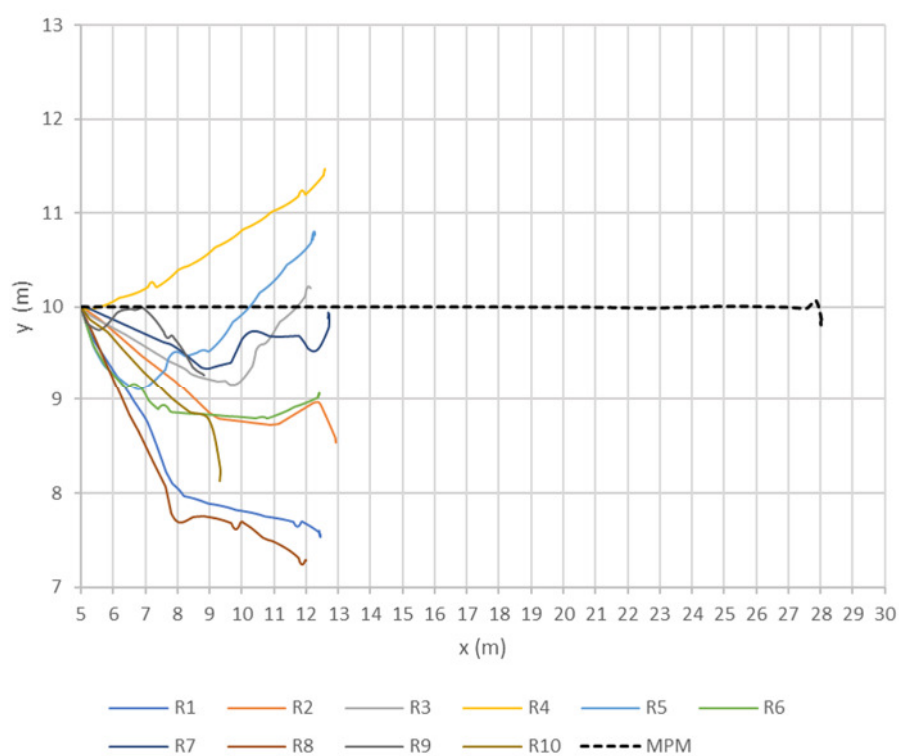


(b)

Figura 3.34: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Medium – 30° - Cenário 2

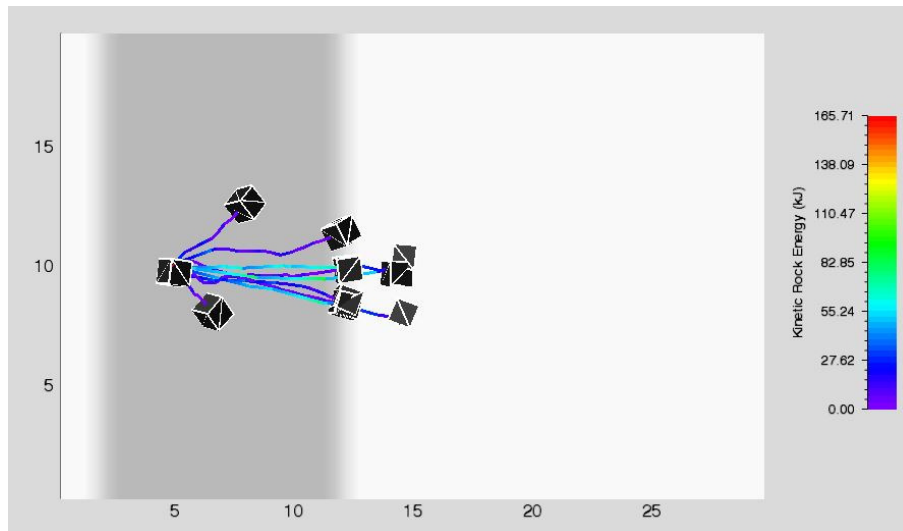


(a)

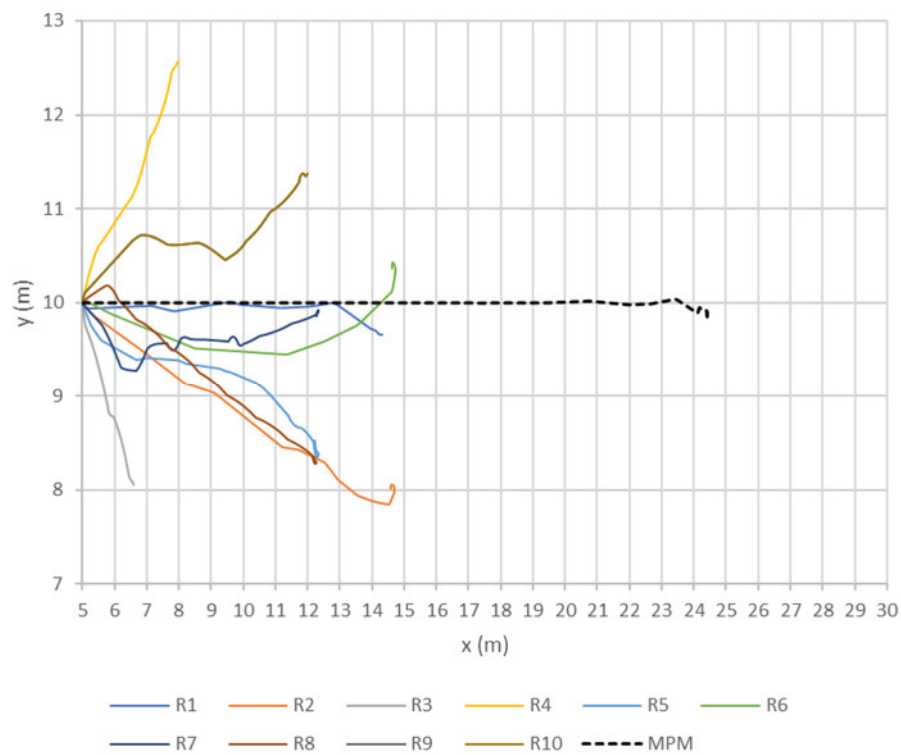


(b)

Figura 3.35: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Medium Hard – 30° - Cenário 2

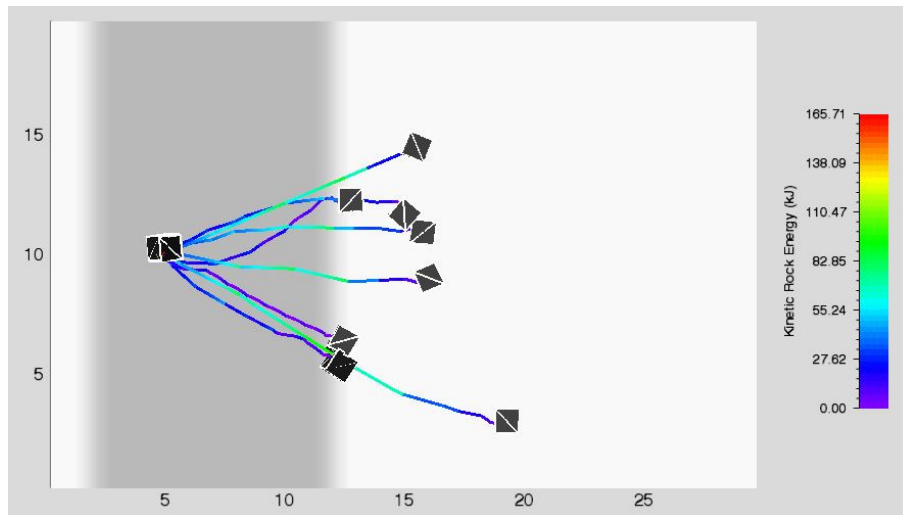


(a)

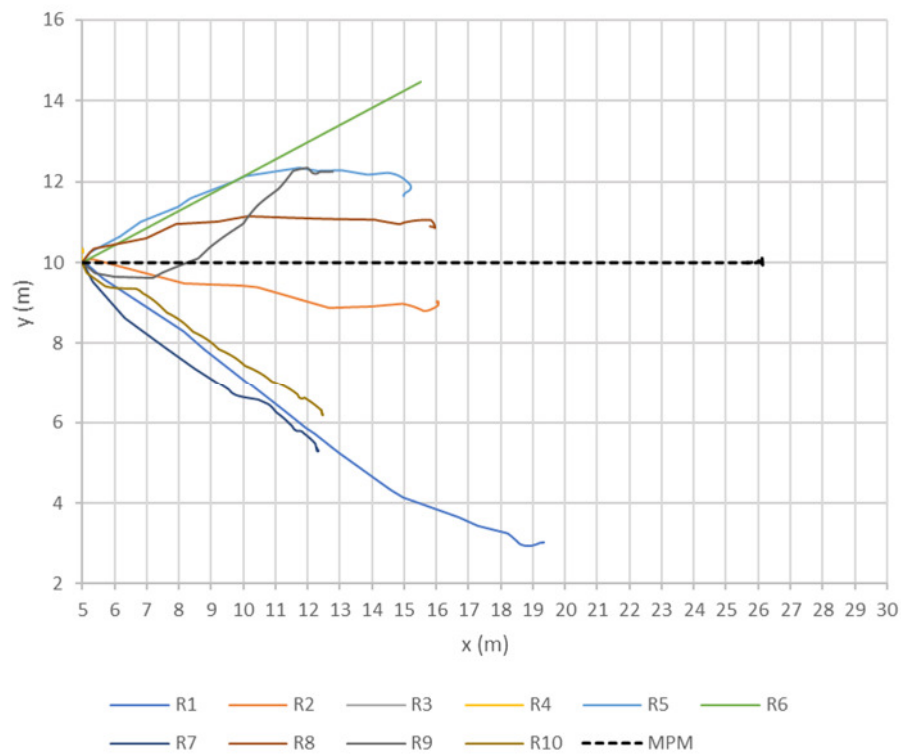


(b)

Figura 3.36: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Hard – 30° - Cenário 2



(a)



(b)

Figura 3.37: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM
(b) – Bloco Cúbico – Categoria: *Extra Hard* – 30° - Cenário 2

- Inclinação: 50°

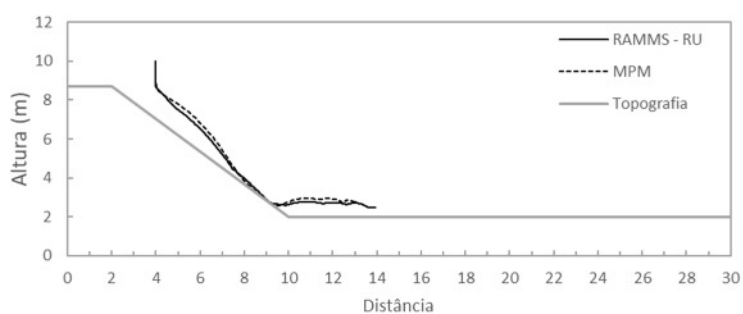
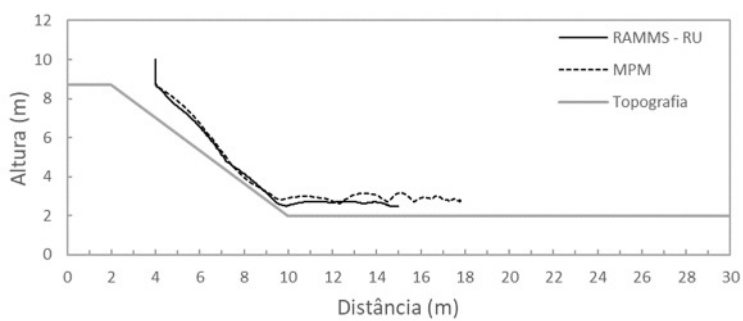
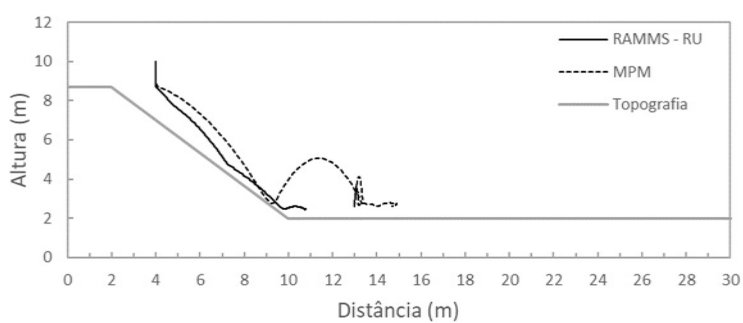
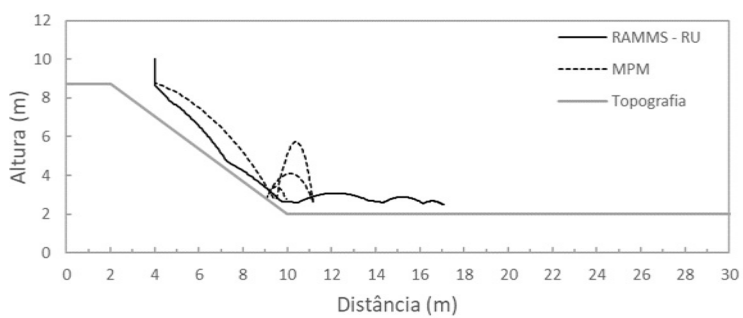
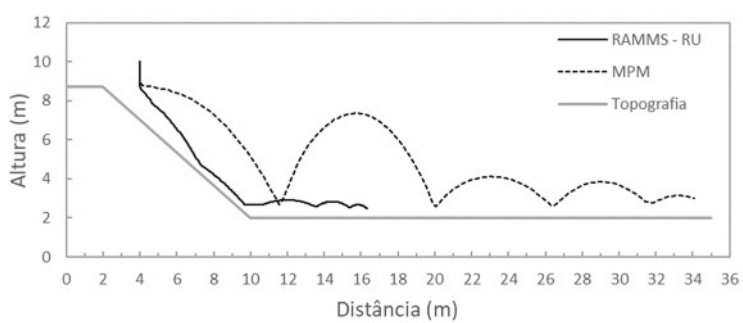
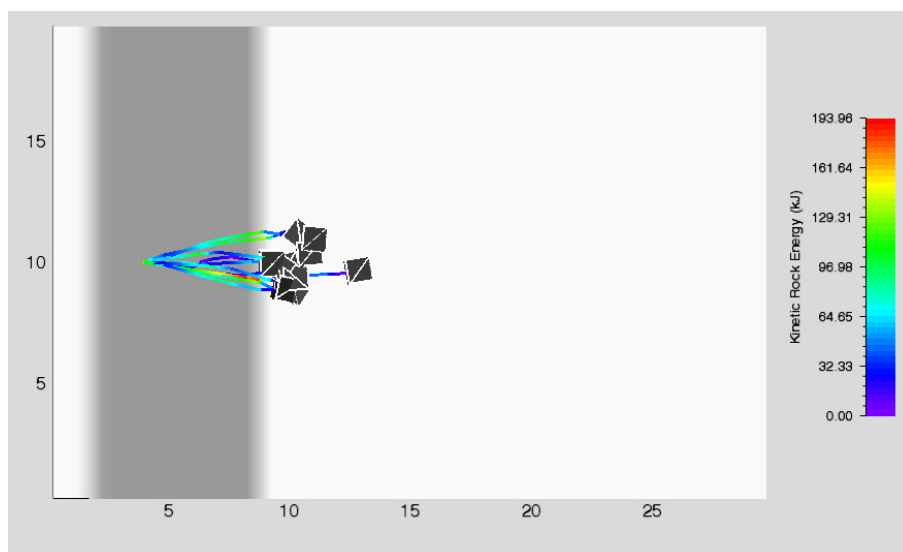
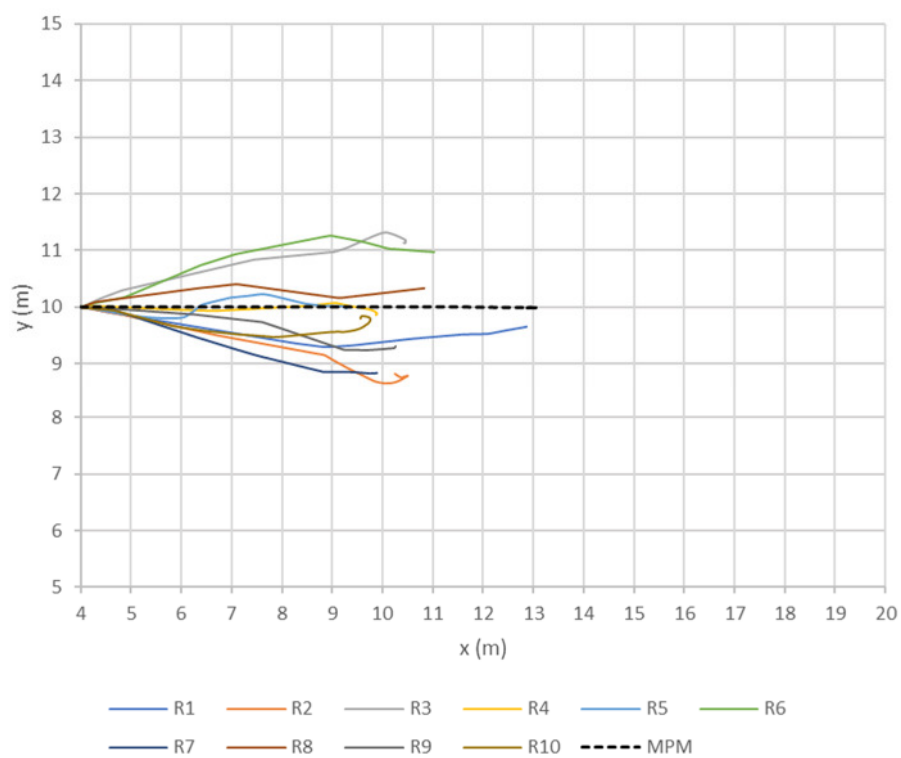
(a) *Medium Soft*(b) *Medium*(c) *Medium Hard*(d) *Hard*(e) *Extra Hard*

Figura 3.38 - Comparação entre a trajetória RAMMS x MPM – 3D – 50°-Cenário 1

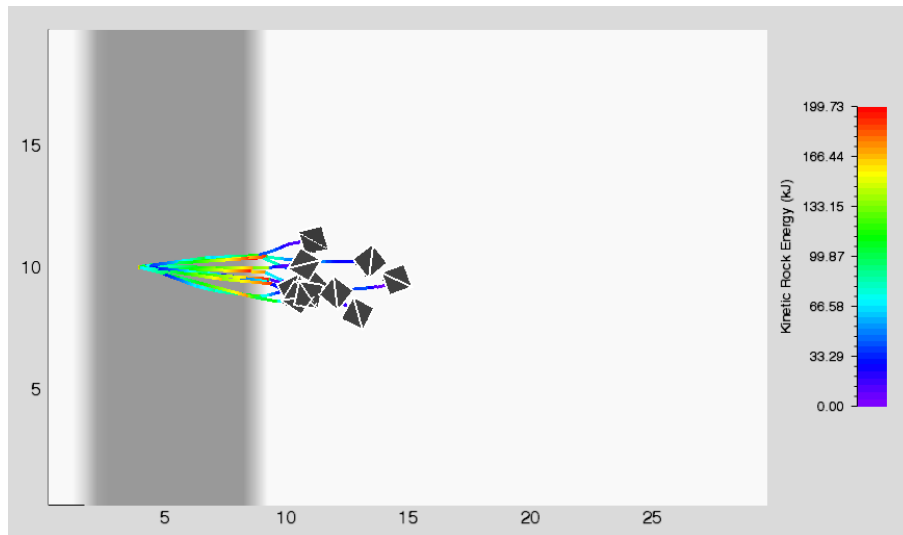


(a)

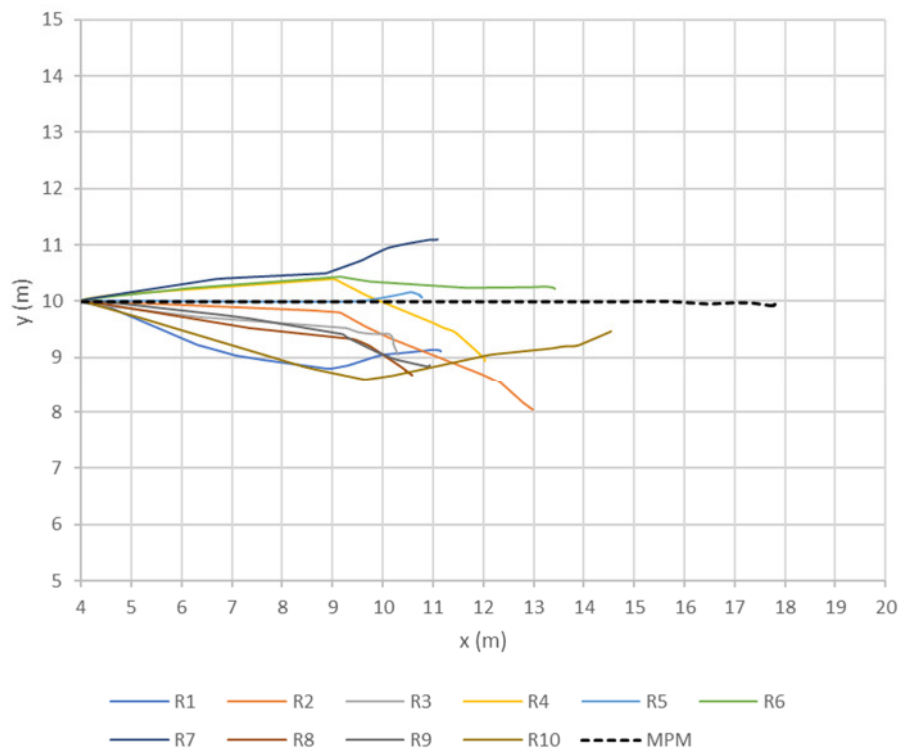


(b)

Figura 3.39: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Medium Soft– 50° Cenário 2

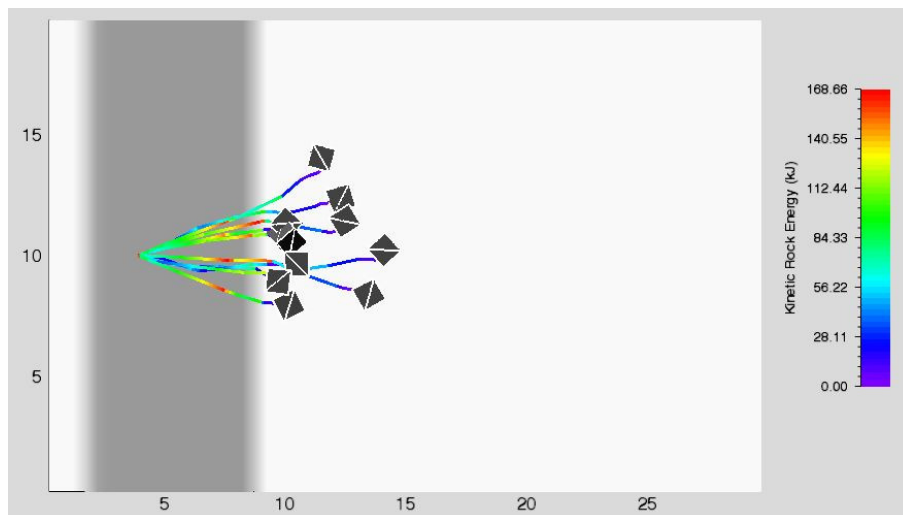


(a)



(b)

Figura 3.40: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Medium – 50° Cenário 2



(a)

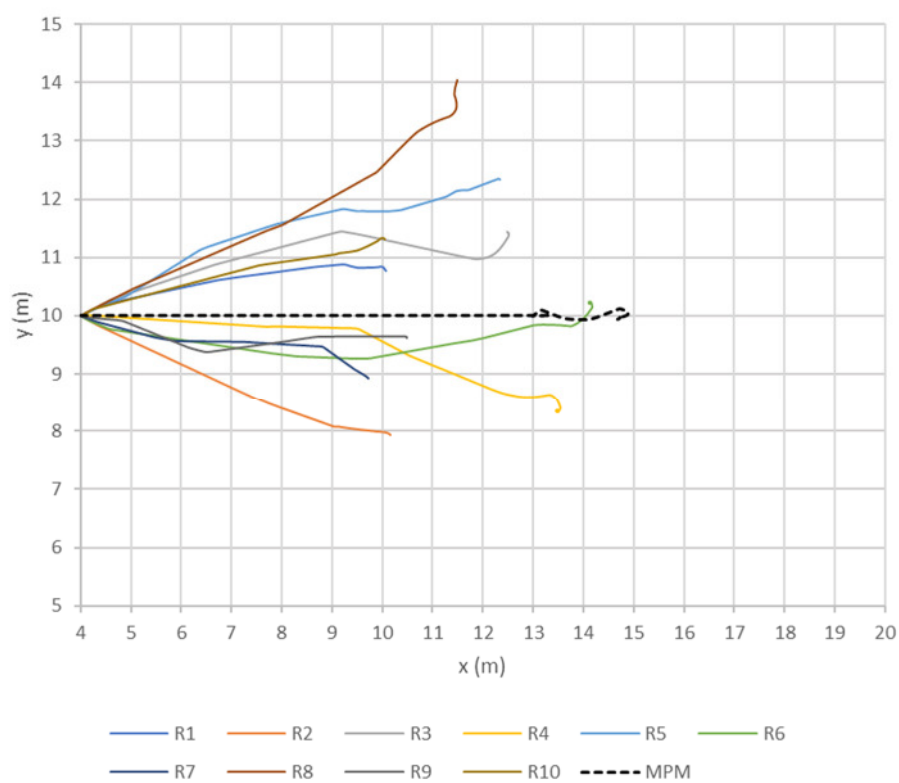
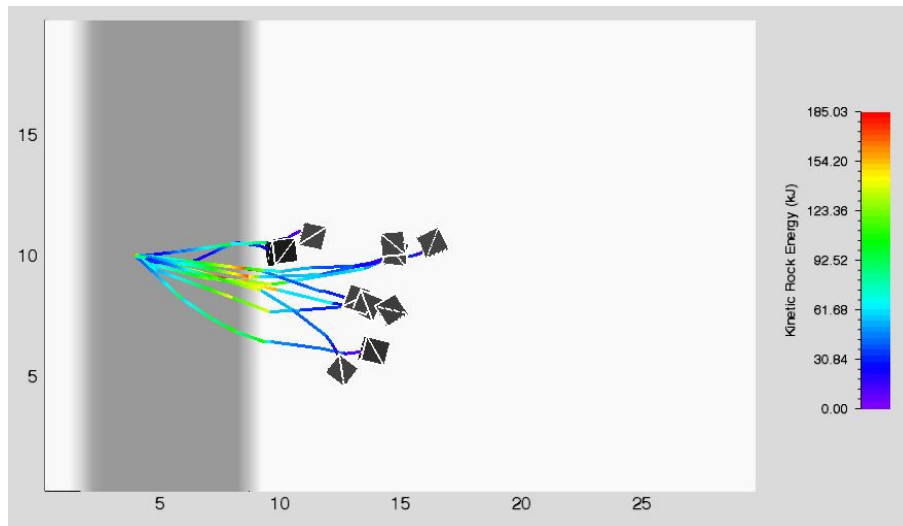
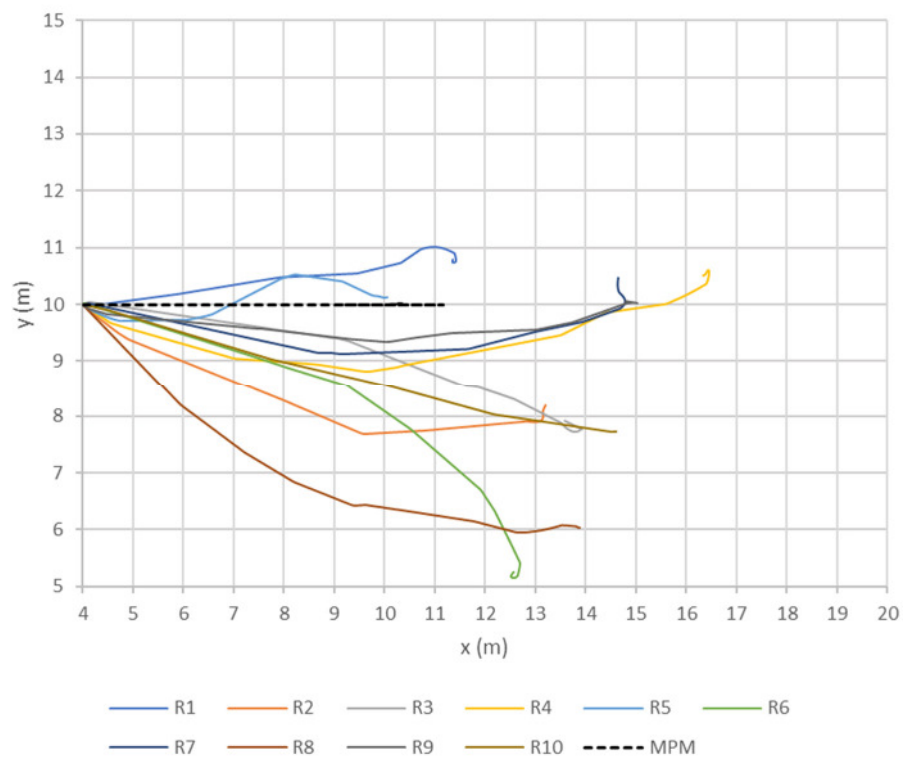


Figura 3.41: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Medium Hard – 50° Cenário 2

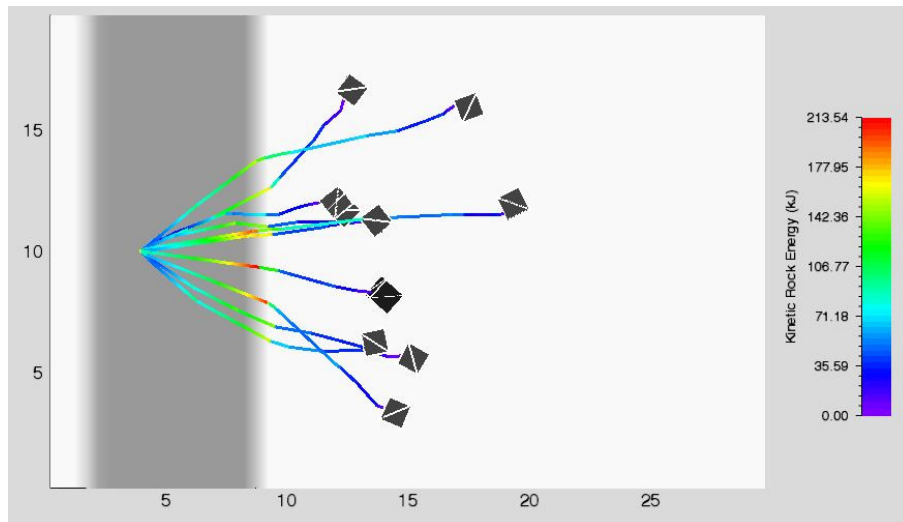


(a)

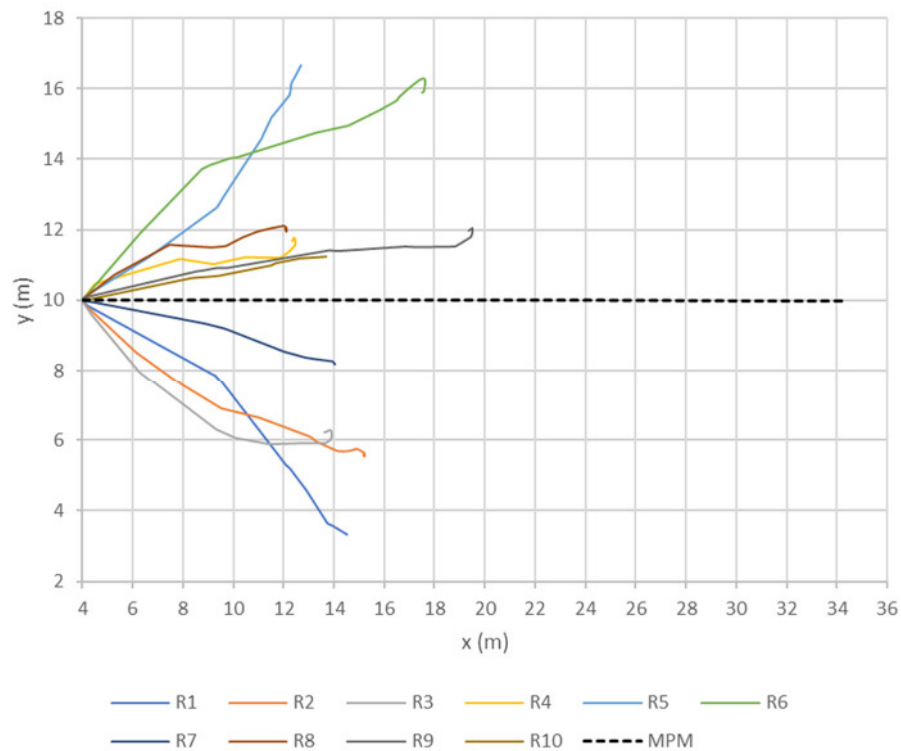


(b)

Figura 3.42: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Hard – 50° - Cenário 2



(a)



(b)

Figura 3.43: Trajetórias RAMMS (a) e Comparação entre as trajetórias RAMMS x MPM (b) – Bloco Cúbico – Categoria: Extra Hard – 50° Cenário 2

Considerando-se o Cenário 1, as trajetórias descritas pelo bloco, segundo os resultados do MPM, apresentam um maior alcance do que os resultados obtidos pelo RAMMS. As trajetórias obtidas dos resultados das simulações com o MPM, considerando o talude com inclinação de 30°, descrevem, em geral, trajetórias com trechos de saltos, o que não se espera para esse ângulo de declividade. A categoria que apresenta uma maior coincidência entre os resultados é a *Medium Soft*, contudo, com diferenças maiores que as verificadas para os casos bidimensionais.

Se comparadas entre si, as trajetórias oriundas das análises com o RAMMS, para uma inclinação de 30°, o programa não apresenta diferença significativa no alcance dos blocos para quase todas as categorias de solo. Os blocos param assim que atingem o pé do talude, independente do material do terreno. A exceção se dá na categoria *Extra Hard*, na qual, ao alcançar a base do talude, o bloco ainda possui energia para rolar por mais 2m aproximadamente.

Em relação ao talude com inclinação de 50°, ainda analisando a partir do Cenário 1, as trajetórias resultantes do MPM e do RAMMS para a categoria *Medium Soft* apresentam uma semelhança satisfatória. Na categoria *Medium*, há uma menor coincidência entre as trajetórias e o bloco alcança uma maior distância antes de atingir o repouso. Entretanto, nas categorias *Medium Hard*, *Hard* e *Extra Hard*, os resultados do MPM apresentam elevadas alturas de salto, principalmente na categoria *Extra Hard*. Na categoria *Hard*, segundo os resultados obtidos com o MPM, ao impactar a base do talude, o bloco salta, atinge o trecho horizontal do terreno e, devido ao seu movimento de rotação, salta de volta para o talude, alcançando o repouso na base do talude, enquanto que, na trajetória RAMMS, o bloco segue em movimento por mais 7m aproximadamente.

Nos casos considerados no Cenário 1, uma vez que se trata de um bloco de formato regular no qual todos os pontos que formam sua aresta entram em contato com o talude simultaneamente e a superfície não apresenta desníveis ou rugosidades, a trajetória do bloco é retilínea e com desvios pouco consideráveis. Como no RAMMS o bloco pode impactar o talude em diversas orientações em relação aos seus eixos, as trajetórias são dispersas e mudam de direção durante o movimento.

Considerando os resultados obtidos no cenário 2, para o talude com inclinação de 30°, o MPM apresenta maiores alcances horizontais em relação às trajetórias obtidas com o RAMMS. Em alguns casos, como o que ocorre na comparação com a categoria *Medium Hard*, as diferenças são bem discrepantes. Enquanto os pontos de parada do RAMMS se encontram quase todos entre $x = 12\text{m}$ e $x = 13\text{m}$, no MPM o bloco só atinge o repouso no ponto $x = 28\text{m}$. Nos casos que consideram uma topografia de 50°, para algumas categorias, há uma boa semelhança entre a trajetória do MPM e pelo menos uma trajetória do RAMMS, como o que ocorre nas categorias *Medium Soft*, *Medium Hard* e *Hard*. Nas demais categorias, ocorre a mesma discrepância vista nos casos com inclinação de 30°, principalmente na categoria *Extra Hard*, na qual o bloco atinge o limite do modelo antes de parar. Esse comportamento sugere que, em geral, as trajetórias dos blocos que desenvolvem movimentos de saltos durante a queda são mais bem representadas pelo MPM do que aquelas dos blocos que rolam ou deslizam na superfície do talude, em comparação às trajetórias do RAMMS.

A Tabela 3.10 apresenta os valores das distâncias percorridas, em metros, por cada um dos blocos das onze trajetórias do RAMMS (RU, R1, R2, ..., R10) e do resultado obtido do MPM. Os resultados são apresentados em escala de cor, em que a cor azul representa as menores distância e o vermelho, as maiores.

Tabela 3.10 – Distância percorrida - em metros - pelos blocos cúbicos para cada trajetória

Inclinação	Categoria	RU	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	MPM
30°	<i>Medium Soft</i>	8.6	1.3	3.8	5.4	0.5	6.1	1.7	0.9	5.8	7.8	5.5	11.6
	<i>Medium</i>	8.2	3.6	8.9	8.8	9.2	9.2	8.0	9.2	0.7	3.3	9.4	14.0
	<i>Medium Hard</i>	8.8	9.4	9.4	8.7	9.1	9.3	9.1	9.4	9.2	4.7	5.7	24.3
	<i>Hard</i>	8.6	10.5	11.3	3.0	4.6	9.1	11.3	9.0	8.9	8.6	0.5	20.8
	<i>Extra Hard</i>	10.6	17.5	13.2	0.7	0.6	12.4	12.6	10.3	12.6	10.0	10.0	23.4
Inclinação	Categoria	RU	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	MPM
50°	<i>Medium Soft</i>	12.5	11.6	9.6	9.4	8.6	8.1	9.9	8.7	9.5	9.0	8.8	12.0
	<i>Medium</i>	13.6	10.1	12.1	9.2	11.1	9.5	12.1	9.8	9.6	9.8	13.5	16.5
	<i>Medium Hard</i>	9.3	8.9	9.3	11.7	12.7	11.6	13.2	8.6	11.7	9.3	8.9	14.6
	<i>Hard</i>	15.7	10.4	12.8	13.3	15.9	9.1	13.4	14.2	14.3	14.0	13.6	13.2
	<i>Extra Hard</i>	14.9	15.6	15.4	14.9	11.9	14.2	19.1	12.8	11.6	18.7	12.4	32.8

Nas Figuras 3.44, 3.45, 3.46, 3.47 e 3.48 são comparadas as curvas da energia cinética do bloco durante a queda para o Cenário 1, nas quais o bloco possui a mesma orientação de liberação no RAMMS e no MPM. As comparações são apresentadas considerando as categorias de terreno estudadas e as topografias definidas para as simulações.

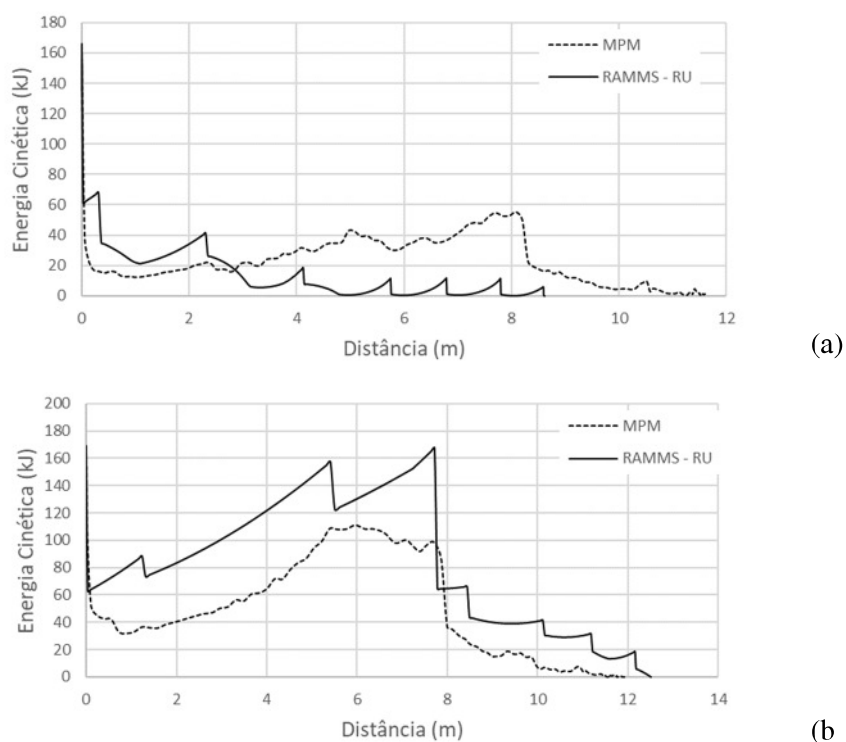


Figura 3.44: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Medium Soft – Cenário 1

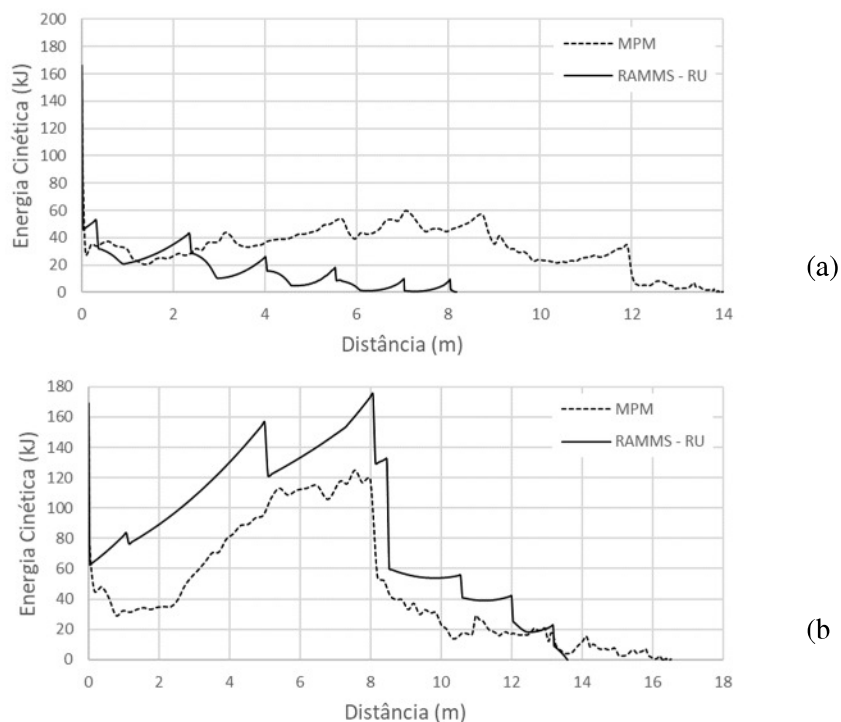


Figura 3.45: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Medium – Cenário 1

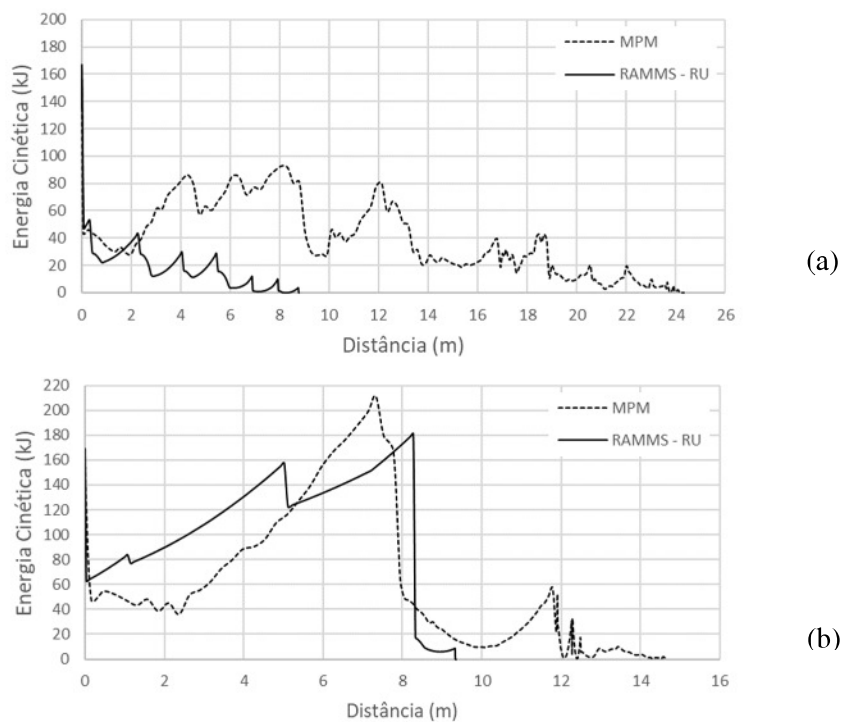


Figura 3.46: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Medium Hard – Cenário 1

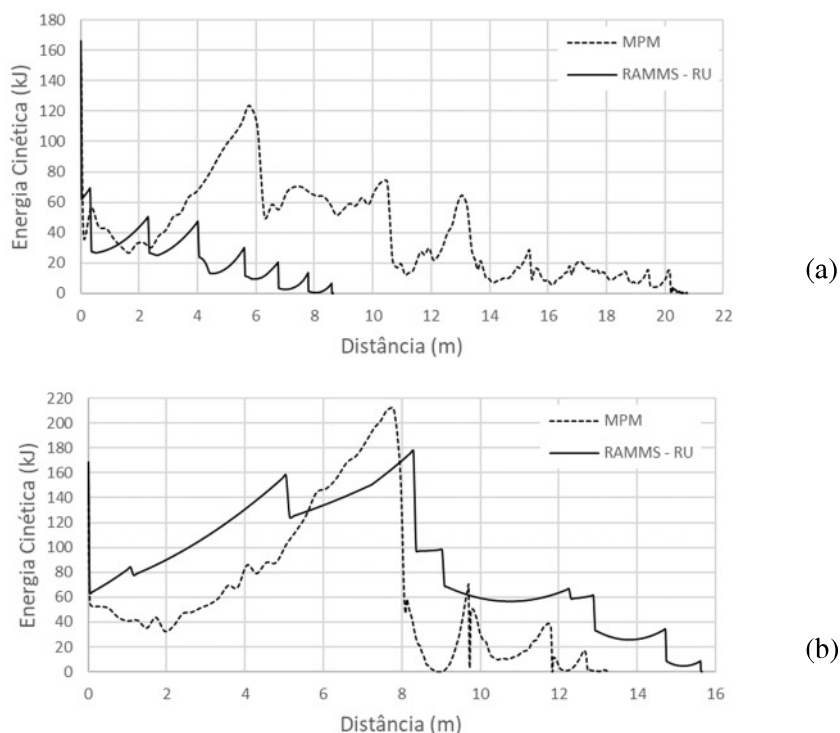


Figura 3.47: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Hard – Cenário 1

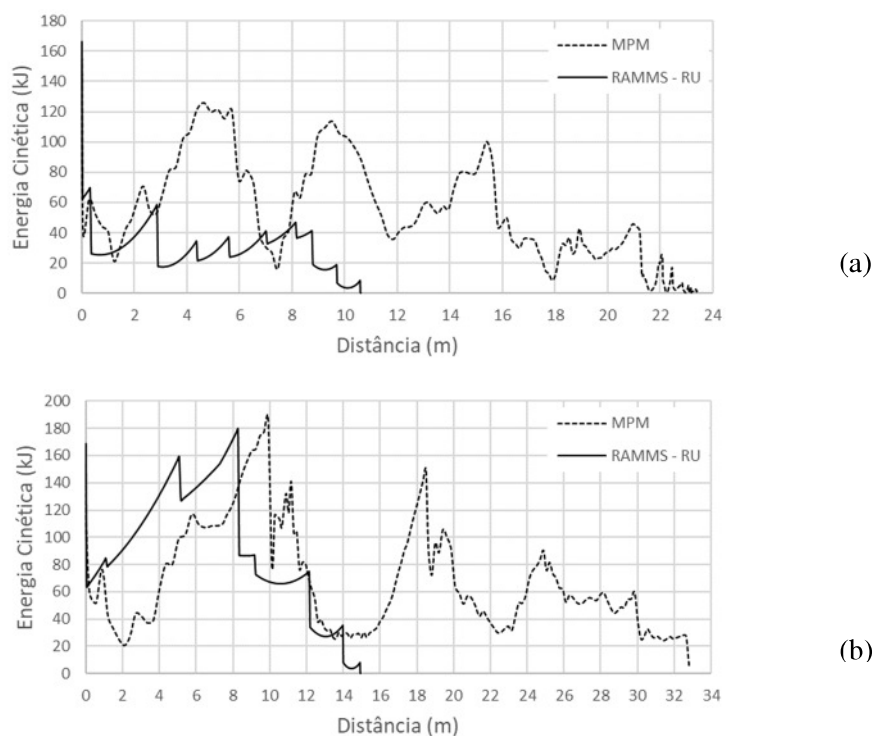


Figura 3.48: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Extra Hard – Cenário 1

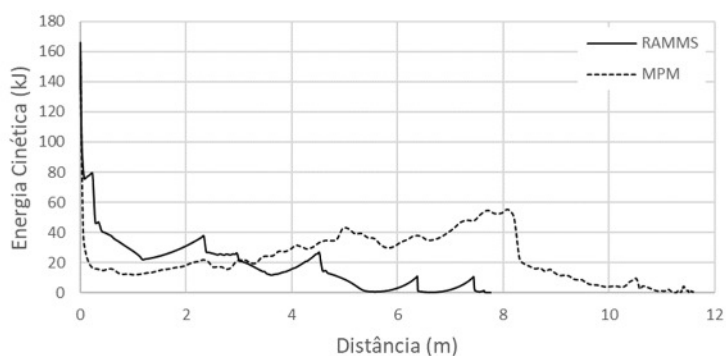
O RAMMS, levando-se em consideração a inclinação de 30°, apresenta dissipação de energia mais efetiva do que a observada no MPM em todas as categorias. Em relação ao talude de 50°, as curvas de energia do MPM e do RAMMS se aproximam razoavelmente, com exceção do observado na categoria *Extra Hard*.

Para comparar de maneira mais rigorosa um cenário no qual há trajetórias aleatórias e não se sabe a orientação inicial do bloco (Cenário 2), é necessário verificar a distância percorrida por cada bloco em função da variação de energia cinética durante o percurso. Dentre as dez trajetórias fornecidas pelo RAMMS, aquela cuja distância mais se aproxima do resultado do MPM foi utilizada na comparação entre as curvas de energia cinética. A Tabela 3.11 apresenta, para cada categoria, as trajetórias escolhidas em relação à inclinação do talude.

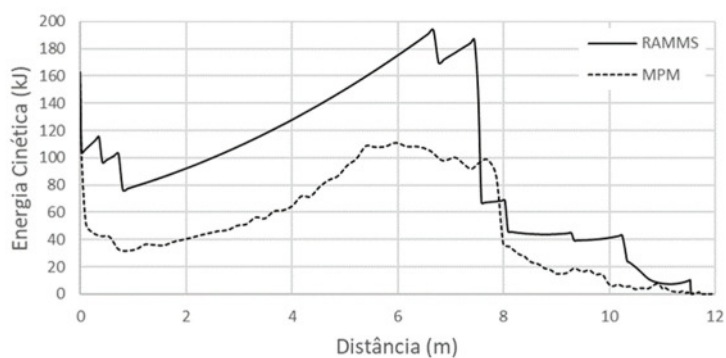
Tabela 3.11 – Trajetórias RAMMS escolhidas para as comparações – Cenário 2

Terreno	Inclinação	
	30°	50°
<i>Medium soft</i>	R9 - 7,8m	R1 - 11,6m
<i>Medium</i>	R10 - 9,4m	R10 - 13,5m
<i>Medium hard</i>	R2 - 9,4m	R6 - 13,2m
<i>Hard</i>	R2 - 11,3m	R3 - 13,3m
<i>Extra hard</i>	R1 - 17,5m	R6 - 19,1m

Os gráficos das Figuras 3.49, 3.50, 3.51, 3.52 e 3.53 apresentam a comparação dos resultados do RAMMS e do MPM considerando a trajetória escolhida de acordo com o critério da menor diferença entre as distâncias percorridas.

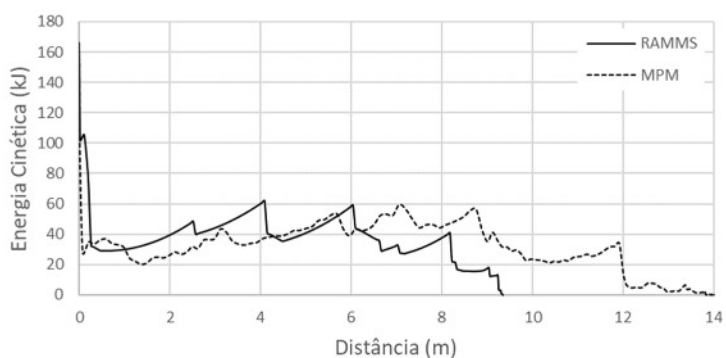


(a)

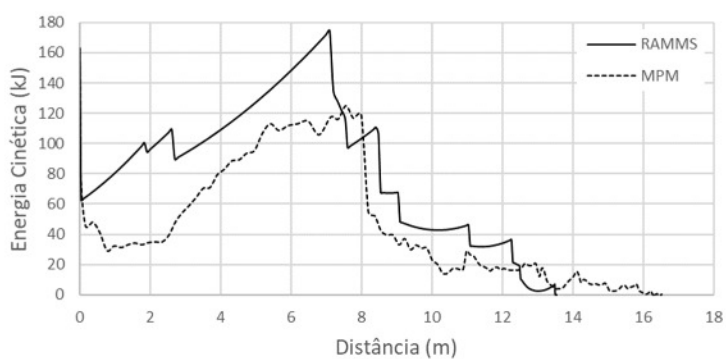


(b)

Figura 3.49: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Medium Soft – Cenário 2

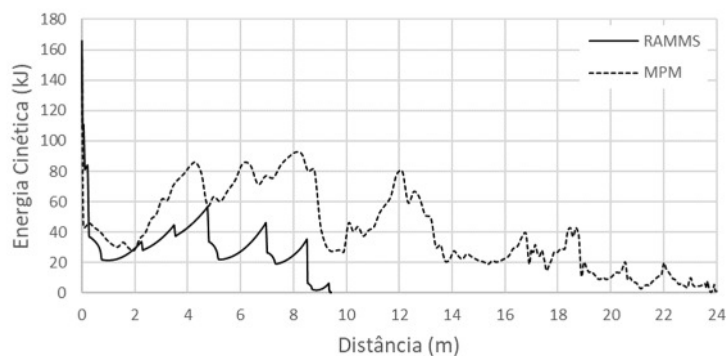


(a)

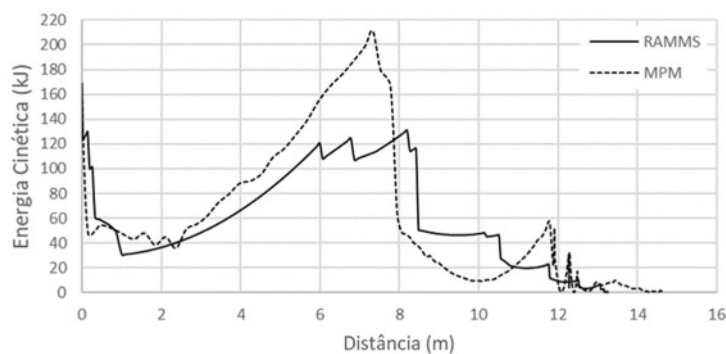


(b)

Figura 3.50: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Medium – Cenário 2

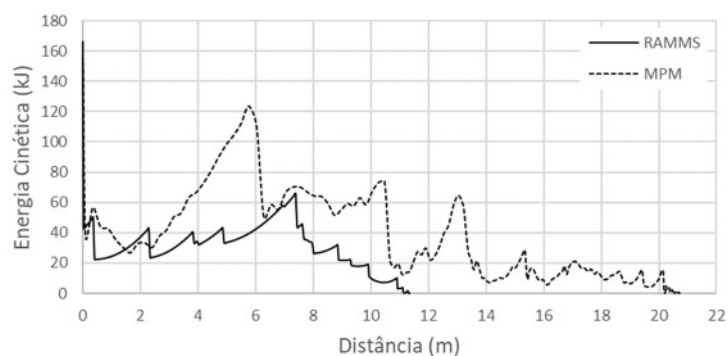


(a)

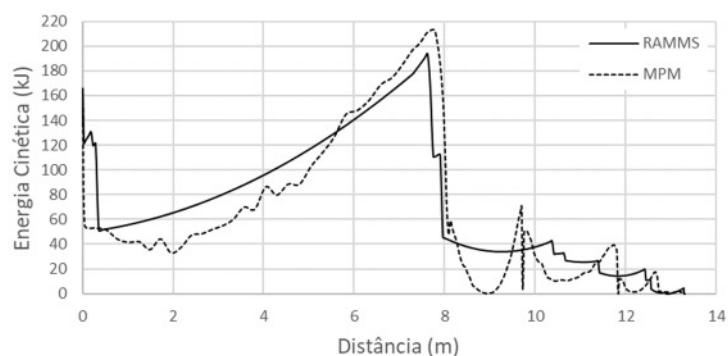


(b)

Figura 3.51: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Medium Hard – Cenário 2



(a)



(b)

Figura 3.52: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Hard – Cenário 2

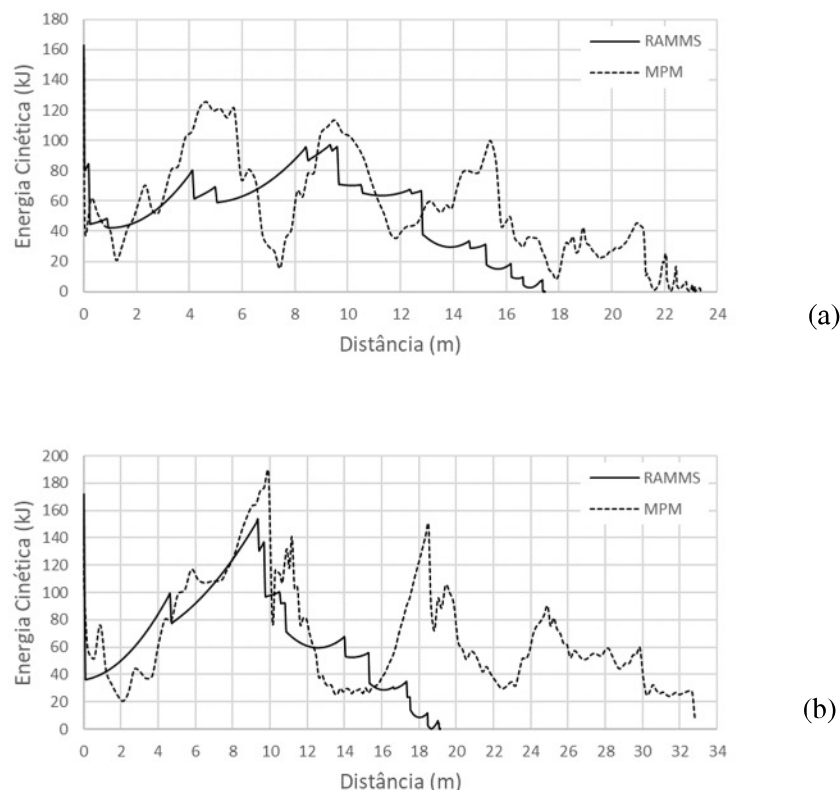


Figura 3.53: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM para taludes com inclinação de 30° (a) e 50° (b) – 3D – Categoria: Extra Hard – Cenário 2

Considerando-se o talude com inclinação de 50°, para a categoria *Hard*, há uma ligeira convergência entre a trajetória do MPM e a trajetória RAMMS usada para a comparação. Excetuando-se a categoria *Extra Hard*, nas demais os blocos, em ambos os métodos, percorrem distâncias com valores relativamente próximos. Na topografia de 30°, o MPM apresenta, em geral, maiores níveis de energia em todas as categorias. Para o talude com inclinação de 50°, nas categorias *Medium Hard* e *Extra Hard* o mesmo se repete, contudo, nas categorias *Medium Soft* e *Medium* os níveis de energia da trajetória RAMMS é superior aos da trajetória MPM, enquanto que na categoria *Hard*, os níveis de energia são mantidos próximos em toda trajetória.

A proximidade dos resultados obtidos no modelo bidimensional e que foram usados para validar os parâmetros elastoplásticos correspondentes de cada categoria, não foram reproduzidos nos modelos tridimensionais. No modelo tridimensional, o impacto do bloco na superfície gera uma área de influência limitada aproximadamente circular em torno do ponto de impacto. Em 2D, as

deformações são planas, significando que a zona de influência do impacto se estende infinitamente na direção perpendicular ao plano. Como o mecanismo de dissipação é diferente, os resultados também são diferentes. Para aumentar a dissipação de energia, os parâmetros de resistência do solo foram diminuídos

3.2.9

Análise paramétrica da influência dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb nas trajetórias e na dissipação de energia

Para avaliar a variação dos parâmetros de resistência do material para cada categoria, foram consideradas reduções de 20%, 40% e 60% na resistência do talude para aumentar a dissipação de energia, partindo da hipótese de que os parâmetros de Mohr-Coulomb utilizados para cada categoria podem estar superestimados. A Tabela 3.12 apresenta as distâncias percorridas nas simulações com o MPM, considerando as porcentagens da resistência do material do talude para cada uma das categorias. Para as análises do Cenário 2, foi utilizado o critério de comparar dentre as trajetórias obtidas com o MPM aquela cuja distância percorrida mais se aproxima do resultado obtido pelo RAMMS para uma melhor análise da dissipação de energia ao longo do percurso do bloco. Também foi verificado nas comparações quais as trajetórias em que os níveis de energia se mantinham mais próximos. Nessa etapa, só foi considerada a topografia de 30°.

Tabela 3.12 – Distância percorrida - em metros - pelo bloco para cada trajetória considerando fatores de redução da resistência

Categoria	100%	80%	60%	40%
<i>Medium Soft</i>	11.6	10.2	10.0	1.4
<i>Medium</i>	14.0	12.6	11.5	11.1
<i>Medium Hard</i>	24.3	13.6	12.9	12.4
<i>Hard</i>	20.8	12.4	15.2	13.8
<i>Extra Hard</i>	23.4	26.4	25.3	16.6

Os gráficos das Figuras 3.54, 3.55, 3.56, 3.57 e 3.58 apresentam a comparação dos resultados do RAMMS e do MPM, considerando os fatores de redução de resistência para os dois cenários estudados.

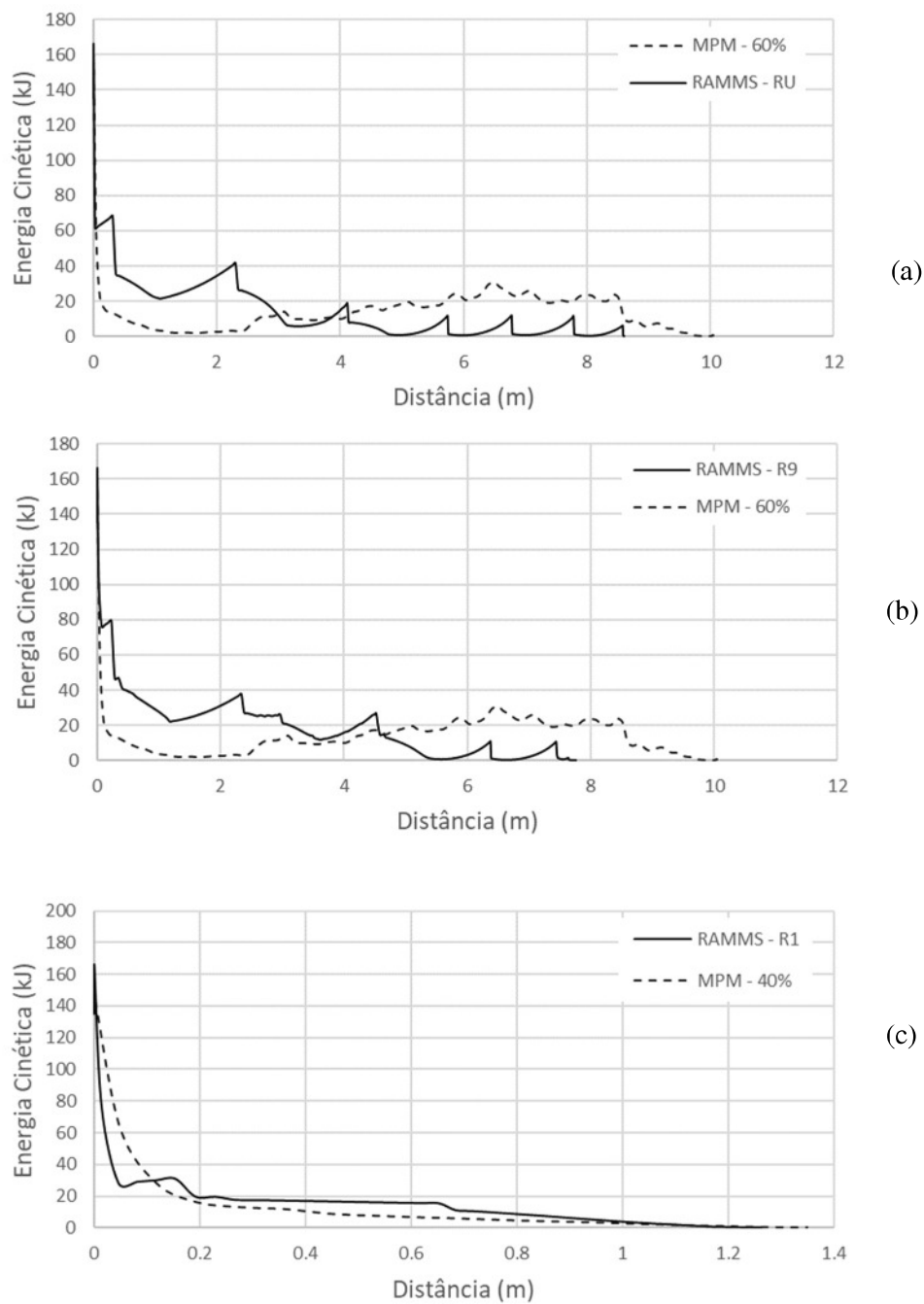
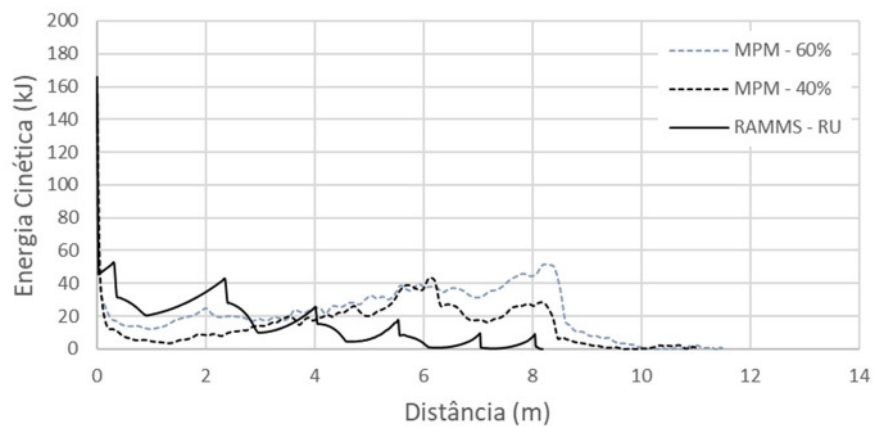
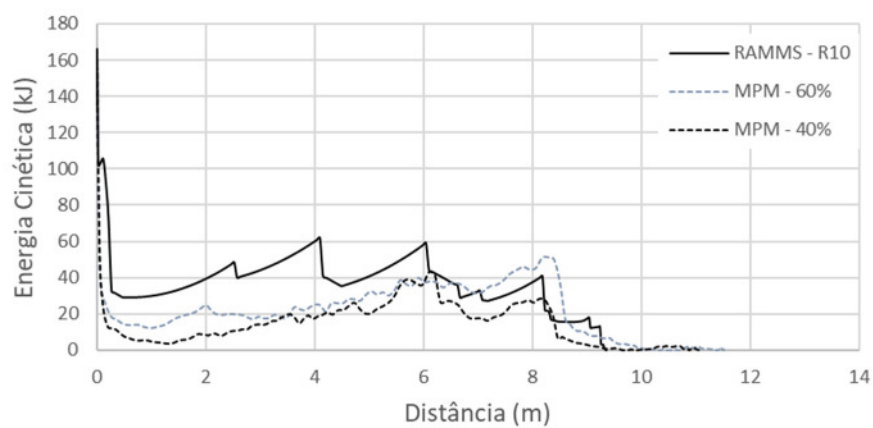


Figura 3.54: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 60% da resistência do material – Cenário 1 (a); considerando 60% da resistência do material – Cenário 2 (b) e considerando 40% da resistência em comparação com a trajetória R1 do RAMMS (c) – 30° - Categoria: Medium Soft

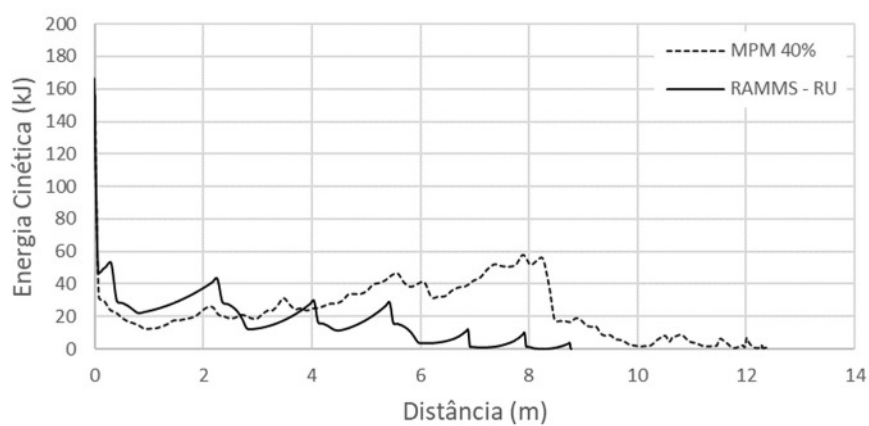


(a)



(b)

Figura 3.55: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 60% e 40% da resistência do material – Cenário 1 (a) e considerando 60% e 40% da resistência em comparação com a trajetória R10 do RAMMS – Cenário 2 (b) - 30° - Categoria: Medium



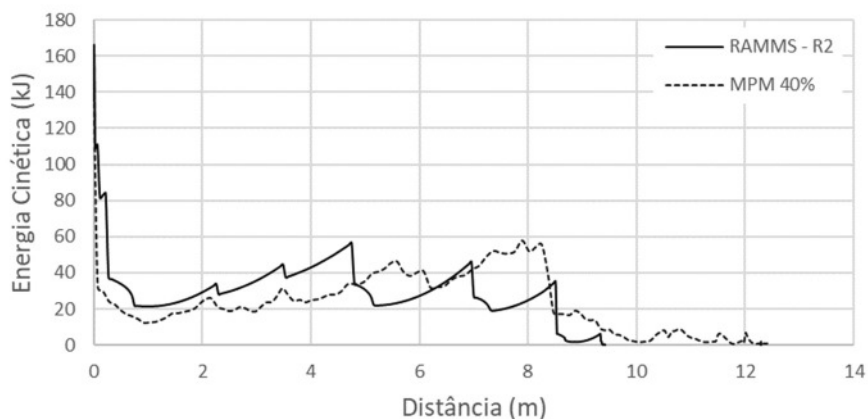


Figura 3.56: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 40% da resistência do material – Cenário 1 (a) e considerando 40% da resistência em comparação com a trajetória R2 do RAMMS – Cenário 2 – 30° - Categoria: Medium Hard

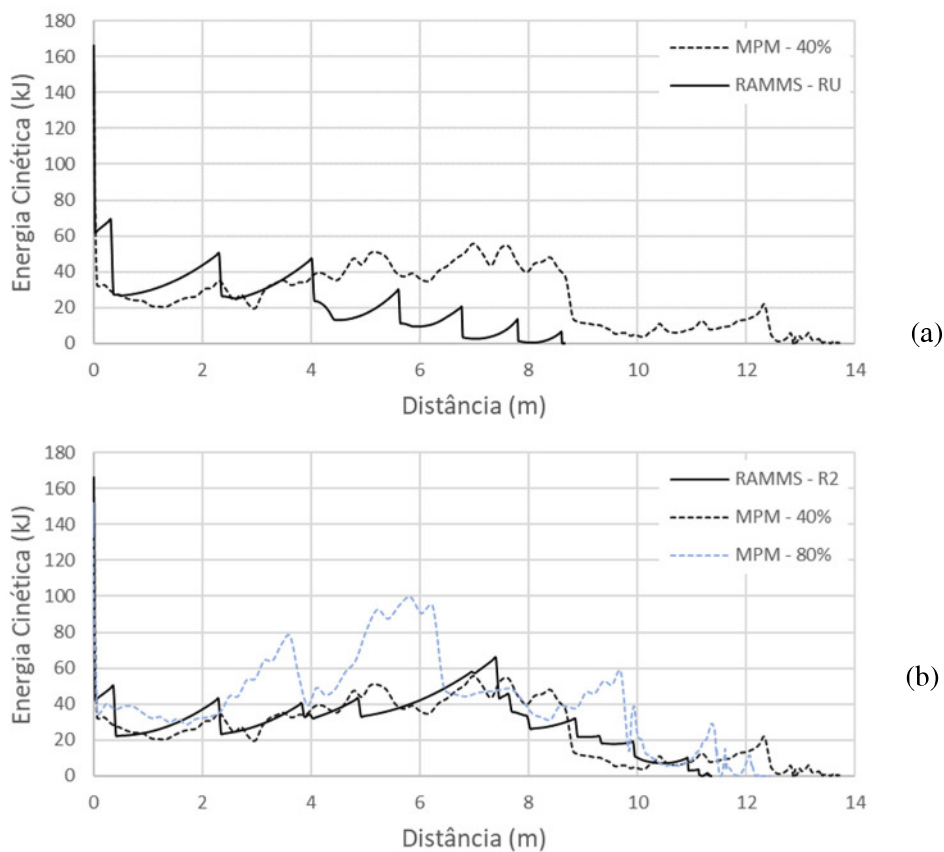


Figura 3.57: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 40% da resistência do material – Cenário 1 (a) e considerando 40% da resistência em comparação com a trajetória R2 do RAMMS – Cenário 2 (b) – 30° - Categoria: Hard

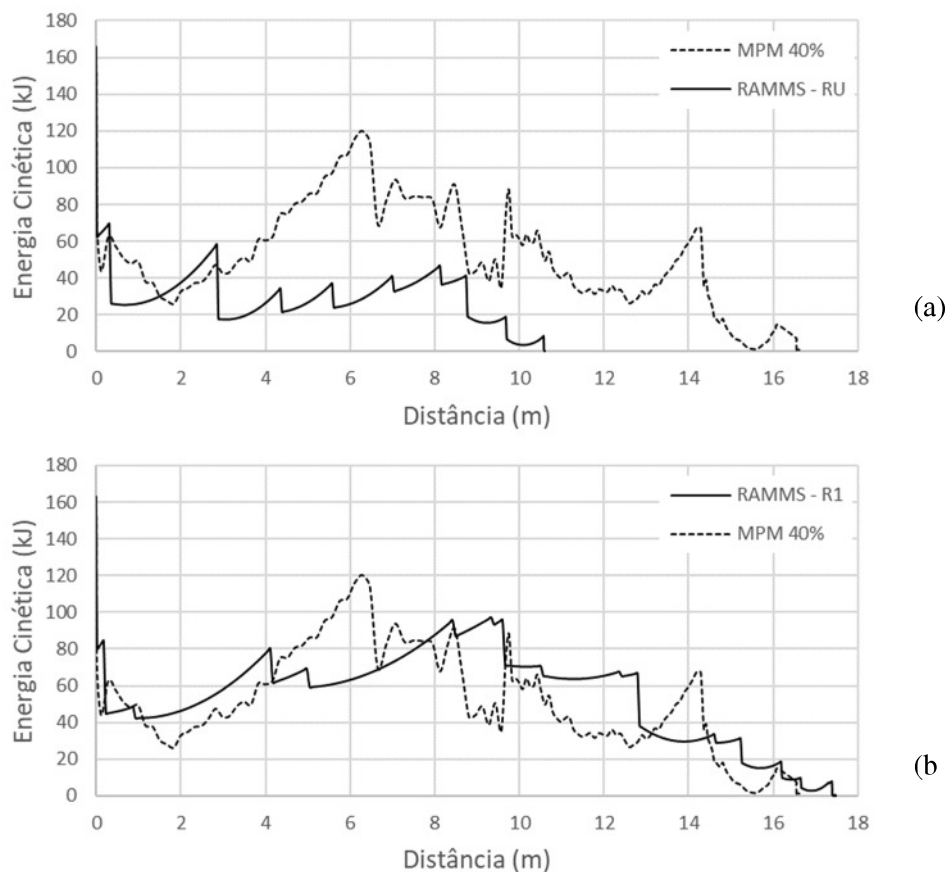


Figura 3.58: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM considerando 80% da resistência do material (a) e considerando 40% da resistência do material (b) – 30° - Categoria: Hard

Na categoria *Extra Hard*, comparando-se com a trajetória MPM com 40% da resistência original, os níveis de energia dos dois métodos oscilam em valores próximos um do outro para o Cenário 2. No cenário 1, mesmo com a redução da resistência no MPM, a dissipação de energia no RAMMS ainda se dá de maneira mais efetiva. Na categoria *Hard*, quando considerada uma redução de 20% da resistência, para atender ao critério estipulado de se considerar as trajetórias com menor diferença entre as distâncias percorridas, o MPM apresenta maiores valores de energia cinética durante a trajetória. Ao considerar uma redução de resistência de 60%, as curvas de energia cinética do RAMMS e do MPM apresentam boa coincidência para o Cenário 2. No Cenário 1, há um trecho inicial com proximidade das curvas, porém a energia do bloco aumenta no MPM enquanto que no RAMMS ela se dissipa até o bloco entrar em repouso.

Na categoria *Medium Hard*, os níveis de energia são próximos e com poucas divergências para o Cenário 2. No cenário 1, a trajetória do MPM apresenta um pico de energia cinética antes do repouso. Na categoria *Medium* são apresentados dois casos: a trajetória MPM com 60% e com 80% da resistência do solo, nos quais, apesar do ponto de parada do bloco ser ligeiramente mais distante, as curvas de energia são mais próximas, sendo a redução a 60% mais próxima aos resultados do RAMMS. Na categoria *Medium Soft*, na primeira metade da trajetória, o RAMMS apresenta maiores valores de energia. Porém, durante a trajetória o MPM apresenta um aumento da energia cinética, superando os valores do RAMMS em ambos os cenários. Ainda na categoria *Medium Soft*, para uma redução de 60% da resistência, o bloco, após impactar o talude, penetra na superfície e desliza ao longo da cicatriz dissipando toda sua energia em poucos metros. Nesse último caso, quando comparado a uma das trajetórias do RAMMS na qual o bloco também não possui energia suficiente para seguir em movimento de queda ao longo do talude e atinge o repouso logo após o impacto, as curvas de energia são satisfatoriamente próximas.

A redução da resistência se deu na soma das parcelas que compõem a resistência daquele material, ou seja, diretamente na resistência ao cisalhamento pelo critério de Mohr-Coulomb. Para efeito de comparação, foram analisadas as zonas de influência do impacto do bloco do talude quando a redução da resistência se dá no geral, na parcela dependente do ângulo de atrito e na parcela de coesão. As Figuras 3.59, 3.60, 3.61, 3.62 e 3.63 a seguir apresentam os resultados dessas análises paramétricas para cada tipo de material escolhido para representar as categorias estudadas, conforme a Tabela 6, onde “ τ ” significa a redução da resistência ao cisalhamento, “ c ” é a parcela de coesão e “ ϕ ” é a parcela dependente do ângulo de atrito.

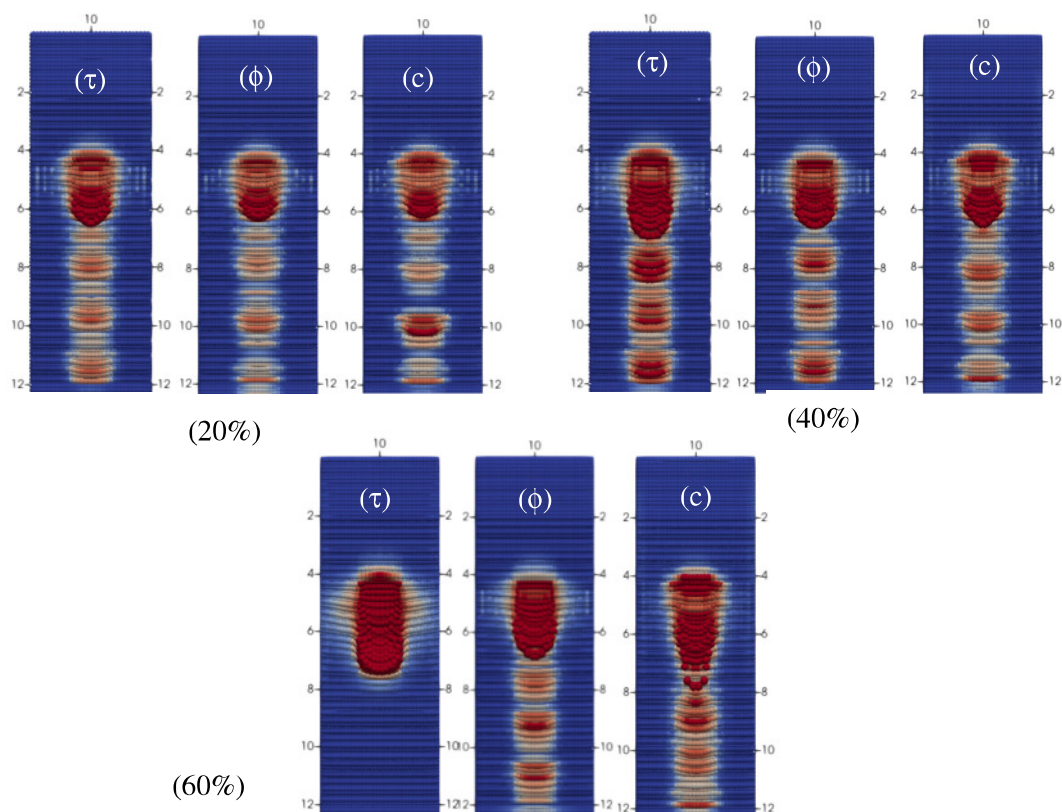


Figura 3.59: Área de influência do impacto – Solo residual de granito

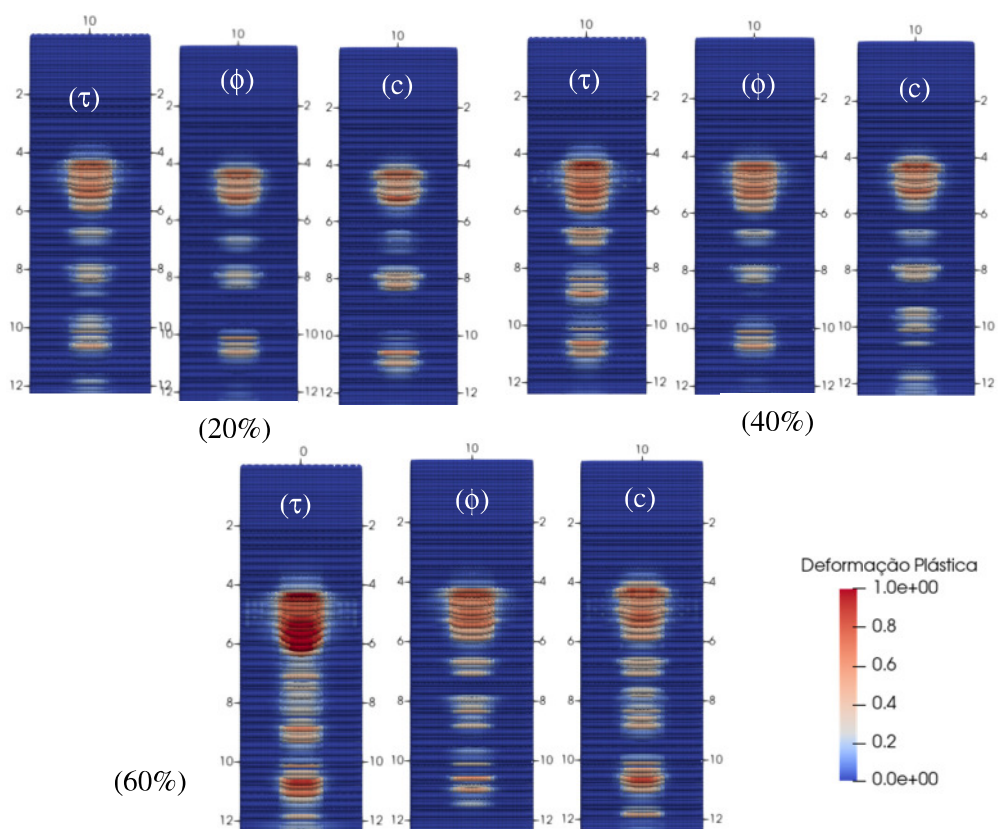


Figura 3.60: Área de influência do impacto – Solo residual de gnaiss

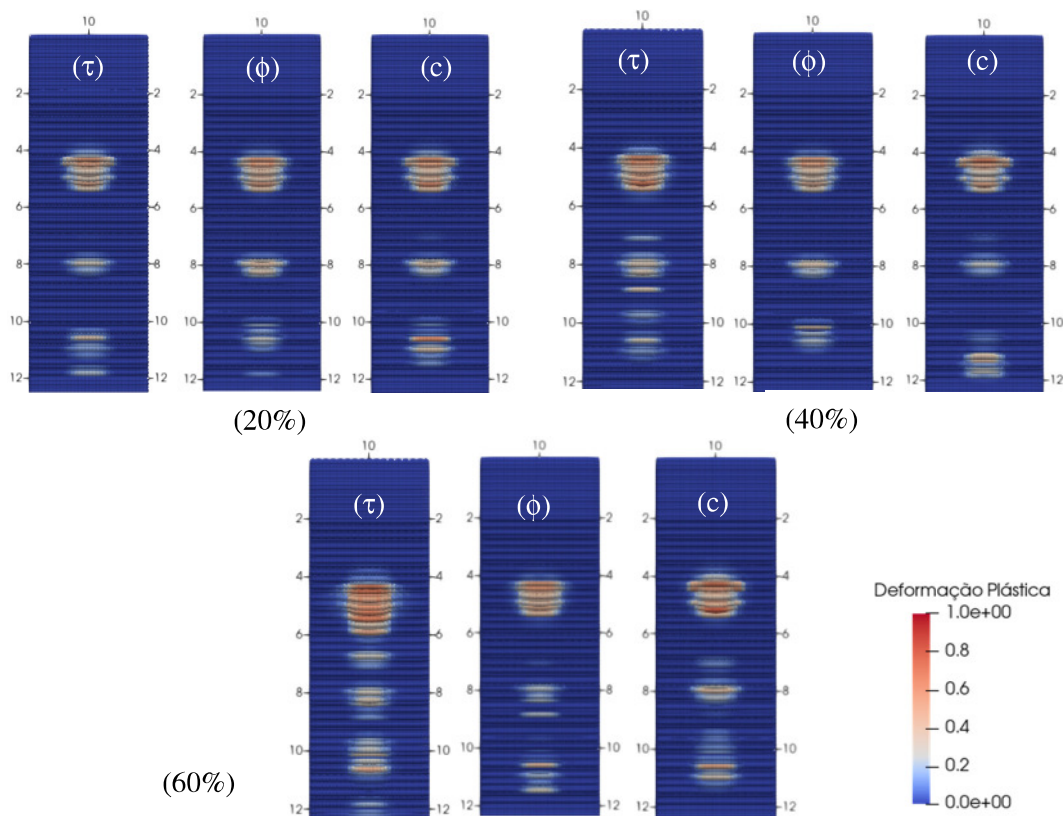


Figura 3.61: Área de influência do impacto – Solo laterítico compactado

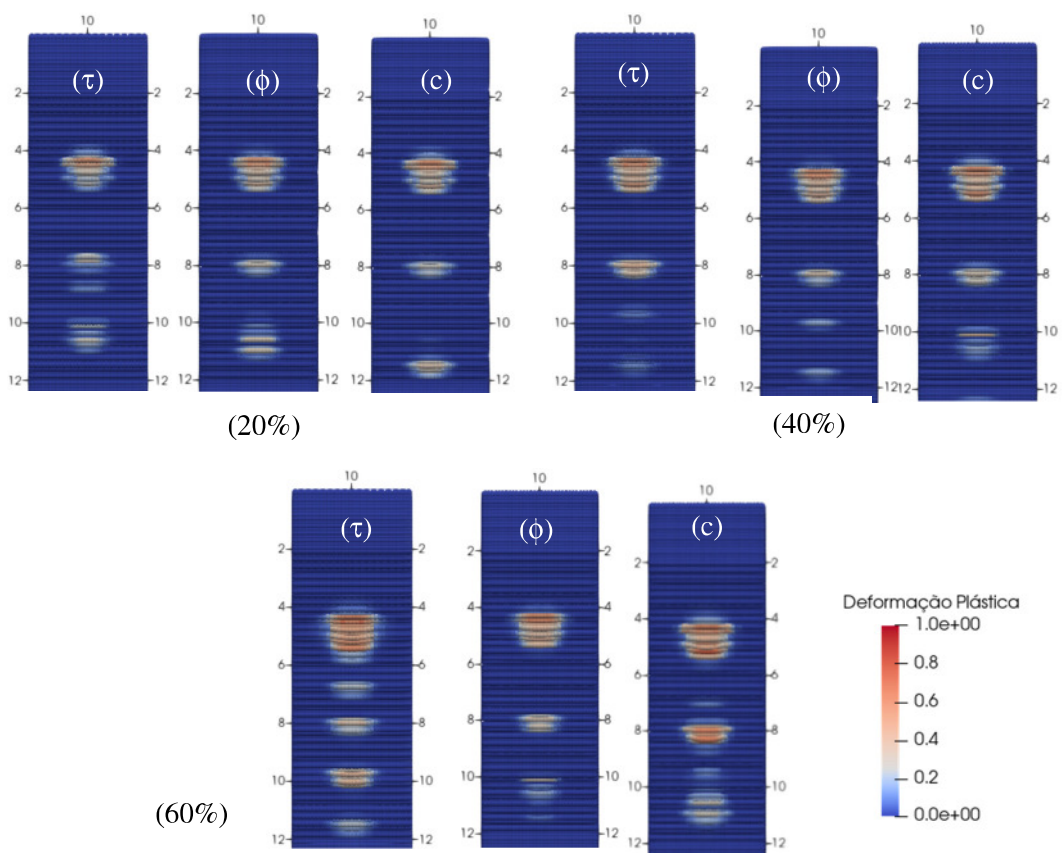


Figura 3.62: Área de influência do impacto – Filito Alterado

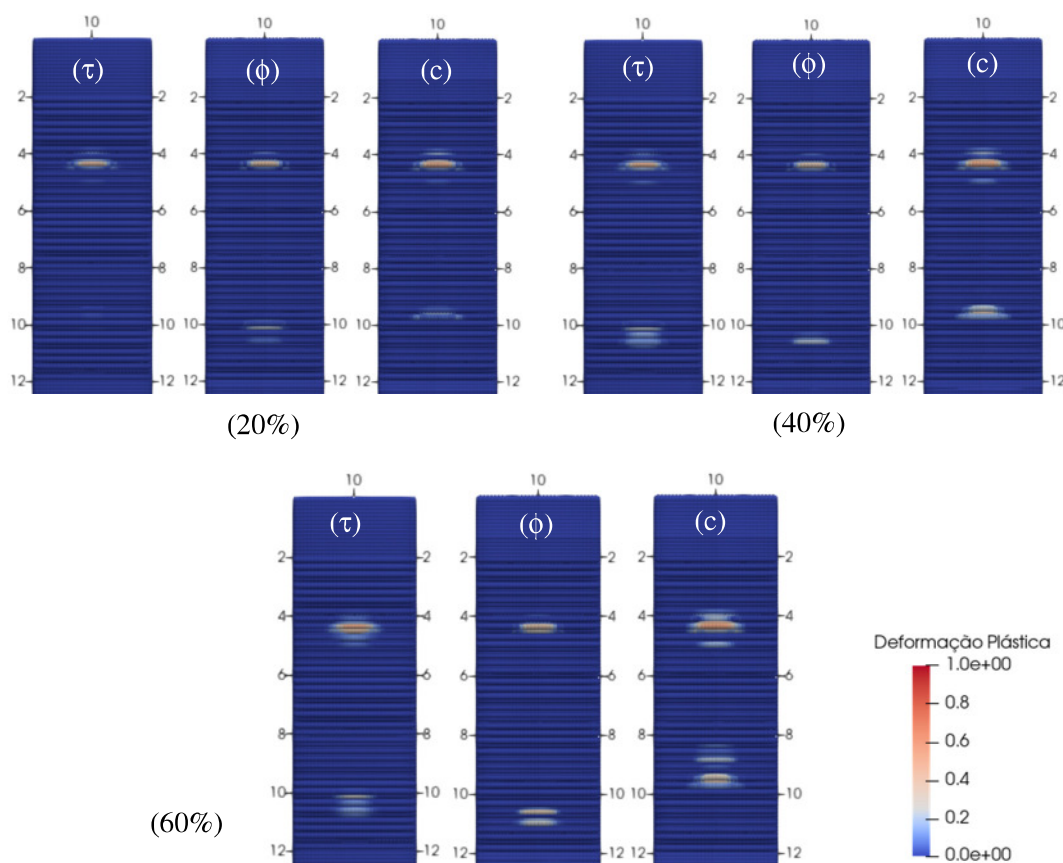


Figura 3.63: Área de influência do impacto – Monzonito

Para o solo residual de granito (*Medium soft*) e para o solo residual de gnaiss (*Medium*), comparando-se a redução geral com a redução individual dos parâmetros de resistência para os diferentes fatores de redução, verifica-se que a redução geral implica em maiores deformações no solo. No solo residual de granito, para uma redução geral de resistência de 60%, as deformações plásticas dissipam toda a energia do bloco que se mantém em repouso na cicatriz do escorregamento. Se comparadas as reduções no ângulo de atrito e na coesão, a última possui maior influência nas deformações plásticas e, conseqüentemente, na dissipação de energia. O formato da cicatriz também é ligeiramente diferente, a diminuição da coesão resulta em cicatrizes mais alongadas com um maior espalhamento do solo. Com diminuição do ângulo de atrito, as cicatrizes desenvolvem um formato próximo à geometria do bloco, nesse caso, o bloco cisalha a superfície, compactando o solo com um menor acúmulo de material na crista do escorregamento.

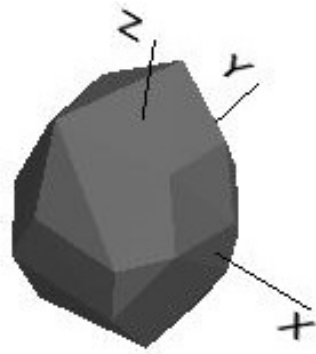
Para o solo laterítico compactado (*Medium hard*) e para o filito alterado (*Hard*), a redução em 20% da coesão apresenta-se como mais significativa nas deformações plásticas do que uma redução geral ou uma redução no ângulo de atrito. Para maiores fatores de redução, o mesmo comportamento visto para os solos residuais se repete. O formato das cicatrizes é bem similar para reduções de 20% e 40%, para um fator de redução de 60% e semelhança se esvai.

As deformações plásticas oriundos do impacto do bloco no monzonito (*Extra Hard*) são mais sensíveis às reduções na coesão do que em uma redução geral. É possível verificar para esse caso que as deformações plásticas, se considerada uma redução somente do parâmetro de coesão, são ligeiramente maiores que aquelas apresentadas para reduções gerais ou no ângulo de atrito.

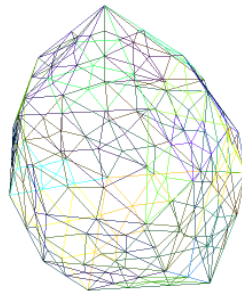
3.2.10 Simulações 3D com blocos irregulares

Nas simulações até então realizadas, foram considerados blocos regulares de formato cúbico. Nesta seção, serão apresentados blocos de diferentes formatos, todos com o mesmo volume e mesma massa específica. O RAMMS, como visto, divide esses blocos irregulares em três categorias: *equant*, *flat* e *long*.

O bloco cúbico, assim como um bloco esférico ou quaisquer outros blocos gerados através da extrusão de uma forma geométrica, pode ser modelado no MPM-PUCRio diretamente através de palavras-chaves de criação de geometria, porém blocos de formato irregulares não são facilmente gerados no programa. Contudo, isso não é um fator limitante do MPM-PUCRio, uma vez que a ferramenta permite ao usuário criar modelos de quaisquer formatos usando uma malha de elementos finitos. A Figura 3.64 apresenta as etapas de criação de um bloco irregular no simulador MPM-PUCRio.



(1)

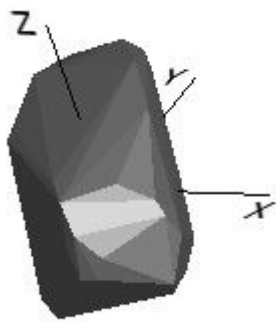


(2)

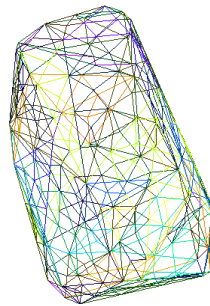
Equant



(3)



(1)

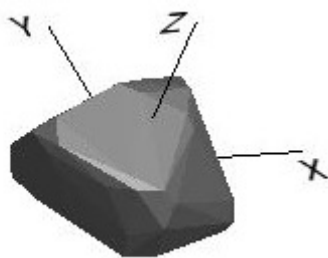


(2)

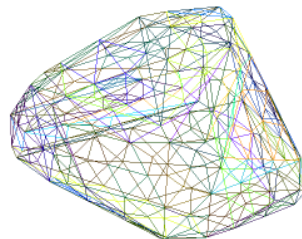
Long



(3)

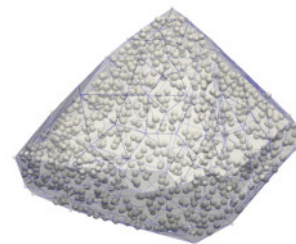


(1)



(2)

Flat



(3)

Figura 3.64 - Etapas da modelagem de um bloco irregular desde o RAMMS até simulador MPM-PUCRio

Após escolhido o tipo de bloco e definidas as suas propriedades (Etapa 1), O RAMMS gera um arquivo contendo uma nuvem de pontos com os vértices daquele bloco. Os pontos desse arquivo são inseridos em um programa gerador de malhas; nesse trabalho foi utilizado o GMSH [97]. A partir dos pontos são formadas as arestas, destas as superfícies e, por fim, um volume, no qual é definida a malha (Etapa 2). O arquivo de malha é carregado no simulador MPM-PUCRio e as partículas são distribuídas uniformemente no centro de cada tetraedro da malha (Etapa 3). Por fim, essas partículas são exportadas e carregadas nos modelos dos taludes.

Para as simulações no MPM-PUCRio, foram consideradas somente as categorias *Medium* e *Hard*, uma vez que estas serão as categorias utilizadas no estudo de caso. Foi considerada somente a topografia de 30° sendo todos os parâmetros dos blocos iguais aos utilizados nas simulações com os blocos cúbicos. Também foram considerados os fatores de redução de resistência utilizados nas comparações das simulações anteriores.

Nas simulações com o MPM, para alterar a orientação de lançamento dos blocos, as coordenadas dos pontos foram permutadas entre si de modo que os blocos fossem rotacionados em relação aos seus eixos definidos no RAMMS. Dessa forma, é possível avaliar a influência da posição de impacto na trajetória dos blocos. A Figura 3.65 mostra as orientações de lançamento para cada um dos três tipos de bloco que foram consideradas nas simulações com o MPM.

Na Tabela 3.13 são apresentadas as distâncias percorridas pelos blocos, tanto as calculadas pelo RAMMS (R1, R2, ..., R10), quanto pelo MPM nas diferentes posições de lançamento (ZX, ZY, ZZ). Para os blocos irregulares também serão considerados dois cenários: Cenário 1, onde são comparadas as trajetórias de blocos com a mesma orientação de saída (RAMMS – RU e MPM – ZZ) e o Cenário 2, com trajetórias estocásticas. Nas comparações entre os resultados dos RAMMS e do MPM no Cenário 2, foi utilizado o mesmo critério de se comparar as trajetórias que percorrem distâncias mais próximas. Dessa forma, as trajetórias MPM e RAMMS que tiverem a menor diferença entre suas distâncias serão consideradas.

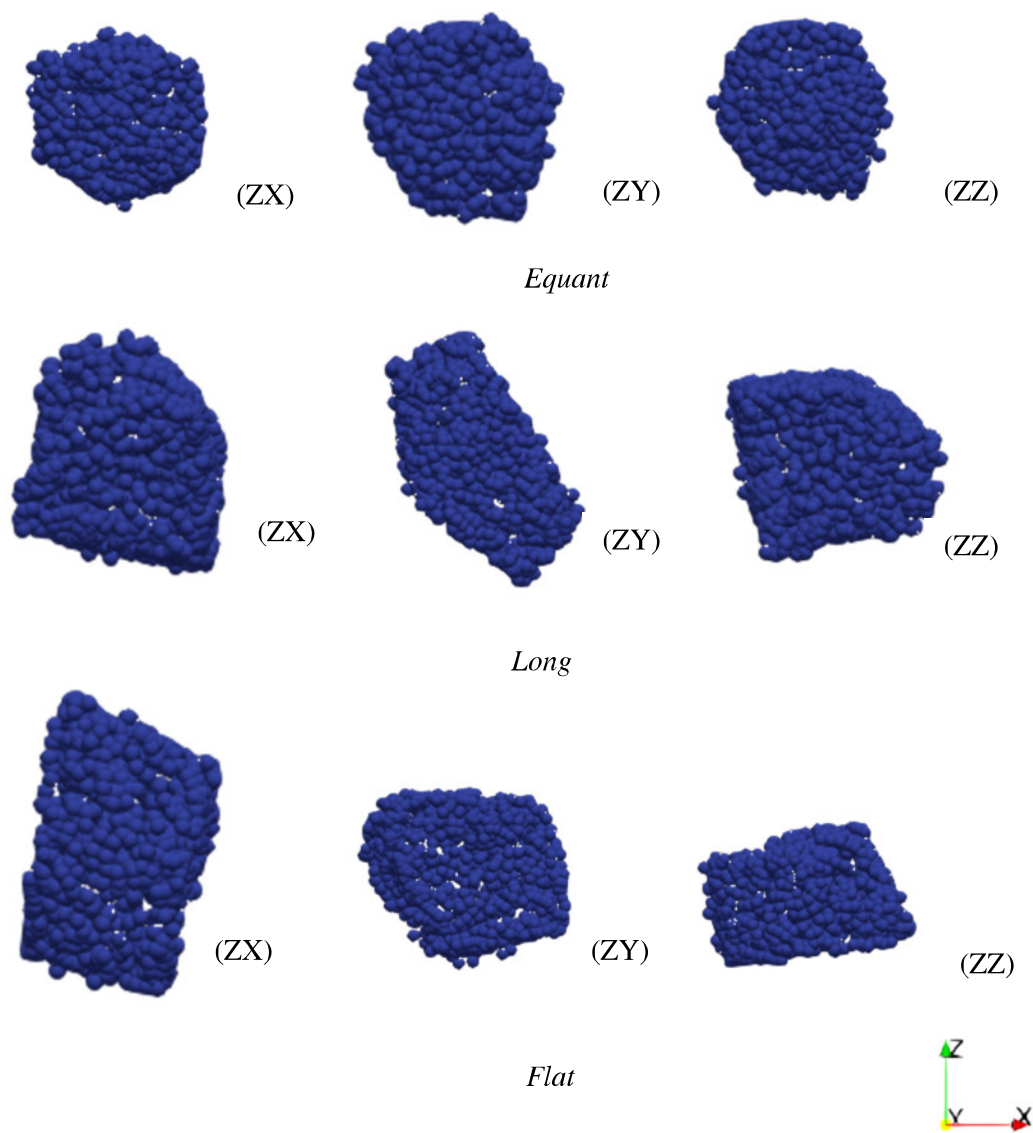


Figura 3.65 – Orientação inicial de lançamento dos blocos no MPM

Tabela 3.13 - Distância percorrida - em metros - pelos blocos para cada trajetória

Bloco	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	RU	ZX	ZY	ZZ
<i>Equant</i>	11.5	13.8	14.3	10.6	18.2	12.2	12.5	10.9	13.4	12.6	12.7	28.3	25.8	22.5
<i>Long</i>	10.0	10.0	8.1	10.6	10.1	16.8	10.6	8.7	10.2	10.5	14.4	17.1	9.5	15.5
<i>Flat</i>	6.7	9.4	9.6	10.5	12.7	8.1	8.3	9.5	13.2	9.4	14.1	18.4	22.4	12.6

<i>Hard</i>														
Bloco	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	RU	ZX	ZY	ZZ
<i>Equant</i>	13.9	11.5	16.5	17.0	13.6	16.3	15.0	13.3	15.8	15.7	11.0	25.3	18.7	21.6
<i>Long</i>	11.7	12.7	8.7	8.1	10.9	10.6	13.3	10.6	17.5	11.2	15.6	21.7	18.8	19.0
<i>Flat</i>	11.9	13.1	8.2	10.1	13.1	12.3	11.3	12.2	12.1	10.7	11.2	23.0	24.7	19.7

Nas Figuras 3.66 e 3.67 são comparadas as trajetórias RAMMS – RU e MPM ZZ, nas quais o bloco tem sua orientação de saída igual para os dois métodos.

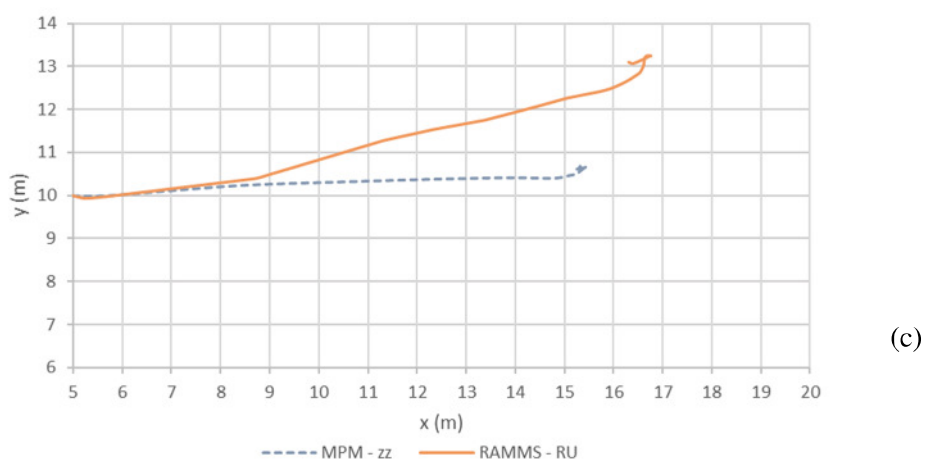
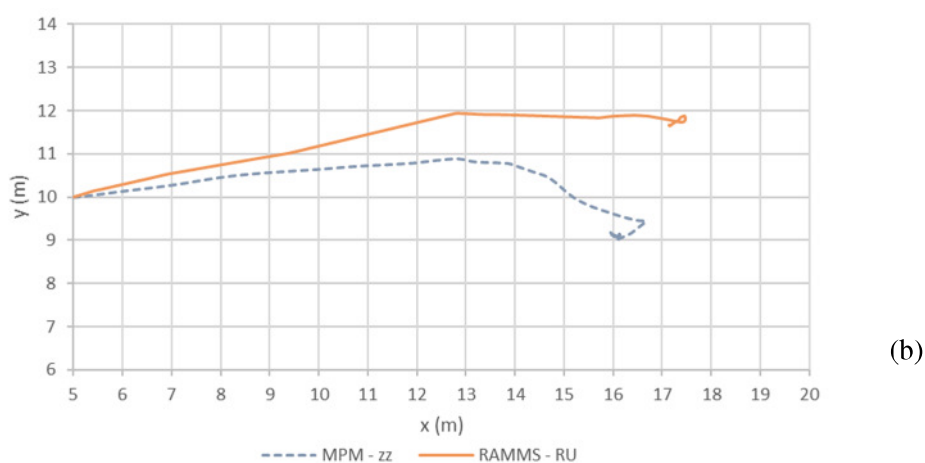
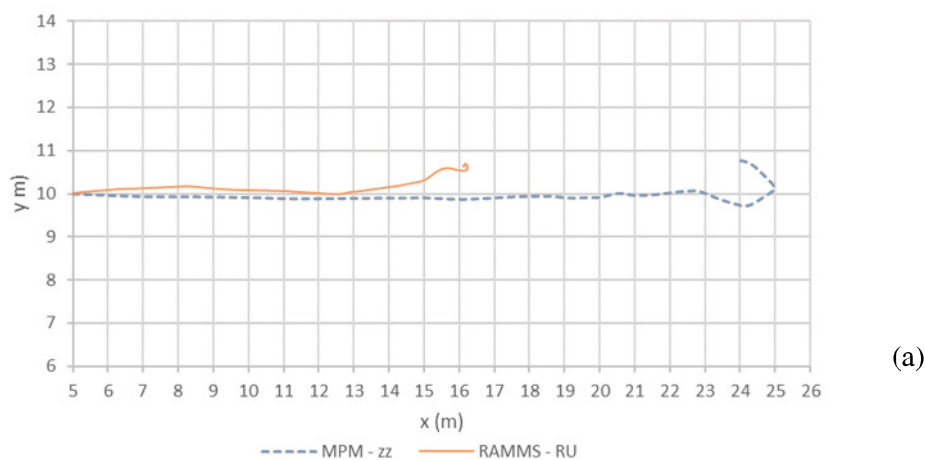
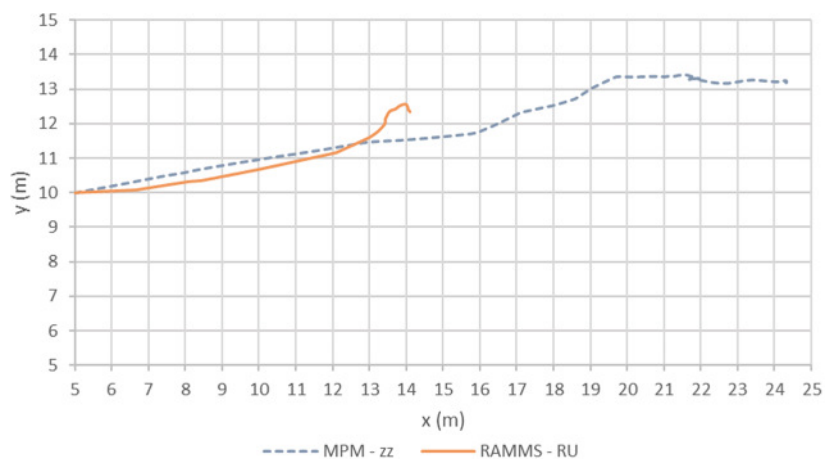
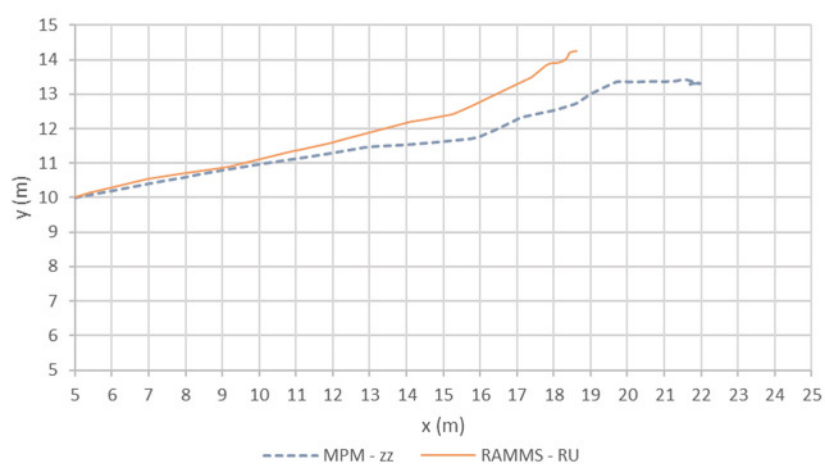


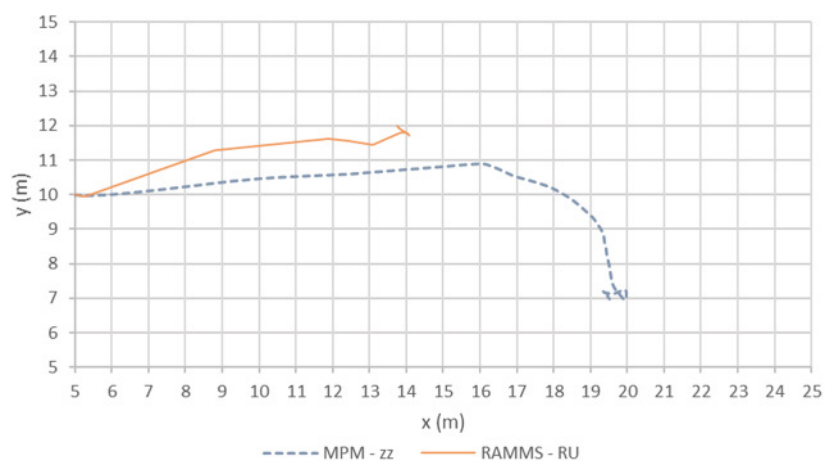
Figura 3.66 – Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo *equant* (a) *long* (b) e *flat* (c) – Cenário 1 - Categoria: *Medium*



(a)



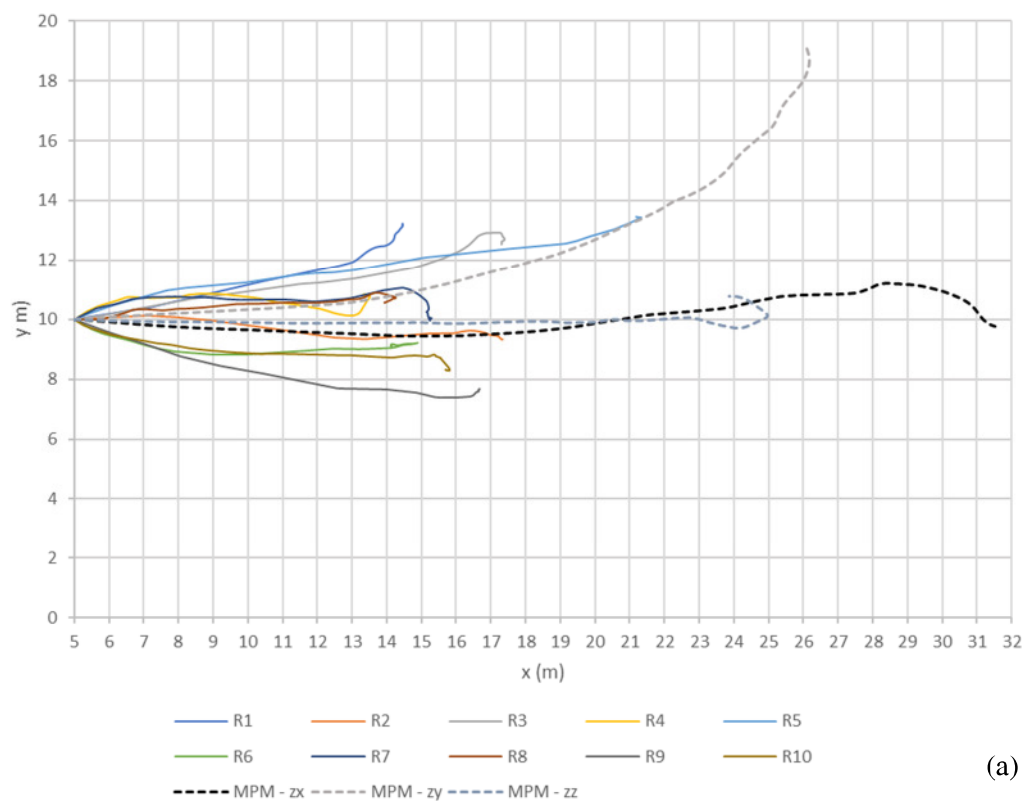
(b)



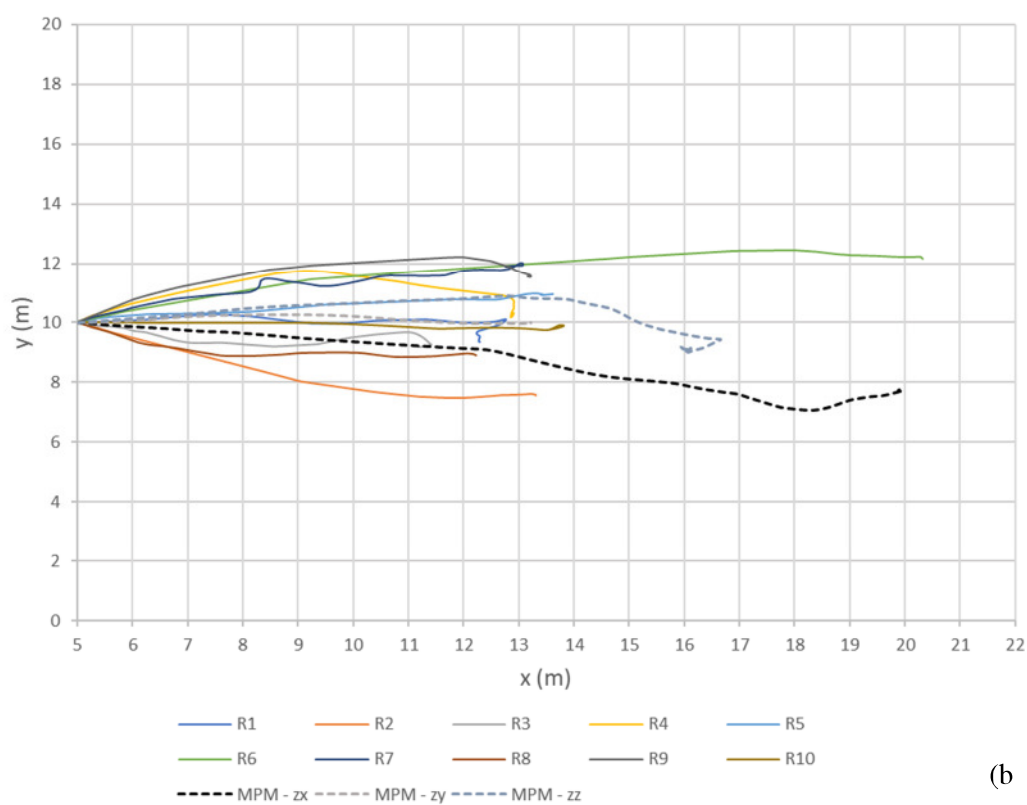
(c)

Figura 3.67 – Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo *equant* (a) *long* (b) e *flat* (c) – Cenário 1 - Categoria: *Hard*

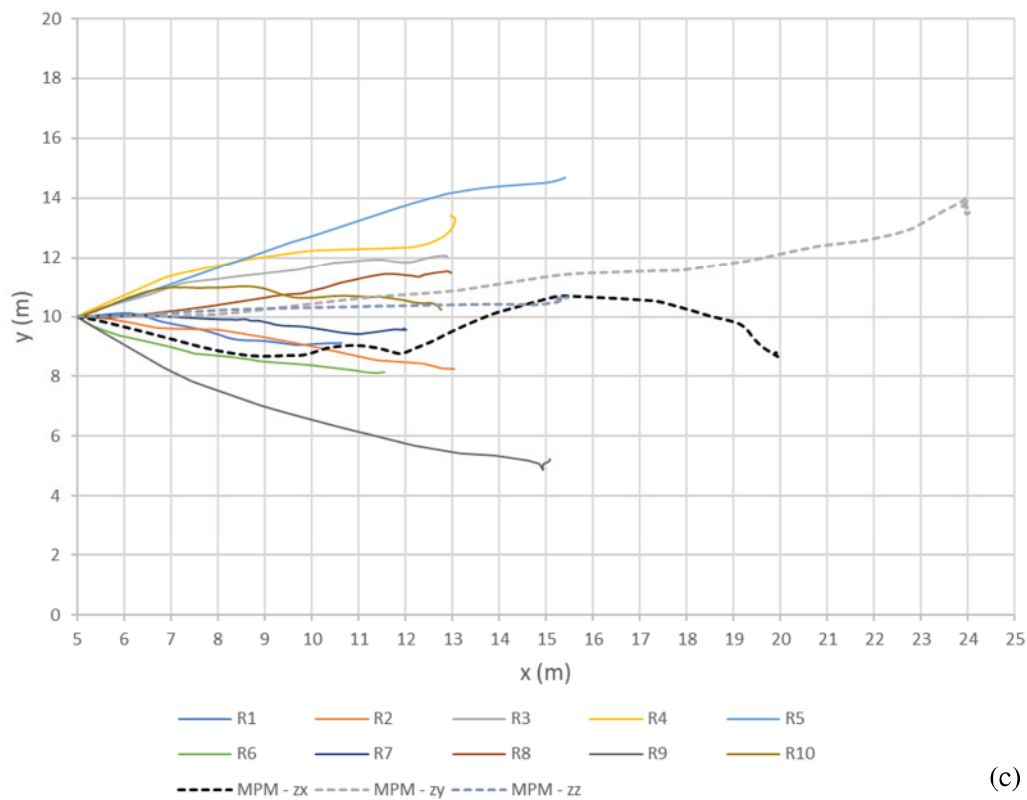
Nas Figuras 3.68 e 3.69 são comparadas as trajetórias estocásticas do RAMMS com as três trajetórias simuladas com o MPM.



(a)

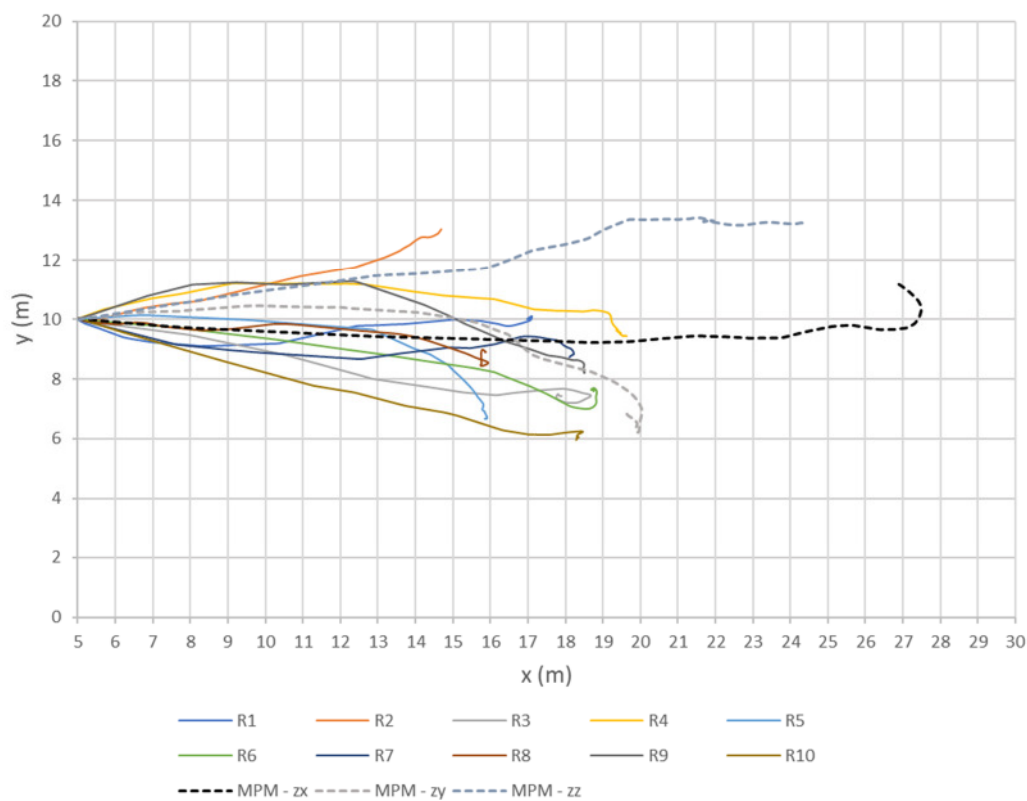


(b)

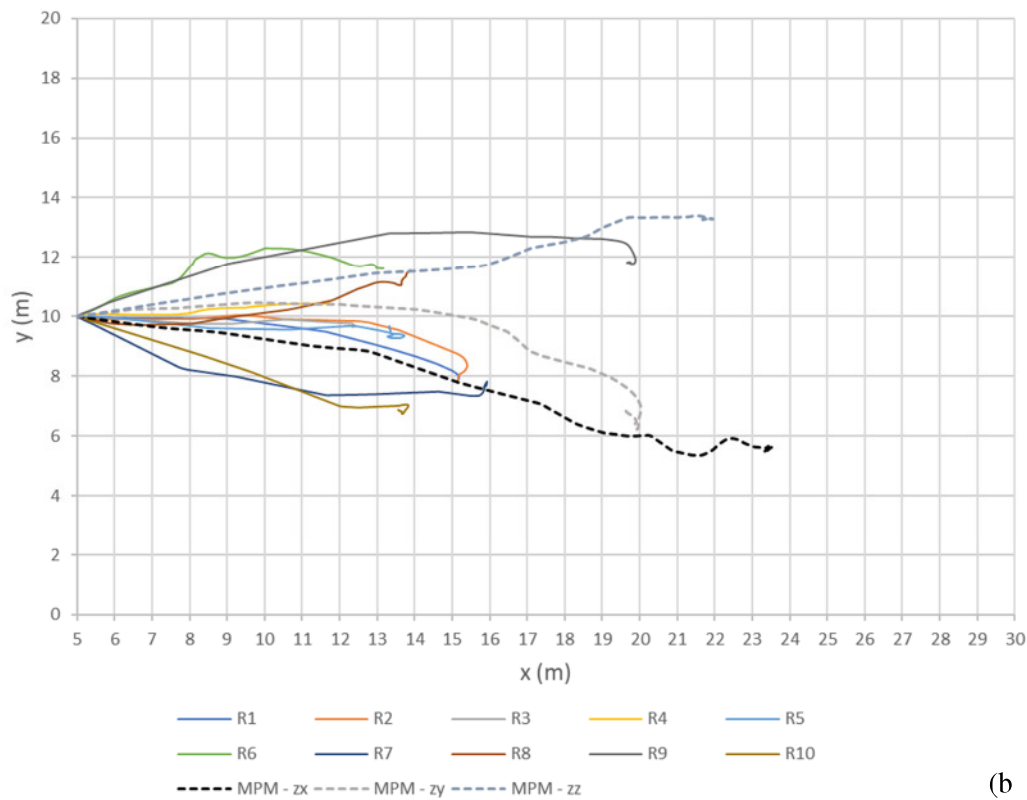


(c)

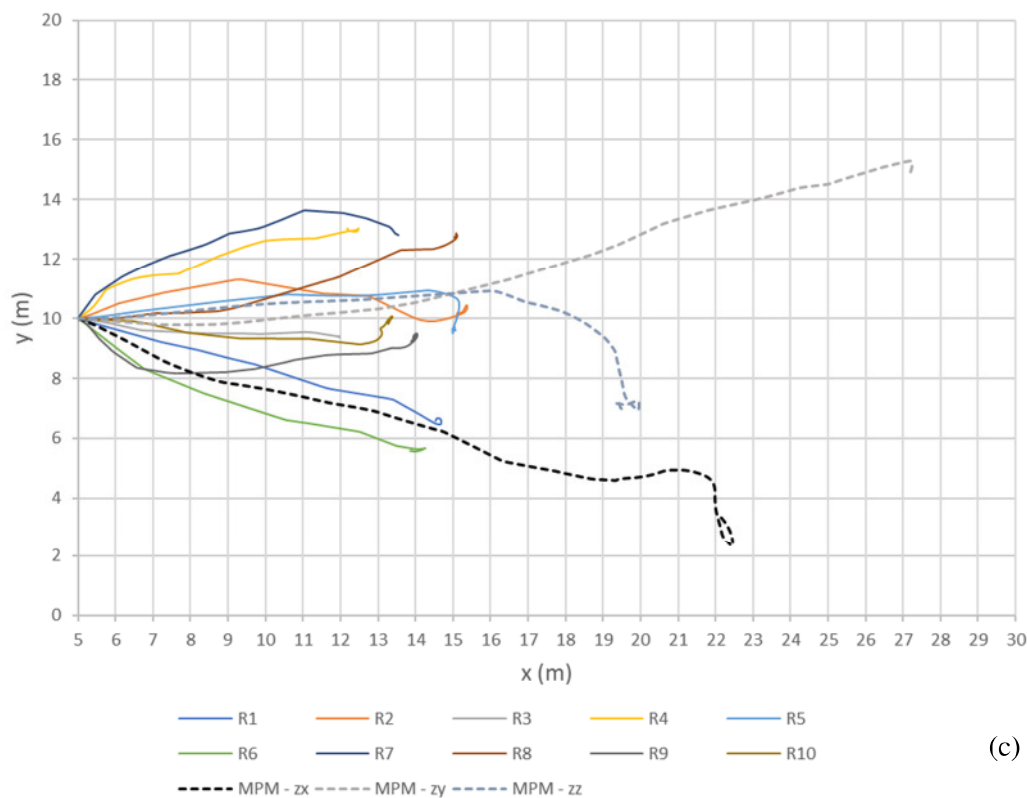
Figura 3.68 – Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo equant (a) long (b) e flat (c) – Cenário 2 - Categoria: Medium



(a)



(b)



(c)

Figura 3.69 – Comparação das trajetórias obtidas pelo MPM e pelo RAMMS para blocos do tipo *equant* (a) *long* (b) e *flat* (c) – Cenário 2 - Categoria: *Hard*

Nas Figuras 3.70, 3.71, 3.72 e 3.73 estão apresentadas as comparações dos resultados obtidos do MPM e do RAMMS em relação a dissipação de energia cinética dos blocos para os Cenários 1 e 2, categoria *Medium* e *Hard*, considerando os três diferentes formatos dos blocos.

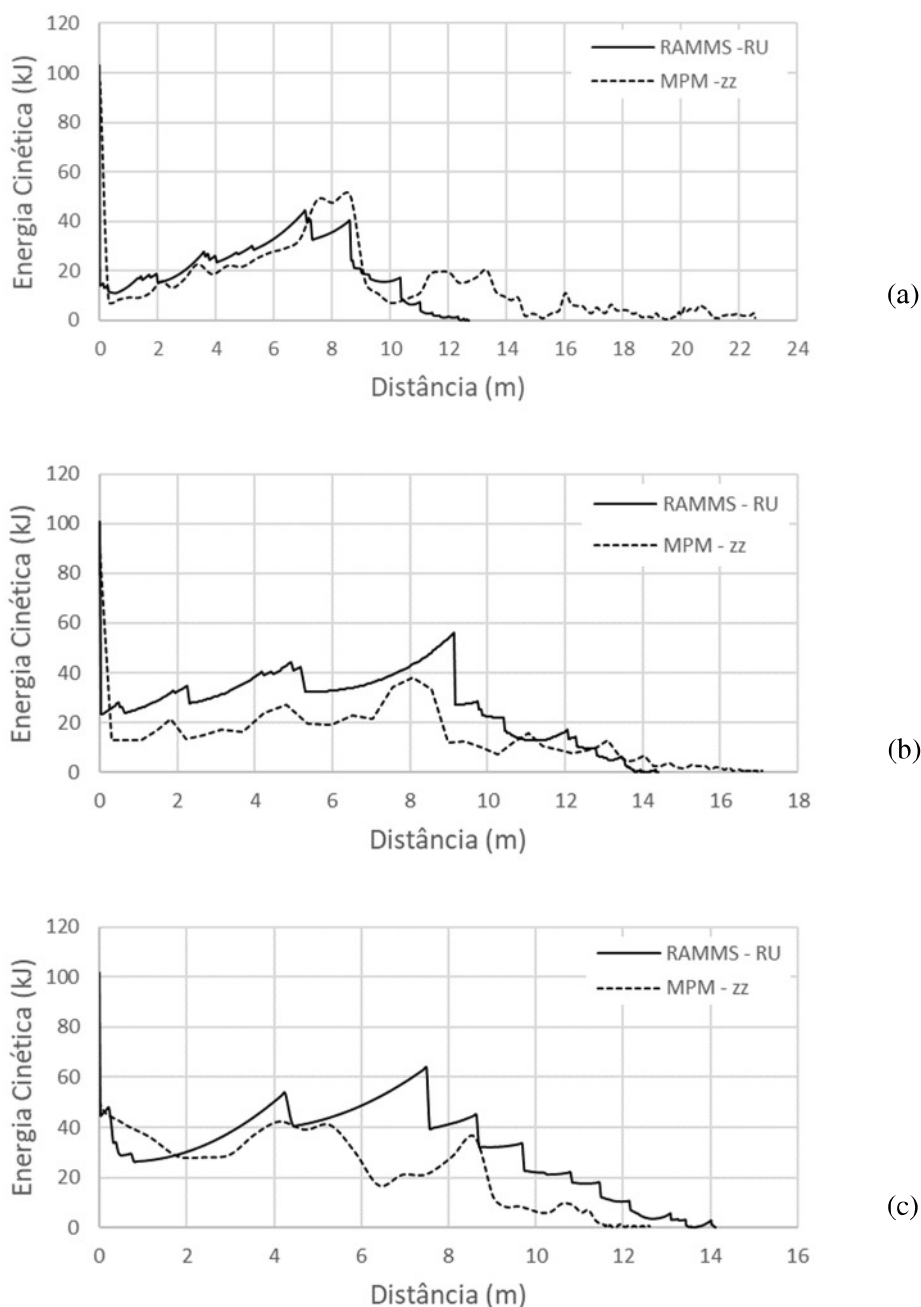
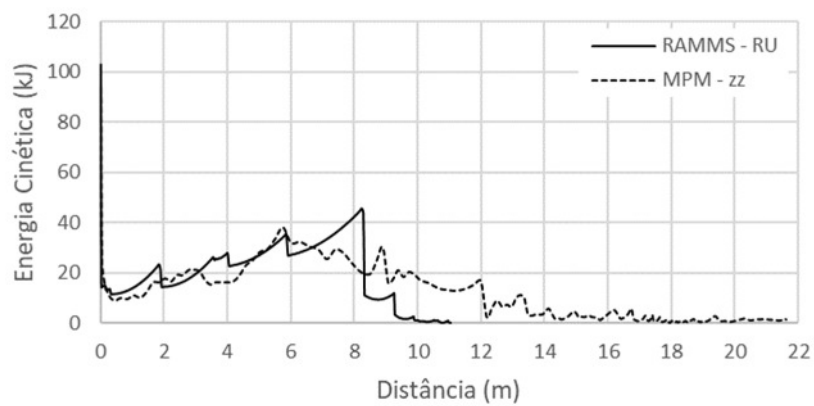
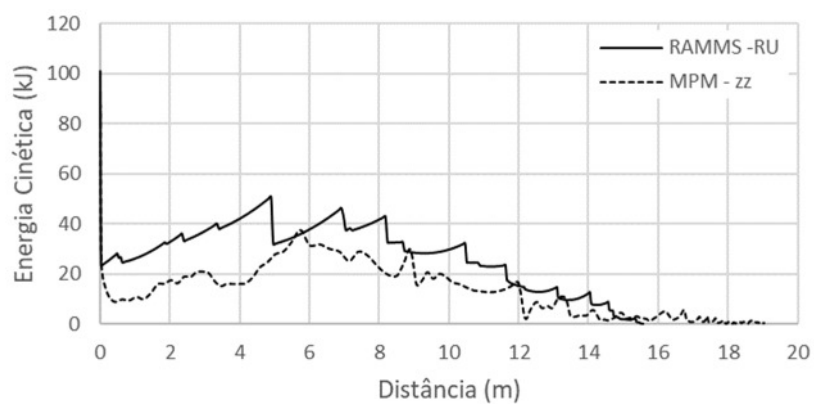


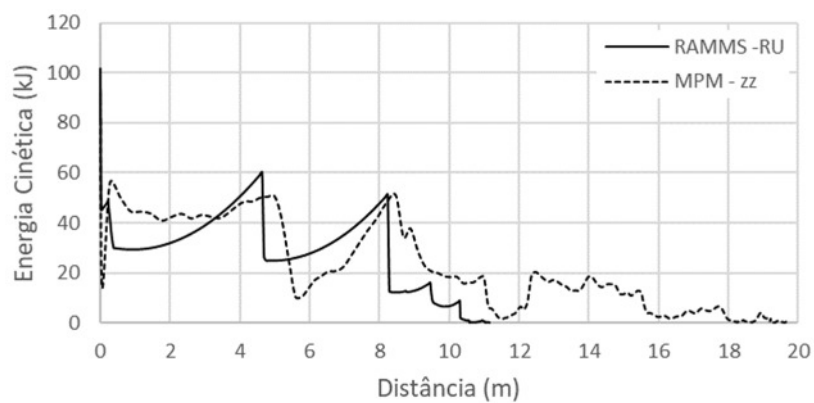
Figura 3.70: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo equant (a) long (b) e flat (c) - Cenário 1 - Categoria: Medium



(a)

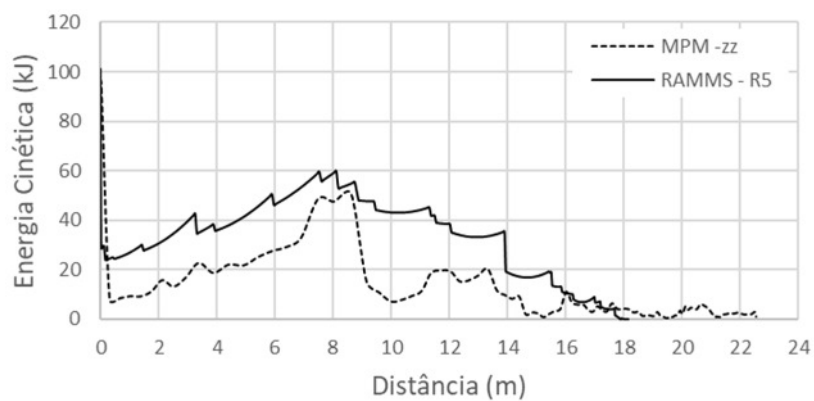


(b)

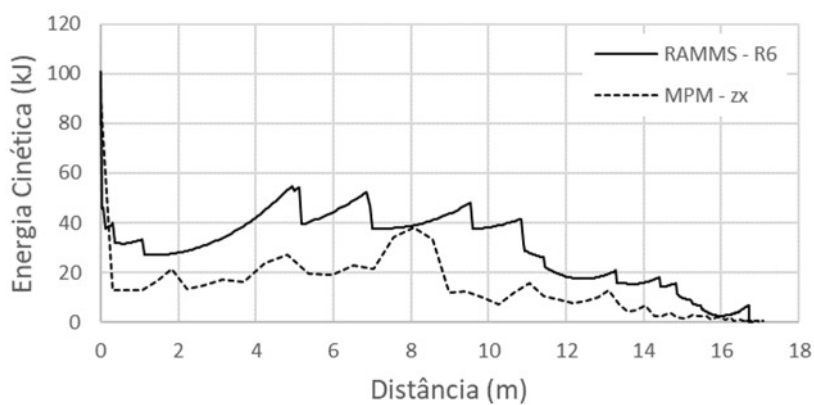


(c)

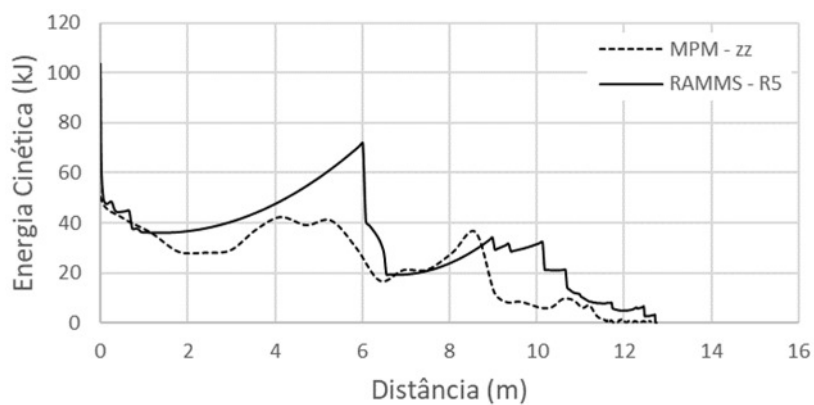
Figura 3.71: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo equant (a) long (b) e flat (c) - Cenário 1 - Categoria: Hard



(a)

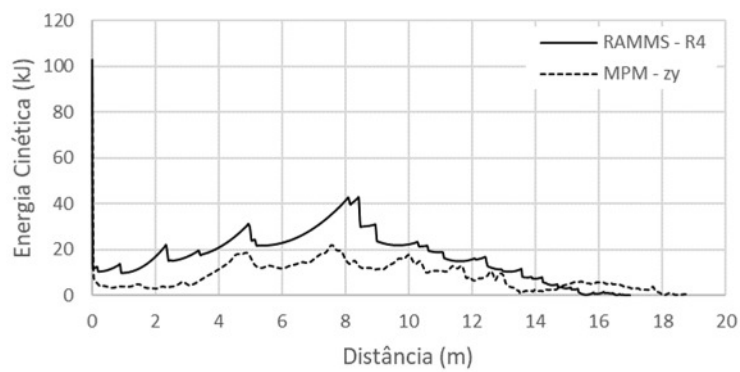


(b)

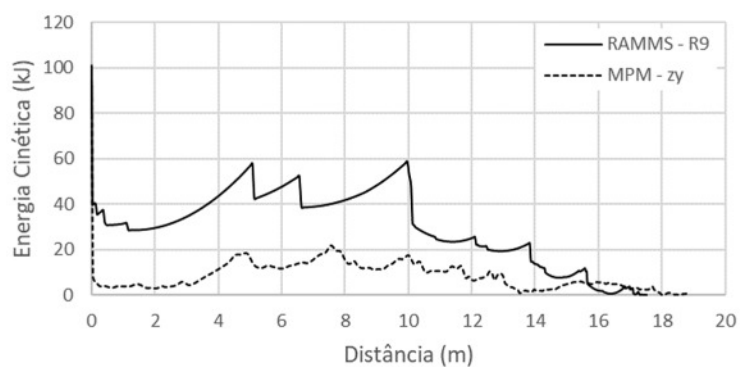


(c)

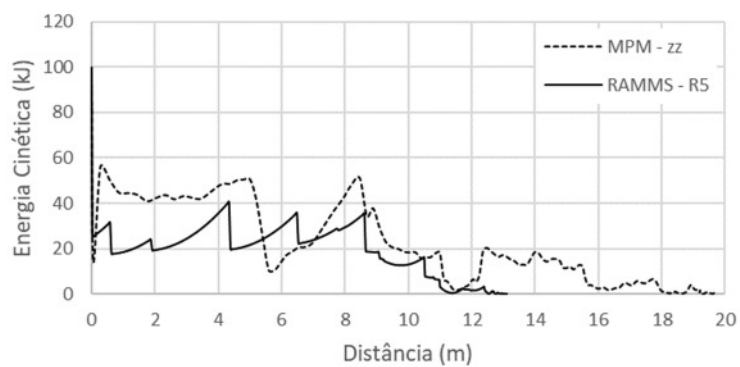
Figura 3.72: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo equant (a) long (b) e flat (c) - Cenário 2 - Categoria: Medium



(a)



(b)



(c)

Figura 3.73: Comparação entre as curvas de energia cinética RAMMS x MPM dos blocos tipo *equant* (a) *long* (b) e *flat* (c) - Cenário 2 - Categoria: *Hard*

Assim como nas simulações com os blocos cúbicos, nas simulações com rochas de formato irregular utilizando o MPM, os blocos percorrem maiores distâncias quando comparadas com o RAMMS, conforme pode ser verificado na Tabela 3.13. Na categoria *Hard*, considerando os resultados do RAMMS, os blocos possuem maior alcance quando comparados com a categoria *Medium*, o que não ocorre no MPM, onde, para os blocos do tipo *equant*, a média da distância percorrida na categoria *Medium* é maior que na categoria *Hard*.

Na Tabela 3.14 são apresentadas as médias ($\bar{x}$) das distâncias percorridas pelas 11 trajetórias RAMMS e pelas três trajetórias MPM e seus desvios-padrão (s).

Tabela 3.14 – Média e desvio-padrão do alcance horizontal das trajetórias RAMMS e MPM

	Bloco	RAMMS		MPM	
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
<i>Medium</i>	<i>Equant</i>	13.0	2.1	27.1	1.3
	<i>Long</i>	10.9	2.5	14.0	4.0
	<i>Flat</i>	10.1	2.3	17.8	4.9
<i>Hard</i>	<i>Equant</i>	14.5	2.0	21.9	3.3
	<i>Long</i>	11.9	2.8	19.8	1.6
	<i>Flat</i>	11.5	1.4	22.5	2.5

No MPM, assim como RAMMS, também é possível verificar as alterações geradas na trajetória, de acordo com a orientação de liberação do bloco. Os blocos *flat* e *long* apresentam maiores dispersões nas distâncias percorridas durante a queda, enquanto a dispersão para o bloco *equant* é menor na categoria *Medium*. A baixa dispersão para blocos *equant* era esperada, em comparação com as outras geometrias, uma vez que esse formato se aproxima razoavelmente de uma geometria esférica. Curiosamente, esse comportamento não é verificado na categoria *Hard*, onde trajetórias para o bloco *equant* apresentam um maior valor de desvio-padrão que as demais geometrias. Esse comportamento inesperado pode ser explicado pelo fato de que, por se tratar de uma superfície mais rígida, ao impactar o solo, o bloco salta e as rugosidades da superfície do bloco as fazem saltar em diferentes direções.

Quando considerado o cenário onde os blocos possuem a mesma orientação de saída, os blocos do tipo *long* são os que apresentam as trajetórias mais próximas em ambos os métodos nas duas categorias de terreno. Em todas as análises, nos primeiros metros de trajetória, o RAMMS e o MPM apresentam trajetórias bem próximas, sofrendo desvios ao longo do percurso de queda. Em relação à dissipação de energia, os gráficos demonstram boa coincidência, principalmente para os blocos *equant*, quando ainda se encontram em movimento na superfície do talude. Quando esses blocos chegam na região horizontal do modelo, o MPM dissipa a energia de maneira menos efetiva que o RAMMS e o bloco rola com baixa energia por uma distância considerável antes de atingir o repouso.

No Cenário 2, a comparação entre trajetórias que possuem a menor diferença entre as distâncias percorridas pelo bloco para os dois métodos não leva em consideração a orientação de saída do bloco; porém é possível fazer algumas análises comparando as trajetórias. Primeiramente, os blocos *equant*, *long* e *flat* no MPM percorrem longas distâncias mesmo com baixos níveis de energia cinética. Alguns casos apresentam curvas de energia razoavelmente próximas, como os blocos *long* e *flat*, da categoria *Medium* e *equant* da categoria *Hard*. Para descrever melhor como o MPM avalia a influência da orientação de saída e dissipação de energia, é necessário analisar as curvas de energia cinética para cada bloco, considerando as três diferentes orientações utilizadas neste estudo.

As Figuras 3.74 e 3.75 apresentam como uma simples mudança na orientação de saída dos blocos pode interferir na variação da energia cinética durante o processo de queda.

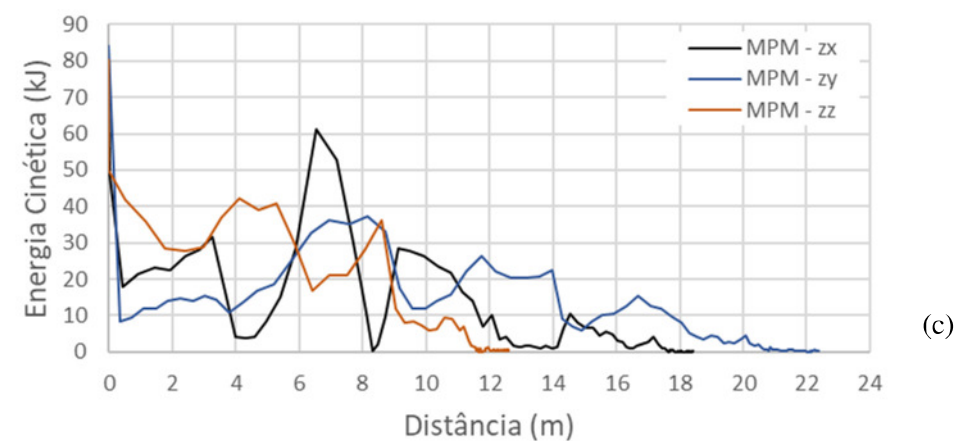
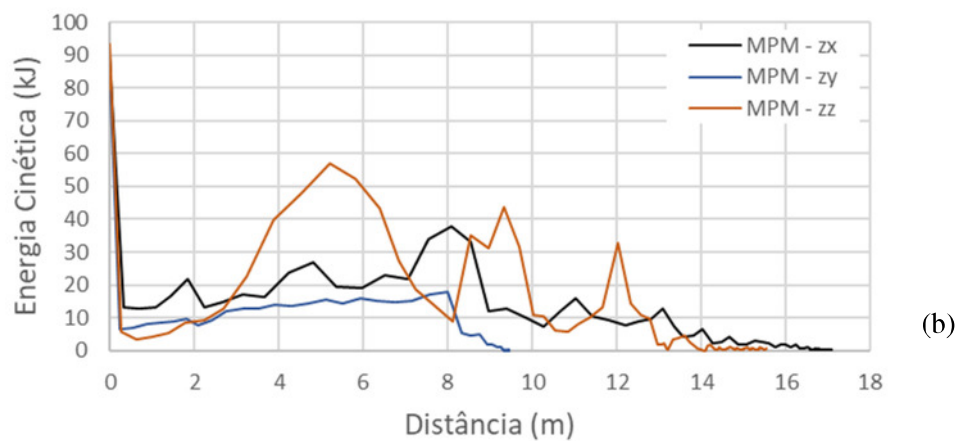
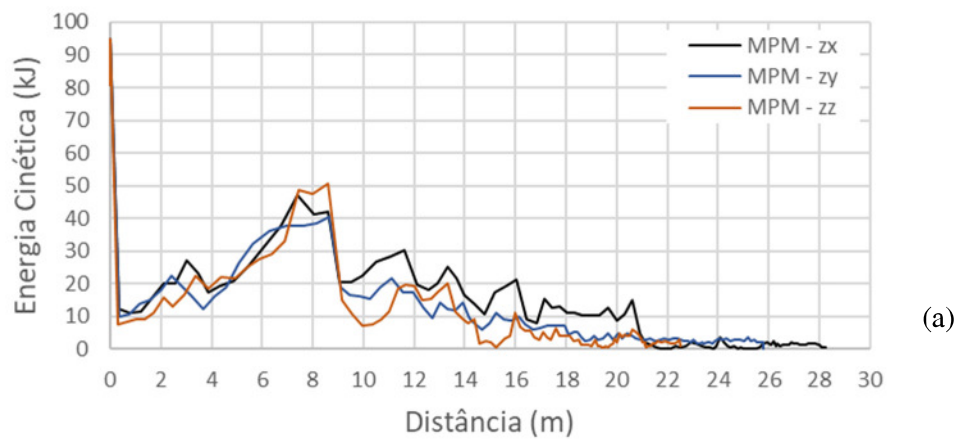


Figura 3.74: Variação da energia cinética em relação a orientação de saída dos blocos *equant* (a) *long* (b) e *flat* (c) - Categoria: *Medium*

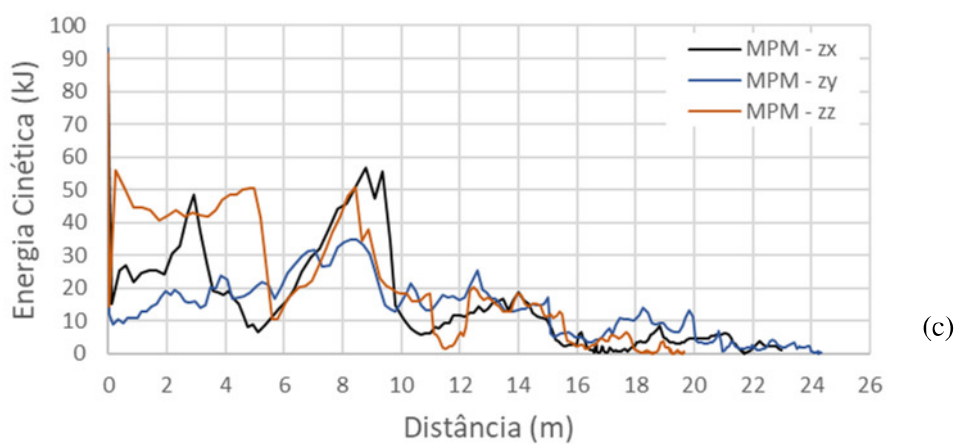
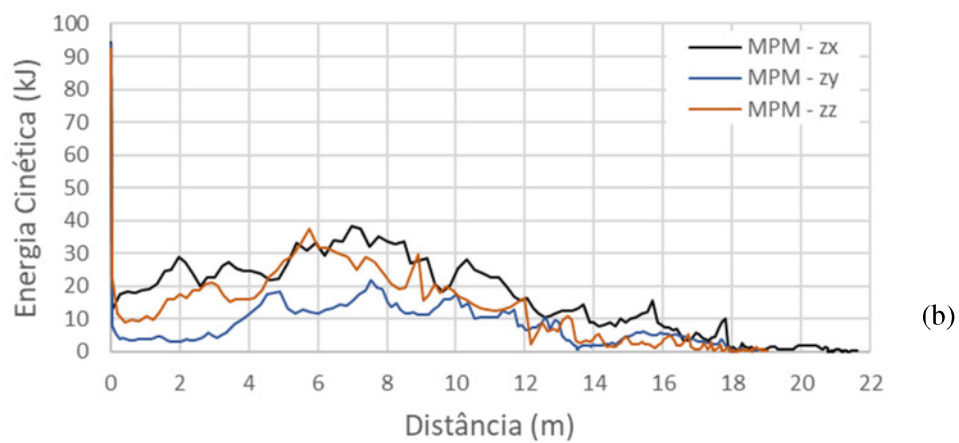
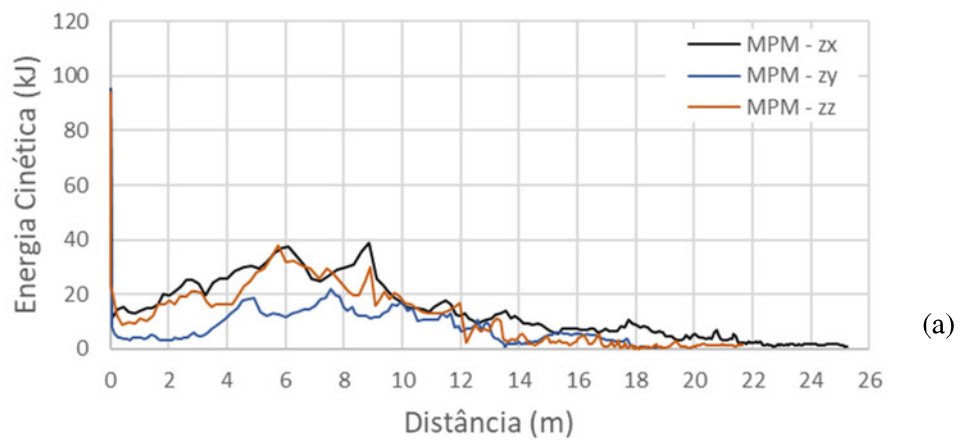


Figura 3.75: Variação da energia cinética em relação a orientação de saída dos blocos *equant* (a) *long* (b) e *flat* (c) - Categoria: *Hard*

A mudança na orientação de saída do bloco não apresenta diferenças muito significativas para os blocos *equant*. Entretanto, em blocos com formato *flat* e *long* pode representar uma variação de energia, em um mesmo trecho, até 5 vezes maior, conforme o verificado para em blocos *flat*, categoria *Hard*, nos primeiros metros percorridos. A mudança na orientação também implica no movimento desenvolvido pela rocha durante a trajetória de queda, o que influencia fortemente como se dá a dissipação de energia e, conseqüentemente, o alcance do bloco. Esse comportamento pode ser visto no exemplo do bloco com formato tipo *long*, quando comparados os resultados das orientações ZY e ZZ. Enquanto que na orientação ZY o bloco desliza por quase todo o seu percurso, na ZZ ele desenvolve movimento de rolamento ao longo da superfície.

3.3 Conclusões

O capítulo discorreu sobre a influência de diversos parâmetros na simulação de processos de queda de blocos de rocha, utilizando o Método do Ponto Material, assim como os critérios a serem adotados na definição de um modelo e como estes também podem modificar os resultados. Vários fatores podem interferir nos resultados dessas simulações, como o material do terreno, a geometria do talude, o formato do bloco, sua orientação e velocidade.

Em relação ao material do terreno, é comum pensar que quanto mais resistente for o material do terreno, menor seria a dissipação de energia e maior o alcance dos blocos; porém nem sempre isso se reflete nas simulações. Nas análises da influência dos parâmetros de elastoplástico do solo, alguns casos divergem dessa concepção. Há casos em que, por conta da baixa resistência do material, após o impacto, o talude sofre uma ruptura global e o bloco se move junto com a massa rompida (Figura 3.8). Ou ainda casos em que o bloco em queda atinge o talude de maneiras menos favoráveis à dissipação de energia mesmo para solos menos competentes (Figura 3.28 (c)). Além disso, a rigidez considerada para o solo influencia na forma da cicatriz do escorregamento, e o solo mais rígido não permite que o bloco deforme a crista do escorregamento o suficiente para transpô-la e seguir em movimento (Figura 11). A rigidez do modelo também é afetada pela discretização utilizada para a malha Euleriana (Figuras 3.18 e 3.19)

Considerar o formato dos blocos é fundamental para a análise das trajetórias, tanto nos modelos bidimensionais como nos tridimensionais. Os blocos circulares ou esféricos naturalmente irão alcançar maiores distâncias em suas trajetórias. Porém, o formato do bloco também pode favorecer uma maior penetração no talude, diminuindo sua energia cinética até o ponto de, em alguns casos, atingir o repouso logo após o impacto, conforme visto na Figura 3.13 (d), para um modelo bidimensional.

Dos três tipos de blocos utilizados nas simulações tridimensionais com o MPM, aqueles com formato *equant* são mais móveis para a categoria *Medium* (Solo residual de gnaiss) enquanto as com formato *flat* são mais móveis para a categoria *Hard* (Filito alterado). O RAMMS apresenta os blocos *equant* como os mais móveis e os *flat* como os menos móveis em ambas as categorias. Contudo, o número de trajetórias utilizadas no RAMMS foi superior ao MPM. Esse fato pode ser explicado pela velocidade angular desse bloco durante a queda, que está relacionada ao eixo inercial em torno do qual a rocha gira. Como as orientações de saída foram definidas com base nos eixos principais dos blocos de acordo com os pontos da biblioteca de blocos do RAMMS, a menor dissipação de energia nas interações rocha-solo proporciona bloco rolar em torno do eixo de maior inércia, que favoreceu uma maior mobilidade para esse tipo de formato.

Mantendo os parâmetros elastoplásticos do terreno constante, a forma da rocha e a variação de sua orientação de saída possuem forte influência no alcance dos blocos, na dinâmica e na dispersão das trajetórias de queda de blocos de rocha. Sendo assim, a escolha adequada dos parâmetros utilizados nas simulações é fundamental na análise numérica de queda de blocos de rocha.

O MPM simula com competência eventos de queda de bloco de rocha quando comparado com o RAMMS, sendo necessária uma escolha bem refinada dos parâmetros do terreno para obter uma certa proximidade nos resultados. Porém, conforme visto em alguns casos, o bloco rola por distâncias consideráveis mesmo com baixa energia cinética, o que sugere a necessidade de implementação de algum mecanismo de resistência ao rolamento para aprimorar a simulação.

4

Estudo de caso – Talude ferroviário em Vassouras/RJ

O estudo se concentra em um talude rochoso às margens do km153+400 da Linha Centro, ferrovia sob concessão da MRS Logística, no município de Vassouras, centro-sul do estado do Rio de Janeiro. No talude em questão, para evitar a queda de blocos de rocha, inicialmente foi executado um projeto de estabilização com face em tela metálica na base do talude, onde fora realizado um corte vertical. No entanto, após o mapeamento da área, foram identificados, ao longo da superfície do talude, blocos com risco de desprendimento que deveriam ser estabilizados ou removidos.

A maioria dos blocos possuíam volumes de até 1m^3 , também havia blocos de volume de até $2,3\text{m}^3$ com algumas fraturas que poderiam resultar em menores fragmentos e uma grande lasca com aproximadamente 7m^3 . Para proteger a linha férrea de um eventual acidente envolvendo a queda de um bloco, foi instalado um sistema de barreiras flexíveis capaz de suportar o impacto desses blocos. Na Figura 4.1, é possível visualizar a face do talude, o corte vertical em sua base, onde foi instalada a tela metálica, a linha de barreiras flexíveis e a ferrovia. A Figura 4.2 apresenta uma vista superior da área de estudo.



Figura 4.1 – Talude rochoso às margens da linha férrea [98]



Figura 4.2 – Vista superior da área de estudo [98]

Durante o levantamento topográfico da região, foi identificada uma área crítica de escorregamento com alta concentração de blocos (Figura 4.3). Nesta área, dentre os blocos mapeados, havia uma grande lasca com volume aproximado de 7m^3 com risco de desprendimento, que será objeto deste estudo. (Figura 4.4)

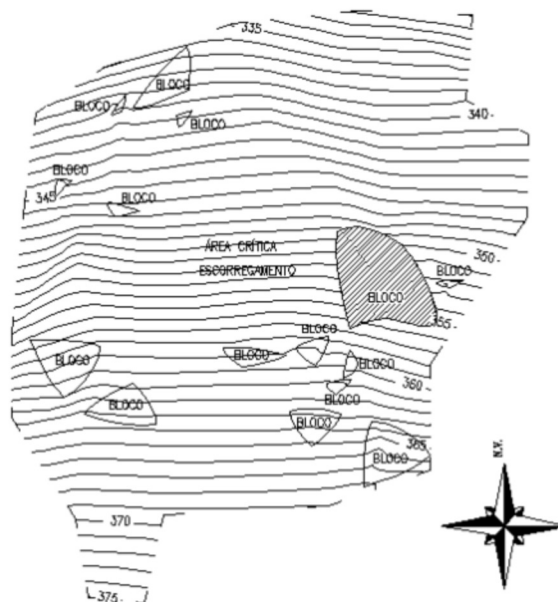


Figura 4.3 – Área crítica de escorregamento e hachurada a lasca com 7m^3 [98]



Figura 4.4 – Bloco com risco de desprendimento [98]

Após um estudo sobre as trajetórias, a energia cinética e as alturas de salto que a lasca poderia alcançar durante sua queda [98], optou-se, como solução de engenharia, pela estabilização do bloco com chumbadores. O objetivo deste estudo é avaliar, através do Método do Ponto Material e comparando com os resultados obtidos com o RAMMS, a real necessidade de estabilizar o bloco no local ou se a barreira flexível instalada no talude seria capaz de absorver a energia de impacto da lasca durante um eventual desprendimento. Para tal, é necessária a revisão da metodologia utilizada para definir a solução adotada particularmente para esse bloco e uma modelagem consistente do terreno e do bloco.

4.1. Modelagem do terreno

O levantamento de dados do talude foi realizado com o auxílio de um drone, sendo mapeadas as posições e dimensões dos blocos e os dados de elevação do terreno. A partir do levantamento topográfico e das curvas de nível do talude, foi gerado o modelo digital de elevação do terreno (Figura 4.5).

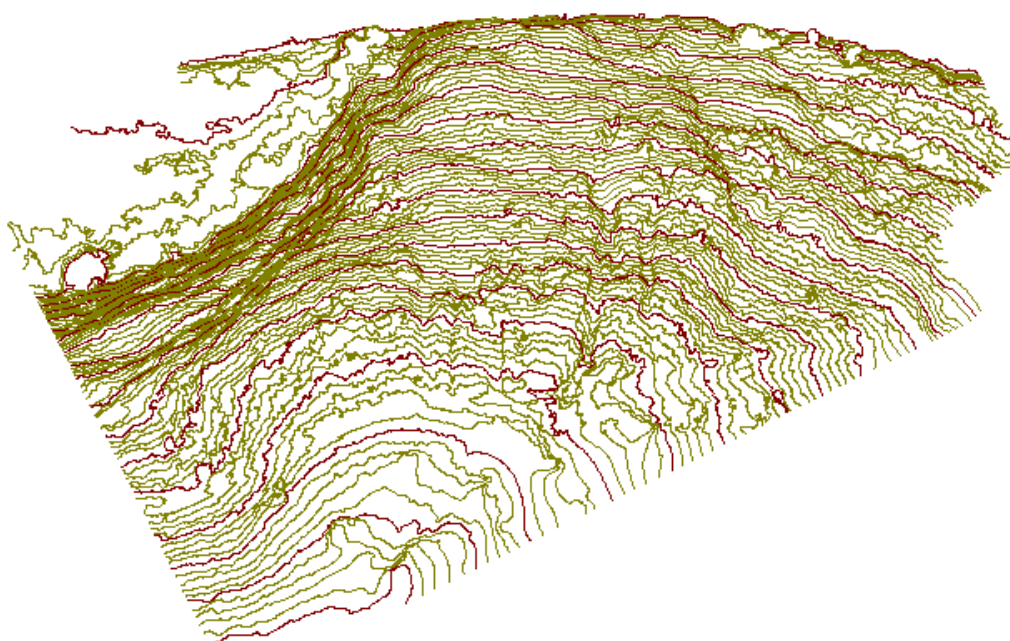


Figura 4.5 – Curvas de nível do terreno

O arquivo com as curvas de nível foi carregado em um programa de visualização, edição e análise de dados georreferenciados, neste trabalho foi usado o QGIS, e convertido de camada vetorial para uma camada raster, onde cada pixel possui um valor de elevação. A Figura 4.6 apresenta a camada raster obtida a partir das curvas de nível do talude.

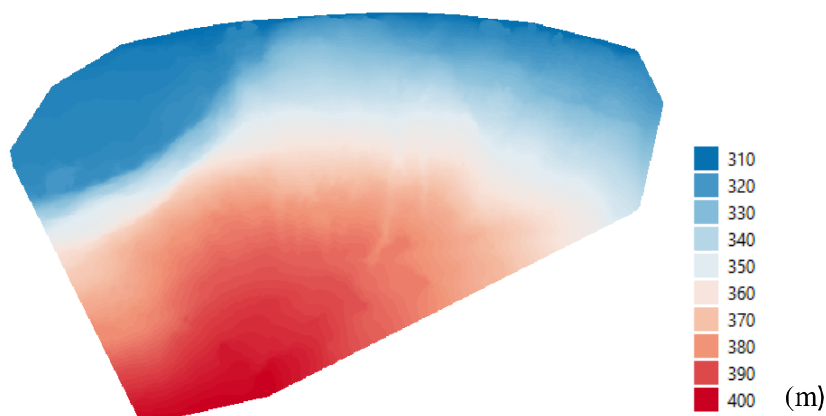


Figura 4.6 – Raster do terreno

A camada rasterizada pode ser salva em diferentes formatos de modelo digital de elevação. A partir do modelo digital de elevação, é possível gerar as partículas que irão formar a superfície tridimensional do talude no modelo MPM utilizando um gerador de partículas. O mesmo modelo digital de elevação é inserido no RAMMS para a modelagem do terreno.

4.2 Simulações – MPM-PUCRio

4.2.1 Gerador de partículas PUC-Rio/MPM-Particle-Generator

O gerador de partículas PUC-Rio/MPM-Particle-Generator [99] é um programa de código aberto que permite a criação de modelos numéricos MPM tridimensionais com base nas curvas de nível do terreno e na elevação de cada material, para incluir e considerar eventuais heterogeneidades. A metodologia implementada no gerador possui três características principais: a construção do modelo MPM é baseada apenas no modelo digital de elevação; não são necessárias malhas de elementos finitos durante o processo; e as heterogeneidades são definidas pelos dados de elevação de cada material [100].

A Figura 4.7 apresenta a metodologia desenvolvida por Fernández (2019) [100] para configurar modelos MPM heterogêneos tridimensionais. Para construir o modelo MPM é necessário, inicialmente, ter o Modelo Digital de Elevação do terreno a ser modelado e os dados de elevação para cada material do domínio do modelo (a). Para cada ponto do Modelo Digital de Elevação, as partículas são distribuídas em uma caixa imaginária, chamada de caixa estratigráfica, que está centrada em cada ponto do MDE, onde a base da caixa é o limite inferior do modelo e o topo é a elevação do terreno em cada ponto (b). Quando o modelo for homogêneo, somente é necessário o raster de dados do terreno e o modelo é criado com um número de caixas igual ao número de dados MDE do terreno. Para modelos heterogêneos, além dos dados de elevação para cada material, é necessário definir corretamente o material das partículas nas caixas estratigráficas durante o processo de construção do modelo. Dessa forma, as partículas são distribuídas dentro de cada caixa estratigráfica, levando em consideração a elevação de cada material que compõe o modelo (c).

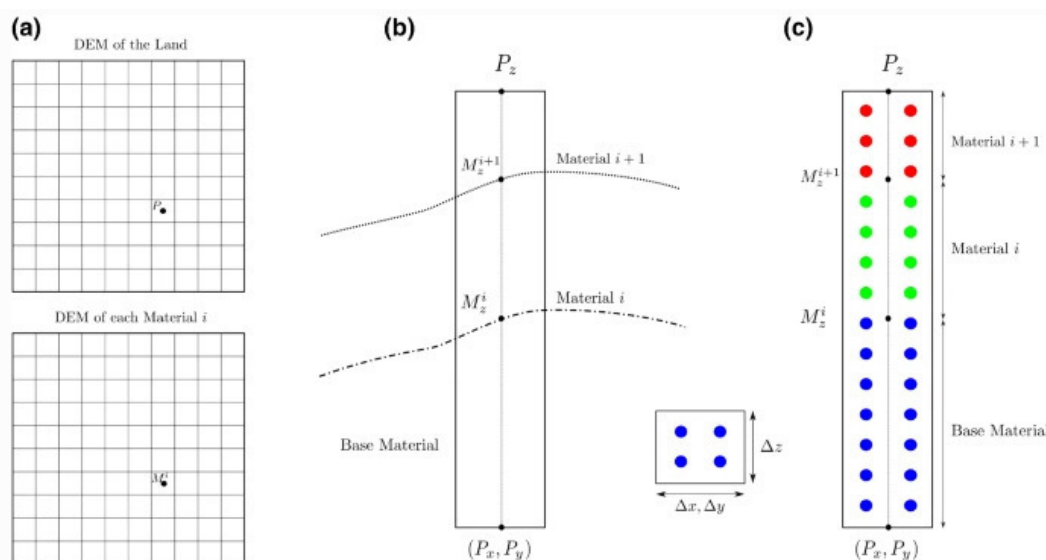


Figura 4.7 – Fluxo de trabalho para configurar modelos tridimensionais heterogêneos de escala geológica [100]

4.2.2.
Discretização MPM do talude ferroviário de Vassouras-RJ

Antes de modelar o terreno com o gerador de partículas MPM, o raster com os dados de elevação foi recortado em uma região de interesse na qual se desenvolve o processo de queda e reprojetoado para que cada pixel tivesse 1.0m de dimensão (Figura 4.8). Os dados da área recortada devem ser salvos em um arquivo de texto que contenha a posição e a altitude de cada ponto.

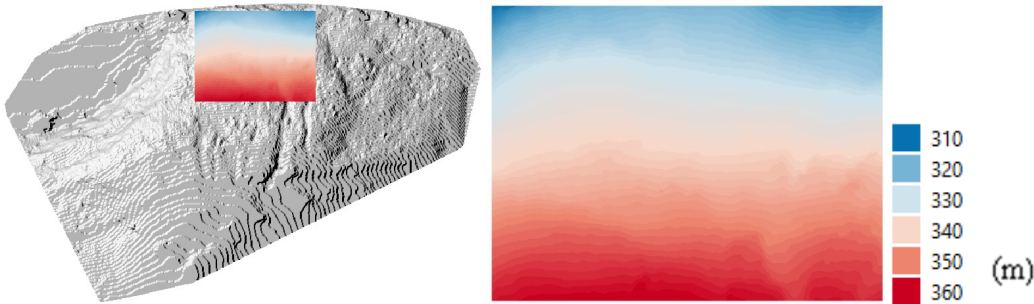


Figura 4.8 – Recorte e reprojeção do raster

Com os dados do raster, elabora-se o arquivo de entrada para que o gerador construa o modelo. A Figura 4.9 apresenta o trecho inicial do arquivo de entrada utilizado para modelar o terreno deste estudo.

1	%DEM.TO.MPM							
2	2352							
3	0.5	0.5	311	300	1	1	1	1
4	1.5	0.5	312	300	1	1	1	1
5	2.5	0.5	314	300	1	1	1	1
6	3.5	0.5	315	300	1	1	1	1
7	4.5	0.5	315	300	1	1	1	1
8	...							

Figura 4.9 – Extrato do arquivo de entrada do modelo MPM do terreno

Na primeira linha do arquivo, a palavra-chave *%DEM.TO.MPM* informa ao gerador a operação que deve ser realizada. Na segunda linha é informado o número de caixas estratigráficas; nesse caso foram usadas 2352 caixas. Nas linhas seguintes são descritas as informações das caixas seguindo a sequência: pos_x pos_y pos_z zbase dx dy dz matid. Onde pos_x pos_y são as coordenadas dos dados do MDE (aqui foram usadas coordenadas relativas); pos_z e zbase são as coordenadas de elevação máxima e mínima, respectivamente, da caixa; dx, dy e dz são as dimensões da caixa; e matid é a identificação do material.

Apesar do talude por inteiro possuir diferentes camadas, a região recortada para a análise foi considerada homogênea, dessa forma, não foi necessário definir os diferentes números de horizontes nem seus dados. Por fim, após executar o arquivo de entrada pelo gerador de partículas, o modelo tridimensional discretizado do terreno foi criado (Figura 4.10). Foram geradas 565336 partículas.

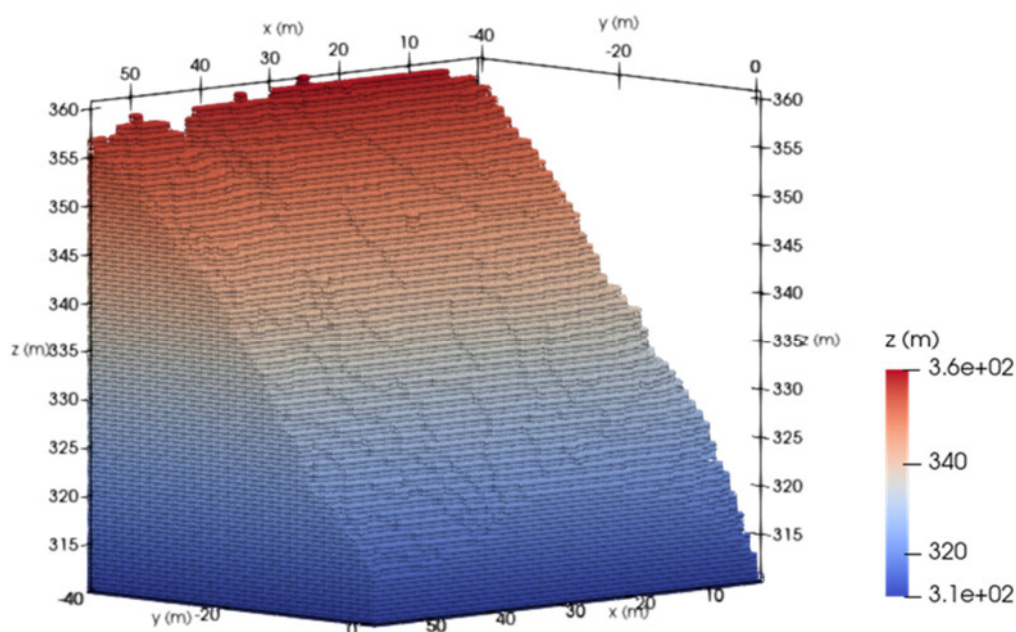


Figura 4.10 – Modelo MPM discretizado da área de estudo do talude de Vassouras/RJ – Elevações das partículas

4.2.3

Material do terreno

O talude possui superfície rochosa formada por um gnaisse. Há uma grande quantidade de blocos em toda a extensão área do talude. Há uma área plana na base da encosta coberta de solo. Todo o talude é coberto por uma fina camada de vegetação rasteira.

Não há dados sobre os parâmetros elastoplásticos dos materiais. Dessa forma, foram utilizados os parâmetros de Mohr-Coulomb correspondentes à categoria *Hard* do RAMMS::Rockfall, conforme definido na Tabela 3.7. A região plana localizada na base do talude pode ser encaixada na categoria *Medium*, contudo essa área não foi considerada na simulação por não influenciar nos resultados.

4.2.4

Modelagem do bloco- MPM

Para a modelagem do bloco, foi utilizada uma malha auxiliar de elementos finitos. A nuvem dos pontos foi obtida através da ferramenta Rock Builder do software RAMMS::Rockfall. Como não se dispunha da real nuvem de pontos do bloco, foi escolhida uma rocha do tipo *flat* com o formato mais próximo ao verificado no levantamento de campo.

A metodologia para modelagem do bloco foi igual à utilizada no capítulo anterior. A malha gerada no GMSH é carregada no MPMPUC-Rio onde as partículas são distribuídas nos centros dos tetraedros (Figura 4.11). O bloco modelado possui 7m³ de volume e massa de 18,9x10³kg. O bloco está posicionado no ponto (25.3, -36.0) do sistema de coordenadas relativas do modelo, na altitude de 357m.

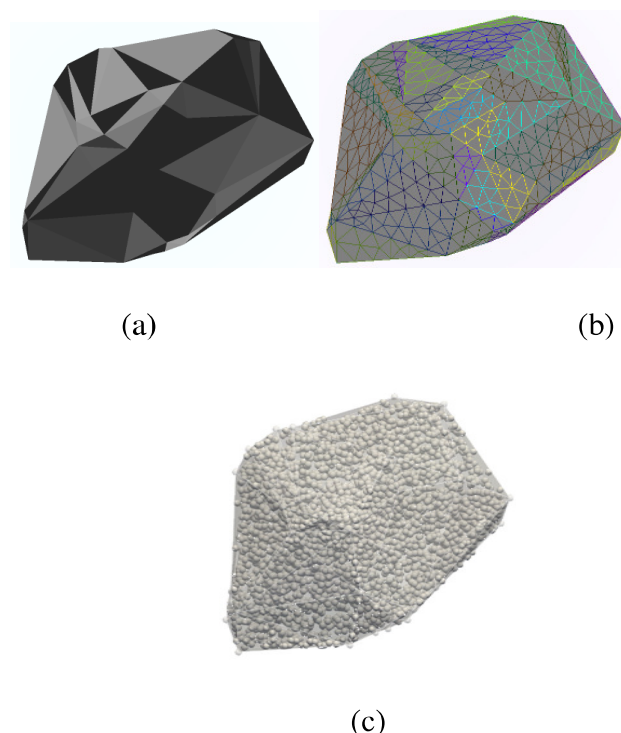


Figura 4.11 – Modelagem do bloco: (a) volume criado a partir da nuvem de pontos fornecida pela ferramenta Rock Builder ; (b) malha auxiliar de elementos finitos e; (c) distribuição dos pontos materiais

4.2.5

Dados de entrada

As simulações iniciais que definiram a necessidade de estabilização do bloco partiram do pressuposto de que quando lascas giram em torno do eixo de maior inércia, em um movimento similar ao de uma roda, a energia cinética é maior do que a de blocos esféricos. Esse comportamento foi verificado na Seção 3.2.10, em que os blocos de formato *equant* tiveram média de alcance menor que blocos *flat*. Contudo, para a realidade do talude estudado, é provável que não haja espaço suficiente para o movimento culminar nessa condição de “roda”.

Para a análise com o MPM, foram definidas seis orientações iniciais, de acordo com os semieixos do bloco e denominadas M1, M2, ..., M6 (Figura 4.12). Também foi definida uma velocidade de saída dos blocos de 5.0m/s. O bloco foi definido como material linear elástico, enquanto o talude como um material elastoplástico de Mohr-Coulomb. Os dados da simulação estão resumidos na Tabela 4.1.

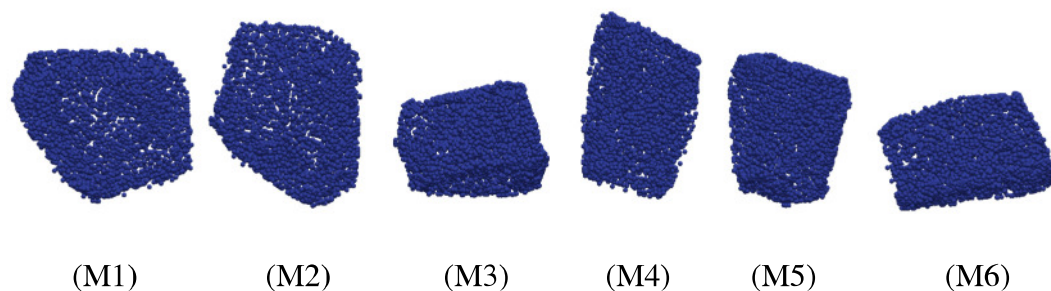


Figura 4.12 – Orientações iniciais do bloco - MPM

Tabela 4.1 – Dados da simulação - MPM

Malha Euleriana	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	1.0	m
Aceleração da gravidade	g_z	9.81	m/s ²
<i>Parâmetros do Talude</i>			
Módulo de Young	E	100	MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.25	-
Massa específica	ρ	2000	kg/m ³
Coesão	c	159	kPa
Ângulo de Atrito	ϕ	33.7	°
Fator de redução de resistência	SRF	60	%
n° de partículas	—	565336	partículas
<i>Parâmetros da Rocha</i>			
Módulo de Young	E	100	MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.2	-
Massa específica	ρ	2700	kg/m ³
Volume	V	7.0	m ³
n° de partículas	—	3770	partículas

4.3

Simulações – RAMMS::Rockfall

O Modelo Digital de Elevação, salvo na extensão *.asc*, é carregado no RAMMS::Rockfall e o programa gera a superfície tridimensional do talude (Figura 4.13). Em seguida, é necessário definir o ponto de partida do bloco. O bloco parte da posição (651105.3, 7535929.0) do sistema de coordenadas UTM 23S, com altitude de 357m. Essa posição corresponde a mesma utilizada na simulação com o MPM.

Apesar da região plana na base do talude não se enquadrar na mesma categoria de material do terreno da superfície do talude, todo o modelo foi definido como sendo material da categoria *Hard*. A área plana, que se encaixaria na categoria *Medium*, é irrelevante nesse estudo, uma vez que os blocos não têm suas trajetórias passando pela região. O arraste de floresta foi considerado desprezível para a simulação.

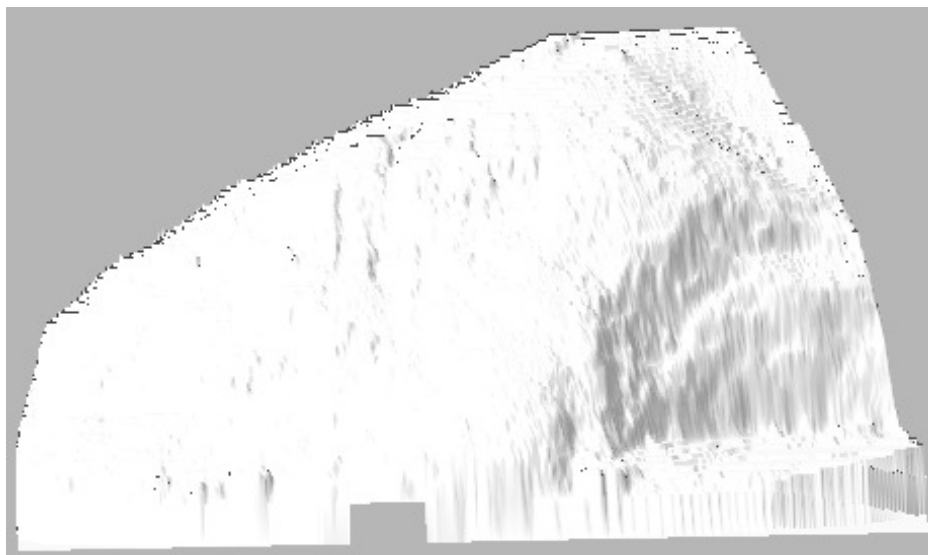


Figura 4.13 – Modelo digital de elevação do terreno inserido no RAMMS

Assim como no MPM, foram definidas 6 diferentes orientações iniciais do bloco. As mesmas nuvens de pontos utilizadas para gerar as malhas dos blocos com o MPM foram utilizadas na ferramenta Rock Builder do RAMMS. As orientações foram denominadas R1, R2, ..., R6 (Figura 4.14) e correspondem às mesmas orientações definidas no MPM (M1=R1).

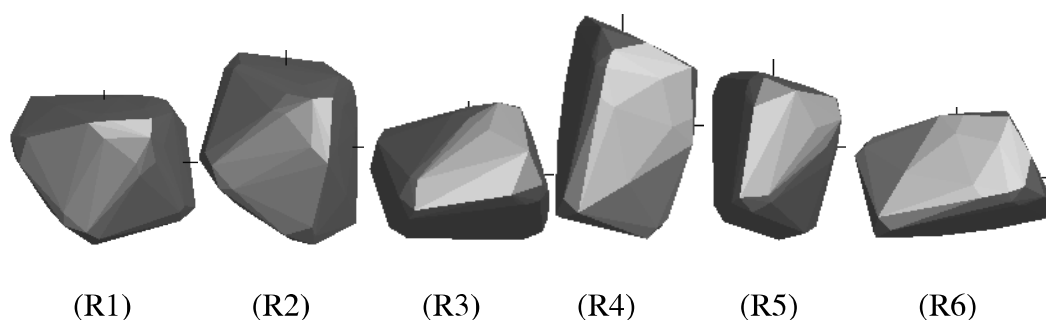


Figura 4.14 – Orientações iniciais do bloco - RAMMS

4.4 Resultados

Os gráficos da imagem 4.15 apresentam a energia cinética do bloco durante a sua trajetória para as seis orientações iniciais de saída. Nos gráficos, as linhas verticais vermelhas cheia e pontilhada representam o corte da barreira no trecho onde a trajetória MPM e RAMMS a cruzam respectivamente.

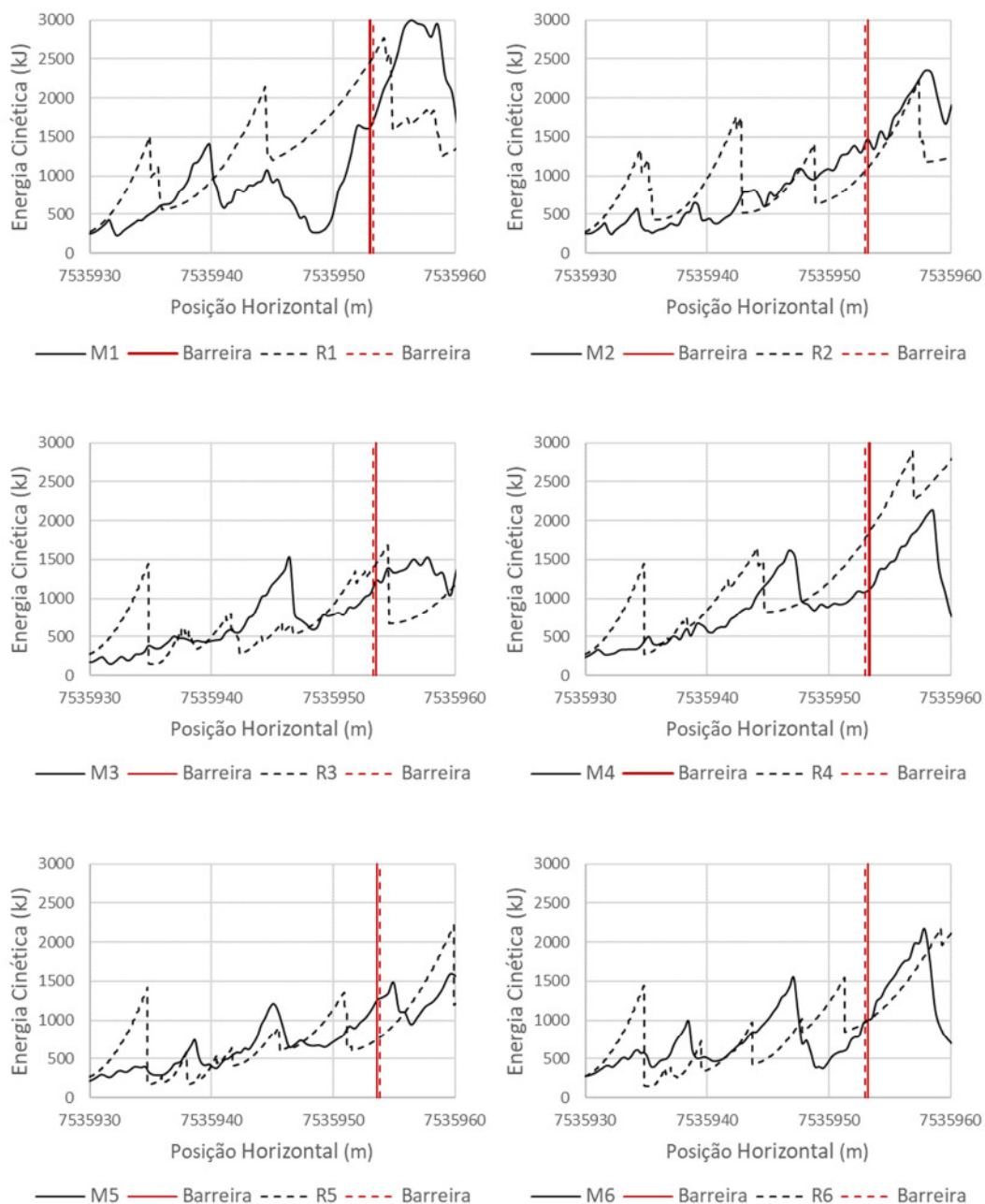


Figura 4.15 – Energia cinética do bloco – MPM x RAMMS

A Figura 4.16 apresenta a posição do bloco durante a trajetória para as diferentes orientações iniciais. Nas Tabelas 4.2 e 4.3, estão resumidos os dados necessários para a verificação da capacidade da barreira de absorver o impacto do bloco, considerando-se a velocidade inicial definida e orientações adotadas, de acordo com os resultados obtidos através do MPM e do RAMMS.

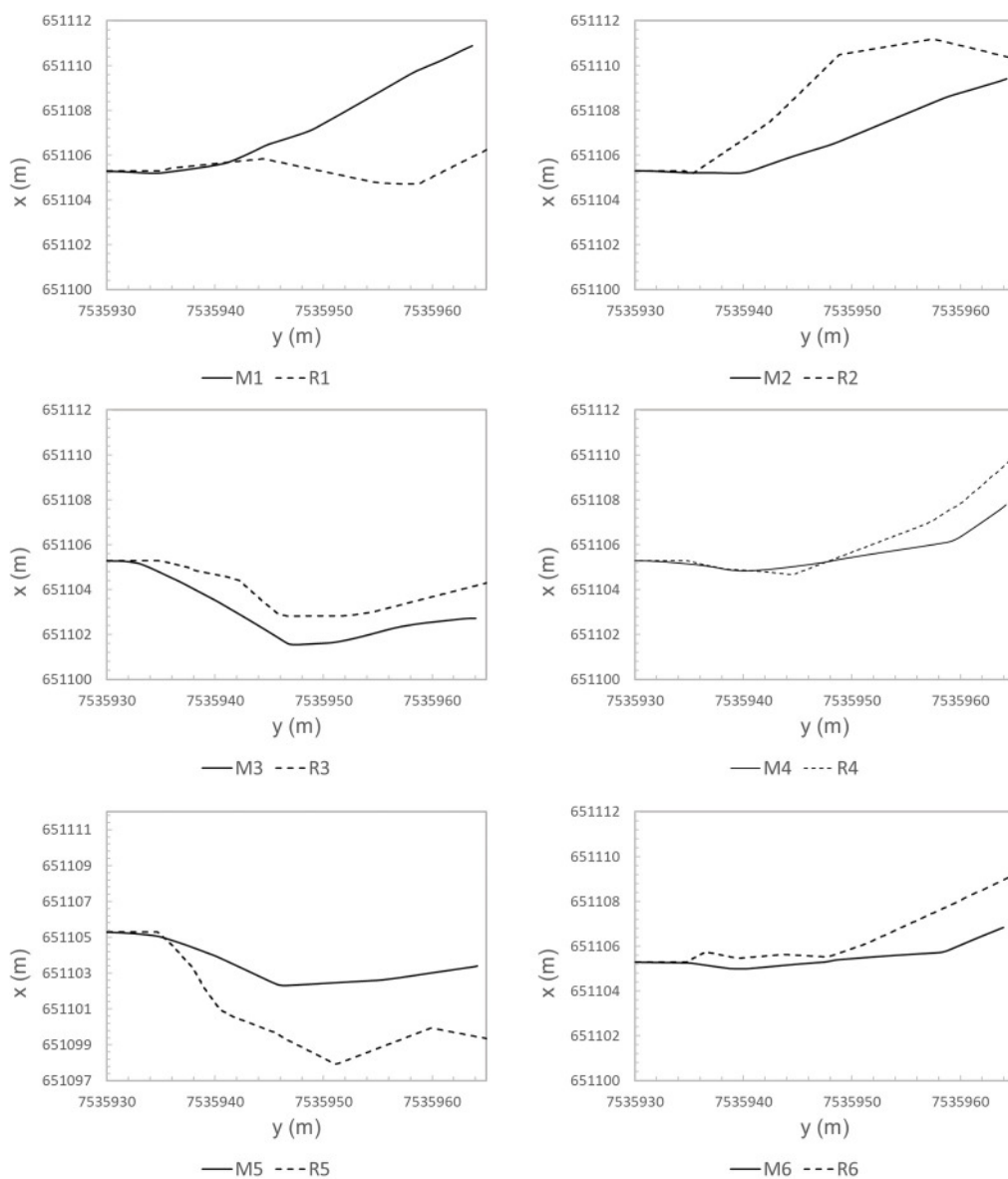


Figura 4.16 – Trajetórias do bloco – MPM e RAMMS

Tabela 4.2 – Resultados da simulação - MPM

	Trajetória						Média	Desvio Padrão
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	$\bar{x}$	s
Energia Cinética Máxima (kJ)	2994	2354	1548	2122	2163	2170	2225	466
Energia Cinética de Impacto na Barreira (kJ)	1621	1476	1236	1110	1263	1007	1285	228
Velocidade Máxima (m/s)	17.8	15.7	12.8	14.9	15.1	15.1	15.2	1.6
Velocidade de Impacto na Barreira (m/s)	13.0	12.5	11.4	10.8	11.5	10.3	11.6	1.0
Altura de Impacto na Barreira (m)	6.3	6.1	5.0	6.0	5.1	5.8	5.7	0.5

Tabela 4.3 – Resultados da simulação - RAMMS

	Trajetória						Média	Desvio Padrão
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	$\bar{x}$	s
Energia Cinética Máxima (kJ)	2761	2222	2887	3687	2214	2625	2733	543
Energia Cinética de Impacto na Barreira (kJ)	2523	1072	1399	1782	776	973	1421	646
Velocidade Máxima (m/s)	16.2	14.8	17.0	17.9	14.8	15.1	16.0	1.3
Velocidade de Impacto na Barreira (m/s)	15.4	9.9	10.7	13.0	8.2	9.0	11.0	2.7
Altura de Impacto na Barreira (m)	3.4	4.0	3.2	5.4	4.1	3.6	4.0	0.8

Na Figura 4.17 estão apresentados os gráficos com as médias e os desvios padrão para cada um dos métodos utilizados, considerando as variáveis listadas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

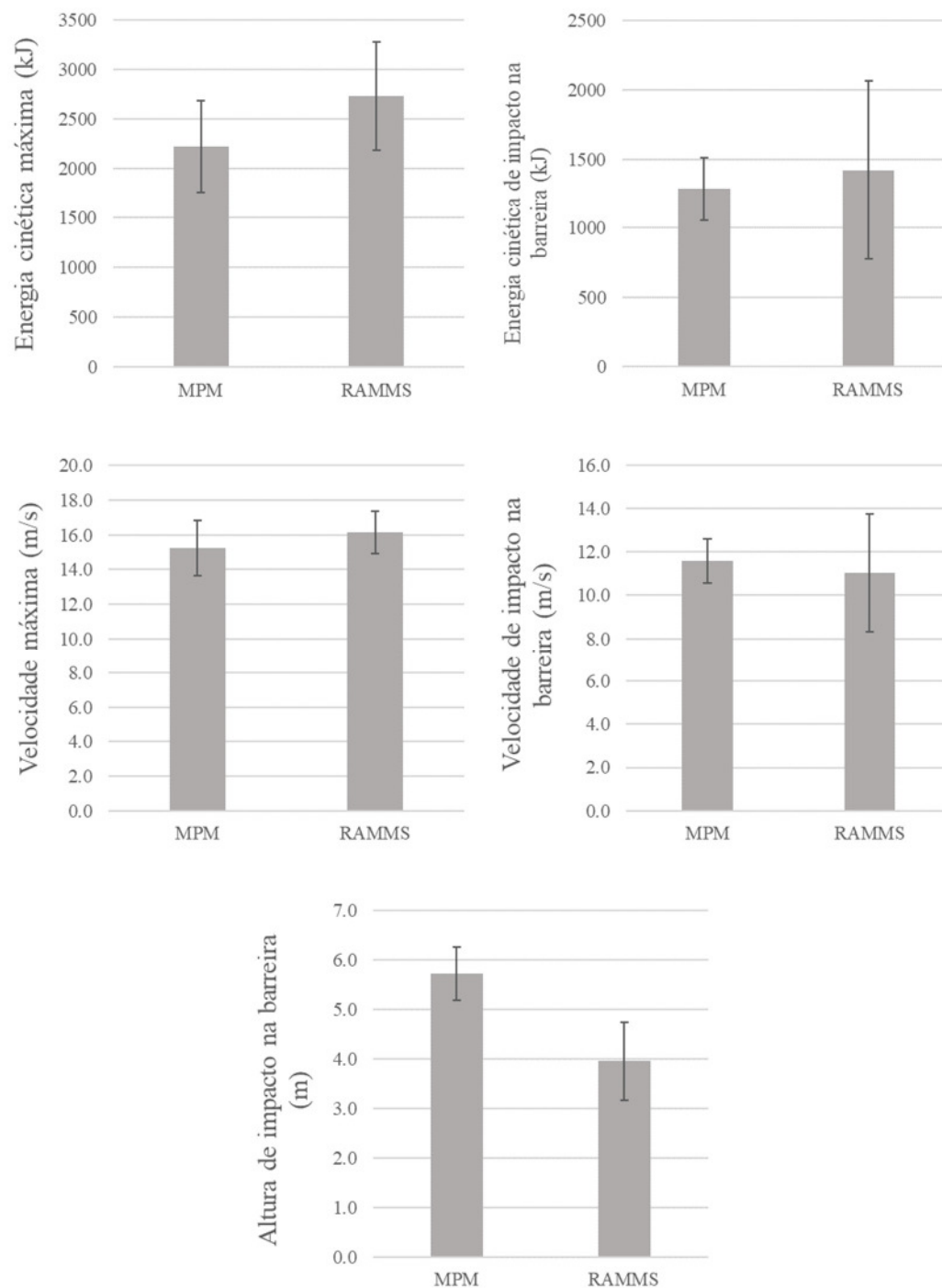


Figura 4.17 – Médias e desvios padrão – MPM x RAMMS

A Figura 4.18 mostra as deformações plásticas oriundas da sequência de impactos do bloco com o talude para as trajetórias MPM até o momento em que o bloco alcança a barreira. Para cada orientação de saída, o bloco atinge a barreira em um determinado instante de tempo, que está especificado em cada uma das imagens.

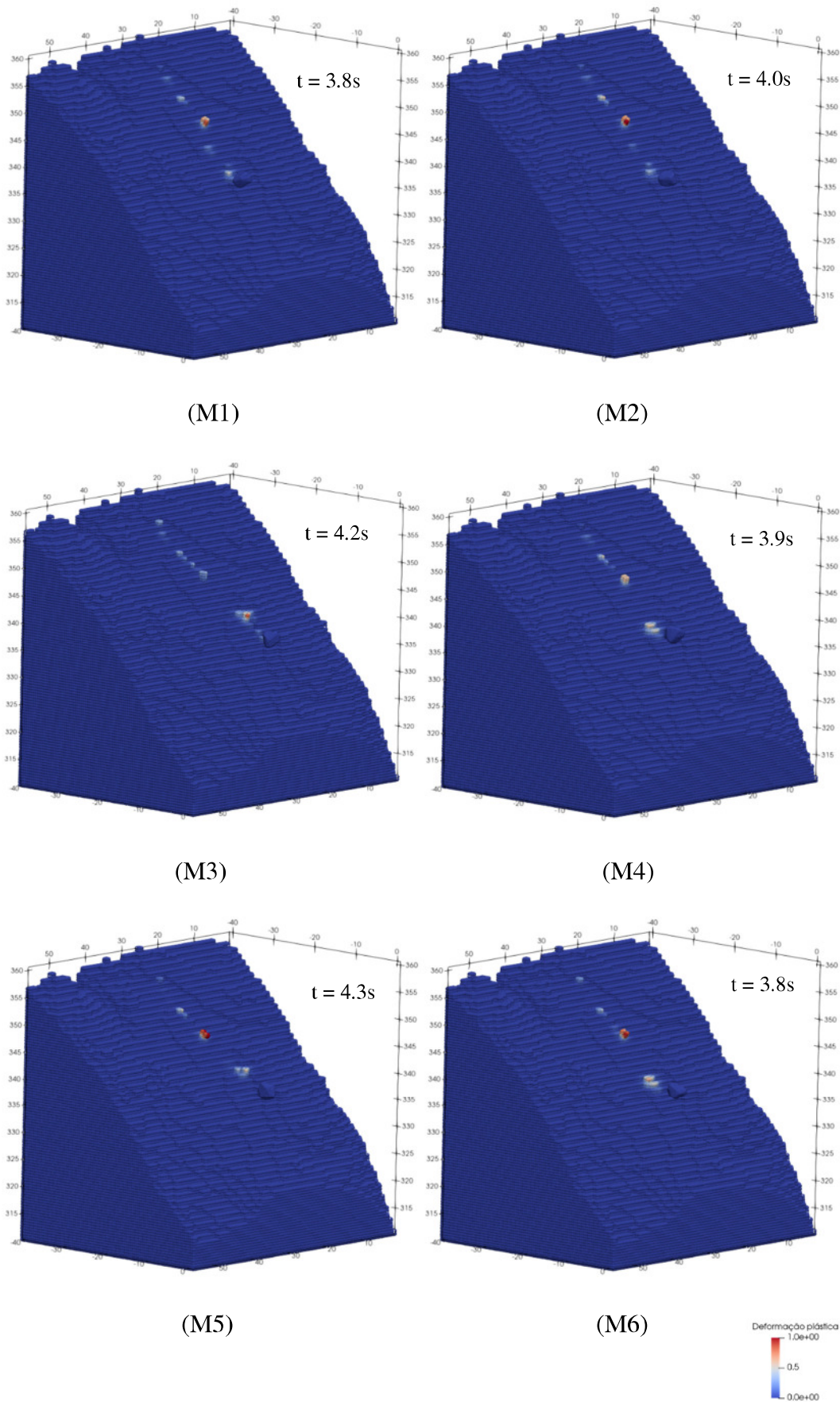


Figura 4.18 – Deformações plásticas decorrentes dos impactos do bloco contra o talude

4.5

Discussões e conclusões

Considerando os resultados obtidos das simulações de queda do bloco com os critérios adotados neste estudo, é possível concluir que os resultados podem ser considerados conservadores, uma vez que, dificilmente, o bloco irá iniciar seu movimento com uma velocidade tão elevada; contudo, foram adotados para iniciar o movimento do bloco. Para valores menores, o bloco não muda sua posição.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é que a simples mudança da orientação de saída do bloco pode influenciar no tipo de movimento que o bloco desenvolve durante a queda. Para quase todas as orientações de saída, o bloco se movimenta aos saltos durante a queda. Contudo, para a orientação M3, o bloco rola sobre um trecho do talude até atingir uma saliência topográfica, onde o tipo de movimento passa de rolamento para salto.

Quando comparadas as trajetórias dentre o MPM e do RAMMS (ver Figura 4.16), as trajetórias M4-R4 coincidem em, aproximadamente, metade do percurso, divergindo ligeiramente na metade final. O mesmo acontece nas trajetórias M6-R6, entretanto, as trajetórias na metade inicial apesar de bem próximas, não apresentam o mesmo grau de coincidência que a M4-R4. As trajetórias M3-R3 são próximas e possuem mudanças de direção similares nos mesmos trechos. As demais trajetórias apresentam trechos iniciais de coincidência e depois divergem.

A média dos valores de energia cinética de impacto na barreira obtida com o MPM é ligeiramente inferior que a média obtida com o RAMMS (~10%). Porém, a amostra obtida com o RAMMS é mais heterogênea e, dependendo da orientação inicial, a diferença da energia que o bloco impacta a barreira é de até 325%, considerando somente as 6 trajetórias deste estudo. Em relação à altura de impacto, o RAMMS apresenta uma média menor que o MPM, em aproximadamente 30%.

Para a verificação da capacidade das barreiras, foram consideradas as especificações técnicas para barreiras de proteção contra desprendimento da Geobrugg [101-103]. Há barreiras que suportam valores de até 10000kJ de energia de impacto, muito superior ao valor máximo obtido nas simulações. Considerando os resultados obtidos com o MPM, uma barreira que suportasse até 2000kJ

atenderia à solicitação do impacto. Porém, de acordo com os resultados obtidos com o RAMMS, essa barreira estaria subdimensionada e contra a segurança. A classe de barreira imediatamente superior, tem a capacidade de absorção de energia de até 3000 kJ, o que atenderia tanto os resultados do MPM, quanto os do RAMMS.

Contudo, é necessário avaliar também as alturas disponíveis para cada classe de barreiras. O bloco estudado possui sua maior dimensão medindo 3.0m. Considerando-se que a altura da barreira deve ser igual a máxima altura de impacto obtida mais um raio do bloco, deve ser acrescida 1.5m nos valores de altura de impacto obtidos nas simulações.

De acordo com o manual para barreiras de 3000kJ, a máxima altura para essa classe de barreira é de 7.5m, que não atenderia aos resultados do MPM, uma vez que a altura máxima de impacto seria de 7.8m. Para a classe de barreira imediatamente superior, que suporta uma energia de impacto de até 5000kJ, há barreiras com altura de 8.0m e de 9.0m que poderiam ser utilizadas para atender ao problema.

Considerando unicamente os resultados obtidos com o RAMMS, uma barreira com capacidade de absorção de 3000kJ e com altura mínima de 6.0m seria capaz de conter o bloco. Por outro lado, se forem considerados somente os resultados do MPM e desprezando os eventuais 30cm do bloco que ficariam acima da extremidade da barreira, uma barreira de 2000kJ com altura de 7.5m poderia ser utilizada para o mesmo fim.

Contudo, considerando os resultados obtidos pelos dois métodos, uma barreira com capacidade de absorção de impacto de 5000kJ e com altura mínima de 8.0m seria suficiente para conter o bloco em queda. Caso a barreira utilizada atenda esses critérios mínimos, não seria necessária a estabilização do bloco.

5

Considerações Finais

5.1

Conclusões gerais

Nesta seção, serão apresentadas as conclusões finais do trabalho de acordo com os resultados obtidos nos capítulos anteriores. Serão listados uma síntese dos principais pontos levantados ao longo deste trabalho sobre as análises de sensibilidade dos parâmetros utilizados para a modelagem de queda de blocos através do MPM, a comparação entre o MPM e o RAMMS e o uso do MPM para a avaliação de casos reais.

- A maior resistência do solo não implica necessariamente em um maior alcance do bloco. Ao impactar um solo com menor resistência, o bloco pode causar um deslizamento no material do talude e ser arrastado junto com a massa rompida.
- O formato do bloco e a resistência do material do talude determinam se, após o impacto do bloco no talude, o bloco terá energia suficiente para transpor a rampa da cicatriz e seguir em movimento de queda. Foi verificado que entre dois blocos que possuam a mesma energia de impacto, o bloco com um formato mais favorável à penetração na superfície dissipa sua energia cravando-se no talude, enquanto um bloco com o formato menos favorável à penetração gera uma zona de plastificação, desliza ao longo da cicatriz do impacto e, ao transpor a rampa de sobressalto, ainda possui energia para seguir em movimento.

- O uso de parâmetros iguais em modelos bidimensionais e tridimensionais fornece resultados diferentes. No modelo bidimensional, o talude é considerado infinito e a zona plastificada se estende perpendicularmente ao plano. No modelo tridimensional, a zona plastificada é uma região delimitada. Nas análises tridimensionais, com os mesmos parâmetros que apresentaram uma boa proximidade de resultados nas análises 2D, em comparação com os resultados obtidos com o RAMMS, a dissipação de energia se deu de maneira menos efetiva e os blocos percorreram longas distâncias antes de atingirem o repouso. A solução para utilizar os parâmetros definidos nos modelos bidimensionais foi usar fatores de redução da resistência, de modo que as curvas de energia cinética apresentassem melhor coincidência.
- O RAMMS possui a vantagem de gerar inúmeras trajetórias em um curtíssimo intervalo de tempo se comparado ao MPM. Contudo, o MPM permite ao usuário visualizar a zona de ruptura do impacto. Também é possível avaliar as consequências da queda do bloco no talude, como, por exemplo, os deslizamentos deflagrados pelo impacto do bloco na superfície.
- No MPM, blocos de geometria alongada e de geometria regular (arredondado) que apresentam movimento de rolamento se deslocam grandes distâncias com baixa energia cinética. É necessário introduzir um mecanismo de resistência ao rolamento ou algum critério de parada para evitar que isso ocorra.
- Diferentes orientações iniciais de queda em blocos alongados (*long*) e achatados (*flat*) influenciam na dissipação de energia e, consequentemente, no alcance dos blocos. Esse comportamento é mais acentuado em solos menos resistentes.
- O MPM se configura como um método moderno para prever trajetórias de queda de rocha, assim como as velocidades finais de impacto e posições, características de grande importância prática para projetos de estruturas de mitigação. Além disso, no MPM, a interação de contato entre a rocha com o terreno é capaz de reproduzir os quatro movimentos de queda de rocha -

rolamento, deslizamento, saltos e queda livre – bem como a transição entre eles.

- O MPMPUC-Rio é capaz de simular processo de queda de blocos de rocha em terrenos irregulares a partir de um Modelo Digital de Elevação, utilizando-se o gerador de partículas MPM-Particle-Generator. Também é possível modelar blocos com quaisquer formatos com o auxílio de uma malha de elementos finitos. Quanto ao material do terreno, é possível utilizar diversos modelos constitutivos disponíveis no simulador, embora neste trabalho tenha sido usado somente o modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb. Dessa forma, é possível definir os parâmetros reais do problema, o que torna a simulação mais específica. No RAMMS, é necessário encaixar diferentes tipos de materiais nas categorias disponíveis no software.
- O MPM pode ser aplicado a problemas de queda de bloco de rocha de maneira mais eficiente em caso de blocos particulares e individualizados, onde se tenha as dimensões do bloco, sua posição e orientação inicial, conforme foi feito no estudo de caso. Com os resultados dessas análises, é possível determinar a estabilização do bloco ou a classe de barreira a ser utilizada para deter o bloco durante a queda. Porém, o número de trajetórias de análises fica limitado pelo tempo computacional de cada simulação.
- Devido às incertezas existentes no estudo de queda de blocos de rocha, modelos que utilizem de poucas variáveis, como o RAMMS, se apresentam como mais vantajosos quando não se tem dados representativos confiáveis. A análise de inúmeras trajetórias permite considerar os diversos cenários possíveis durante o processo de queda. Essa abordagem permite a adoção de soluções mais seguras.

5.2

Sugestões para futuros trabalhos

- Uma metodologia na qual os parâmetros do método do ponto material sejam determinados através de retroanálises de uma trajetória de queda de bloco em um campo experimental.
- Estudo numérico baseado em experimentos de laboratório com a finalidade de obter uma melhor parametrização das variáveis.
- Estudo de mecanismos a serem implementados no MPM capazes de reproduzir a resistência ao rolamento e a resistência ao movimento devido à vegetação.
- Um estudo da influência da discretização da malha Euleriana nos resultados das simulações de queda de rocha com o MPM.

Referências Bibliográficas

- [1] VARGAS Jr, E. A.; VELLOSO, R. Q.; CHÁVEZ, L. E., GUSMÃO, L. A., AMARAL, C. P. **On effect of thermally induced stresses in failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil.** Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(1) 123-134, 2013.
- [2] CASTRO, A. S.; RIBEIRO, R. S.; BARROSO, E. V.; VARGAS Jr, E. A.; POLIVANOV, H. **Influência do grau de saturação no módulo de elasticidade dos solos:** aplicação à previsão do alcance em quedas de blocos de rocha. Geol. USP. Sér. Cient., v.17, n. 4p. 139-151, 2017.
- [3] DIAS, G. P., BARROSO, E. V. **Determinação experimental do coeficiente de restituição normal de rochas:** aplicação na previsão do alcance de blocos em encostas. Anuário do Instituto de Geociências, 29(2), 149-167, 2006.
- [4] VARGAS Jr, E. A.; CASTRO, J. T.; AMARAL, C. P.; FIGUEREDO, R. P. **On mechanisms for failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil:** thermal fatigue? Ninth International Symposium on Landslides, n. 2, 1007-1011. Rio de Janeiro: A. A. Balkema Publishers, 2004.
- [5] CAMPOS, P. C. O.; MARQUES, M. E. S.; ROSA, D. L. **Investigação de gatilhos geotécnicos de movimentação de massas em taludes ferroviários.** VI Encontro ANTF de Ferrovias – Edição Digital, 2021.
- [6] VALENTE, F. **Análise numérica dos processos de queda de blocos na Região Sudeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [7] CAVIEZEL, A.; RINGENBACH, A.; DEMMEL, S. E.; DINNEEN, C. E.; KREBS, N.; BÜHLER, Y.; CHRISTEN, M.; MEYRAT, G. STOFFEL, A.; HAFNER, E.; EBERHARD, L. A.; RICKENBACK, D.; SIMLER, K.; MAYER, P.; NIKLAUS, P. S.; BIRCHER, T.; AEBI, T.; CAVIGELLI, L.; SCHAFFNER, M.; RICKLI, S.; SCHNETZLER, C.; MAGNO, M.; BENINI, L.; BARTELT, P. **The relevance of rock shape over mass – implications for rockfall hazard assessments.** Nature Communications, 12, 5546, 2021.
- [8] YAN, P.; ZHANG, J.; KONG, X.; FANG, Q. **Numerical simulation of rockfall trajectory with consideration of arbitrary shapes of falling rocks and terrain.** Computers Geotech, 122, 103511, 2020.
- [9] FERNÁNDEZ, F. **Modelagem numérica de problemas geotécnicos de grandes deformações mediante o método do ponto material.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

- [10] AUGARDE, C. & HEANEY, C. **The use of meshless methods in geotechnics. Computational Geomechanics: COMGEO I:** Proceedings of the 1st International Symposium on Computational Geomechanics (COMGEO I) 311–320. Juan -les- Pins, France, 2009.
- [11] LLANO-SERNA, M. A. **Aplicações do Método do Ponto Material (MPM) a problemas geotécnicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- [12] SOGA, K.; ALONSO, E.; YERRO, A.; KUMAR, K.; BANDARA, S. **Trends in largedeformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method.** *Géotechnique*, 66(3):248–273, 2015.
- [13] FERN, J.; ROHE, A.; SOGA, K.; ALONSO, E. **The Material Point Method for geotechnical Engineering: a practical guide.** CRC Press, 2019.
- [14] ZHANG, X.; CHEN, Z.; LIU, Y. **The material point method: a continuum-based particle method for extreme loading cases.** Academic Press, 2016.
- [15] AMARAL, C.; ESTRELLA, L. **Deslizamentos de rocha no Rio de Janeiro: Quais fatores determinam ou não o registro de um desastre.** UNIFESO - Revista de Ciência Tecnologia e Inovação, v.4, n.6, 55-58, Teresópolis, 2019.
- [16] CAMARGO, C. Petrópolis faz desmonte de rochas em áreas afetadas por temporal. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 10 de mar. de 2022. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2022/03/petropolis-faz-desmonte-de-rochas-em-areas-afetadas-por-temporal.shtml>> Acesso em: 18 de ago. de 2022
- [17] AMARAL, C; ESTRELLA, L; MOTTA, M; ROMERO, J; BELLOTI, T; MAGALHÃES, J. **O Recente Deslizamento de Rocha no Morro Boa Esperança, em Itaipu, Niterói.** UNIFESO - Revista de Ciência Tecnologia e Inovação, v.3, n.5, Teresópolis, 2018.
- [18] ALPACA, N. H.; SALEME, I. Casa é destruída por deslizamento de terra e pedra na zona norte do Rio de Janeiro. **CNN Brasil**, Rio de Janeiro, 16 de abr. de 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/casa-e-destruida-por-deslizamento-de-terra-na-zona-norte-do-rio-de-janeiro/>> Acesso em: 18 de ago. de 2022.
- [19] TAVARES, T. Trecho da BR-393 segue parcialmente interditado após deslizamento de pedra em Vassouras. **G1 Sul do Rio e Costa Verde**, 09 de abr. de 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2019/04/09/trecho-da-br-393-segue-parcialmente-interditado-apos-deslizamento-de-pedra-em-vassouras.ghtml>> Acesso em: 18 de ago. de 2022.

- [20] PEDRAS se soltam de encosta e se espalham sobre trecho da RJ-125, em Vassouras. **G1 Sul do Rio e Costa Verde**, 11 de jan. de 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2022/01/11/pedras-se-soltam-de-encosta-e-se-espalham-sobre-trecho-da-rj-125-em-vassouras.ghtml>> Acesso em: 18 de ago. de 2022.
- [21] DESLIZAMENTO de pedras causa interdição parcial da BR-116, em Teresópolis, no RJ. **G1 Região Serrana**, 04 de ago. de 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2019/08/04/deslizamento-de-pedras-causa-interdicao-parcial-da-br-116-em-teresopolis-no-rj.ghtml>> Acesso em: 18 de ago. de 2022.
- [22] TOE, D.; MENTANI, A.; BOURRIER, F.; GOVONI, L.; GOTTARDI, G.; LAMBERT, S. **A probabilistic approach to integrate the effect of protection systems into rockfall hazard assessment**. 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, 79-82, Barcelona, Spain, 2017.
- [23] LEINE, R.I., SCHWEIZER A., CHRISTEN M., GLOVER J., BARTELT P., GERBER W. **Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape**. Multibody System Dynamics, v.32, 241–271, 2014.
- [24] SJÖBERG, J. **Analysis of Large Scale Rock Slopes**. Doctoral Thesis - Department of Civil and Mining Engineering; Luleå University of Technology, Luleå, 1999.
- [25] GONÇALVES, J. A. G. F. **Estabilidade de fundações e taludes em maciços rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciência e Tecnologia; Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [26] VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. **Ingeniería Geológica**. Pearson Educación, 2002.
- [27] PINOTTI, A. M.; CARNEIRO, C. D. R. **Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP**. Terræ Didática, 9(1):132-168. Campinas, 2013.
- [28] PORTO Jr. R., ANTUNES F.A., AMARAL C. **Controle geológico-estrutural nos escorregamentos na cidade do Rio de Janeiro, RJ, Brasil**. Simpósio de Geologia do Sudeste, 9, Niterói. *B. Resumos...* Niterói: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleos Rio de Janeiro / Espírito Santo, Minas Gerais e São Paulo. p. 120, 2005
- [29] GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de Escavação**. 2º Edição. Edgard Blücher, 1984

- [30] NUNES, A. L. S.; ROCHA, J. S. A. **Influência dos coeficientes de restituição nas trajetórias de queda de blocos rochosos**. COBRAMSEG, Gramado, 2010.
- [31] SILVA, L. C. **Aplicação do sistema de avaliação de perigo “Rockfall Hazard Rating System” (RHRS) aos Taludes da BR-356 / Rodovia dos Inconfidentes, MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- [32] GÁLVEZ, J. H. F. **Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da rodovia RS471 / BR153, lote 2**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [33] HOEK, E. **Practical Rock Engineering**. Evert Hoek Consulting Engineering Inc., 2006.
- [34] WYLLIE, D. C & MAH, C. W. **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. Spon Press, 2004.
- [35] MACCAFERRI. **Sistema contra a queda de rochas: Necessidades e Soluções**. Encarte técnico, 2017
- [36] RITCHIE, A.M. **Evaluation of Rockfall and its Control**. Highway Research Record, Washington, D.C., v.17, 13-28, 1963
- [37] VOLKWEIN, A.; SCHELLENBERG, K.; LABIOUSE, V.; AGLIARDI, F.; BERGER, F.; BOURRIER, F.; DORREN, L.K.A.; GERBER, W.; JABOYEDOFF, M. **Rockfall characterisation and structural protection—a review**. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11(9), 2617–2651, 2011.
- [38] BOZZOLO, D. & PAMINI, R. **Simulation of Rockfalls Down a Valley Side**. Acta Mechanica, 63, 113-130, 1986.
- [39] AZZONI, A. & FREITAS, M. H. **Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis**. Springer-verlag, Londres 1995.
- [40] ROCHA, J. S. A. **Estudos numéricos sobre trajetórias de queda de blocos rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

- [41] SILVEIRA, L. R. C. **Avaliação do perigo de queda de blocos em taludes urbanos e ferroviários e simulação de sua trajetória.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)–Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- [42] GOBBI, F. **Sistemas flexíveis para redução de risco contra acidentes geotécnicos, estado atual das aplicações no Brasil.** COBRAMSEG, Rio de Janeiro, 2012
- [43] HARLOW, F. H. **A machine calculation method for hydrodynamic problems.** Tech. Rep. LAMS-1956, Los Alamos Scientific Laboratory, 1955.
- [44] HARLOW, F. H., **Hydrodynamic problems involving large fluid distortions.** Journal of the ACM 4 (1) 137–142, 1957.
- [45] SULSKY, D.; CHEN, Z.; SCHREYER, H. L. **A particle method for history-dependent materials.** Computer methods in applied mechanics and engineering, 118(1-2):179–196, 1994.
- [46] HARLOW, F. H., **The particle-in-cell computing method for fluid dynamics.** Methods in Computational Physics 3, 319–343, 1964.
- [47] BRACKBILL, J. U. & RUPPEL, H. M. **FLIP: A method for adaptively zoned, particle-in-cell calculations of fluid flows in two dimensions.** J. Comput. Phys., 65:314–343, 1986.
- [48] BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D.B.; RUPPEL, H. M. **FLIP: A low-dissipation, particle-in-cell method for fluid flow.** Comput. Phys. Comm., 25-38. 1988.
- [49] SULSKY, D.; ZHOU, S.-J.; SCHREYER, H. L. **Application of a particle-in-cell method to solid mechanics.** Computer physics communications, 87(1-2):236–252, 1995.
- [50] SULSKY, D. & SCHREYER, H.L. **Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems.** Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 139:409–429, 1996.
- [51] LAI, W. M.; RUBIN, D.; KREMPL, E. **Introduction to continuum mechanics** Third edit., 1993.

- [52] MORAES, T. C.; FERNÁNDEZ, F.; VELLOSO, R. Q.; VARGAS Jr, E. A.; **Análise de ruptura de talude infinito usando o Método do Ponto Material**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Brasil, 2018.
- [53] NGUYEN, V. P. Material point method: basics and applications. Cardiff University, 2014. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/262415477_Material_point_method_basics_and_applications_Content>
- [54] FERNÁNDEZ, F.; ROJAS, J. E. G.; VARGAS, E. A.; VELLOSO, R. Q. DIAS, D. **Three-dimensional face stability analysis of shallow tunnels using numerical limit analysis and material point method**. Tunnelling and Underground Space Technology 112, 2021.
- [55] ZABALA, F.; ALONSO, E.. **Progressive failure of aznalcóllar dam using the material point method**. Géotechnique, 61(9):795–808, 2011.
- [56] ROJAS, D. T. **Avaliação da influência das propriedades do material na evolução dos movimentos de massa utilizando o método do ponto material**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- [57] FERNÁNDEZ, F. Manual do simulador MPM-PUCRio. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio, 2022; Disponível em: <<https://sites.google.com/view/fabricix/software/mpm-pucrio>>
- [58] HENDERSON, A.; AHRENS, J.; LAW, C. ; OTHERS. **The View Guide**. v. 366. Kitware Clifton Park, NY, 2004.
- [59] CHRISTEN, M.; BÜHLER, Y.; BARTELT, P.; LEINE, R.; GLOVER, J.; SCHWEIZER, A.; GRAF, C.; MCARDELL, B.; GERBER, W.; DEUBELBEISS, Y.; FEISTL, T.; VOLKWEIN, A. **Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool “RAMMS” for gravitational natural hazards**. Koboltschnig, G., Hübl, J., Braun, J. (eds.) Proceedings of 12th Congress INTERPRAEVENT, v.1, 77–86, 2012.
- [60] CAVIEZEL, A.; LU, G.; DEMMEL, S. E.; RINGENBACH, A.; BÜHLER, Y.; CHRISTEN, M.; BARTELT, P. **RAMMS::ROCKFALL – a modern 3-dimensional simulation tool calibrated on real world data**. 53rd US rock mechanics/geomechanics symposium, ARMA 19-223, American Rock Mechanics Association (ARMA), 2019.

- [61] BOURRIER F.; DORREN L.; NICOT F. **Towards objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model**, *Geomorphology*, v. 110, 68–79, 2009.
- [62] CHAU, K.; WONG, R.; WU, J. **Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts**. *Int. J. Rock Mech. Min.*, 39, 69-77, 2002.
- [63] DORREN, L.; MAIER, B.; PUTTERS, U.; SEIJMONSBERGEN, A. **Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps**. *Geomorphology*, 57, 151-167, 2004.
- [64] PFEIFFER, T. J.; BOWEN, T. D. **Computer Simulation of rockfalls**. *Environmental and Engineering Geoscience*, XXVI, 135-146, 1989
- [65] ACARY, V. & BROGLIATO, B. **Numerical Methods for Nonsmooth Dynamical Systems: Applications in Mechanics and Electronics**. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, v. 35. Springer, Berlin, 2008.
- [66] FRÉMOND, M. **Rigid bodies collisions**. *Phys. Lett. A* 204, 33–41, 1995.
- [67] GLOCKER, C. **Set-Valued Force Laws, Dynamics of Non--Smooth Systems. Lecture Notes in Applied Mechanics**. v. 1. Springer, Berlin, 2001.
- [68] JEAN, M. **The non-smooth contact dynamics method**. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 177, 235–257, 1999.
- [69] LEINE, R.I., VAN DE WOUW, N. **Stability and Convergence of Mechanical Systems with Unilateral Constraints**. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, v. 36. Springer, Berlin, 2008.
- [70] STUDER, C.; LEINE, R.I.; GLOCKER, C. **Step size adjustment and extrapolation for time stepping schemes in nonsmooth dynamics**. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 76(11), 1747–1781, 2008.
- [71] LU, G.; CAVIEZEL, A.; CHRISTEN, M.; BÜHLER, Y.; BARTELT, P. **Modelling rockfall dynamics using (convex) non-smooth mechanics**. Eds. A. S. Cardoso et al., *Numerical methods in geotechnical engineering IX*, 575-583, London: CRC Press, 2018.

- [72] MOREAU, J.J. **Unilateral contact and dry friction in finite freedom dynamics.** Moreau, J.J., Panagiotopoulos, P.D. (eds.) *Non-smooth Mechanics and Applications*. CISM Courses and Lectures, v. 302, 1–82. Springer, Wien, 1988.
- [73] GLOCKER, C. **Energetic consistency conditions for standard impacts. Part I. Newton--type inequality impact laws and Kane's example.** *Multibody Syst. Dyn*, 29, 77–117, 2013.
- [74] LU, G.; CAVIEZEL, A.; CHRISTEN, M.; DEMMEL, S. E.; RINGENBACH, A.; BÜHLER, Y.; DINNEEN, C. E.; GERBER, W.; BARTELT, P. **Modelling rockfall impact with scarring in compactable soils.** *Landslides* 16, 2353-2367, 2019.
- [75] GLOVER J. **Rock-shape and its role in rockfall dynamics.** Thesis (PhD in geography)-Durham University, Durhan, 2015.
- [76] CALCATERRA, D.; PARISE, M.; LONDON, G. S. **Weathering As a Predisposing Factor to Slope Movements.** Geological Society Engineering Geology Special Publication. Geological Society, 2010.
- [77] JABOYEDOFF, M. **Slope tectonics.** Geological Society London, 2011.
- [78] JABOYEDOFF, M. & LABIOUSE, V. **Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones.** *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3):819-828, 2011.
- [79] RAMMS::ROCKFALL User Manual. **A numerical model for rockfall in research and practice.** 2016.
- [80] MA, Z.; ZHANG, X.; HUANG, P. **An object-oriented MPM framework for simulation of large deformation and contact of numerous grains.** *Computer Modeling in Engineering & Sciences* 55(1):61–87, 2010.
- [81] GISCHIG, V. S.; HUNGR, O.; MITCHELL, A.; BOURRIER, F. **Pierre3d: a 3d stochastic rockfall simulator based on random ground roughness and hyperbolic restitution factors.** *Can Geotech J* 52:1360–1373, 2015.
- [82] QGIS-DEVELOPMENT-TEAM; OTHERS. **Qgis geographic information system.** Open Source Geospatial Foundation Project, 2016.
- [83] VESENTINI, J. W. **Geografia: o mundo em transição.** Ática, 2011.

- [84] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. Ed, Rio de Janeiro, 2012.
- [85] LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. Oficina de Textos, 2010.
- [86] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro, 2007.
- [87] ANTUNES, F. S.; CAMPOS, T. M. P.; POLIVANOV, H.; CALDERANO, S. B.; ANDRADE, A. G.; **Desenvolvimento de classes e unidades geopedológicas a partir da interação entre a pedologia e a geotecnia**. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, 127:61-79, 2013.
- [88] FUTAI, M.M.; CECÍLIO Jr, M.O.; ABRAMENTO, M. **Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da Região Metropolitana de São Paulo**. Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba, ABMS, 155-187, 2012.
- [89] ISRM. **Basic geotechnical description of rock masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 18, 85-110, 1981.
- [90] PINTO, C. S.; GOBARA, W.; PERES, J. E. E. P.; Nader, J. J. **Propriedades dos solos residuais**. Solos do Interior de São Paulo, São Paulo, ABMS, 95-142, 1993.
- [91] ABEF. **ABEF Research on Foundation Engineering**. XII ICSMF, 9-45, 1989.
- [92] ASSIS, G. M.; LIMA, N. C.; FERREIRA, G. C. S.; SARRO, W. S. **Módulo de elasticidade de solo arenoso compactado utilizando ensaios de ultrassom**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 1921-1932, Gramado, 2018.
- [93] MARTINS, L. C. C.; GÓNGORA, I. A. G. **Melhoria do solo laterítico de Brasília com adição da fração fina de resíduo de construção e demolição reciclado**. FATECS – Centro Universitário de Brasília, 2016.
- [94] LOPES, M. C.; LANA, M. S.; RIBEIRO, L. F. M.; SILVA, C. H. C. **Comportamento geotécnico de rochas brandas na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG)**. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(3): 471-476, 2007.

- [95] GUERRA, G. J. Z. **Caracterização geomecânica de maciços rochosos intemperizados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- [96] CERVANTES, L. M. T. **Resistência de maciços rochosos estruturalmente complexos de mineração submetidos a carregamentos dinâmicos**. Tese (Doutorado em Geotecnia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- [97] GEUZAIN, C.; REMACLE, J.-F.. **Gmsh: A 3-d finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities**. International journal for numerical methods in engineering, 79(11):1309–1331, 2009.
- [98] FRANÇA, B. S.; **Estudo comparativo entre simulações tridimensionais e bidimensionais de queda de rochas através de métodos computacionais**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.
- [99] FERNÁNDEZ, F. **Puc-rio/mpm-particle-generator: V1.0-alpha**. 2019.
- [100] FERNÁNDEZ, F.; VARGAS, E. A.; VELLOSO, R. Q. **A 3D discretization procedure for the material point method (MPM)**. Computational Particle Mechanics, 7:725-733, 2019
- [101] GEOBRUGG. **RXE-2000 Rockfall Barrier**. Product Manual. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape WSL, Birmensdorf, Switzerland, 2018
- [102] GEOBRUGG. **RXE-3000 Rockfall Barrier**. Product Manual. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape WSL, Birmensdorf, Switzerland, 2018
- [103] GEOBRUGG. **RXE-5000 Rockfall Barrier**. Product Manual. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape WSL, Birmensdorf, Switzerland, 2018