ANÁLISES NUMÉRICAS DE CASOS DE QUEDAS DE BLOCOS ROCHOSOS

André da Silva Freitas

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

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro

Junho de 2013

ANÁLISES NUMÉRICAS DE CASOS DE QUEDAS DE BLOCOS ROCHOSOS

André da Silva Freitas

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

Examinada por:

_____

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

_____

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

_____

Prof. Rogério Luiz Feijó, D.Sc.

_____

Prof. Willy de Alvarenga Lacerda, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2013

Freitas, André da Silva

Análises Numéricas de Casos de Quedas de Blocos Rochosos/ André da Silva Freitas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIX, 111 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 104-111.

1. Quedas de Blocos Rochosos. 2. Ensaios de Campo. 3. Modelos Numéricos. I. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais Genuino e Lydia

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Lívia, pelo apoio e incentivo constantes nos momentos de intensa dedicação ao mestrado.

Aos meus pais, Genuino e Lydia, e aos meus irmãos Luciana e Lucas que sempre estiveram ao meu lado em todas as situações e que lutaram muito para que eu conseguisse chegar até aqui.

À minha orientadora, professora Anna Laura Lopes da Silva Nunes, pelo exemplo profissional e pela dedicação constante durante todo o período da pesquisa. A sua motivação e profissionalismo são exemplos a serem seguidos.

Aos diretores da Geoprojetos Engenharia ltda., Sandro Sandroni, José Roberto Brandt e Sidney Reis por todos os ensinamentos e experiências profissionais em projetos e obras geotécnicas nas quais tive a oportunidade de participar durante o período em que trabalhei na empresa.

Aos amigos de Volta Redonda-RJ, Roberto Valentim, Leonardo Marques, Carlos Barbosa, Wanderson Neves e Sheila Nunes; e aos amigos do Rio de Janeiro, Leonardo Deotti, Renato Pereira, Fabrício Florido, Elisângela Florido e Eduardo Cabral, pela amizade de hoje e sempre.

Aos meus companheiros de orientação, Itamar, Katiane e Andrea; e aos meus amigos de turma, Erisvaldo, Marcelus, Alessandra, Vinícius, Diogo, Jaelson e Brunna pela amizade e ajuda nos momentos difíceis durante o curso.

Aos amigos do trabalho Leonardo, Magno, Marcelo, Rui e Yuri pela compreensão com os horários flexíveis, os quais viabilizaram a realização de todo o curso de Mestrado.

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

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

ANÁLISES NUMÉRICAS DE CASOS DE QUEDAS DE BLOCOS ROCHOSOS

André da Silva Freitas

Junho/2013

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Programa: Engenharia Civil

Quedas de blocos e lascas em encostas rochosas fraturadas e com juntas de alívio são comuns. Este tipo de instabilização geralmente acontece de forma repentina, sem sinais de movimentação, além de apresentar valores elevados de velocidades e energias cinéticas, causando danos em infraestruturas e até perdas de vidas. As técnicas de convivência com este tipo de ruptura são representadas, principalmente, por estruturas de proteção, as quais podem ser ativas ou passivas. Este trabalho tem o objetivo de simular um caso histórico de queda de bloco e dois ensaios realizados em escala real, utilizando o programa numérico *RocFall* v.4.0, com posterior avaliação dos resultados de tipos de movimento, pontos de parada e energia cinética total desenvolvida pelos blocos. As análises forneceram resultados bastante coerentes, porém, é muito importante ressaltar que toda simulação numérica deve ser precedida de uma criteriosa avaliação das condições geológico-geotécnicas de campo, visando simular de forma mais aproximada possível o fenômeno real de queda de blocos rochosos.

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

NUMERICAL ANALYSIS OF ROCKFALL CASES

André da Silva Freitas

June/2013

Advisor: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Department: Civil Engineering

Rock falls on fractured rocky hillsides are common. This type of instabilization generally happens abruptly, without movement warnings, and usually presents high speeds and kinetic energies, and may result in infrastructure damages and loss of lives. The techniques of living with this type of rupture are mainly represented by protective structures, which can be active or passive. This study aims to simulate a rock fall case history and two real scale tests, using the numerical program RocFall v.4.0, with subsequent evaluation of the results, types of movement, end positions and total kinetic energy developed by the blocks. The analyzes provided fairly consistent results, however, is very important to note that all numerical simulation must be preceded by a careful evaluation of geologic-geotechnical field conditions, aiming at simulating as closely as possible the real phenomenon of rock fall.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA 2

1.3 ESCOPO DA PESQUISA 3

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA 5

2.2 MECANISMOS DE INSTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS 6

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES ROCHOSOS 13

2.3.1 Soluções de Convivência 14

2.3.2 Eliminação do Problema 19

2.3.3 Técnicas de Estabilização 20

2.4 BARREIRAS FLEXÍVEIS 24

2.5 ENSAIOS DE CAMPO 27

2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISE 36

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 40

3 - PROGRAMA NUMÉRICO E CASOS DE ESTUDO 41

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 41

3.2 PROGRAMA NUMÉRICO ROCFALL 41

3.2.1 Definição da Geometria 42

3.2.2 Definição dos Materiais 43

3.2.3 Definição das Características do Bloco 44

3.2.4 Definição das barreiras 44

3.2.5 Resultados 45

3.3 CASO DE ESTUDO I – ENSAIO DE CAMPO NOS ALPES FRANCESES 47
3.3.1 Introdução 47
3.3.2 Procedimentos de ensaio 48
3.3.3 Resultados 50
3.4 CASO DE ESTUDO II – CASO HISTÓRICO EM *UTAH*, EUA 54
3.4.1 Introdução 54
3.4.2 Descrição da área 56
3.5 CASO DE ESTUDO III – ENSAIO DE CAMPO NO COLORADO, EUA .. 58
3.5.1 Descrição da área de ensaio 58
3.5.2 Procedimentos de coletas de dados 63
3.5.3 Procedimentos do ensaio 65
3.5.4 Resultados 66
4 - ANÁLISES NUMÉRICAS 68
4.1 INTRODUÇÃO 68
4.2 DADOS EXPERIMENTAIS E OBSERVADOS 69
4.2.1 Caso de Estudo I – Ensaio da França 69
4.2.2 Caso de Estudo II – Caso de *Utah* 69
4.2.3 Caso de Estudo III – Ensaio do Colorado 70
4.3 METODOLOGIA DE ESTUDO 73
4.3.1 Avaliação dos Pontos de Parada dos Blocos 73
4.3.2 Avaliação da Energia Cinética Total 77
4.4 ANÁLISES E RESULTADOS DAS TRAJETÓRIAS E PONTOS DE PARADA DOS BLOCOS 81
4.4.1 Caso de Estudo I – Ensaio da França 81
4.4.2 Caso de Estudo II – Caso de *Utah* 83

4.5 ANÁLISES E RESULATADOS DA AVALIAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA TOTAL 86
4.5.1 Bloco Tipo A – 1618 kg 86
4.5.2 Bloco Tipo B – 1695 kg 87
4.5.3 Bloco Tipo C – 1577 kg 90
4.5.4 Bloco Tipo D – 2259 kg 92
4.5.5 Bloco Tipo E – 2173 kg 94
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 96
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES 100
5.1 INTRODUÇÃO 100
5.2 CONCLUSÕES 101
5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ruptura planar de bloco rochoso (Nunes, 2004). 7

Figura 2.2 – Ruptura circular em maciço de ardósia muito alterado (Nunes, 2008). 8

Figura 2.3 – Ruptura em cunha (Hoek, 2001). 8

Figura 2.4 – Ruptura por tombamento (Nunes, 2008). 9

Figura 2.5 – Fluxo de detritos em Teresópolis/RJ (Arquivo pessoal de Nunes, 2011). . 10

Figura 2.6 – Queda de blocos em Azenhas, Portugal (Nunes, 2008). 11

Figura 2.7 - Deslocamentos de queda livre, saltos e rolamentos de blocos (Bautista, 2007). 12

Figura 2.8 - Movimentos em função da inclinação do talude (modificado de Ritche, 1963). 12

Figura 2.9 – Tela metálica para controle de queda de blocos na rodovia BR-393 (Arquivo pessoal do autor). 15

Figura 2.10 – Dique de solo reforçado após o impacto de um bloco construído para teste (Peila et al., 2002). 16

Figura 2.11 – Bermas para redução de energia (Rocha, 2009). 17

Figura 2.12 – Trincheira para coleta de bloco (Nunes, 2008). 18

Figura 2.13 – Túnel Falso para proteção da estrada conhecida como Chapman's Peak Drive na África do Sul (Volkwein et al., 2005). 19

Figura 2.14 – Processo mecânico de fragmentação de blocos rochosos (GeoRio, 1999). 20

Figura 2.15 – Canaletas para drenagem em talude rochoso (GeoRio, 1999). 21

Figura 2.16 – Proteção superficial de talude com concreto projetado em Angra dos Reis-RJ (Arquivo pessoal do autor). 22

Figura 2.17 – Retaludamento em banquetas (Nunes, 2008). 23

Figura 2.18 – Grelhas ancoradas em talude rochoso na rodovia BR-040 em Petrópolis-RJ (Arquivo pessoal do autor). 24

Figura 2.19 – Barreira Flexível instalada em encosta rochosa da estrada conhecida como Chapman's Peak Drive na África do Sul (Volkwein et al., 2005). 25

Figura 2.20 – Seção transversal típica da barreira flexível (modificado de Peila et al., 1998). 26

Figura 2.21 – Visão frontal típica da barreira flexível (modificado de Peila et al., 1998). 26

Figura 2.22 – Registro da trajetória do bloco em diferentes intervalos durante o ensaio de campo (Giani et al., 2004). 28

Figura 2.23 – Esquema das componentes de cálculo (Giani et al., 2004). 29

Figura 2.24 – Ensaio de queda livre de blocos de rocha em barreiras flexíveis (Anderheggen et al., 2002). 30

Figura 2.25 - Configurações de inclinações e valas na área experimental (modificado de Pierson et al., 2001). 31

Figura 2.26 - Ensaios de queda de bloco para verificação das valas de amortecimento (Pierson et al., 2001). 31

Figura 2.27 - Dique de proteção contra queda de blocos reforçados com geossintéticos (modificado de Nomura et al., 2002). 32

Figura 2.28 - Ensaio de queda de bloco em dique reforçado com geossintético (Nomura et al., 2002). 32

Figura 2.29 - Campo de testes suíço (a) vista de barreira flexível fixada na face do talude (b) vista do equipamento para teste em configurações variadas de malha (c) (modificado de Grassl *et al*., 2003). 33

Figura 2.30 – Comparação de resultados experimentais e numéricos de um arranjo de barreira flexível (Grassl et al., 2003). 34

Figura 2.31 - Ensaios de barreiras em campo experimental (Cantarelli *et al*., 2008). ... 34

Figura 2.32 - Sistema de ensaio de telas metálicas para proteção de queda de blocos (Bertolo *et al*., 2009). 35

Figura 2.33 - Ensaio de rampa para fluxo de detritos com barreira flexível (Roth *et al*., 2004). 36

Figura 3.1 – Exemplo de definição da geometria do talude no programa RocFall (Rocscience Inc, 2002). 42

Figura 3.2 – Exemplo de trajetórias de movimentos geradas pelo programa RocFall (Rocscience Inc, 2002). 45

Figura 3.3 – Gráfico com distribuição do pontos de parada dos blocos (Rocscience Inc, 2002). 46

Figura 3.4 – Levantamento topográfico da área do ensaio da França (modificado de Berger e Dorren, 2006). 49

Figura 3.5 - Mapa com a distribuição dos pontos de parada dos blocos ensaiados na área experimental da França (modificado de Berger e Dorren, 2006). 51

Figura 3.6 – Mapa com os três eixos de trajetória desenvolvidos pelos blocos no ensaio da França (modificado de Berger e Dorren, 2006). 52

Figura 3.7 – Mapa topográfico da região do evento de queda de blocos em Utah (Giraud e Christenson, 2005). 55

Figura 3.8 – Vista frontal da encosta rochosa investigada em Utah (Giraud e Christenson, 2005). 56

Figura 3.9 – Cratera de impacto acima da casa atingida em Utah (Giraud e Christenson, 2005). 57

Figura 3.10 – Bloco que atingiu a casa na cidade de Provo (Giraud e Christenson, 2005). 57

Figura 3.11 – Vista da casa destruída pelo impacto do bloco (Giraud e Christenson, 2005). 58

Figura 3.12 – Mapa da região (a) localização da área de testes (b) localização da encostas com incidência de quedas de blocos no Colorado (Arndt et al., 2009)..... 59

Figura 3.13 – Vista geral da área de teste no Colorado (modificado de Arndt et al., 2009). 60

Figura 3.14 – Seção esquemática da área do ensaio de campo do Colorado (modificado de Arndt et al., 2009). 61

Figura 3.15 – Vista geral da proteção de borracha utilizada na face da encosta do ensaio do Colorado (Arndt et al., 2009)..... 62

Figura 3.16 – Vista geral dos blocos para o ensaio do Colorado (Arndt et al., 2009).... 62

Figura 3.17 – Vista geral com indicação do posicionamento das câmeras no ensaio do Colorado (modificado de Arndt et al., 2009)..... 64

Figura 3.18 – Exemplo de fotografia tomada com a câmera 1 (Arndt et al., 2009). 64

Figura 3.19 – Configuração geométrica de um dos sistemas atenuadores ensaiados no Colorado (Arndt et al., 2009)..... 66

Figura 4.1 – Seção transversal da encosta da área experimental francesa. 76

Figura 4.2 – Seção transversal da encosta do caso histórico de queda de bloco em Utah. 76

Figura 4.3 – Seção transversal da encosta da área de testes do Colorado. 77

Figura 4.4 – Análises das trajetórias e tipos de movimentos desenvolvidos pelo bloco no ensaio da França (a) detalhe do movimento do tipo salto (b). 82

Figura 4.5 – Histograma de número de blocos e localização dos pontos de parada para o ensaio da França. 82

Figura 4.6 – Análises das trajetórias e tipos de movimentos desenvolvidos pelo bloco no caso de Utah (a) detalhe do movimento do tipo salto (b). 84

Figura 4.7 – Histograma de número de blocos e localização dos pontos de parada para o caso de Utah..... 85

Figura 4.8 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo A com altura de queda de 18 m. 87

Figura 4.9 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo B com altura de liberação de 9 m. 88

Figura 4.10 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo B com altura de liberação de 18 m. 89

Figura 4.11 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo B com altura de liberação de 27 m. 89

Figura 4.12 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo C com altura de liberação de 18 m. 91

Figura 4.13 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo D com altura de liberação de 9 m. 92

Figura 4.14 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo D com altura de liberação de 18 m. 93

Figura 4.15 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo D com altura de liberação de 27 m. 93

Figura 4.16 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo E com altura de liberação de 9 m. 95

Figura 4.17 – Vista geral do avanço da cidade na região inferior da encosta (Giraud e Christenson, 2005). 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos movimentos proposta por VARNES (1978). 6

Tabela 2.2 – Programas para análise de queda de blocos de rocha (Rocha, 2009). 38

Tabela 2.3 – Características dos principais programas de simulação de queda de blocos (Rocha, 2009). 39

Tabela 3.1 – Exemplo de resultados obtidos com as câmeras de alta velocidade utilizadas no ensaio da França (modificado de Berger e Dorren, 2006). 50

Tabela 3.2 – Exemplo de comparação de resultados apresentados (modificado de Berger e Dorren, 2006). 50

Tabela 3.3 – Valores obtidos pelos participantes em relação ao máximo ponto de parada dos blocos nos ensaios nos Alpes franceses (modificado de Berger e Dorren, 2006). .. 53

Tabela 3.4 – Características dos blocos pré fabricados (modificado de Arndt et al., 2009). 63

Tabela 4.1 – Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo A (modificado de Arndt et al, 2009). 71

Tabela 4.2 - Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo B (modificado de Arndt et al., 2009). 72

Tabela 4.3 - Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo C (modificado de Arndt et al., 2009). 72

Tabela 4.4 - Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo D (modificado de Arndt et al., 2009). 73

Tabela 4.5 - Valor de energia cinética total observado para o bloco do tipo E (modificado de Arndt et al., 2009). 73

Tabela 4.6 – Resumo dos intervalos de parâmetros utilizados nas análises do ensaio da França e do caso de Utah. 75

Tabela 4.7 – Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo A. 78

Tabela 4.8 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo B. 78

Tabela 4.9 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo C. 79

Tabela 4.10 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo D. 79

Tabela 4.11 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo E. 80

Tabela 4.12 – Resumo dos intervalos de parâmetros utilizados nas análises do ensaio do Colorado. 81

Tabela 4.13 – Resumo dos resultados das análises dos pontos de parada dos blocos.... 83

Tabela 4.14 – Resumo dos resultados das análises dos pontos de parada dos blocos.... 85

Tabela 4.15 – Valores experimental e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo A, com altura de liberação de 18 m. 87

Tabela 4.16 – Valores experimentais e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo B e respectivas alturas de liberação. 90

Tabela 4.17 – Valores experimental e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo C, com altura de liberação de 18 m. 91

Tabela 4.18 – Valores experimentais e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo D e respectivas alturas de liberação. 94

Tabela 4.19 – Valores experimental e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo E, com altura de liberação de 9 m. 95

Tabela 4.20 – Resumo dos resultados dos pontos de parada alcançados pelos blocos analisados. 96

Tabela 4.21 – Resumo da avaliação dos resultados de energia cinética total máxima... 98

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CRSP - *Colorado Rockfall Simulation Program*

E_{max} - energia cinética maxima

h - altura de queda

H_{max} - altura máxima de salto do bloco

J - joules

K - coeficiente de restituição

kg - quilograma

kJ - quilojoule

kN - quilonewton

K_n - coeficiente de restituição normal

K_t - coeficiente de restituição tangencial

lbf - libra-força

m - metro

m^3 - metro cúbico

M - massa

m/s - metro por segundo

n - direção normal à superfície de impacto do bloco na encosta

phi - ângulo de atrito

rad/s - radiano por segundo

rug - rugosidade

t - tangente à superfície de impacto do bloco na encosta

v_x - velocidade inicial do bloco na direção x

v_y - velocidade inicial do bloco na direção y

v_{ang} - velocidade angular inicial do bloco

V_{max} - velocidade total máxima

x - eixo horizontal

y - eixo vertical

° - graus

% - percentagem

1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em muitas ocasiões, a atividade humana instala-se nas proximidades de encostas rochosas, as quais estão sujeitas a processos de instabilização, resultando em risco de quedas de blocos e outros tipos de ruptura, as quais geram transtornos sociais e econômicos. Os profissionais de engenharia e geologia desempenham um papel de fundamental importância na análise da condição de estabilidade, bem como na adoção de medidas de reforço e/ou convivência dessas encostas.

As encostas rochosas são constituídas de uma parcela maciça e de outra formada pelas descontinuidades (fraturas, por exemplo), sendo que as propriedades de resistência e deformabilidade dessas encostas derivam da reunião das características individuais destas parcelas. A associação entre essas propriedades, a geometria e o estado de alteração do maciço rochoso definem suas condições de estabilidade.

Quedas de blocos e lascas em encostas rochosas com descontinuidades são comuns. Este tipo de instabilização é função de fatores geomecânicos, geológicos e hidrogeológicos e geralmente acontece de forma repentina, sem sinais de movimentação, além de apresentar velocidades e energias cinéticas significativas, causando danos em infraestruturas e até perdas de vidas.

As técnicas de convivência com este tipo de ruptura passam, principalmente, pela execução de estruturas de proteção, as quais podem ser ativas ou passivas. As primeiras consistem, principalmente, em conter o bloco ou lasca em sua posição original e as segundas são estruturas projetadas para capturar o bloco após sua ruptura, além de técnicas de demolição.

Os projetos das estruturas de convivência dependem fundamentalmente do conhecimento do fenômeno de restituição de energia, bem como da avaliação dos

parâmetros que regem o impacto do bloco. Neste contexto, os experimentos de campo são de importância crucial. A análise dos resultados dos testes de campo, associada a uma modelagem numérica, torna-se um instrumento valioso para a compreensão deste fenômeno natural e para o projeto de medidas mitigadoras.

Existe uma grande variedade de tipos de programas computacionais com base em análises probabilísticas, variando de 2D a 3D, e que fornecem uma grande diversidade de resultados (Dorren, 2003). Os programas numéricos constituem uma ferramenta importante para a simulação do movimento do bloco, bem como para a estimativa de sua trajetória, energias, altura de movimento e alcance (ponto de parada).

Toda análise computacional requer uma prévia e cuidadosa investigação geológico-geotécnica, além do julgamento criterioso do profissional, com o intuito de garantir a escolha adequada dos parâmetros de entrada, visando simular o mais aproximadamente possível o fenômeno natural. A realização de ensaios de campo em escala real com posterior análise numérica é uma maneira adequada de obter um maior conhecimento sobre estes parâmetros.

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Esta pesquisa tem o objetivo de simular numericamente três casos de quedas de bloco, sendo dois ensaios de campo realizados em escala real e um caso histórico, utilizando o programa *RocFall* v.4.0 comercializado pela *Rocsciense Inc.* (Canadá), e comparar os resultados de energia cinética total e alcance dos blocos obtidos nas simulações numéricas com os obtidos nos ensaios de campo e no caso histórico.

Para tanto, foram analisados dois ensaios e um caso histórico de queda de bloco. São eles:

(i) Ensaio apoiado pelo Ministério Francês de Ecologia e Desenvolvimento Sustentável, realizado em área experimental nos Alpes franceses (Berger e Dorren, 2006);

(ii) Ensaio realizado pelo Departamento de Transportes do Colorado (EUA), em área de teste montada em um talude rochoso na rodovia interestadual 70, entre as cidades de *Georgetown* e *Denver* (Arndt *et al*., 2009);

(iii) Caso histórico de queda de um bloco de rocha, com peso estimado em 130 kN (aproximadamente 6,5 m³), o qual desceu a montanha denominada "Y" atingindo uma casa na cidade de *Provo*, estado americano de *Utah*, em maio de 2005. Felizmente ninguém estava na casa no momento do acidente. O evento foi analisado por uma equipe do Serviço de Investigação Geológica de *Utah* (Giraud e Christenson, 2005).

1.3 ESCOPO DA PESQUISA

O trabalho é constituído de 5 capítulos, apresentando-se neste capítulo inicial, a introdução e os objetivos da pesquisa.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica para o tema; através da qual se procurou mostrar os conceitos e características de movimentos de massa; as principais medidas de estabilização e proteção de encostas rochosas, com particular atenção para as barreiras flexíveis; e os ensaios de campo, fundamentais para a compreensão do fenômeno e do comportamento destas barreiras. A revisão também exibe diversos métodos de análises de movimentos de queda de blocos rochosos, os quais auxiliam na previsão e intervenção deste tipo de evento. Os métodos numéricos, comumente probabilísticos, utilizados para a simulação das trajetórias dos blocos receberam maior ênfase neste trabalho.

No terceiro capítulo, é feita uma apresentação do programa numérico RocFall, bem como sua utilização para a realização da simulação das trajetórias de queda de blocos. O capítulo também apresenta o caso histórico e os ensaios de campo em escala real utilizados para as análises desta pesquisa.

O quarto capítulo apresenta a metodologia de estudo utilizada no trabalho, os modelos básicos empregados nas análises, os resultados alcançados com o programa numérico RocFall e a comparação com os resultados obtidos no caso histórico e nos ensaios em verdadeira grandeza.

O quinto capítulo encerra a pesquisa com as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e características dos movimentos de massa e os tipos de rupturas em encostas rochosas e as medidas de estabilização mais utilizadas na prática da engenharia. Para o conhecimento e análise dos tipos de movimentos de quedas de blocos, são apresentados os métodos de análise que auxiliam na concepção de medidas mitigadoras.

Também são apresentados os ensaios de campo em tamanho real, os quais são de fundamental importância para a compreensão do fenômeno de queda de blocos rochosos e para a avaliação do comportamento das barreiras de proteção em relação à energia de impacto.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são ocasionados por agentes naturais e/ou pela influência da ação humana, e consistem nos deslocamentos de solo, rocha ou ambos, sendo estes deslocamentos causados geralmente pelo aumento da tensão cisalhante no maciço e pela redução da resistência ao cisalhamento.

O entendimento sobre a frequência dos mecanismos desencadeadores de deslocamentos é muito importante para o aprimoramento da prática de projeto e do processo decisório no que tange intervenções em tempo adequado.

Segundo VIEIRA *et al*. (1997), muitos fatores contribuem para o desencadeamento dos movimentos de massa, dentre os quais podem-se destacar as propriedades do solo e/ou rocha (mineralogia, textura, resistência, presença de descontinuidades, entre outras), a morfologia da região (configuração em planta e perfil, topografia, etc.), o uso e ocupação do solo, o regime pluviométrico e variação da temperatura.

Na tentativa de agrupar os movimentos de massa de acordo com suas características, muitos autores têm desenvolvido maneiras variadas de classificação, as quais dependem

de fatores condicionantes e da aplicação proposta, entre outros aspectos. Dentre as principais classificações de movimento de massa destacam-se as propostas por SHARPE (1938), SKEMPTON & HUTCHINSON (1969) e VARNES (1978). A classificação mais utilizada é a de VARNES (1978), na qual o autor agrupa os deslocamentos em função do tipo de movimento e do tipo de material deslocado (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Classificação dos movimentos proposta por VARNES (1978).

Tipo de movimento			**Tipo de material**		
			Rocha	Solo (engenharia)	
Quedas			de rochas	de detritos	de solos
Tombamentos			de rochas	de detritos	de solos
Escorregamentos	rotacional	Poucas unidades	deslizamento de rochas	deslizamento de detritos	deslizamento de solos
	translacional	Poucas unidades	de blocos rochosos	de blocos de detritos	de blocos de solos
		Muitas unidades	de rochas	de detritos	de solos
Espalhamentos laterais			de rochas	de detritos	de solos
Escoamentos			de rocha (rastejo profundo)	de detritos (rastejo de solo)	de solos (rastejo de solo)
Complexos: combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos					

2.2 MECANISMOS DE INSTABILIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os diferentes tipos de ruptura são condicionados principalmente pelo grau de fraturamento do maciço rochoso e pela orientação e distribuição das descontinuidades em relação ao talude, ficando a estabilidade definida pelos parâmetros de resistência das descontinuidades e do maciço rochoso. Em maciços rochosos resistentes, as descontinuidades determinam a situação dos planos de ruptura. Ao contrário, em maciços de rocha branda, a matriz rochosa geralmente responde pelo mecanismo de ruptura.

As rupturas envolvendo movimentos de blocos ou lascas de rocha em planos de descontinuidades podem combinar um ou mais tipos de mecanismos. A seguir são

abordados os principais tipos de rupturas, quais sejam, planar, circular, em cunha, tombamento, quedas de blocos e fluxo de detritos.

A ruptura *planar* ocorre principalmente sob a ação da gravidade, quando o bloco de rocha desconfinado está situado sobre uma superfície inclinada (plano da descontinuidade), com a mesma direção do talude e cuja inclinação é maior que o ângulo de atrito da superfície. Neste caso a coesão pode ser considerada nula (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Ruptura planar de bloco rochoso (Nunes, 2004).

A ruptura *circular* ocorre em maciços de rocha muito alterada ou intensamente fraturada, cujo comportamento se assemelha à ruptura de um maciço de solo (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Ruptura circular em maciço de ardósia muito alterado (Nunes, 2008).

A ruptura *em cunha* ocorre quando dois planos de descontinuidades se interceptam e definem um bloco, cuja cavidade tem o formato de cunha. A interseção entre as descontinuidades deve aflorar na face do talude e apresentar inclinação na mesma direção deste talude. As características das famílias de descontinuidades (orientação, espaçamento, etc) vão definir a forma e o tamanho da cunha (Figura 2.3).

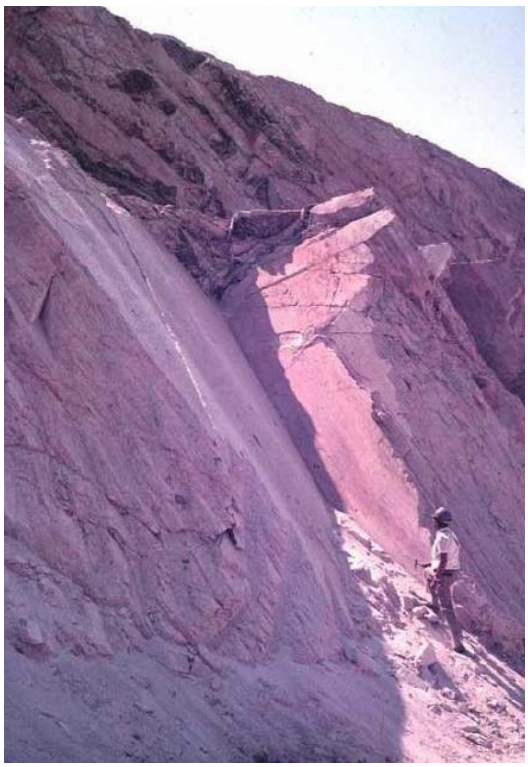

Figura 2.3 – Ruptura em cunha (Hoek, 2001).

O *tombamento* envolve a rotação de colunas ou blocos de rocha sobre um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada, sendo o movimento para frente e para fora do talude. Este tipo de deslocamento é condicionado por descontinuidades que apresentam mergulhos altos (Figura 2.4). As rupturas ocorrem principalmente com blocos isolados por um sistema de descontinuidades ortogonais.

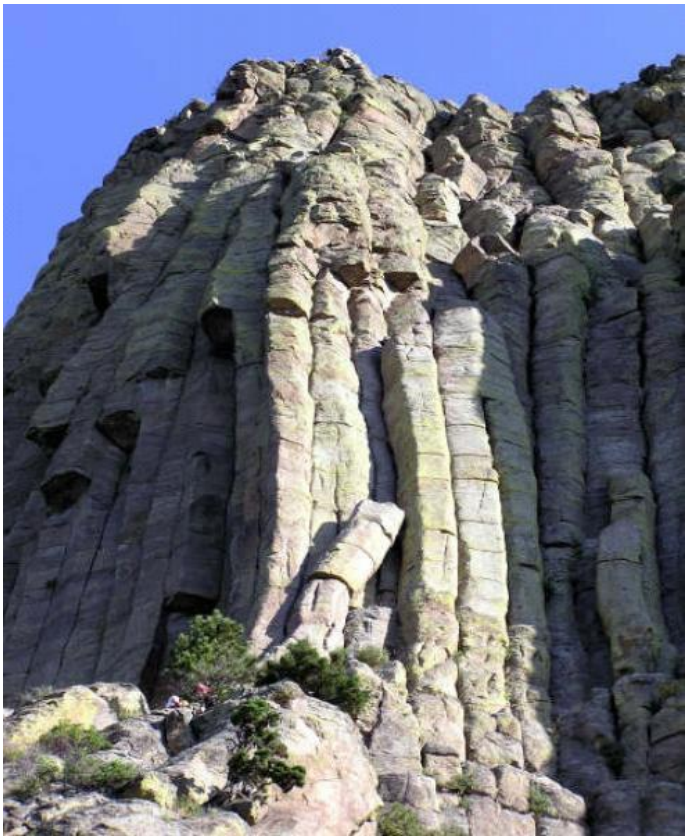

Figura 2.4 – Ruptura por tombamento (Nunes, 2008).

De acordo com NUNES (2008), o *fluxo de detritos* é um mecanismo complexo de ruptura, o qual tem como principal agente desencadeador o aumento de poropressão nas descontinuidades, geralmente ocasionado por intensos períodos de chuva e até mesmo por abalos sísmicos. Esse tipo de ruptura envolve o deslocamento de blocos de rocha de tamanhos diversos, além de segmentos de vegetação, os quais são transportados em meio a uma massa de solo através de talvegues naturais e podem alcançar grandes distâncias horizontais (Figura 2.5). Compreende velocidades elevadas e, por sua intensidade, tem a capacidade de provocar danos catastróficos (Nunes & Rios Filho, 2009).

Figura 2.5 – Fluxo de detritos em Teresópolis/RJ (Arquivo pessoal de Nunes, 2011).

A *queda de bloco ou lasca* de rocha é um tipo de instabilidade comum em regiões montanhosas, porém, infelizmente, não é possível prever quando este tipo de evento ocorre, embora seja mais comum durante e após intensas chuvas ou abalos sísmicos. Neste contexto e, tendo em vista os eventos chuvosos de grandes proporções ocorridos no país, o mapeamento de áreas de risco de quedas de blocos e outros tipos de rupturas constitui o esforço corrente dos órgãos públicos competentes e da comunidade acadêmica.

Este evento natural é condicionado pela existência de descontinuidades (falhas e fraturas), e pelo intemperismo físico e químico do maciço rochoso, dando origem a blocos e lascas individualizados e, alterando as forças atuantes e a resistência do maciço.

Os blocos rochosos deslocados podem apresentar volumes e litologia diversos, desprendendo-se de encostas e exercendo movimentos do tipo queda livre, deslizamento, rolamento e salto através dos taludes. A massa deslocada também pode

apresentar a forma de lascas ou placas, as quais se formam em maciços com estruturas acamadas ou xistosas (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Queda de blocos em Azenhas, Portugal (Nunes, 2008).

HANSEN (1987) indica que os deslocamentos de queda de blocos envolvem somente o fenômeno físico de queda livre, porém, outros autores, como RITCHE (1963) e CRUDEN & VARNES (1996), consideram os movimentos de rolamento e salto (Figura 2.7).

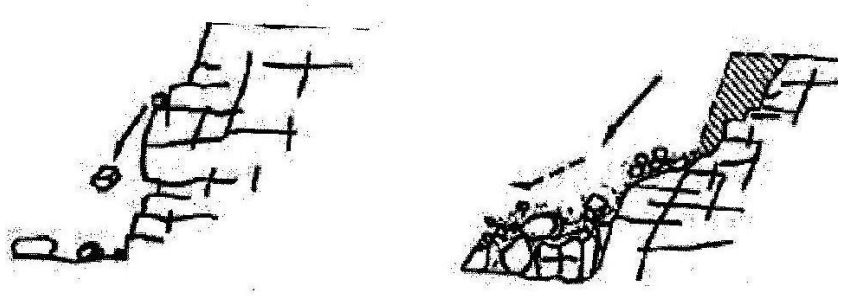

Figura 2.7 - Deslocamentos de queda livre, saltos e rolamentos de blocos (Bautista, 2007).

O movimento do bloco é amplamente influenciado pela inclinação e tipo de superfície da encosta (Figura 2.8). Após a ruptura, o bloco tende a desenvolver dois ou mais tipos de movimentos.

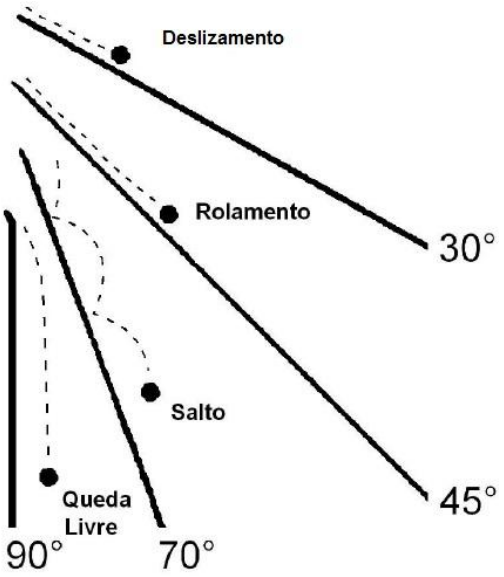

Figura 2.8 - Movimentos em função da inclinação do talude (modificado de Ritche, 1963).

O movimento predominante em encostas com inclinações acentuadas é o de queda livre, o qual, segundo RITCHE (1963), ocorre em inclinações maiores que 76º. Cabe ressaltar que as condições da superfície do talude podem influenciar a variação deste valor e o movimento de queda livre geralmente é intercalado com movimentos de salto.

Ao realizar sua descida ao longo da encosta, o bloco pode ter sua trajetória condicionada por deslocamentos translacionais e/ou rotacionais. Ao impactar a superfície do talude com um movimento de rotação, o bloco tende a saltar em um sentido divergente ao da trajetória até então desenvolvida. Os choques realizados contra a superfície do talude impõem ao bloco uma perda de energia significativa, a qual é acentuada, uma vez que, a inclinação do talude, de modo geral, diminui ao longo da encosta.

O movimento do tipo salto muda gradativamente para o movimento do tipo rolamento se a encosta exibir inclinação média menor que aproximadamente 45º. Porém, o bloco pode retornar ao movimento de salto e/ou queda livre, caso a inclinação do talude volte a aumentar. Quando o bloco segue o movimento de rolamento, ocorre importante perda de energia pelo atrito com a superfície até que o repouso seja atingido.

Conforme já mencionado, a inclinação da encosta é fator determinante para a trajetória de um bloco de rocha em queda, porém, outros fatores como tamanho do bloco e material de revestimento da superfície do talude (rocha, solo e vegetação) são condicionantes no percurso do bloco.

Blocos menores apresentam energia cinética total menor quando comparados com blocos maiores e, por essa razão, alcançam distâncias menores. Este fenômeno é facilmente notado em bacias naturais de deposição de blocos, onde os blocos menores são encontrados mais próximos ao talude, enquanto os blocos maiores são encontrados mais afastados.

O material que reveste a superfície do talude exerce importante influência na trajetória do bloco. Encostas que exibem vegetação de grande porte, por exemplo, apresentam significativo potencial para atenuar a energia cinética do bloco pelo impacto deste com os troncos das árvores.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES ROCHOSOS

A condição básica necessária para a tomada de decisão de projeto é o entendimento dos fatores condicionantes de movimentos nas encostas. De acordo com a ABNT (1991), a

caracterização do problema deve preceder a escolha da solução, a qual deve abordar aspectos geológicos e topográficos, destacando a altura e a inclinação do talude, bem como a análise das descontinuidades, grau de intemperismo e litologia.

Conforme GEORIO (1999) e ORTIGÃO e SAYÃO (2000), as técnicas de estabilização de encostas rochosas são separadas em três grupos principais:

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

2.3.1 Soluções de Convivência

Alguns maciços rochosos muito fraturados podem apresentar quantidade elevada de blocos e lascas instáveis, tornando as técnicas de estabilização tradicionais inviáveis. A solução mais adequada nestas circunstâncias é a adoção de medidas de convivência. Este tipo de projeto não visa evitar a ruptura, ao contrário, visa controlá-la de forma a tornar possível conviver com o talude instável de maneira segura.

Atualmente existem várias técnicas de convivência com taludes rochosos instáveis: telas metálicas para controle da trajetória do bloco, muros de impacto rígidos, bermas dissipadoras de energia cinética, trincheiras para coleta de blocos, túnel falso e barreiras flexíveis de impacto. As barreiras flexíveis são apresentadas em item próprio deste capítulo.

a) Telas Metálicas

As telas metálicas podem exibir comportamento ativo ou passivo e, em geral, são compostas de uma malha de arame apresentando ou não cabos de aço de alta resistência. São dispostas junto à face da encosta e ancoradas com tirantes no topo do talude e fixados com chumbadores ao longo do talude. Este tipo de estrutura é mais indicado para a estabilização de encostas rochosas muito fraturadas com blocos de dimensões reduzidas.

As telas metálicas e seus componentes (placas de distribuição de tensão e os elementos de fixação) devem ser verificados quanto à ruptura. As principais características que este sistema estrutural e seus componentes devem apresentar são: resistência, proteção anti-corrosiva, durabilidade e desempenho adequado. O dimensionamento do sistema de fixação deve levar em conta a possibilidade de ruptura global e quedas de blocos individualizados (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Tela metálica para controle de queda de blocos na rodovia BR-393 (Arquivo pessoal do autor).

b) Muros Rígidos de Impacto

São estruturas metálicas ou em concreto armado, rígidas, projetadas para receber o impacto de blocos de rocha em queda, além de massas de solo. O dimensionamento é função da trajetória e da energia do bloco, o qual é obtido através de análises numéricas ou métodos analíticos. Os muros rígidos também podem ser constituídos de solo reforçado com geossintéticos e são denominados diques (Figura 2.10).

Este tipo de medida apresenta como principal desvantagem a exigência de maior espaço geométrico para sua construção, quando comparado com outras medidas de convivência. Como vantagens podem-se destacar a capacidade de receber impactos de alta energia e a baixa e fácil manutenção. No caso de diques, ainda há a vantagem de se

revestir as faces com vegetação, representando uma solução de fácil integração com a natureza.

Figura 2.10 – Dique de solo reforçado após o impacto de um bloco construído para teste (Peila *et al*., 2002).

c) Bermas Dissipadoras de Energia

As bermas têm como principal objetivo a redução de energia cinética dos blocos de rocha em movimento. Assim como em outras medidas de convivência, o dimensionamento das bermas nas encostas deve ser realizado através de métodos que sejam capazes de simular a trajetória e a energia dos blocos, além de garantir a estabilidade de cada talude entre as bermas, bem como a estabilidade global da encosta. Com a utilização de recobrimento vegetal ou material granular não compactado nas bermas, é possível aumentar a redução de energia (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Bermas para redução de energia (Rocha, 2009).

d) Trincheiras para Coletas de Blocos

As trincheiras são implantadas no pé da encosta e sua largura e profundidade são determinadas em função das dimensões, trajetória e energia cinética total do bloco rochoso em queda, sendo estas estimadas com a utilização de métodos gráficos e numéricos. A estrutura é simples e apresenta bons resultados na proteção permanente contra quedas de blocos (Figura 2.12). Todavia, exige manutenção para garantir sua eficiência. Esta manutenção corresponde à retirada dos blocos e limpeza da trincheira ou vala.

Figura 2.12 – Trincheira para coleta de bloco (Nunes, 2008).

e) Túnel Falso

Esta técnica é utilizada como proteção para trechos de rodovias ou ferrovias onde existe grande incidência de queda de blocos rochosos e fluxo de detritos. São estruturas metálicas ou em concreto armado, projetadas para receber o impacto ou desviar avalanches (Figura 2.13). As dimensões do túnel devem garantir a segurança dos usuários da via e devem levar em conta a segurança da estrutura em relação aos impactos dos blocos e avalanches.

Figura 2.13 – Túnel Falso para proteção da estrada conhecida como *Chapman's Peak Drive* na África do Sul (Volkwein *et al*., 2005).

2.3.2 Eliminação do Problema

Em alguns casos, a eliminação do bloco ou lasca de rocha instável é a opção mais viável, seja por motivos econômicos e/ou técnicos. Os fatores que mais influenciam a decisão de retirar um bloco de rocha instável do maciço são o seu tamanho, as suas condições de apoio e o alcance estimado.

A remoção de blocos ou lascas de maciços rochosos pode ser realizada de forma manual, porém, blocos com grandes dimensões são, em geral, fragmentados em sua posição de origem e posteriormente retirados. A fragmentação do bloco em sua posição original pode ser feita com o emprego de equipamentos mecânicos, de corte a fogo (explosivos) e com a utilização de polímero expansivo. O corte a fogo deve ser precedido de um projeto criterioso, uma vez que a expansão dos gases liberados na explosão pode acarretar a abertura de novas fissuras no maciço, resultando na individualização de novas lascas e/ou blocos instáveis (Figura 2.14).

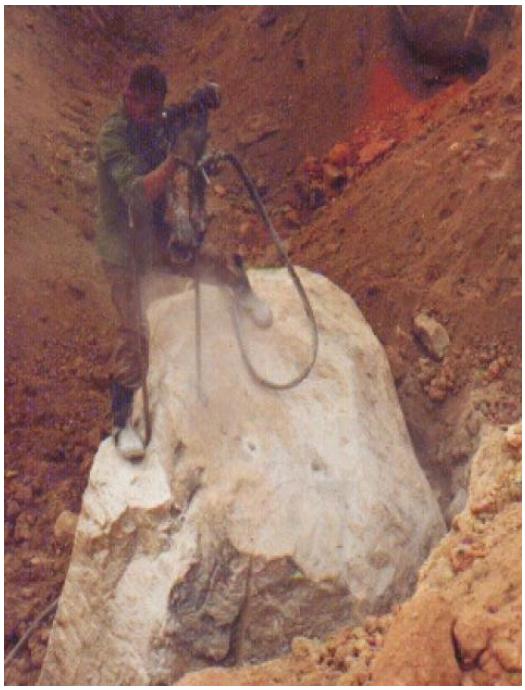

Figura 2.14 – Processo mecânico de fragmentação de blocos rochosos (GeoRio, 1999).

2.3.3 Técnicas de Estabilização

A estabilização de taludes pode ser realizada por meio de diversas técnicas, destacando-se drenagem, proteção superficial, retaludamendo em banquetas, e estruturas de contenção.

a) Drenagem

A água tem influência determinante na estabilidade de maciços de solo ou rocha. Dentre os principais efeitos causados pela presença de água nos maciços, pode-se destacar o aumento da poropressão, o aumento do peso específico do material, a atuação de forças de percolação e a subpressão.

A drenagem pode ser do tipo superficial ou profunda. A drenagem superficial é composta por estruturas destinadas a coletar e encaminhar a água da superfície do talude a um local apropriado, representadas por canaletas instaladas ao longo da encosta, em geral construídas em concreto armado (Figura 2.15).

Os drenos profundos são destinados a coletar a água do interior do maciço e seu projeto deve levar em conta os aspectos geológicos e hidrológicos da encosta. Em geral são compostos de tubos plásticos perfurados, os quais são envolvidos com geotêxtil (também tem sido usada a tela mosqueteira) com o objetivo de evitar o fechamento das perfurações por partículas finas de solo. O projeto de drenos profundos deve estipular períodos de medição de vazão com o intuito de avaliar a eficiência dos elementos drenantes. No tocante a encostas rochosas, é importante destacar que o dreno deve ser dimensionado de forma a interceptar o maior número possível de descontinuidades.

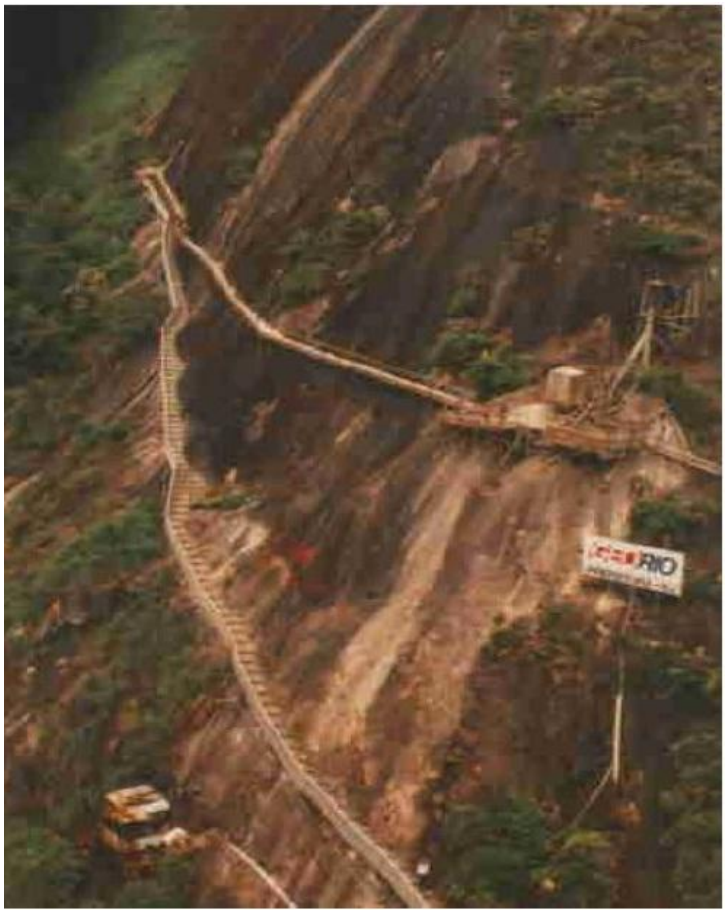

Figura 2.15 – Canaletas para drenagem em talude rochoso (GeoRio, 1999).

b) Proteção Superficial

O concreto, aplicado de forma manual, ou projetado com equipamento mecânico na superfície do talude é uma técnica de estabilização muito utilizada em encostas alteradas e fraturadas, e tem o objetivo de impedir rupturas e erosões (Figura 2.16).

De maneira geral, utiliza-se uma malha metálica fixada por chumbadores, de forma a aumentar a resistência do revestimento projetado. Além da malha metálica, o projeto deve contemplar um sistema de drenagem eficiente, preparo prévio da superfície e dosagem adequada do concreto. Fibras de aço ou polipropileno têm sido adicionadas ao concreto projetado, para garantir maior resistência ao revestimento e evitar patologias.

Figura 2.16 – Proteção superficial de talude com concreto projetado em Angra dos Reis-RJ (Arquivo pessoal do autor).

c) Retaludamento em Banquetas

O retaludamento com a implantação de banquetas em encosta rochosa é uma solução que permite elevar o fator de segurança com a redução do ângulo médio de inclinação do talude. Esta solução deve ser precedida de uma avaliação geotécnica cuidadosa e específica.

A execução das banquetas permite também que o sistema de drenagem superficial seja projetado de modo a dividir a vazão em cada seção. As banquetas também podem atuar como bermas para dissipação da energia cinética de blocos em queda e suas dimensões devem ser determinadas com métodos numéricos que simulem as trajetórias dos blocos e garantam a estabilidade entre banquetas e a estabilidade global do talude (Figura 2.17).

Figura 2.17 – Retaludamento em banquetas (Nunes, 2008).

d) Estruturas de Contenção

As estruturas de suporte têm a finalidade de conter blocos e lascas de rocha instáveis em sua posição original no maciço. Estas estruturas consistem em sistemas de ancoragem que, em geral são atrelados a elementos estruturais de concreto armado. A associação das ancoragens com as peças estruturais geralmente forma um conjunto de grelhas ancoradas e contrafortes com o objetivo de estabilizar uma região do talude com potencial de desprendimento de blocos.

Os contrafortes são estruturas em concreto armado destinadas ao apoio (calçamento) de blocos de rocha instáveis. Geralmente trabalham à compressão, podendo ou não apresentar ancoragens (as quais trabalham à tração) e são construídos de forma a se integrar com as imperfeições da face do talude. As grelhas ancoradas (Figura 2.18) são formadas por um conjunto de vigas verticais e horizontais, cujas ancoragens são posicionadas na interseção destas vigas.

Figura 2.18 – Grelhas ancoradas em talude rochoso na rodovia BR-040 em Petrópolis-RJ (Arquivo pessoal do autor).

2.4 BARREIRAS FLEXÍVEIS

As barreiras flexíveis são estruturas esbeltas e relativamente leves, compostas de redes de aço, as quais são suportadas por cabos ancorados, postes metálicos, além de apresentar um sistema de dissipação de energia. Estas estruturas têm o objetivo de interceptar o movimento de blocos de rocha que eventualmente se desprendam do alto de encostas rochosas (Figura 2.19).

Figura 2.19 – Barreira Flexível instalada em encosta rochosa da estrada conhecida como *Chapman's Peak Drive* na África do Sul (Volkwein *et al*., 2005).

A estrutura compreende a fixação de postes metálicos à fundação por meio de placas rotuladas. Estes postes são responsáveis por suportar verticalmente a tela metálica. Cabos de aço com dissipadores de energia são ancorados na encosta e posicionados na região superior de cada poste (Figuras 2.20 e 2.21). Os elementos de dissipação de energia são projetados para atenuar a energia por fricção e pela sua deformação permanente, reduzindo a força transmitida às ancoragens. O desempenho de todos os componentes do sistema deve atender aos requisitos de resistência e durabilidade.

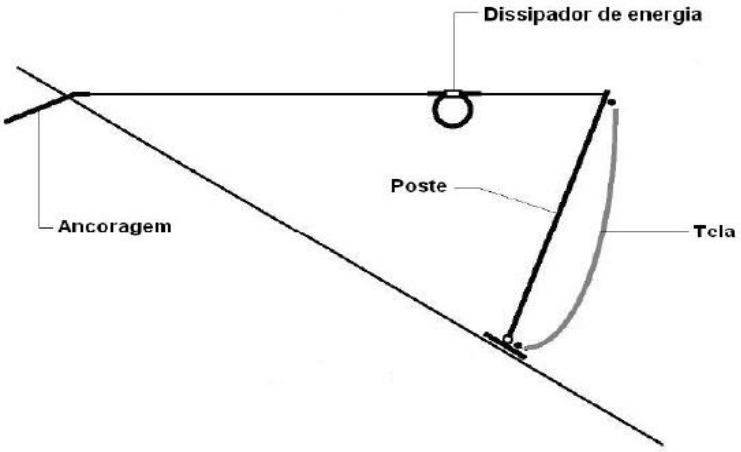

Figura 2.20 – Seção transversal típica da barreira flexível (modificado de Peila *et al*., 1998).

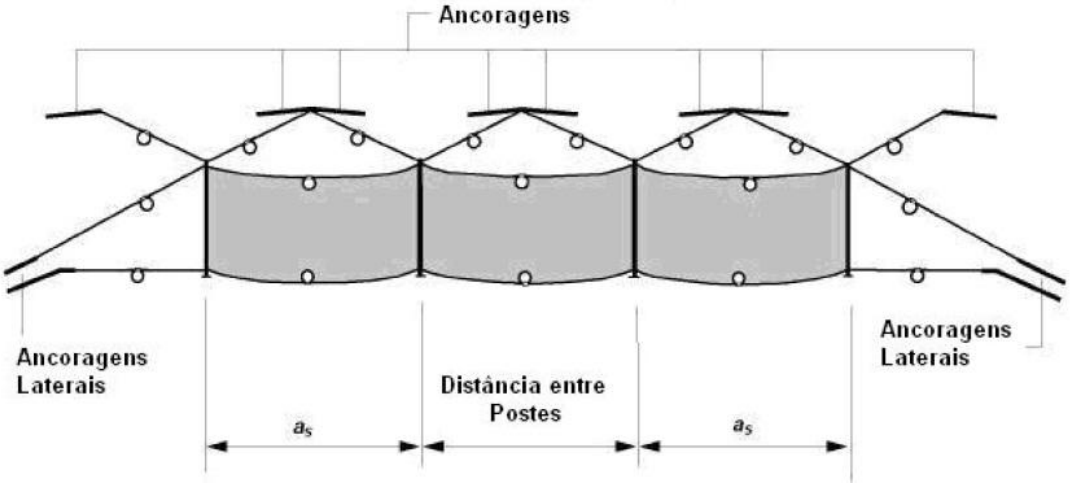

Figura 2.21 – Visão frontal típica da barreira flexível (modificado de Peila *et al*., 1998).

A segurança de habitantes e de infraestruturas em regiões montanhosas requer muito esforço da comunidade técnico-científica. As rodovias e ferrovias são frequentemente ameaçadas com quedas de blocos de rocha. Estudos e testes têm sido desenvolvidos, sobretudo em países europeus, destacando-se Itália, Suíça e França.

Em muitos casos, uma encosta pode apresentar uma extensa região instável, dificultando a adoção de medidas tradicionais de estabilidade. Neste contexto, as barreiras flexíveis oferecem a grande vantagem de tratar o problema localmente após uma avaliação criteriosa dos riscos envolvidos.

Em meados da década de 1980, as barreiras apresentavam capacidade de receber blocos com energia cinética total de até 250 kJ. Atualmente estão disponíveis barreiras com capacidade para suportar blocos com energia de impacto de 8.000 kJ.

O posicionamento e o dimensionamento das barreiras são determinados em função do tamanho e das prováveis trajetórias dos blocos rochosos. Desta forma, são essenciais as estimativas das trajetórias dos blocos, além da definição de algumas variáveis inerentes ao fenômeno de queda de bloco, tais como, alcance, alturas de salto, velocidades e as energias de movimento e de impacto. As características físicas e geométricas da encosta e do bloco são determinantes para a modelagem numérica ou analítica do fenômeno de queda.

A modelagem numérica requer a seleção de outras características, tais como a velocidade inicial de queda, os coeficientes de restituição de energia e rugosidade da encosta e o coeficiente de atrito relativo ao deslocamento do bloco na encosta. Estas características devem ser adotadas após uma criteriosa pesquisa de campo.

2.5 ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios *in situ* (escala real) são de grande importância para o entendimento do fenômeno de queda de bloco de rocha e para a calibração dos programas numéricos de simulação. Ao longo de sua trajetória, o bloco pode desenvolver diferentes tipos de movimento (saltos, rolamentos, deslizamento e queda livre), tornando uma difícil tarefa o desenvolvimento de modelos matemáticos que simulem estes movimentos e suas transições. É esta complexidade que confere aos ensaios em verdadeira grandeza seu caráter crucial.

O principal objetivo dos ensaios de campo é analisar o comportamento do bloco desde o início até o final de seu deslocamento ao longo da encosta. Devido à complexidade, o local para realização deste tipo de ensaio deve ser cuidadosamente escolhido de modo a garantir a segurança das pessoas e infraestruturas próximas.

A área de teste pode ser construída, por exemplo, com a confecção de uma rampa de lançamento. O ensaio também pode ser realizado em um talude natural, exigindo um

levantamento topográfico minucioso de modo a caracterizar detalhadamente a morfologia e as seções verticais para as trajetórias do bloco. Em ambos os casos, são utilizados equipamentos mecânicos para o lançamento do bloco, sendo frequente o emprego de escavadeiras e guindastes.

Em geral, os ensaios contam com câmeras de filmagem e fotográficas de alta velocidade, os quais são posicionados estrategicamente ao longo da encosta. Assim, ainda que o bloco desenvolva uma velocidade elevada durante a descida, estes equipamentos são capazes de registrar a trajetória com eficácia. Os registros obtidos são utilizados para a determinação dos coeficientes de restituição de energia, os quais talvez sejam os parâmetros envolvidos mais difíceis de serem obtidos (Stevens, 1998). Neste contexto, o ensaio de campo apresenta a vantagem de fornecer diretamente os coeficientes de restituição normal e tangencial da superfície da encosta. A Figura 2.22 apresenta o registro de um lançamento de bloco em escala real, monitorado por câmeras fotográficas de alta velocidade instaladas ao longo da encosta.

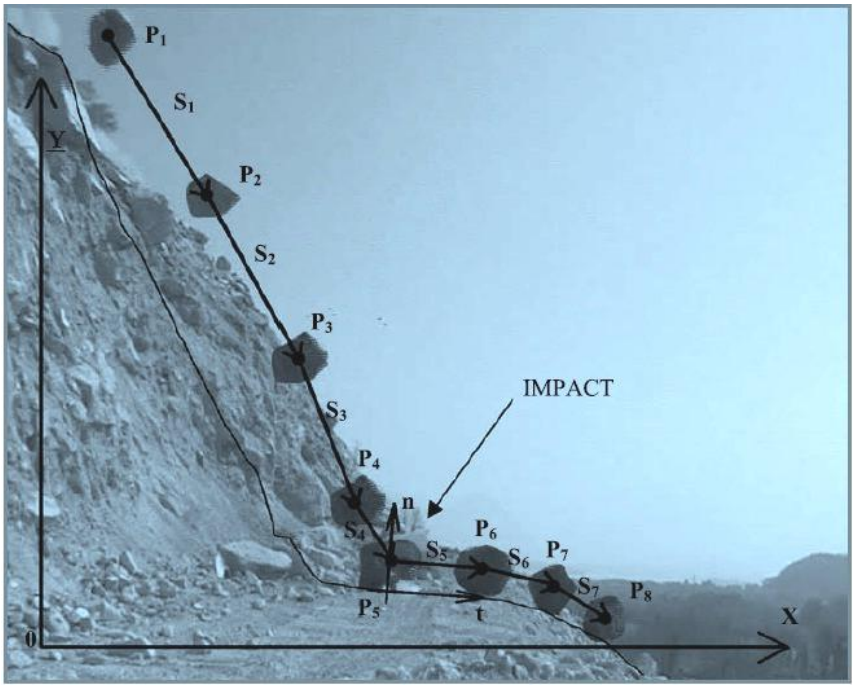

Figura 2.22 – Registro da trajetória do bloco em diferentes intervalos durante o ensaio de campo (Giani *et al.*, 2004).

Após a realização do ensaio, as imagens obtidas são trabalhadas em um programa de computador específico, de forma a obter a sequência de quadros de todo o movimento e o centróide do bloco é referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas. Estas coordenadas e o intervalo de tempo entre quadros permitem o cálculo da velocidade e do ângulo de rotação do bloco ensaiado.

Dois sistemas de coordenadas são utilizados: o sistema global é o sistema x,y, onde x é o eixo horizontal e y o eixo vertical. O sistema local é o n,t, onde n representa a normal em relação à superfície de impacto no talude e t é a tangente. A análise dos dados da energia cinética dissipada no impacto proporciona a determinação de dois coeficientes de restituição. Os coeficientes normal e tangencial são obtidos pelo quociente entre os vetores de velocidade antes e após o impacto nas direções normal e tangencial (Figura 2.23).

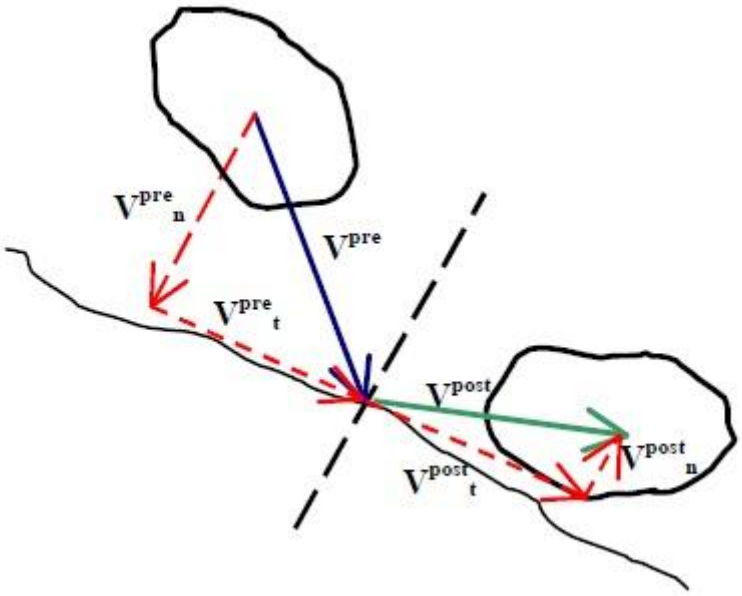

Figura 2.23 – Esquema das componentes de cálculo (Giani *et al*., 2004).

Além de possibilitar o entendimento do fenômeno de queda de bloco, a avaliação dos parâmetros envolvidos e a calibração de modelos numéricos de simulação de queda de bloco, os ensaios de campo também permitem avaliar o comportamento de estruturas mitigadoras, como as barreiras flexíveis.

A barreira flexível é posicionada na área de teste de modo a interceptar a trajetória do bloco. Em geral, a instrumentação na barreira compreende câmeras de alta velocidade posicionadas próximas à estrutura, com o intuito de registrar o comportamento do dispositivo no momento do impacto. Além das câmeras são instaladas células de carga e medidores de deformação nas ancoragens e nos postes de sustentação da rede metálica para avaliar a força de impacto do bloco contra a estrutura. A Figura 2.24 apresenta um ensaio de queda livre realizado com o posicionamento de barreiras flexíveis na face vertical de uma pedreira.

Figura 2.24 – Ensaio de queda livre de blocos de rocha em barreiras flexíveis (Anderheggen *et al*., 2002).

Os ensaios realizados variaram desde a movimentação de blocos em taludes com inclinações diversas e sem posicionamento de barreiras a ensaios com posicionamento de barreiras flexíveis.

No caso de movimentos do tipo queda de blocos, destacam-se os experimentos reportados pela FHWA em 2001, envolvendo as valas de amortecimento e coleta de blocos. Pierson *et al*. (2001) montaram um campo experimental com diferentes configurações de valas (Figura 2.25) e monitoraram as quedas de blocos para coleta de

dados sobre movimentos típicos, distância de parada, amortecimento, e outros aspectos. A Figura 2.26 ilustra os testes realizados com blocos em talude de 12m de altura.

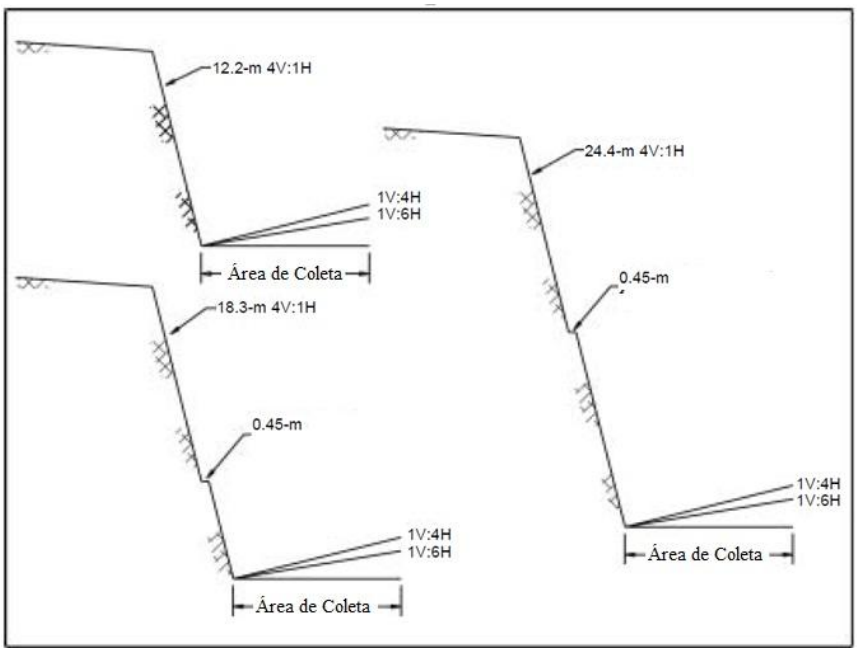

Figura 2.25 - Configurações de inclinações e valas na área experimental (modificado de Pierson *et al*., 2001).

Figura 2.26 - Ensaios de queda de bloco para verificação das valas de amortecimento (Pierson *et al*., 2001).

Os muros de impacto rígidos e do tipo diques reforçados com geossintéticos foram pioneiramente estudados por Nomura *et al*. (2002), em ensaios de campo de dimensões de 1,5m e 6,0m de altura e seção típica conforme apresentada na Figura 2.27. Os testes comprovaram a eficiência deste tipo de estrutura para o amortecimento de blocos em queda.

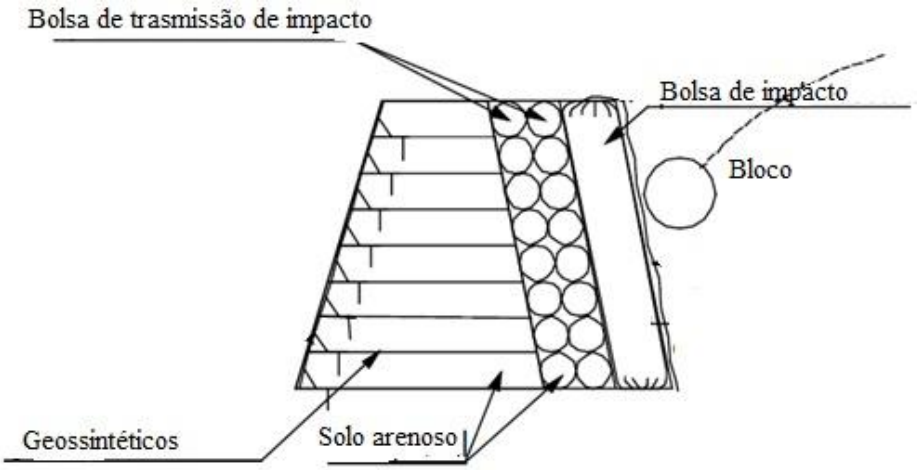

Figura 2.27 - Dique de proteção contra queda de blocos reforçados com geossintéticos (modificado de Nomura *et al*., 2002).

Figura 2.28 - Ensaio de queda de bloco em dique reforçado com geossintético (Nomura *et al.*, 2002).

Grassl *et al*. (2003) realizaram testes de grande escala em campo experimental na Suíça utilizando barreiras flexíveis de proteção contra a queda de blocos rochosos. O objetivo era a análise dos mecanismos de mobilização de resistência de cada componente do sistema de contenção em ensaios de queda de blocos de 160kN (16 toneladas e aproximadamente 8 m³), lançados de 60m de altura (Figura 2.29). Foram realizados ensaios em diferentes malhas e obtidos parâmetros de tempo de impacto, deflexão da malha e energia total do sistema (Figura 2.30).

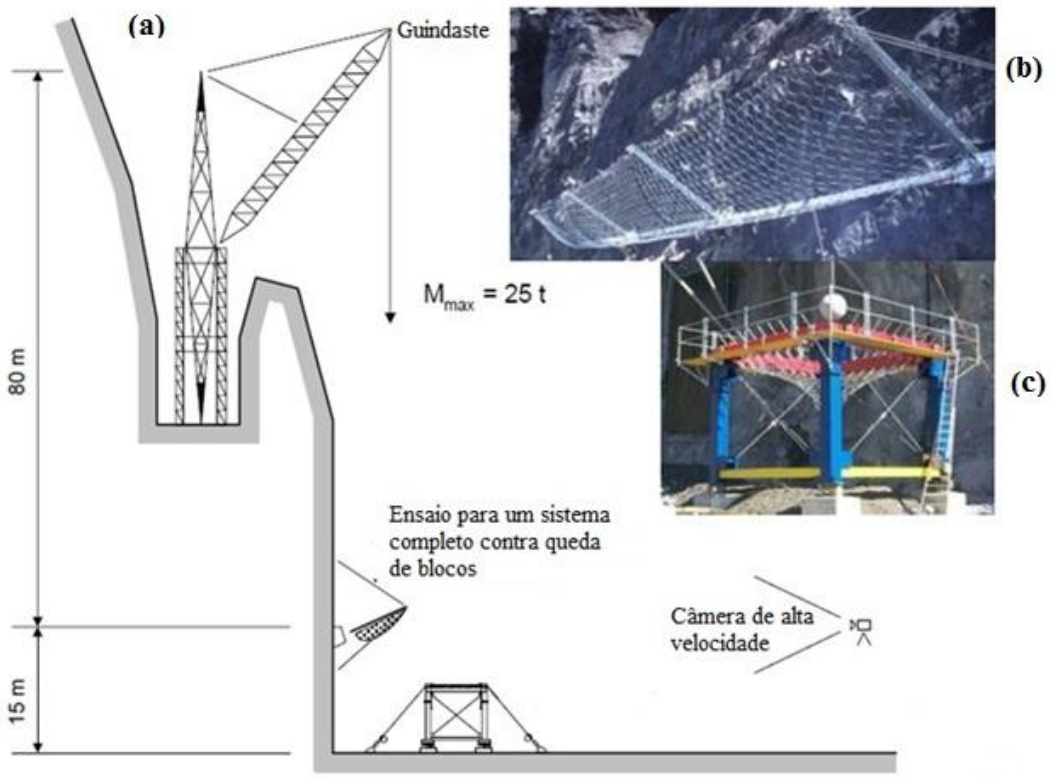

Figura 2.29 - Campo de testes suíço (a) vista de barreira flexível fixada na face do talude (b) vista do equipamento para teste em configurações variadas de malha (c) (modificado de Grassl *et al*., 2003).

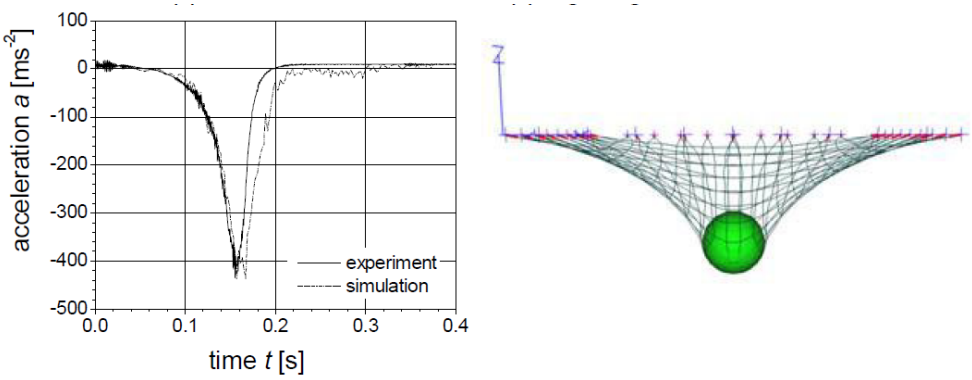

Figura 2.30 – Comparação de resultados experimentais e numéricos de um arranjo de barreira flexível (Grassl *et al*., 2003).

Cantarelli *et al*. (2008) reportam ensaios com blocos de concreto de massa variável, lançados verticalmente sobre barreiras flexíveis. A altura de lançamento também é variável. Sensores laser e sistema de câmeras de vídeo, devidamente posicionados, permitem observar o comportamento da barreira quando do impacto do bloco. A Figura 2.31 ilustra os ensaios realizados na Itália, seguindo a norma europeia ETAG027.

Figura 2.31 - Ensaios de barreiras em campo experimental (Cantarelli *et al*., 2008).

Bertolo *et al*. (2009) também apresentam resultados de ensaios de grande escala em telas metálicas de proteção contra queda de blocos e lascas rochosas. Os autores utilizaram um sistema em escala real que consiste em uma haste fixada ao terreno em um ângulo de 45º com a horizontal, que aplica uma força de até 200kN em uma semi esfera com diâmetro igual a 1,5m (Figura 2.32). A semi esfera solicita a superfície do sistema de proteção, simulando assim um bloco ou lasca que se desprende. Ao longo do ensaio, são medidas as forças nas ancoragens, deslocamento vertical, alongamento da haste de ensaio e a carga aplicada por ela. Os testes foram realizados com apoio da Maccaferri Itália.

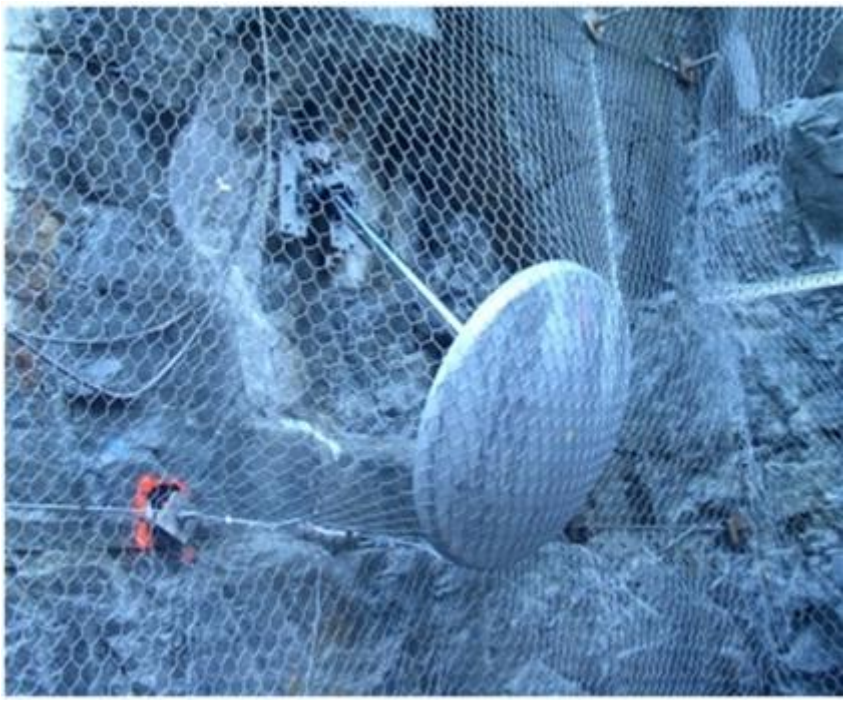

Figura 2.32 - Sistema de ensaio de telas metálicas para proteção de queda de blocos (Bertolo *et al*., 2009).

Em fluxo de detritos, alguns pesquisadores apresentam ensaios de grande escala para caracterização do movimento e de estruturas de proteção. Roth *et al*. (2004) apresentam resultados de testes realizados com barreiras flexíveis entre 1994 e 1995, em equipamento de rampa (*Flume*) do Departamento de Geologia da Califórnia (USGS), conforme ilustra a Figura 2.33. São apresentados 6 ensaios, com medidas de volume, velocidade de impacto, deflexão do painel e força nos cabos de ancoragem. As medidas

foram realizadas com sensores de profundidade por ultra-som, medidores a laser, piezômetros e células de carga. Como resultado, os painéis apresentaram grande flexibilidade e alta capacidade de absorção de impactos.

Figura 2.33 - Ensaio de rampa para fluxo de detritos com barreira flexível (Roth *et al*., 2004).

2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISE

Grande parte dos programas computacionais disponíveis é baseada em análises probabilísticas. Os programas numéricos constituem uma ferramenta importante de projeto, fornecendo dados importantes, tais como energia, altura do salto e alcance do bloco.

A proteção de áreas com alto risco de quedas de bloco de rocha e o projeto de medidas mitigadoras requerem a avaliação quantitativa e qualitativa das ações desenvolvidas pelo fenômeno. Desse modo, torna-se crucial a avaliação das trajetórias e das energias

cinéticas dos blocos durante o seu percurso de queda. Estes valores podem ser determinados através da utilização de modelos preditivos, mais ou menos sofisticados, capazes de simularem o fenômeno da queda de bloco em suas diferentes fases (queda livre, salto, rolamento e deslizamento) e usando formulações analíticas simplificadas. O conhecimento dos parâmetros físico-geométricos que governam o movimento elementar em seus estágios iniciais e ao longo da trajetória é essencial para escolher o modelo computacional mais confiável para realizar uma análise prospectiva do movimento de queda. A resposta em termos de confiabilidade que a utilização de um modelo de cálculo pode dar depende da validade das hipóteses simplificadoras empregadas e dos parâmetros de entrada atribuídos (Giani *et al*., 2004).

Ainda segundo GIANI *et al*. (2004), em geral, os modelos numéricos representam o movimento de queda de bloco como uma sequência de fases aéreas interrompidas por impactos e rebotes, realizando um balanço energético entre os impactos . As características cinemáticas do movimento após o impacto são determinadas pelos coeficientes de restituição normal e tangencial. Para cada impacto, o modelo assume uma variação local aleatória do ângulo de inclinação da encosta. A magnitude desta variação está contida dentro de um intervalo definido pelo parâmetro rugosidade da superfície. A análise pode considerar a descida de vários blocos ao longo de cada seção, permitindo uma avaliação estatística das características do movimento.

Segundo ROCHA (2009), alguns modelos analíticos consideram o bloco adimensional, ou seja, toda massa do bloco está concentrada em um ponto. Porém, alguns admitem o bloco como um elemento de massa, com forma e volume definidos. As duas premissas apresentam vantagens e desvantagens. Os modelos de massa concentrada tornam difícil a simulação de movimentos dos tipos deslizamento e/ou rolamento, uma vez que estes deslocamentos são fortemente influenciados pela forma do bloco. Os modelos que levam em conta a massa e a forma do bloco têm a capacidade de simular diferentes tipos de movimento. Entretanto pode ser uma tarefa difícil determinar a forma e o tamanho do bloco potencialmente instável da encosta devido às condições de acesso. Os programas mais utilizados na prática são os que consideram o bloco de rocha adimensional.

Os programas também se diferem quanto ao espaço de simulação, o qual pode ser bi ou tridimensional. Mais uma vez, ambas as considerações apresentam vantagens e desvantagens, cabendo ao profissional avaliar a capacidade de cada programa em simular um caso real da maneira mais satisfatória possível.

A análise de um evento histórico envolve, entre outras coisas, a avaliação do ponto de partida do bloco, o qual pode ser determinado através de cicatrizes na face da encosta. Além disso, o local de deposição dos blocos pode ser verificado através de testemunhos encontrados nas regiões inferiores das encostas.

As Tabelas 2.2 e 2.3 foram apresentadas por ROCHA (2009) e indicam os principais programas desenvolvidos nas últimas décadas e suas características mais relevantes respectivamente.

Tabela 2.2 – Programas para análise de queda de blocos de rocha (Rocha, 2009).

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

Tabela 2.3 – Características dos principais programas de simulação de queda de blocos (Rocha, 2009).

Características	**RocFall**	**CRSP**	**Georock**	**STONE**	**Rotomap**
Autores	Stevens (1998)	Pfeiffer & Bowen (1989, 91)	GeoStru (2002)	Guzzetti *et al.* (2002)	Scioldo (1991)
Análise	2D	2D	2D / 3D	3D	3D
Superfície de análise	Perfil trasnversal	Perfil transversal	Perfil transversal e DTM	DTM (Modelo digital do terreno)	DTM (Modelo digital do terreno)
Movimento tipo queda livre e/ou salto	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Movimento tipo rolamento	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Movimento tipo deslizamento	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Forma do bloco	Ponto (adimensional)	Esfera, cilindro, disco	Esfera, cilindro, disco	Ponto (adimensional)	Ponto (adimensional)
Números de blocos	Ilimitado	Ilimitado	1.000	Ilimitado	Ilimitado
Barreiras	Altura e inclinação	-	Altura e inclinação	-	Altura

No capítulo 3 é realizada uma apresentação do programa *RocFall* (*Rocscience Inc.)*, o qual foi utilizado nas análises numéricas desta pesquisa. Este programa realiza análise bidimensional através da elaboração de uma seção transversal referenciada por coordenadas de pontos (x,y) interligados por segmentos de reta. Pode-se adotar um número ilimitado de blocos nas análises, sendo estes blocos representados por um ponto adimensional de massa concentrada e que desenvolvem velocidades horizontal, vertical e angular. Em relação ao talude, o programa requer valores de coeficientes de restituição de energia, rugosidade e ângulo de atrito. O programa também admite o posicionamento de barreiras flexíveis, auxiliando a elaboração de projetos destas estruturas. Os resultados numéricos são representados pela trajetória, alcance, velocidades e energias dos blocos em movimento ao longo da seção. No caso de posicionamento de barreiras rígidas ou flexíveis, o programa fornece os valores de velocidade, posição e energia de impacto dos blocos na estrutura.

Em geral os programas numéricos de simulação de queda de blocos são muito sensíveis à variação dos parâmetros de entrada. Portanto, como em qualquer modelagem numérica que visa simular um evento ou condição real, a simulação de queda de blocos rochosos requer uma seleção criteriosa destes parâmetros bem como a adoção de um modelo geométrico realista.

Outro requisito indispensável para a utilização desses programas é a avaliação crítica dos resultados de saída, cujas informações são relativas a trajetórias médias mais prováveis. O profissional dever ter condições de avaliar e rejeitar eventuais trajetórias e resultados inconsistentes. Desta forma, o programa deve ser utilizado como uma ferramenta útil e prática, porém cabe ao usuário a responsabilidade pela definição dos parâmetros de entrada e, fundamentalmente, a avaliação dos resultados obtidos.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta os tipos de movimentos de massa em encostas rochosas, suas características e classificações. Também exibe os principais fatores condicionantes para as instabilidades, os quais incluem o grau de alteração do maciço, e as características de resistência e de distribuição das descontinuidades.

Foram apresentadas também as técnicas de estabilização de taludes rochosos, com especial atenção às barreiras flexíveis, que são estruturas esbeltas e de baixo impacto ambiental e estético, destinadas a interceptar o movimento do bloco de rocha durante sua descida pela encosta.

O capítulo faz ainda uma apresentação dos ensaios de campo e dos métodos numéricos de análise, com destaque para o programa numérico *RocFall*, mostrando sua importância para o entendimento, simulação e previsão dos tipos de movimentos de queda de bloco.

3 - PROGRAMA NUMÉRICO E CASOS DE ESTUDO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme já discutido no capítulo anterior, as encostas rochosas com potencial para quedas de blocos apresentam riscos de perda de vidas humanas, além de grandes transtornos econômicos e sociais. Na tentativa de simular o fenômeno da queda de blocos, foram desenvolvidos programas numéricos que auxiliam a tomada de decisão e a elaboração de projetos. Neste capítulo, é apresentado o programa numérico *RocFall* v.4.0.

Este capítulo apresenta também a descrição dos dois ensaios de campo selecionados para o estudo, sendo o primeiro realizado pelo Departamento de Transportes do Colorado (EUA) e o segundo realizado pelo Ministério Francês de Ecologia e Desenvolvimento Sustentável. O capítulo apresenta ainda, o caso histórico de queda de bloco de rocha ocorrido em 2005 na cidade de Provo, estado americano de *Utah*.

3.2 PROGRAMA NUMÉRICO ROCFALL

O *RocFall* (*Rocsciense Inc*) é um programa de análises probabilísticas desenvolvido para avaliar o fenômeno de queda de blocos de rocha em taludes instáveis. O programa é capaz de determinar energia, velocidade, altura de salto e ponto de parada do bloco, sendo uma importante ferramenta para a concepção de projetos de intervenção de engenharia e para a análise de risco de quedas de blocos.

Segundo STEVENS (1998), o RocFall é um programa robusto e de fácil utilização. A análise é realizada em duas dimensões e, portanto, é necessário determinar as seções transversais críticas da encosta rochosa, além de realizar um número considerável de análises para cada seção definida, alcançando um grupo de trajetórias potenciais para cada seção estudada.

As análises utilizam conceitos de balística, relacionando força gravitacional, impulso após cada choque com o talude, velocidade e as componentes vetoriais do bloco em

relação à encosta. Verificam ainda as fases aéreas interrompidas por choques contra o talude e em que condições o bloco continuará o movimento após estas colisões. É importante ressaltar que o *RocFall* adota o método de massa concentrada (*lumped mass*), sendo os blocos admitidos como pontos adimensionais com massa concentrada no centro de gravidade.

3.2.1 Definição da Geometria

As seções transversais adotadas para as análises são elaboradas com base em levantamentos topográficos de campo, e são definidas no programa por segmentos de reta unidos por pontos de coordenadas x, y (Figura 3.1). Cada segmento da seção analisada pode receber valores paramétricos diferentes, permitindo simular comportamentos geotécnicos distintos ao longo da encosta.

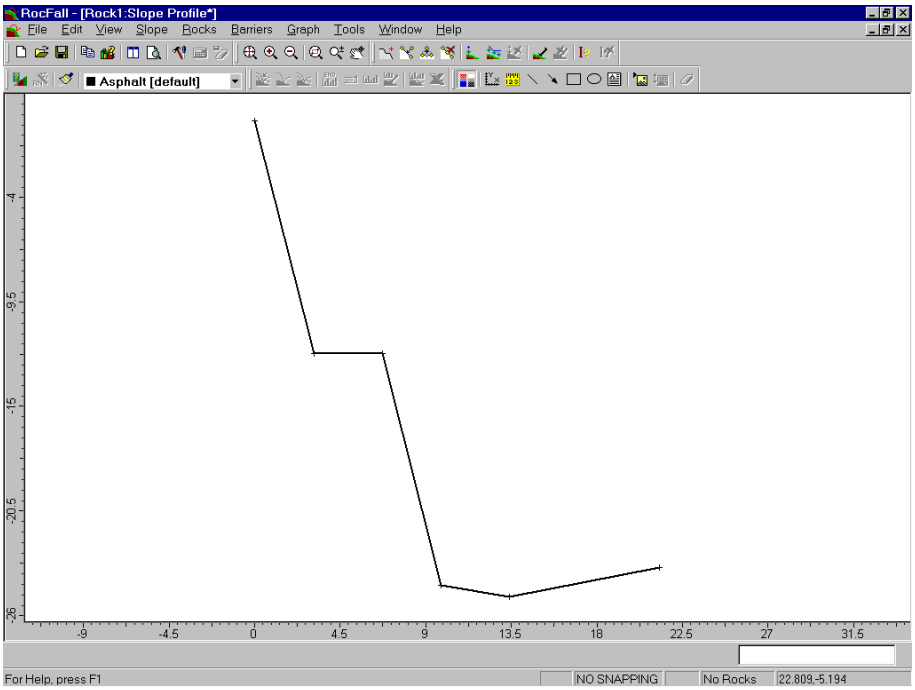

Figura 3.1 – Exemplo de definição da geometria do talude no programa *RocFall* (*Rocscience Inc*, 2002).

Na maior parte dos casos, a área de risco de queda de blocos estudada apresenta uma grande extensão, tornando inviável um levantamento que considere toda a encosta.

Neste contexto, o profissional terá que eleger as seções mais críticas para a realização de um levantamento topográfico.

3.2.2 Definição dos Materiais

Como acontece em muitos problemas de engenharia geotécnica, as encostas frequentemente apresentam variação dos materiais ao longo de uma seção transversal, resultando na variação dos parâmetros para cada trecho distinto. A seguir são apresentados os parâmetros relativos à superfície da encosta:

(i) Rugosidade: uma vez que o programa define a seção transversal por segmentos de reta, este parâmetro visa simular as imperfeições encontradas na superfície do talude. É representado por um desvio padrão do ângulo de inclinação da encosta, sendo determinado pelo profissional com base em estudos e inspeções das características reais encontradas em campo. De acordo com a literatura e o tutorial do próprio programa, os valores típicos ficam em torno de 0 a 5º. Se um trecho da seção com inclinação de 10º é definido com rugosidade 2º, por exemplo, este segmento terá sua inclinação variando de 8º a 12º;

(ii) Ângulo de atrito: este parâmetro é determinante para as condições de movimento do bloco, pois, quando o segmento da seção apresenta inclinação maior que o ângulo de atrito adotado, o bloco continua seu movimento. Contudo, quando o trecho exibe inclinação menor que o ângulo de atrito, o bloco apresentará uma tendência de redução do movimento;

(iii) Coeficientes de restituição normal e tangencial: Estes fatores estabelecem a quantidade de energia que é dissipada em função da colisão ou contato do bloco contra o talude. Os coeficientes K_n (coeficiente normal de restituição) e K_t (coeficiente tangencial de restituição) também atuam reduzindo as velocidades normal e tangencial à superfície do talude e são determinados em função do material encontrado na superfície estudada. O valor de K situa-se entre 0 e 1, com zero representando um material totalmente inelástico e 1 representando um material perfeitamente elástico. Comumente o valor destes coeficientes é maior para uma face de rocha sã, e menor para materiais mais alterados ou solos.

3.2.3 Definição das Características do Bloco

Quanto à posição inicial do bloco, pode-se definir sua localização como sendo um ponto único (o qual o programa denomina de “semeador”), com todos os blocos partindo deste referido ponto; ou uma linha “semeadora”, com a qual o usuário pode definir um intervalo representado por uma linha de onde os blocos darão início ao movimento.

O bloco pode ser posicionado em qualquer ponto da seção transversal. O ponto único deve ser utilizado quando se conhece a posição exata do bloco na encosta. Entretanto, quando se conhece apenas um possível intervalo de potenciais pontos de partida, deve-se utilizar a “linha semeadora”.

Além da posição inicial do bloco, devem ser definidas a sua massa e as velocidades iniciais de movimento (horizontal, vertical e angular).

A definição correta da massa do bloco é de extrema importância, entre outras coisas, porque as barreiras flexíveis são projetadas em unidades de energia. Desta forma, uma pequena variação da massa do bloco pode determinar uma variação significativa da energia do bloco ao longo de sua trajetória (Rocha, 2009).

3.2.4 Definição das barreiras

Assim como acontece com os blocos, as barreiras também podem ser posicionadas em qualquer ponto do perfil estudado, e são representadas por um segmento de reta. A possibilidade de inserir uma barreira no modelo é uma importante ferramenta de projeto. O usuário tem condições de posicionar e dimensionar a barreira em função da trajetória do bloco, da altura de salto e da energia desenvolvida ao longo da encosta.

As propriedades da barreira que o programa permite ao usuário selecionar são a sua capacidade em Joules (J) e os coeficientes de restituição, os quais podem definir um comportamento perfeitamente inelástico (igual a zero), perfeitamente elástico (igual a 1) ou elástico inelástico (variando de 0 a 1)

A barreira interrompe a trajetória se sua capacidade for maior que a energia de impacto desenvolvida pelo bloco. Caso contrário, a estrutura é perfurada e o movimento continua com a energia cinética reduzida de igual valor ao da capacidade da barreira.

3.2.5 Resultados

O programa fornece uma série de trajetórias de movimentos (Figura 3.2), sendo estas equivalentes ao número de blocos adotados na análise, além de permitir a escolha de um ou mais intervalos para coleta de dados ao longo desta trajetória. As informações relativas à energia cinética, velocidade e altura de salto do bloco serão coletadas em função do número de intervalos estipulados para amostragem.

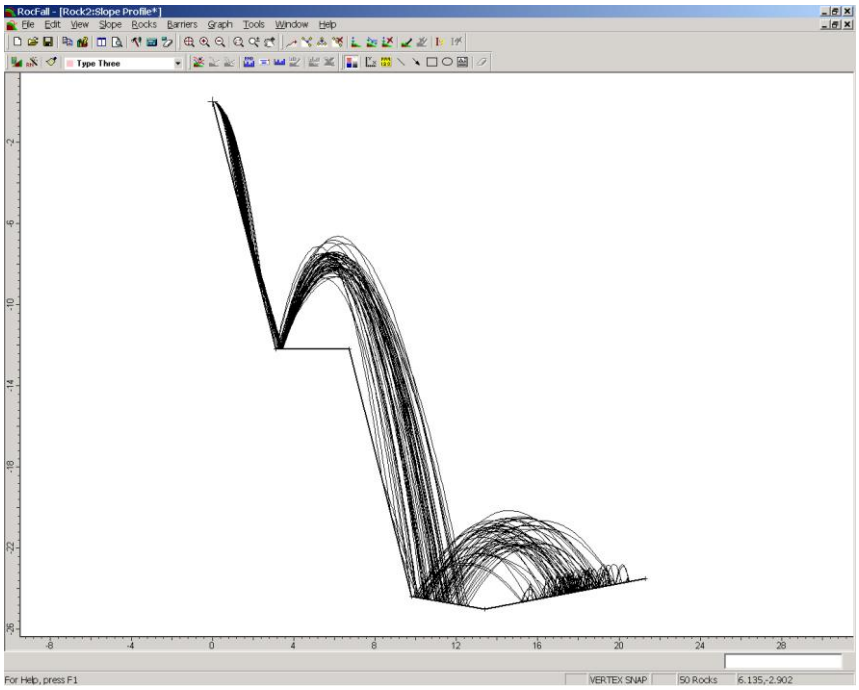

Figura 3.2 – Exemplo de trajetórias de movimentos geradas pelo programa *RocFall* (*Rocscience Inc*, 2002).

STEVENS (1998) relata que embora desconsidere o tamanho e a forma do bloco, o modelo de cálculo adotado pelo *RocFall* é robusto e rápido, o que permite ao usuário a realização de análises de sensibilidade dos resultados.

Os dados também são disponibilizados na forma de gráficos ao longo da trajetória de movimento, os quais podem ser referentes à energia cinética total, energia cinética translacional, energia cinética rotacional, altura de salto, velocidade translacional e rotacional e a posição final do bloco, sendo esta última uma informação muito importante para a avaliação de risco para edificações e pessoas (Figura 3.3).

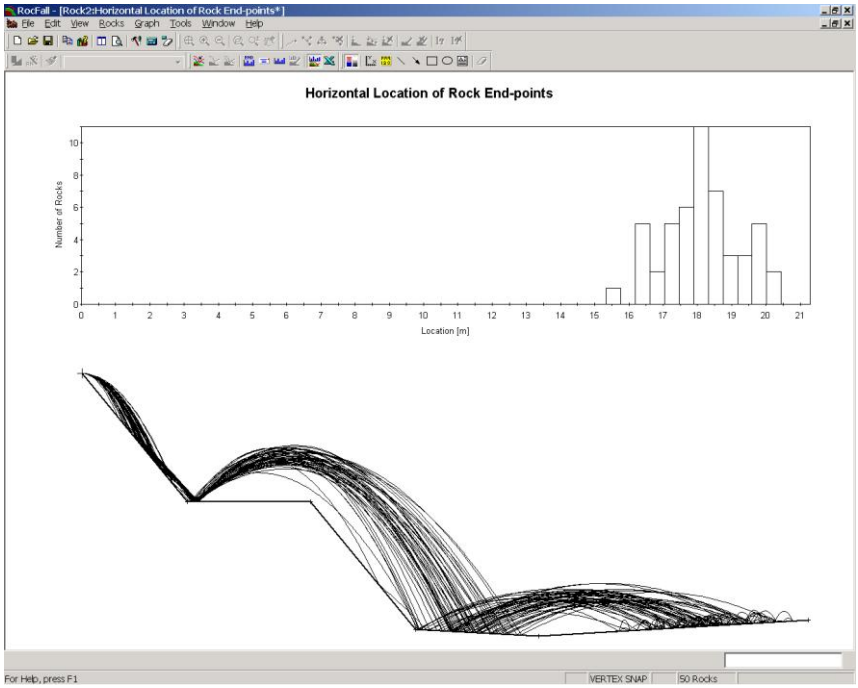

Figura 3.3 – Gráfico com distribuição do pontos de parada dos blocos (*Rocscience Inc*, 2002).

O programa fornece, na forma de gráficos de distribuição, dados relativos ao impacto do bloco contra a barreira, cujas informações são referentes às coordenadas x, y do impacto, velocidades e energias cinéticas.

O usuário também pode optar por fazer a coleta de dados em um ponto específico da seção, o qual apresenta gráficos de distribuição para este ponto.

3.3 CASO DE ESTUDO I – ENSAIO DE CAMPO NOS ALPES FRANCESES

3.3.1 Introdução

O Ministério Francês da Ecologia e do Desenvolvimento Sustentável realizou uma série de ensaios em escala real, monitorados por câmeras de alta velocidade, em uma área de testes localizada nos Alpes daquele país. O objetivo dos ensaios foi convidar consultores que utilizam programas computacionais, bem como desenvolvedores de programas, para utilizar seus modelos de simulação na tentativa de estimar o mais aproximadamente possível as trajetórias dos blocos ensaiados. Para tanto, os dados fornecidos aos participantes foram:

(i) Localização geográfica do campo experimental;
(ii) A forma e o volume dos blocos utilizados nos experimentos e;
(iii) A posição de duas câmeras utilizadas no monitoramento dos movimentos dos blocos.

Naturalmente, a definição dos parâmetros relativos à superfície da encosta no campo experimental era responsabilidade dos participantes.

Apenas 7 dos 12 participantes que retornaram seus resultados foram capazes de prever o ponto de parada dos blocos com uma margem de erro de $\pm$ 10%. Os erros máximos foram da ordem de 400%.

De acordo com os responsáveis, entre os modelos comerciais envolvidos, três deles foram utilizados por múltiplos participantes. Os resultados mostraram que dois usuários diferentes podem obter estimativas inválidas ou bem acuradas, utilizando o mesmo programa, indicando que o papel do especialista é crucial na utilização de modelos de simulação. Ainda, segundo os coordenadores do ensaio, dois tipos de público estão interessados nos resultados deste experimento:

(i) Consultores que trabalham no campo da avaliação de risco de queda de blocos de rocha utilizando modelos de simulação de trajetórias e;

(ii) Gestores públicos e toda a sociedade diretamente afetada por eventos do tipo queda de bloco.

O primeiro grupo quer saber se o modelo já foi utilizado na avaliação de risco de queda de blocos com confiabilidade ou se necessita de ajustes, e, o segundo grupo deseja ter informações sobre o desempenho do modelo em relação a condições específicas de campo.

A comparação dos resultados propostos nos ensaios teve o objetivo de aumentar o conhecimento científico sobre os principais modelos adotados e fornecer informações pertinentes aos participantes. O programa de ensaios não objetivou elaborar um ranking de modelos ou muito menos emitir certificados.

Os realizadores esclareceram que, uma vez que o conjunto de resultados se refere a um único local (campo experimental), os ensaios não podem ser utilizados como base para uma classificação dos diferentes produtos utilizados, mas a análise dos resultados permite:

(i) Entender as potenciais diferenças entre os resultados provenientes das simulações de acontecimentos reais de queda de blocos;
(ii) Realizar uma primeira análise crítica de modelos de simulação de trajetória usando um experimento real bem documentado e;
(iii) Fornecer aos consultores, pesquisadores e gerentes de projetos um panorama geral sobre os produtos utilizados, bem como uma informação comparativa sobre os resultados das simulações, com base em dados reais.

3.3.2 Procedimentos de ensaio

Os ensaios foram realizados liberando blocos com volumes e formas conhecidas, com a utilização de uma escavadeira mecânica, a partir de um ponto especificado. Foram lançados 100 blocos, cujas trajetórias e pontos de depósito foram mapeados. Também foram verificadas as velocidades e as alturas com que os blocos passavam pelos pontos de medição.

A primeira câmera de alta velocidade foi posicionada a uma distância de 185,0 metros do ponto de lançamento dos blocos, e a segunda câmera, 235,0 metros após.

A Figura 3.4 apresenta o levantamento topográfico do campo experimental, com curvas de nível a cada 2,5 metros. A planta também indica o posicionamento das câmeras de medição e do ponto de lançamento dos blocos.

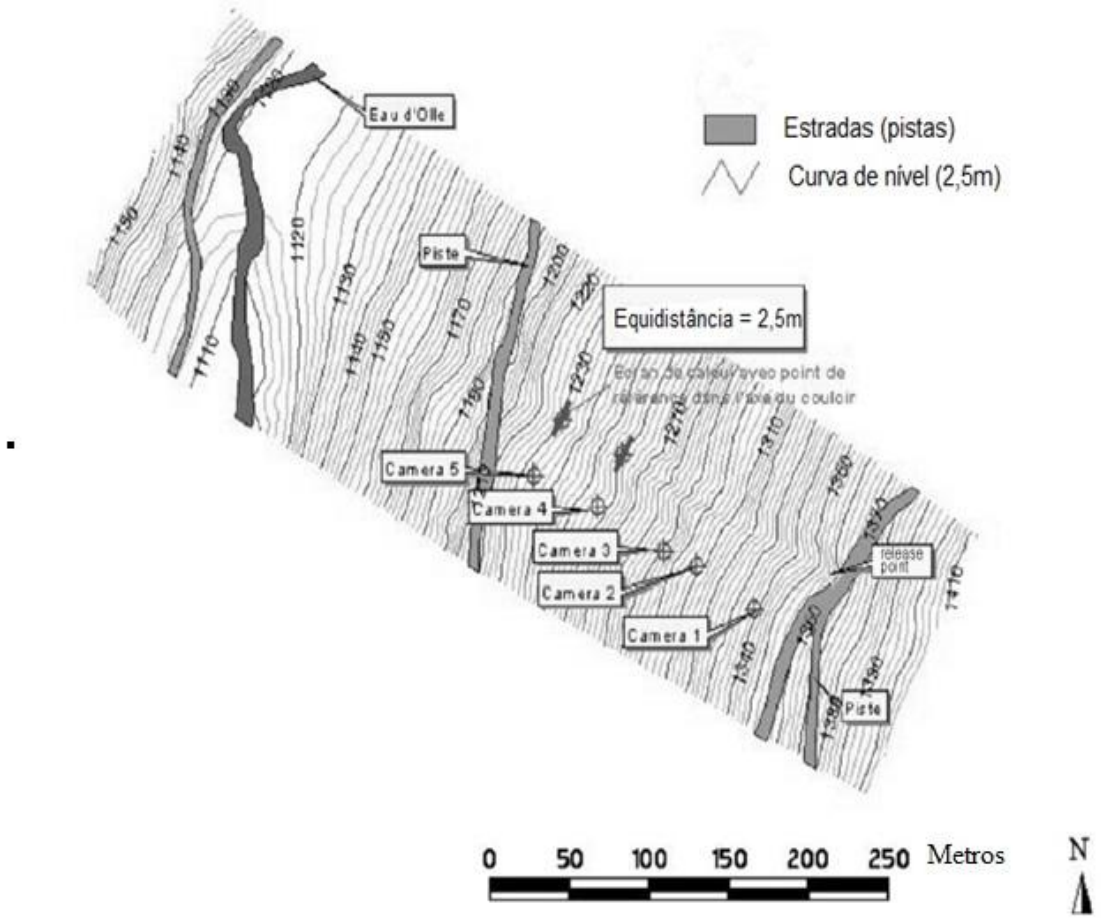

Figura 3.4 – Levantamento topográfico da área do ensaio da França (modificado de Berger e Dorren, 2006).

Os participantes deveriam caracterizar o solo e sua capacidade de dissipação de energia, e todos os blocos ensaiados foram retirados de suas posições originais de depósito. No final dos testes, cada participante recebeu um comparativo dos seus próprios resultados com os dados reais, além de uma tabela anônima com os intervalos de erros dos demais participantes.

3.3.3 Resultados

Os dados obtidos nas simulações foram comparados com aqueles obtidos nos experimentos reais. A Tabela 3.1 mostra um exemplo de resultados obtidos através das câmeras de monitoramento.

Tabela 3.1 – Exemplo de resultados obtidos com as câmeras de alta velocidade utilizadas no ensaio da França (modificado de Berger e Dorren, 2006).

	Altura do Salto (m)				Velocidade (m/s)				Energia Cinética (kJ)			
	Max.	Min.	Média	Desvio	Max.	Min.	Média	Desvio	Max.	Min.	Média	Desvio
Câmera1	5,0	0,0	1,4	1,1	28,1	1,8	12,5	5,2	786,4	3,3	204,9	168,8
Câmera2	6,2	0,0	1,6	1,4	28,9	4,5	13,8	5,5	958,3	21,1	244,5	196,3
Erro de medição	+/- 5%				+/- 5%				+/- 15%			

A comparação dos resultados foi apresentada na forma de índices que representam o desvio entre o valor simulado e o observado (Tabela 3.2). Este índice corresponde ao valor simulado * 100 / valor observado. Um índice maior do que 100% representa superestimação, enquanto um valor inferior a 100% representa subestimação.

Tabela 3.2 – Exemplo de comparação de resultados apresentados (modificado de Berger e Dorren, 2006).

	Razão Vmax		Razão Hmax		Razão Emax	
	Câmera 1	Câmera 2	Câmera 1	Câmera 2	Câmera 1	Câmera 2
Part. 1	103	92	135	143	91	101
Part. 2	102	97	63	109	n.a	n.a
Part. 4	49	36	91	70	12	14
Part. 7	138	124	535	732	n.a	n.a
Part. 8	57	56	56	65	37	34
Part. 9	39	32	0	0	18	15
Part. 11	72	73	42	54	74	78
Part. 12	37	24	4	6	8	16
Part. 13	69	63	38	37	73	72
Part. 14	78	77	79	69	87	79
Part. 15	183	172	101	109	472	513
Part. 17	90	81	117	113	87	96

Além dos dados relativos às velocidades, energias e alturas de salto, o experimento também analisou as trajetórias e os pontos de depósito dos blocos, sendo esta variável de extrema importância, no que diz respeito à proteção de pessoas e edificações.

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam um mapa com a distribuição dos pontos de parada dos 100 blocos ensaiados e um mapa indicando três eixos gerais de trajetórias desenvolvidas pelos blocos, respectivamente.

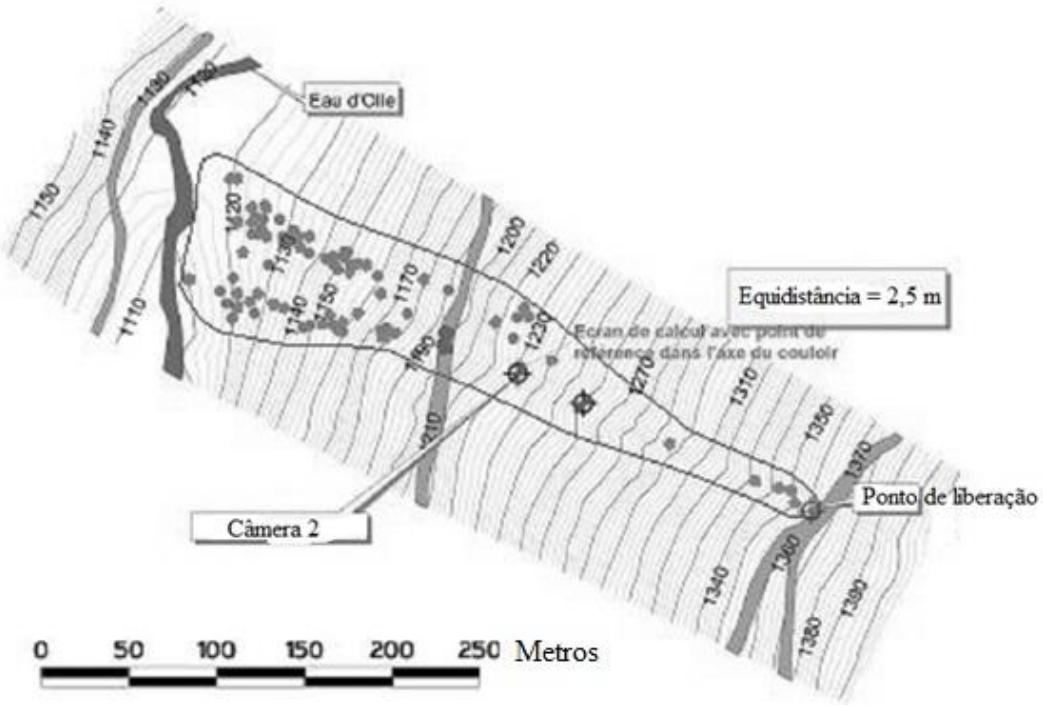

Figura 3.5 - Mapa com a distribuição dos pontos de parada dos blocos ensaiados na área experimental da França (modificado de Berger e Dorren, 2006).

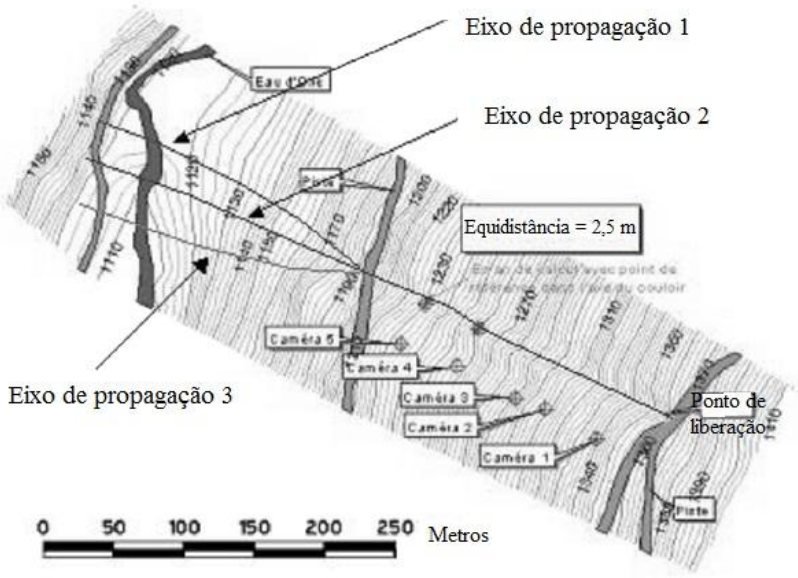

Figura 3.6 – Mapa com os três eixos de trajetória desenvolvidos pelos blocos no ensaio da França (modificado de Berger e Dorren, 2006).

Em relação aos pontos de parada dos blocos, os participantes expressaram seus resultados na forma de cotas ou coordenadas. Os organizadores apresentaram os resultados reais e os resultados dos participantes na forma de classes de altitudes, permitindo apresentar o percentual de blocos que chegaram a uma dada coordenada no levantamento topográfico. A Tabela 3.3 apresenta um exemplo de resultados divulgados pelos organizadores em relação ao ponto de parada dos blocos.

Tabela 3.3 – Valores obtidos pelos participantes em relação ao máximo ponto de parada dos blocos nos ensaios nos Alpes franceses (modificado de Berger e Dorren, 2006).

	Valor observado	Part. 2	Part. 4	Part. 7	Part. 8	Part. 9	Part. 11	Part. 12	Part. 13	Part. 14	Part. 15	Part. 17
Max. distância alcançada	390	385	360	355	395	355	365	395	275	390	400	430
Diferença da Distância Simulada	0	-5	-30	-35	5	-35	-25	5	-115	0	10	40
Razão de distância (simulada / observada)	100%	99%	92%	91%	101%	91%	94%	101%	71%	100%	103%	110%
Probabilidade de parar em 385-400 m (%)	4			0	7	0	0	20	0	2	100	11
Probabilidade de passar de 385-400 m (%)	0				0			0		0	0	7

Devido à escolha de realizar um teste “cego”, os participantes não puderam recolher todo o conjunto de dados necessários para uma retro análise usando seus modelos de simulação de trajetória. Assim, os participantes foram confrontados com uma situação mais desfavorável do que aquela encontrada na realidade. No futuro, os organizadores consideram não realizar um teste completamente “cego”, por exemplo, deixando na área experimental alguns testemunhos (impactos do bloco contra a encosta e seu ponto de parada original).

Finalmente, destaca-se que esta dissertação está baseada no trabalho publicado por Berger e Dorren (2006), no qual foram divulgados os dados completos de apenas 1 dos 100 blocos ensaiados, sendo este bloco alvo das análises apresentadas no Capítulo 4 desta dissertação.

O referido bloco foi identificado como bloco 41 e apresentava as seguintes características:

(i) Dimensões: 120 × 100 × 70 centímetros;
(ii) Volume: 0,84 m³;
(iii) Massa: 2.350 kg;
(iv) A distância percorrida do ponto de partida até o ponto de parada foi de 391,2 m, partindo da cota 1365,00 m e parando na cota 1119,85 m.

3.4 CASO DE ESTUDO II – CASO HISTÓRICO EM *UTAH*, EUA

3.4.1 Introdução

Em maio de 2005, uma série de blocos de rocha desceu do alto de uma encosta denominada de Montanha Y, acima da cidade de Provo, no estado americano de *Utah*. Um dos blocos atingiu e danificou severamente uma casa localizada no pé da encosta, felizmente não havia ninguém na casa no momento do acidente. Destaca-se a intensa precipitação pluviométrica que ocorria na região durante o evento de queda de blocos.

A Divisão de Serviços de Emergências e Segurança Interna de *Utah* solicitou uma investigação sobre o evento, a qual foi realizada pelo Serviço de Inspeção Geológica de *Utah*. A investigação procurou determinar as características geológicas do evento e avaliar o potencial risco de eventos futuros, auxiliando a tomada de decisão do gestor público em relação às casas e demais edificações da região atingida.

De acordo com a investigação geológica, o ponto de origem dos blocos, ou ponto "semeador", está localizado a 867 metros acima da casa atingida (Figura 3.7). Foram encontrados inúmeros blocos depositados ao longo do bairro investigado, indicando uma série de eventos anteriores e mostrando que algumas edificações se encontram em área de risco de queda de blocos.

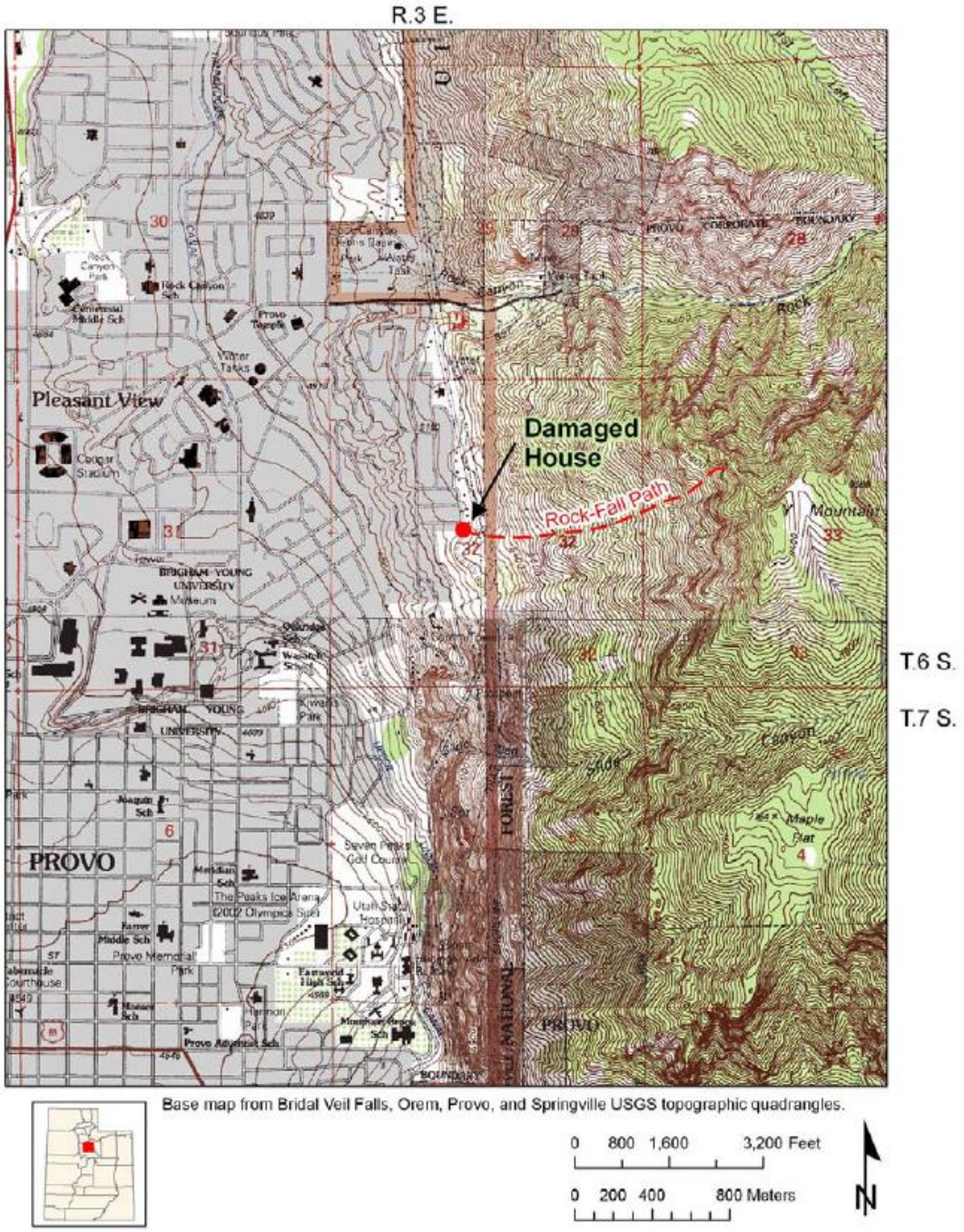

Figura 3.7 – Mapa topográfico da região do evento de queda de blocos em *Utah* (Giraud e Christenson, 2005).

Os investigadores recomendaram que os moradores fossem informados que estão em uma área de risco de queda de blocos de rocha, e que contratassem um consultor geotécnico para avaliação individual dos riscos, bem como para avaliar a necessidade de adoção de medidas de proteção.

3.4.2 Descrição da área

Os blocos partiram de uma face íngreme da montanha "Y", na região superior da encosta. A escarpa rochosa é seguida de tálus e materiais coluvionares na região inferior da encosta, cuja inclinação média é de aproximadamente 28,5º (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Vista frontal da encosta rochosa investigada em *Utah* (Giraud e Christenson, 2005).

O bloco desenvolveu sua trajetória provavelmente envolvendo energias, velocidades e alturas de saltos elevadas. A investigação detectou crateras de impacto do bloco contra o material coluvionar com inclinação aproximada de 20º, localizadas acima da casa danificada (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Cratera de impacto acima da casa atingida em *Utah* (Giraud e Christenson, 2005).

O bloco que se chocou contra a casa tem dimensões aproximadas de 7,0 x 5,1 x 4,5 metros e massa estimada em 1300 kN (Figura 3.10). A casa atingida foi totalmente destruída (Figura 3.11).

Figura 3.10 – Bloco que atingiu a casa na cidade de Provo (Giraud e Christenson, 2005).

Figura 3.11 – Vista da casa destruída pelo impacto do bloco (Giraud e Christenson, 2005).

O evento de queda de bloco de *Utah* foi objeto de análises numéricas de simulação de trajetória de movimento e de ponto de parada final do bloco neste trabalho, cujos resultados são apresentados no Capítulo 4 desta dissertação.

3.5 CASO DE ESTUDO III – ENSAIO DE CAMPO NO COLORADO, EUA

3.5.1 Descrição da área de ensaio

Após uma série de eventos de queda de bloco de rocha ocorridos na rodovia interestadual 70, os quais causaram grandes transtornos econômicos e sociais, o Conselho Nacional de Pesquisas de Transportes dos Estados Unidos, em parceria com Departamento de Transportes do Colorado realizou um programa de ensaios para o entendimento do fenômeno de queda de bloco e do comportamento das barreiras flexíveis. O ensaio abordado neste estudo foi realizado na referida rodovia interestadual

70, entre as cidades de *Geogetown* e *Denver*, 25 quilômetros a leste de *Geogetown*, em uma localidade denominada *Hidden Valley* (Figura 3.12).

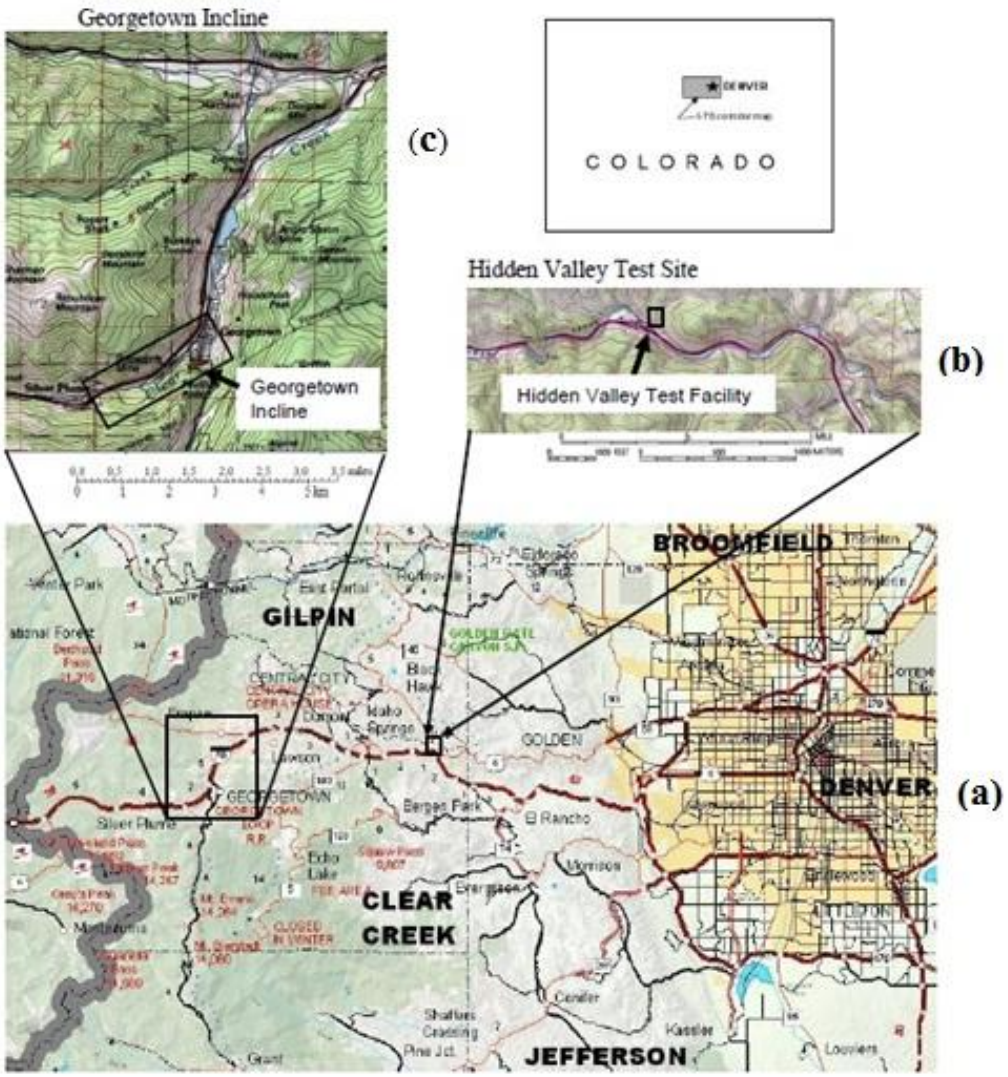

Figura 3.12 – Mapa da região (a) localização da área de testes (b) localização da encostas com incidência de quedas de blocos no Colorado (Arndt *et al.*, 2009).

Este local foi escolhido por apresentar as condições de segurança adequadas, tanto para os usuários da rodovia quanto para os realizadores do ensaio, e também por apresentar as condições técnicas favoráveis. O local selecionado apresenta um talude rochoso quase vertical, com pouca ondulação, possibilitando a liberação do bloco testado a partir de um guindaste posicionado próximo à face da encosta, seguido de um talude de solo

com 15,0 metros de comprimento e inclinação média de 35º. Na base do referido talude foi construída uma estrutura rígida de terra como medida de segurança.

O ensaio foi concebido de modo que um bloco pré-fabricado pudesse ser solto por um guindaste em alturas determinadas, realizando um movimento do tipo queda livre até tocar a face da encosta rochosa. A partir desse ponto, o bloco desenvolveria seu movimento sobre uma rampa de concreto com 50º de inclinação, construída sobre o talude de solo abaixo da face rochosa. Uma barreira flexível foi posicionada ao final desta rampa. Após a barreira, foi determinada uma área de coleta, para retirada dos blocos que passassem pelo sistema atenuador.

A Figura 3.13 apresenta uma vista geral da área de ensaio e a Figura 3.14 mostra uma seção esquemática do projeto da área do ensaio.

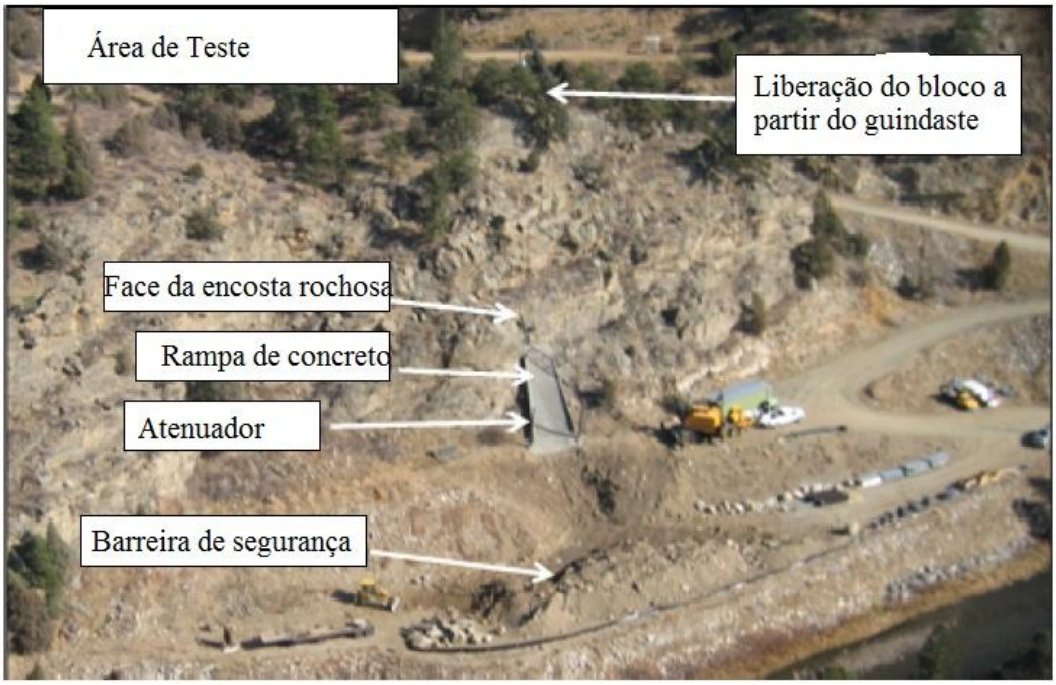

Figura 3.13 – Vista geral da área de teste no Colorado (modificado de Arndt *et al*., 2009).

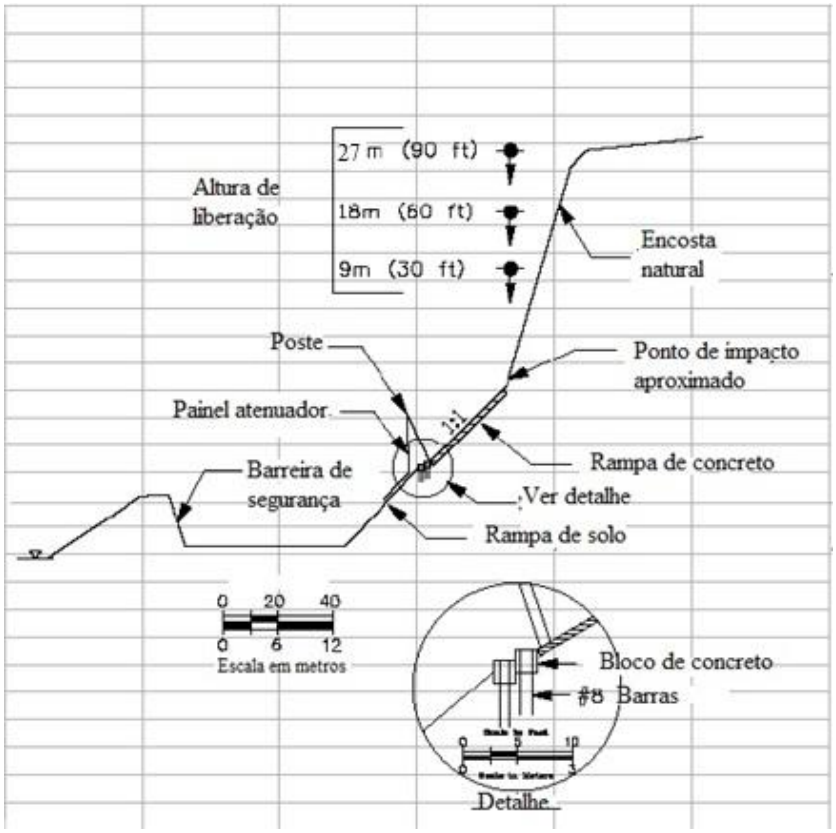

Figura 3.14 – Seção esquemática da área do ensaio de campo do Colorado (modificado de Arndt *et al*., 2009).

Foi necessária a implantação de uma proteção de borracha no ponto de impacto do bloco com a face da encosta (Figura 3.15), cujos objetivos seguem listados abaixo:

(i) Proteção da face da encosta, uma vez que o ensaio foi realizado em área particular;
(ii) Proteção do bloco pré-fabricado contra fragmentação após o impacto e;
(iii) Controle da trajetória do bloco em direção ao sistema atenuador, visto que os testes prévios realizados sem a proteção de borracha resultaram em grande variabilidade de trajetórias de saltos dos blocos.

Figura 3.15 – Vista geral da proteção de borracha utilizada na face da encosta do ensaio do Colorado (Arndt *et al*., 2009).

Os blocos utilizados no ensaio foram fabricados na forma de cubos octaédricos com bordas e cantos acentuados, simulando de maneira mais aproximada possível um bloco natural (Figura 3.16). As faces dos blocos foram pintadas para facilitar a análise dos movimentos em alta velocidade com a utilização das imagens obtidas no ensaio. A Tabela 3.4 apresenta as dimensões e as massas dos seis blocos ensaiados.

Figura 3.16 – Vista geral dos blocos para o ensaio do Colorado (Arndt *et al*., 2009).

Tabela 3.4 – Características dos blocos pré fabricados (modificado de Arndt *et al*., 2009).

Bloco	Massa (kg)	Diâmetro aproximado (m)
A	1.618	1
B	1.695	1
C	1.577	1,3
D	2.259	1,3
E	2.173	1,3
F	3.823	1,6

3.5.2 Procedimentos de coletas de dados

Três câmeras de alta velocidade, com capacidade para capturar 250 quadros por segundo, foram usadas para documentar o ensaio (Figura 3.17).

A câmera 1 foi posicionada na lateral da rampa e utilizada para medir a velocidade e a energia do bloco durante o seu movimento ao longo da rampa de concreto. Desse modo, foi possível calcular as energias utilizando a distância percorrida ao longo do tempo.

A câmera 2 foi instalada de modo a capturar a interação do bloco com o painel atenuador, sendo possível analisar a viagem do bloco através do sistema e também o seu comportamento quando este ficou preso na barreira. Em muitas ocasiões a imagem não ficou nítida, devido a poeira e a detritos levantados pelo impacto.

A câmera 3 foi utilizada para a obtenção de uma vista, em elevação, do bloco viajando sob o painel atenuador.

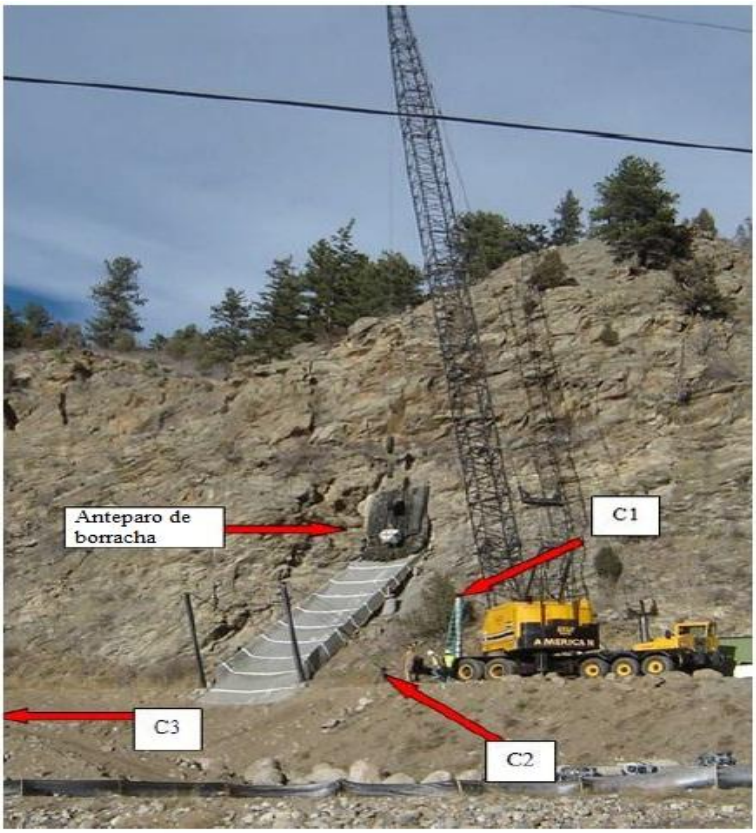

Figura 3.17 – Vista geral com indicação do posicionamento das câmeras no ensaio do Colorado (modificado de Arndt *et al*., 2009).

Figura 3.18 – Exemplo de fotografia tomada com a câmera 1 (Arndt *et al*., 2009).

Depois de salvar os arquivos em um disco rígido, foi realizada a análise dos movimentos dos blocos ao longo de sua descida pela rampa. Nos casos em que a altura de salto do bloco foi inferior a 0,3 metros, foi possível estimar as velocidades a partir das imagens com o auxílio das marcas de calibração pintadas na rampa. Nos casos em que a altura de salto foi maior que 0,3 metros, foi difícil estimar a distância entre dois pontos por métodos visuais, sendo necessário utilizar um programa para analisar os movimentos.

Além das câmeras de alta velocidade, foi utilizado um extensômetro elétrico (*Strain gauge*) para cada um dos dois postes da barreira flexível. Estes medidores foram soldados na região inferior dos postes e conectados a um sistema de fibra ótica, permitindo a análise dos dados de deformação dos postes em tempo real. Os dados foram utilizados para avaliar o intervalo de tempo do impacto do bloco com o poste, e não entram no escopo desta dissertação.

3.5.3 Procedimentos do ensaio

Os ensaios foram conduzidos realizando a liberação dos seis tipos de blocos pré-fabricados erguidos por uma grua em três alturas determinadas. Ao final da queda livre, o bloco se choca contra a proteção de borracha instalada na face da encosta, e a energia verticalmente orientada é convertida em energia rotacional e certa velocidade horizontal é gerada. Desse modo, o bloco começa a girar e se deslocar lateralmente para fora do talude, começando sua viagem ao longo da rampa de concreto em uma combinação de rolamentos e saltos. Na base da rampa, o bloco é interceptado pelo sistema atenuador e depois coletado em área própria.

Três alturas distintas de lançamento dos blocos foram estipuladas, 9,0; 18,0 e 27,0 metros acima da rampa de concreto. Um total de 113 ensaios individuais foi realizado, com diferentes blocos e barreiras, ressaltando que os valores das energias não foram calculados para todos os ensaios.

Em muitos casos, para cada barreira ensaiada, o bloco começou sendo lançado do início da rampa com a altura de lançamento aumentando progressivamente. Entretanto, a maioria das sequências de ensaio teve a altura de lançamento limitada a 18,0 metros,

uma vez que a altura de 27,0 metros resultava em saltos muito grandes, além de provocar danos à rampa de concreto.

Foram utilizados quatro postes dispostos com espaçamento de 6,0 metros, altura de 6,0 metros e uma variada configuração de painéis (Figura 3.19).

Figura 3.19 – Configuração geométrica de um dos sistemas atenuadores ensaiados no Colorado (Arndt *et al*., 2009).

3.5.4 Resultados

Os resultados dos ensaios foram agrupados em 4 categorias principais:

(i) Energias cinéticas com base nas gravações de alta velocidade, utilizando método visual e um programa computacional;
(ii) Reação da barreira após o impacto inicial;
(iii) Reação da região final (cauda) da barreira e;
(iv) Conexões dos postes com as fundações.

As velocidades translacional e rotacional foram obtidas usando o método de análise visual das imagens para 41 ensaios e o programa computacional de análise de

movimento foi utilizado para 32 ensaios. Uma vez que as massas dos blocos eram conhecidas com precisão, as estimativas de velocidades foram facilmente convertidas em estimativas de energias.

Cabe destacar que esta dissertação tem o objetivo de analisar apenas os resultados dos 41 ensaios relativos às energias cinéticas estimadas pelo método visual de análise das imagens capturadas em alta velocidade.

4 - ANÁLISES NUMÉRICAS

4.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os modelos científicos costumam ser formulados em termos de programas computadorizados, que procuram simular o comportamento de sistemas naturais por meio de cálculos numéricos (Press *et al*., 2006).

O presente trabalho apresenta uma avaliação, por meio de análises numéricas utilizando o programa *RocFall* versão 4.0 (*Rocscience Inc.*), dos resultados de trajetórias de movimento, pontos de alcance e energia cinética total alcançada por blocos de rocha em ensaios realizados em verdadeira grandeza, bem como em um caso histórico de queda de bloco.

Durante a realização das análises, procurou-se organizar as grandezas avaliadas de forma a observar as etapas usualmente aplicadas à prática de projeto de medidas mitigadoras. As análises obedeceram a seguinte sequência:

(i) Trajetória do movimento;
(ii) Ponto de parada do bloco e;
(iii) Energia cinética total.

Com o objetivo de tornar a leitura mais dinâmica, os casos de estudo abordados neste trabalho serão identificados no texto como:

a) Caso de estudo I: Ensaio da França;
b) Caso de estudo II: Caso de *Utah*;
c) Caso de estudo III: Ensaio do Colorado.

4.2 DADOS EXPERIMENTAIS E OBSERVADOS

4.2.1 Caso de Estudo I – Ensaio da França

As análises foram conduzidas com base nos dados obtidos em uma campanha de ensaios de queda de blocos de rocha realizada em uma área experimental nos Alpes franceses. Os dados do ensaio utilizados nas análises seguem relacionados abaixo:

- Levantamento topográfico da área de teste (Figura 3.4);
- Dados relativos ao bloco ensaiado de número 41, o qual apresentava dimensões de 120 x 100 x 70 centímetros, volume de 0,84 m³ e massa de 2350 kg;
- Resultados: (i) Trajetórias de movimento representadas por três eixos preferenciais ao longo da encosta (Figura 3.6); (ii) Ponto de lançamento do bloco (cota 1365,0 metros) e ponto de parada (cota 1119,5 metros), percorrendo uma distância planimétrica de 391,2 metros.

4.2.2 Caso de Estudo II – Caso de *Utah*

O estudo numérico foi realizado na tentativa de simular um caso real de queda de bloco ocorrido em maio de 2005 na cidade de *Provo*, estado americano de *Utah*. Esta queda de bloco destruiu uma casa localizada na região inferior da encosta e foi investigada pelo Serviço de Inspeção Geológica de *Utah*.

As análises foram realizadas com base nas informações contidas no relatório emitido pelo referido Serviço de Inspeção. A equipe encarregada de investigar o evento de queda de bloco mencionado realizou voos panorâmicos sobre a região na tentativa de identificar cicatrizes e crateras de impacto do bloco contra a superfície da encosta, possibilitando localizar o ponto de partida do bloco, bem como sua trajetória e os tipos de movimentos desenvolvidos ao longo da encosta.

O relatório apresenta ainda, um levantamento topográfico de toda região montanhosa, com curvas de nível a cada 15,0 metros aproximadamente (Figura 3.7).

O estudo indicou que o ponto de origem do bloco está localizado na região superior da encosta, aproximadamente na cota 2378 metros, e o ponto de parada foi identificado na cota 1570 metros.

Os dados relativos ao bloco foram obtidos através de inspeção direta, uma vez que este se encontrava depositado na região inferior da encosta, nas proximidades da casa atingida. O bloco apresentava dimensões de cerca de 7,0 x 5,1 x 4,5 metros, e suas arestas abauladas lhe atribuíam um aspecto relativamente esférico (Figura 3.10). A massa do bloco foi estimada em 13000 kg.

4.2.3 Caso de Estudo III – Ensaio do Colorado

Seguindo uma sequência lógica de projeto, após analisar os pontos de parada alcançados pelos blocos no ensaio da França de no caso de *Utah*, foi realizada uma avaliação das energias cinéticas totais máximas desenvolvidas por 41 blocos testados em um programa de ensaios em escala real conduzido pelo Departamento de Transportes do Colorado, EUA.

Os dados utilizados nas simulações foram apresentados pela circular número E-C141 publicada pelo *Transportation Research Board*, EUA.

A Figura 3.14 apresenta a seção esquemática da área do ensaio, representando a face da encosta acima da rampa, a altura de lançamento dos blocos, o anteparo para o impacto após a queda livre, a rampa de concreto, o posicionamento do sistema atenuador, a área de coleta dos blocos e a berma de segurança. O modelo adotado nas análises foi elaborado com base nesta seção esquemática.

Os blocos ensaiados foram pré-fabricados (Figura 3.16), permitindo que suas características fossem bem conhecidas (Tabela 3.4).

As velocidades rotacional e translacional foram observadas em 41 ensaios através da análise das imagens obtidas pelas câmeras de alta velocidade utilizadas para monitorar os ensaios. A partir dos resultados de velocidade medidos nos ensaios, foi estimada a energia cinética total equivalente.

Para os 41 testes avaliados, as energias cinéticas totais de impacto no atenuador se situaram na faixa de 111 a 505 kJ, com apenas dois testes apresentando resultados superiores a esta faixa, sendo que um deles produziu uma energia cinética total máxima de 1006 kJ.

As Tabelas 4.1 a 4.5 apresentam os valores de energia cinética total máxima medidas para cada tipo de bloco utilizado nos ensaios, ressaltando que as energias cinéticas máximas foram observadas no momento do impacto do bloco com o sistema atenuador.

Tabela 4.1 – Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo A (modificado de Arndt *et al*, 2009).

Bloco A - 1618 kg		
Teste	Altura de Lançamento (m)	Energia Cinética Total Medida (kJ)
68	18	337
72	18	364
73	18	305

Tabela 4.2 - Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo B (modificado de Arndt *et al.*, 2009).

Bloco B - 1695 kg		
Teste	Altura de Lançamento (m)	Energia Cinética Total Medida (kJ)
1	9	144
2	9	264
3	9	397
4	18	325
5	18	505
1b	9	179
2b	18	496
3b	27	453
4b	9	382
5b	18	277
6c	9	219
7	9	245
8	18	382
9	18	369
10	18	355
11	18	276
58	18	417
60	18	244
64	18	266
108	18	283

Tabela 4.3 - Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo C (modificado de Arndt *et al.*, 2009).

Bloco C - 1577 kg		
Teste	Altura de Lançamento (m)	Energia Cinética Total Medida (kJ)
36	18	484
38	18	307
43	18	250
45	18	327
46	18	355
47	18	294

Tabela 4.4 - Valores de energia cinética total observados para o bloco do tipo D (modificado de Arndt *et al.*, 2009).

Bloco D - 2259 kg		
Teste	Altura de Lançamento (m)	Energia Cinética Total Medida (kJ)
12	9	343
13	9	340
14	9	332
15	18	1006
16	18	412
17	18	704
18	9	111
21	9	290
22	18	421
23	9	428
27	27	502

Tabela 4.5 - Valor de energia cinética total observado para o bloco do tipo E (modificado de Arndt *et al.*, 2009).

Bloco E - 2173 kg		
Teste	Altura de Lançamento (m)	Energia Cinética Total Medida (kJ)
109	9	288

4.3 METODOLOGIA DE ESTUDO

4.3.1 Avaliação dos Pontos de Parada dos Blocos

A avaliação dos pontos de parada dos blocos analisados no ensaio da França e no caso de *Utah*, foi realizada através da elaboração de seções transversais no programa *RocFall*, com base no levantamento topográfico da área experimental francesa e da região montanhosa da cidade de *Provo*. A confecção das seções também considerou as trajetórias preferenciais apresentadas pelos blocos ensaiados e pelo bloco observado no caso histórico.

Para o ensaio da França, o bloco ensaiado foi posicionado no trecho da seção indicado pelos realizadores como ponto de lançamento (cota 1365 m), e, para o caso de *Utah*, o bloco foi posicionado no trecho da seção indicado, no relatório de inspeção, como ponto de origem do bloco (cota 2378 m). A partir de então foram adotadas 5000 trajetórias de simulação para cada caso de estudo, com posterior verificação estatística das trajetórias e pontos de parada modelados, finalizando com uma comparação entre os resultados simulados e os resultados ensaiados nos ensaios da França e do Colorado e o observado no caso de *Utah*.

Para os dois casos de estudo, o material da superfície da encosta foi atribuído com base nas informações contidas nos trabalhos descritos no capítulo anterior, variando de rocha sã, sem recobrimentos vegetais e sem deposição de blocos, à rocha sã, com deposição de blocos nas regiões superiores das encostas (material do tipo 1). Nas regiões inferiores, foram consideradas condições variando de rocha alterada, com recobrimento, vegetal à condição de rocha com recobrimento de tálus e materiais coluvionares (material do tipo 2).

Os parâmetros adotados nas análises, tais como os coeficientes de restituição normal (k_n), tangencial (k_t), rugosidade da superfície do talude e o ângulo de atrito foram determinados por meio de análises dos valores apresentados por Pfeiffer & Bowen (1989), Pfeiffer *et al.* (1990), Giani (1992), Chau *et al*. (1996) e *Rocscience Inc* (2006).

Desta forma, nas regiões superiores das duas encostas analisadas, os coeficientes normal e tangencial variaram de 0,50 a 0,56 e 0,91 a 0,99, respectivamente. Para os dois casos foi adotado um ângulo de atrito igual a 30º, com desvio padrão de 2º, variando entre 28º e 32º, de forma a representar graus distintos de alteração do maciço rochoso. A superfície da encosta foi considerada com rugosidade igual a 1º.

Nas regiões inferiores das encostas, os coeficientes normal e tangencial variaram de 0,40 a 0,52 e 0,86 a 0,92, respectivamente. O ângulo de atrito foi adotado igual a 28º com desvio padrão de 2º, variando de 26º a 30º, correspondendo a espessuras variadas de solo e quantidades diversas de blocos. A superfície da encosta foi considerada com rugosidade de 2º.

Em todas as análises realizadas, os blocos partiram com velocidades horizontais iniciais iguais a 1 m/s, com desvio padrão de 0,2 m/s. As velocidades iniciais vertical (m/s) e angulares (rad/s) foram consideradas nulas. As velocidades horizontais iniciais foram consideradas na tentativa de simular o esforço imposto ao bloco pela escavadeira mecânica no momento do lançamento (no caso do ensaio francês), e, na tentativa de simular os esforços internos gerados no interior do maciço pela intensa precipitação pluviométrica que provavelmente contribuiu para o início do movimento do bloco no caso histórico de *Utah*.

A tabela 4.6 apresenta um resumo dos intervalos de parâmetros utilizados nas análises. O material do tipo 1 foi considerado variando de rocha sã sem recobrimentos vegetais e sem deposição de blocos à rocha sã com deposição de blocos. O material do tipo 2 foi considerado variando de rocha alterada com recobrimento vegetal à condição de rocha com recobrimento de tálus e colúvios.

Tabela 4.6 – Resumo dos intervalos de parâmetros utilizados nas análises do ensaio da França e do caso de *Utah*.

	kn	**kt**	**rug (°)**	**phi (°)**	**vx (m/s)**
Intervalo para o material tipo 1	0,50 - 0,56	0,91 - 0,99	1	28 - 32	0,8 - 1,2
Intervalo para o material tipo 2	0,40 - 0,52	0,86 - 0,92	2	26 - 30	0,8 - 1,2

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as seções transversais das encostas elaboradas para a área experimental francesa e para o caso de *Utah*, respectivamente.

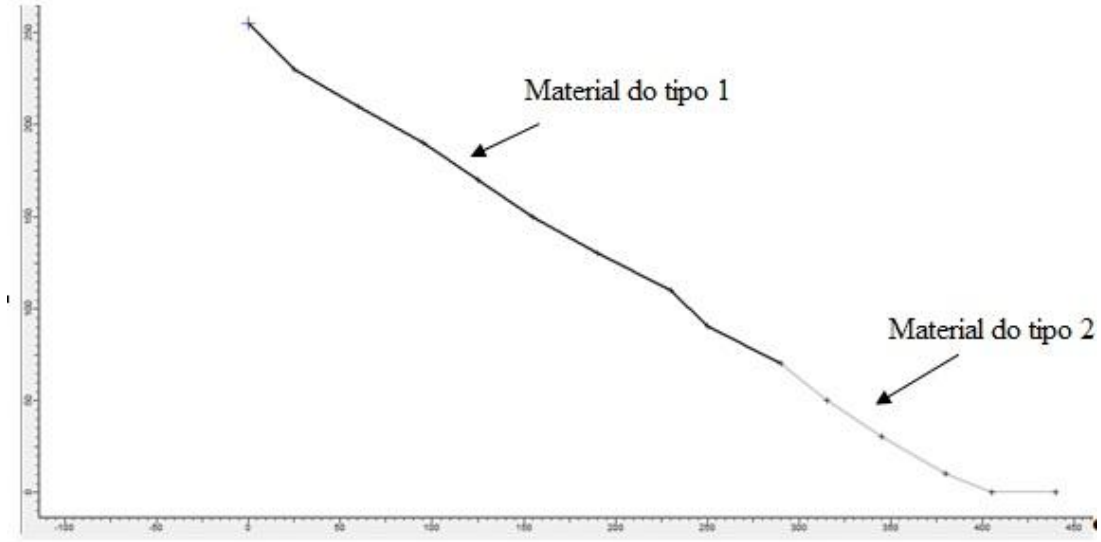

Figura 4.1 – Seção transversal da encosta da área experimental francesa.

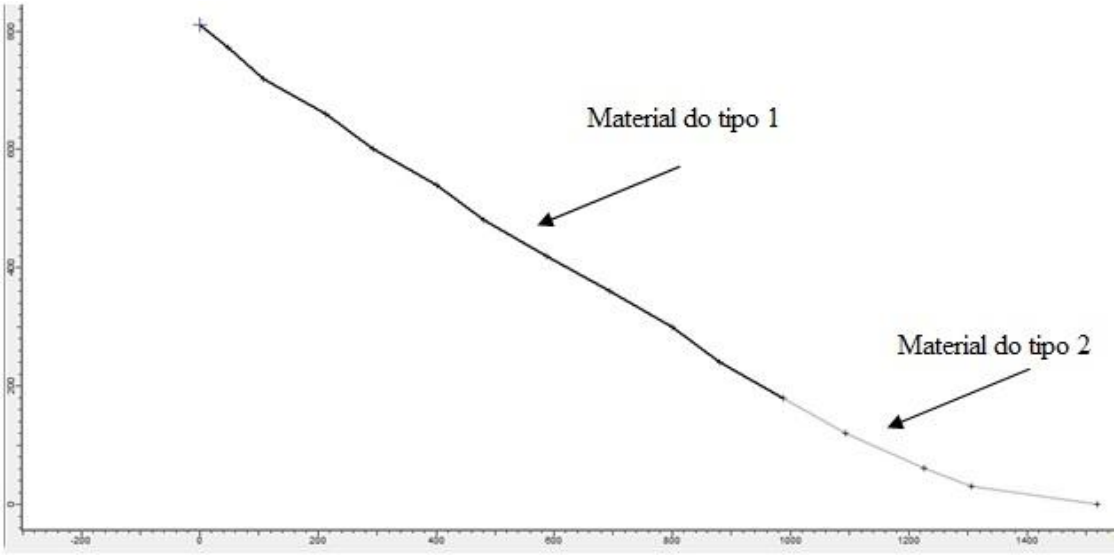

Figura 4.2 – Seção transversal da encosta do caso histórico de queda de bloco em *Utah.*

As análises numéricas das seções transversais dos taludes têm a capacidade de apresentar um gráfico de distribuição e localização dos pontos de parada dos blocos, indicando o trecho da encosta onde acontece a maior deposição de blocos e o número de blocos depositados neste trecho específico.

O programa *RocFall* também permite obter informações relativas ao tipo de movimento e a trajetória desenvolvida pelo bloco ao longo da seção estudada. São gerados gráficos

referentes à posição, altura de salto, energia cinética total, energia cinética translacional, energia cinética rotacional, velocidade translacional e velocidade rotacional, permitindo ao usuário avaliar o comportamento do bloco durante toda a sua trajetória ao longo da encosta.

As trajetórias de movimentos geradas pelo programa permitem a avaliação do tipo de movimento do bloco ao longo do talude. O usuário pode observar se um tipo de movimento predomina em relação aos demais ou se o bloco desenvolve uma combinação de tipos de movimento (queda livre, salto, deslizamento ou rolamento).

4.3.2 Avaliação da Energia Cinética Total

De maneira similar ao ensaio da França e ao caso de Utah, foi elaborado um modelo numérico para o ensaio do Colorado. O modelo foi realizado com base no projeto da área de teste (Figura 4.3).

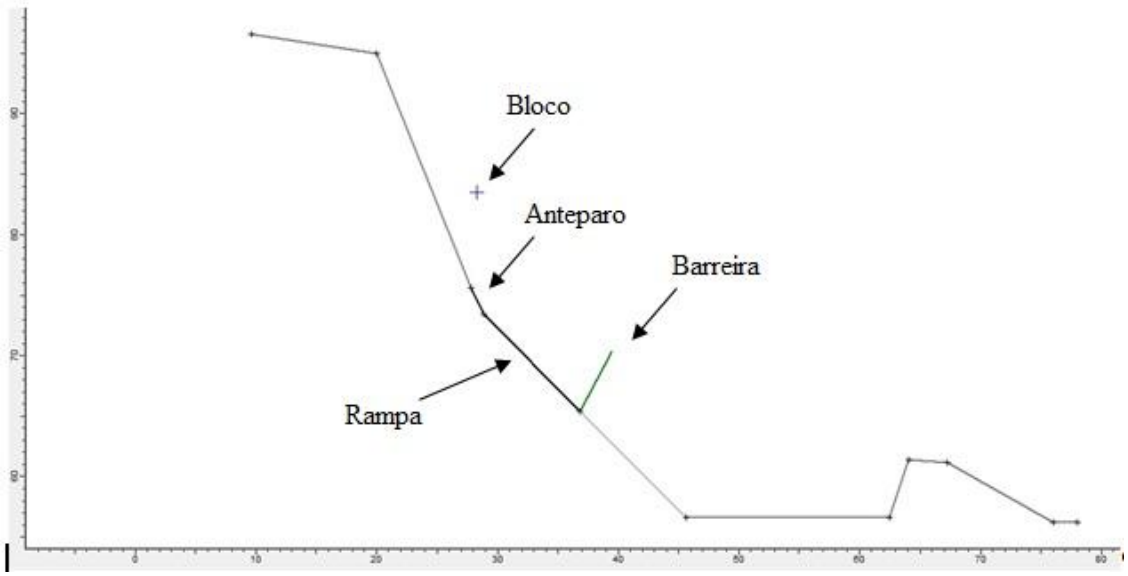

Figura 4.3 – Seção transversal da encosta da área de testes do Colorado.

Os 41 blocos ensaiados foram separados de acordo com a sua massa e suas respectivas alturas de lançamento (9,0; 18,0 ou 27,0 metros). As análises foram conduzidas de modo a observar a energia cinética total no momento do impacto com o sistema atenuador.

Alguns ensaios apresentaram resultados de energia cinética total com diferença significativa em relação aos demais ensaios de mesma condição. Neste contexto, os valores de energia cinética total observados nos ensaios receberam um tratamento estatístico de maneira que, para cada tipo de bloco e sua respectiva altura de lançamento, foram excluídos os valores que excederam 40% em torno da média. As Tabelas 4.7 a 4.11 apresentam o tratamento estatístico, indicando os valores descartados e os valores médios corrigidos de energia cinética total.

Tabela 4.7 – Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo A.

Bloco A - 1618 kg	
Altura de Queda: 18 m	
Teste	Energia Cinética Total Medida (kJ)
68	337
72	364
73	305
Média	335

Tabela 4.8 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo B.

Bloco B - 1695 kg					
Altura de Queda: 9 m		Altura de Queda: 18 m		Altura de Queda: 27 m	
Teste	Energia Cinética Medida (kJ)	Teste	Energia Cinética Medida (kJ)	Teste	Energia Cinética Medida (kJ)
1	144*	4	325	3b	453
2	263	5	505*		
3	397*	2b	496*		
1b	179	5b	277		
4b	382*	8	382		
6c	219	9	368		
7	245	10	354		
		11	278		
		58	417		
		60	244		
		64	266		
		108	283		
Média	261	Média	350	Média	453
Média Corrigida	227	Média Corrigida	319		
* Valores descartados					

Tabela 4.9 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo C.

Bloco C - 1577 kg	
Altura de Queda: 18 m	
Teste	Energia Cinética Medida (kJ)
36	484*
38	307
43	250
45	327
46	355
47	294
Média	336
Média Corrigida	307
*Valor descartado	

Tabela 4.10 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo D.

Bloco D - 2259 kg					
Altura de Queda: 9 m		Altura de Queda: 18 m		Altura de Queda: 27 m	
Teste	Energia Cinética Medida (kJ)	Teste	Energia Cinética Medida (kJ)	Teste	Energia Cinética Medida (kJ)
12	343	15	1006*	27	502
13	340	16	412		
14	332	17	704		
18	111*	22	421		
21	290				
23	428				
Média	307	Média	636	Média	502
Média Corrigida	347	Média Corrigida	512		
*Valores descartados					

Tabela 4.11 - Tratamento estatístico dos valores de energia cinética total para o bloco do tipo E.

Bloco E - 2173 kg	
Altura de Queda: 9 m	
Teste	Energia Cinética Medida (kJ)
109	288
Média	288

Após o tratamento estatístico dos valores de energia cinética total obtidos na campanha de ensaios, foram realizadas análises na tentativa de modelar numericamente a referida campanha de ensaios. O programa fornece um gráfico com a distribuição da energia cinética total máxima atingida pelo bloco em qualquer trecho da seção. O valor de pico da energia cinética total máxima e sua localização horizontal permitiram realizar uma comparação entre os valores simulados e os valores experimentais. Assim como nos casos anteriores, e com o objetivo de explorar o potencial estatístico do programa, foram adotados 5000 blocos para cada análise.

Para a campanha de ensaios do Colorado, os parâmetros adotados nas análises também foram selecionados através de indicações encontradas na literatura, ressaltando-se que, para este caso, a seleção dos parâmetros relativos à superfície mostrou-se uma tarefa mais fácil em relação aos casos de estudo anteriores, uma vez que o material da rampa utilizada nos ensaios era bem conhecido, o concreto.

Os coeficientes de restituição normal e tangencial adotados para o anteparo instalado no ponto de impacto foram de 0,43 e 0,86, respectivamente. Para a rampa de concreto, os coeficientes de restituição normal e tangencial adotados foram de 0,50 e 0,93, respectivamente. Foi aplicado um desvio padrão de 0,02 para todos os coeficientes de restituição.

O ângulo de atrito adotado foi de 28º para o anteparo de impacto e de 30º para a rampa de concreto, com aplicação de um desvio padrão de 2º para ambos os casos. Toda a superfície foi considerada planar, com rugosidade nula.

A tabela 4.12 apresenta um resumo para os intervalos de parâmetros utilizados nas análises.

Tabela 4.12 – Resumo dos intervalos de parâmetros utilizados nas análises do ensaio do Colorado.

	kn	**kt**	**rug (°)**	**phi (°)**
Anteparo	0,41 - 0,45	0,84 - 0,88	0	26 - 30
Rampa	0,48 - 0,52	0,91 - 0,95	0	28 - 32

4.4 ANÁLISES E RESULTADOS DAS TRAJETÓRIAS E PONTOS DE PARADA DOS BLOCOS

4.4.1 Caso de Estudo I – Ensaio da França

As análises foram conduzidas de modo a observar as trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos pelos blocos no modelo de simulação, e, principalmente, avaliar os pontos de parada alcançados pelos blocos analisados. Os resultados foram comparados com os obtidos no ensaio realizado em verdadeira grandeza.

A Figura 4.4 apresenta as trajetórias de movimento dos blocos obtidas com o modelo de simulação. Nota-se que os movimentos predominantes do bloco são do tipo rolamento pela superfície, com saltos em queda livre em trechos específicos.

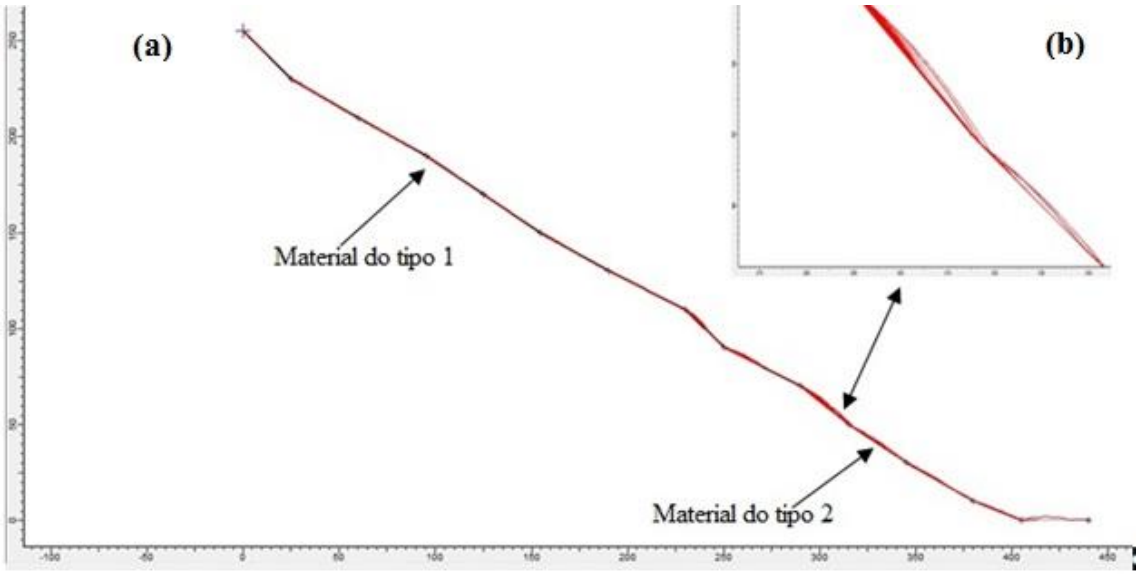

Figura 4.4 – Análises das trajetórias e tipos de movimentos desenvolvidos pelo bloco no ensaio da França (a) detalhe do movimento do tipo salto (b).

A Figura 4.5 apresenta o histograma de número de blocos com a respectiva localização dos pontos de parada em relação à seção analisada. A figura indica ainda o ponto de parada do bloco ensaiado.

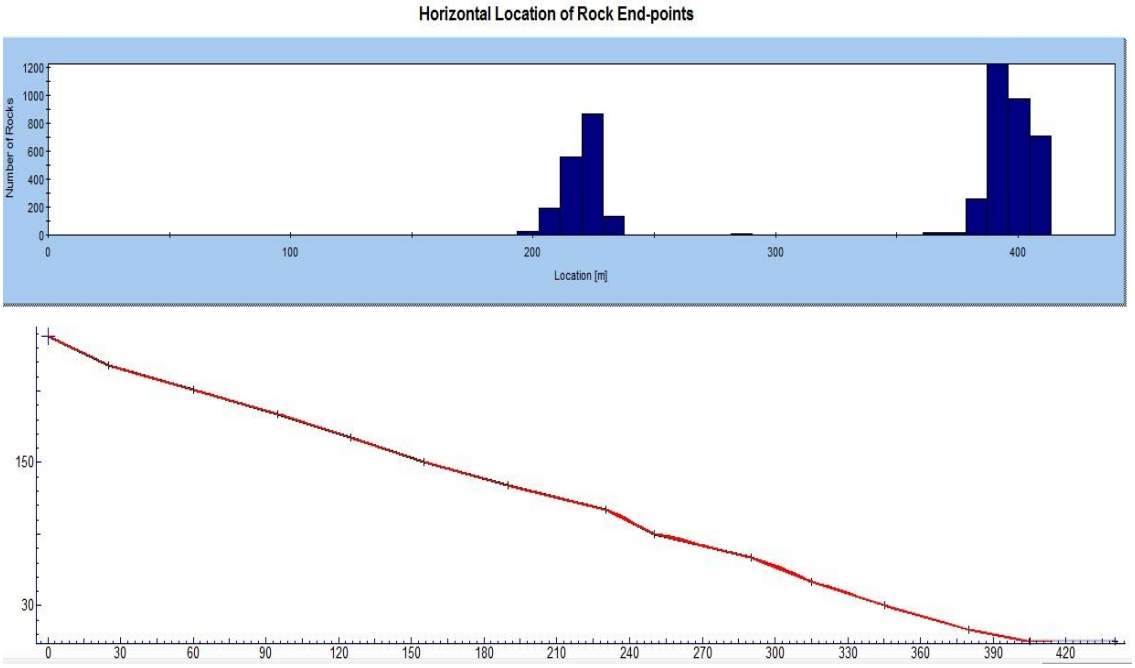

Figura 4.5 – Histograma de número de blocos e localização dos pontos de parada para o ensaio da França.

A Tabela 4.13 resume os resultados apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5. O trecho de chegada dos blocos, referenciado à distância horizontal da encosta a partir da crista, considera todos os 5000 blocos da análise probabilística realizada. Os trechos de acúmulo de blocos correspondem à região da encosta, em projeção horizontal, que acolhe um número determinado de blocos. O percentual de blocos depositados para cada trecho também é apresentado, além do ponto com maior número de acúmulo de blocos para cada trecho avaliado.

Tabela 4.13 – Resumo dos resultados das análises dos pontos de parada dos blocos.

Ponto de Parada Experimental (m)	Valores de Simulação			
	Trecho de Chegada (m)	Trechos de Acúmulo (m)	Percentual de Blocos	Ponto com Maior Acúmulo de Blocos (m)
391	180 - 410	180 - 234	35,0%	224
		286	0,1%	286
		350 - 390	5,9%	382
		391 - 410	59,0%	392

4.4.2 Caso de Estudo II – Caso de *Utah*

De maneira análoga ao ensaio da França, as análises foram conduzidas de modo a observar as trajetórias e os tipos de movimentos desenvolvidos pelos blocos no modelo de simulação, e, principalmente, avaliar os pontos de parada alcançados por estes blocos. Os resultados foram comparados com o observado no caso histórico estudado.

A Figura 4.6 apresenta as trajetórias de movimento dos blocos obtidas com o modelo de simulação. Nota-se que os movimentos predominantes do bloco são do tipo deslizamento e rolamento pela superfície, com eventuais saltos em queda livre em trechos específicos.

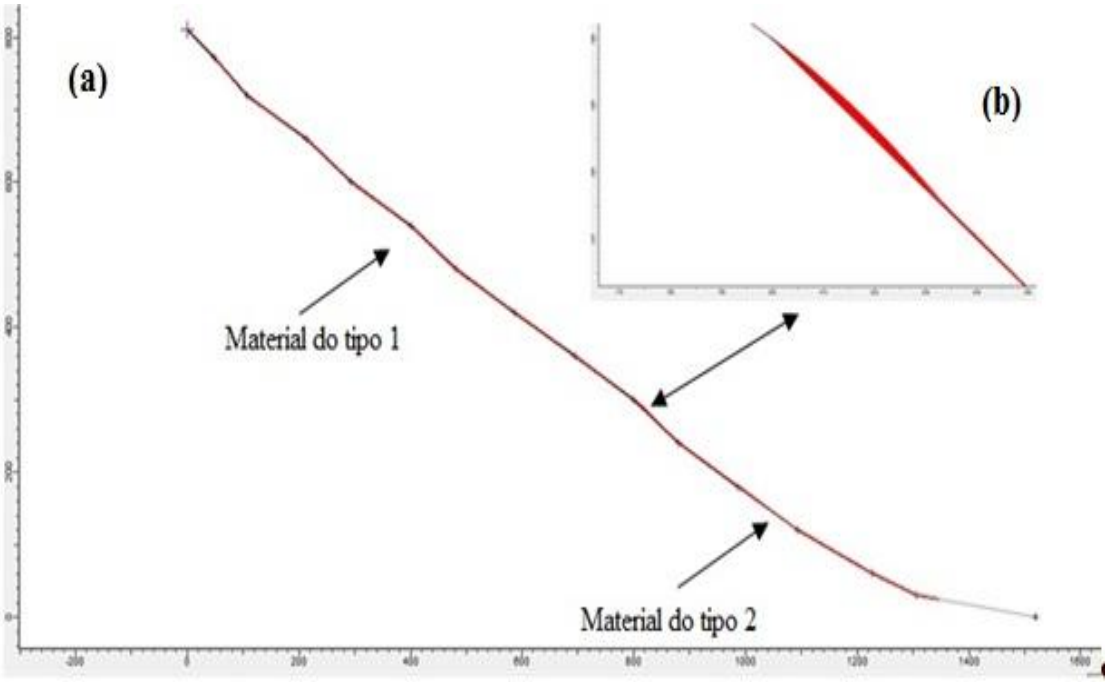

Figura 4.6 – Análises das trajetórias e tipos de movimentos desenvolvidos pelo bloco no caso de *Utah* (a) detalhe do movimento do tipo salto (b).

A Figura 4.7 apresenta o histograma de número de blocos com a respectiva localização dos pontos de parada em relação à seção analisada. A figura indica ainda o ponto de parada do bloco observado.

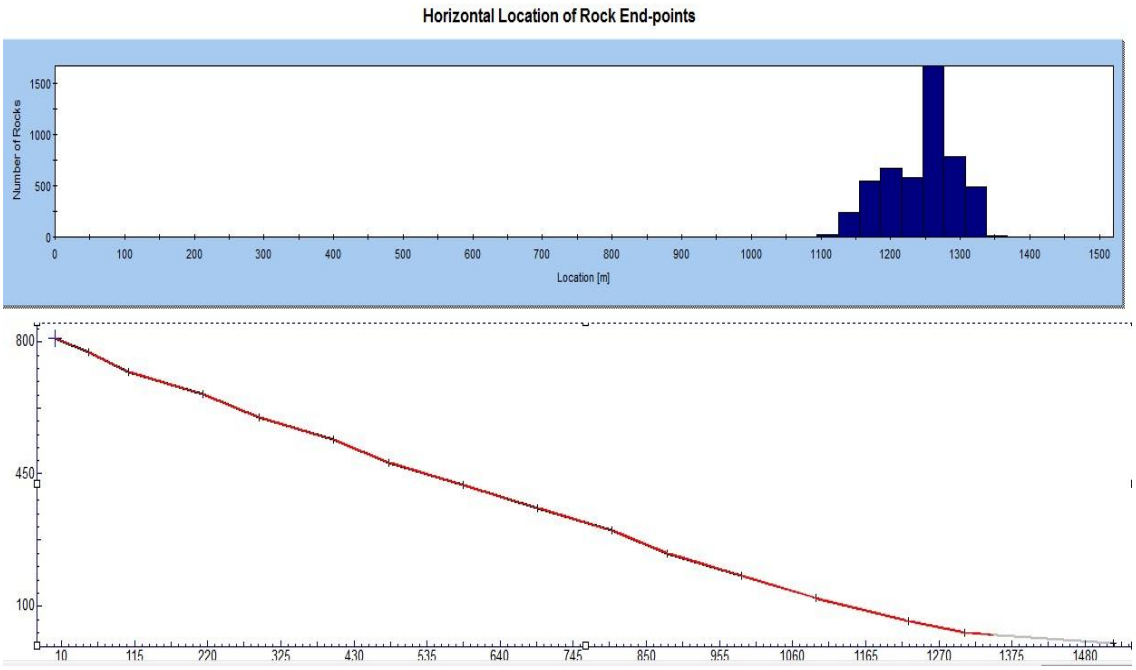

Figura 4.7 – Histograma de número de blocos e localização dos pontos de parada para o caso de *Utah*.

A Tabela 4.14 resume os resultados apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7. O trecho de chegada dos blocos, referenciado à distância horizontal da encosta a partir da crista, considera todos os 5000 blocos da análise probabilística realizada. Os trechos de acúmulo de blocos correspondem à região da encosta, em projeção horizontal, que acolhe um número determinado de blocos. O percentual de blocos depositados para cada trecho também é apresentado, além do ponto com maior número de acúmulo de blocos para cada trecho avaliado.

Tabela 4.14 – Resumo dos resultados das análises dos pontos de parada dos blocos.

Ponto de Parada Observado (m)	Valores de Simulação			
	Trecho de Chegada (m)	Trechos de Acúmulo (m)	Percentual de Blocos	Ponto com Maior Acúmulo de Blocos (m)
1.270	1070 - 1360	1070 - 1140	5%	1140
		1170 - 1210	24%	1200
		1230 - 1300	61%	1261
		1320 - 1360	10%	1322

4.5 ANÁLISES E RESULATADOS DA AVALIAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA TOTAL

As análises foram conduzidas com base nos resultados obtidos em 41 ensaios realizados em verdadeira grandeza no estado americano do Colorado, apresentados como caso de estudo III no capítulo 3 desta dissertação, tendo como objetivo verificar os valores de energia cinética total desenvolvidos pelos blocos ensaiados. Durante as análises, os blocos foram separados por tipo (massa), observando suas respectivas alturas de liberação (queda). Os resultados observados nos ensaios foram comparados com os obtidos no modelo de simulação.

Este trabalho manteve a nomenclatura adotada para os blocos na campanha de ensaios realizada na área experimental.

4.5.1 Bloco Tipo A – 1618 kg

Três alturas de liberação de blocos foram especificadas para a campanha de ensaios, 9,0; 18,0 e 27,0 metros. Dos 41 ensaios analisados, três foram realizados com o bloco do tipo A, liberados da altura intermediária, ou seja, 18,0 metros. A Figura 4.8 apresenta as trajetórias de movimento do referido bloco e as energias cinéticas totais envolvidas no movimento. Nota-se que o movimento do bloco é do tipo queda livre até o impacto com o anteparo, predominando o movimento do tipo salto ao longo da rampa, atingindo um valor máximo de energia de 320 kJoules no impacto com a barreira.

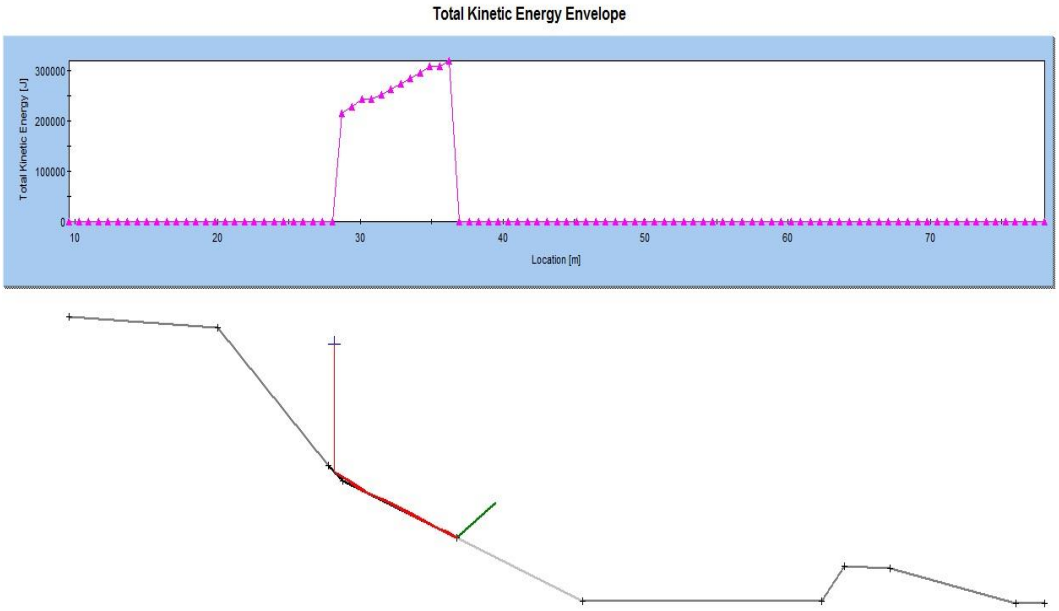

Figura 4.8 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo A com altura de queda de 18 m.

A Tabela 4.15 resume os resultados apresentados na Figura 4.8. A tabela apresenta o valor médio de energia cinética total máxima observado nos ensaios para o bloco do tipo A com altura de liberação de 18,0 metros, além de apresentar o valor obtido no modelo numérico de simulação e uma comparação entre estes valores.

Tabela 4.15 – Valores experimental e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo A, com altura de liberação de 18 m.

Bloco Ensaiado			Energia Cinética Total Máxima (kJ)		Comparação
Tipo de Bloco	Massa do Bloco (kg)	Altura de Liberação (m)	Valor Médio Experimental	Valor Simulado	Desvio
A	1618	18	335	320	-4,5%

4.5.2 Bloco Tipo B – 1695 kg

O bloco do tipo B foi liberado das três alturas determinadas para a campanha de ensaios, além de ser o bloco com o maior número de ensaios (20 dos 41 testes

analisados). As Figuras 4.9 a 4.11 apresentam as trajetórias de movimento do referido bloco e as energias cinéticas totais envolvidas em seu movimento ao longo da rampa para as alturas de liberação de 9,0; 18,0 e 27,0 metros respectivamente.

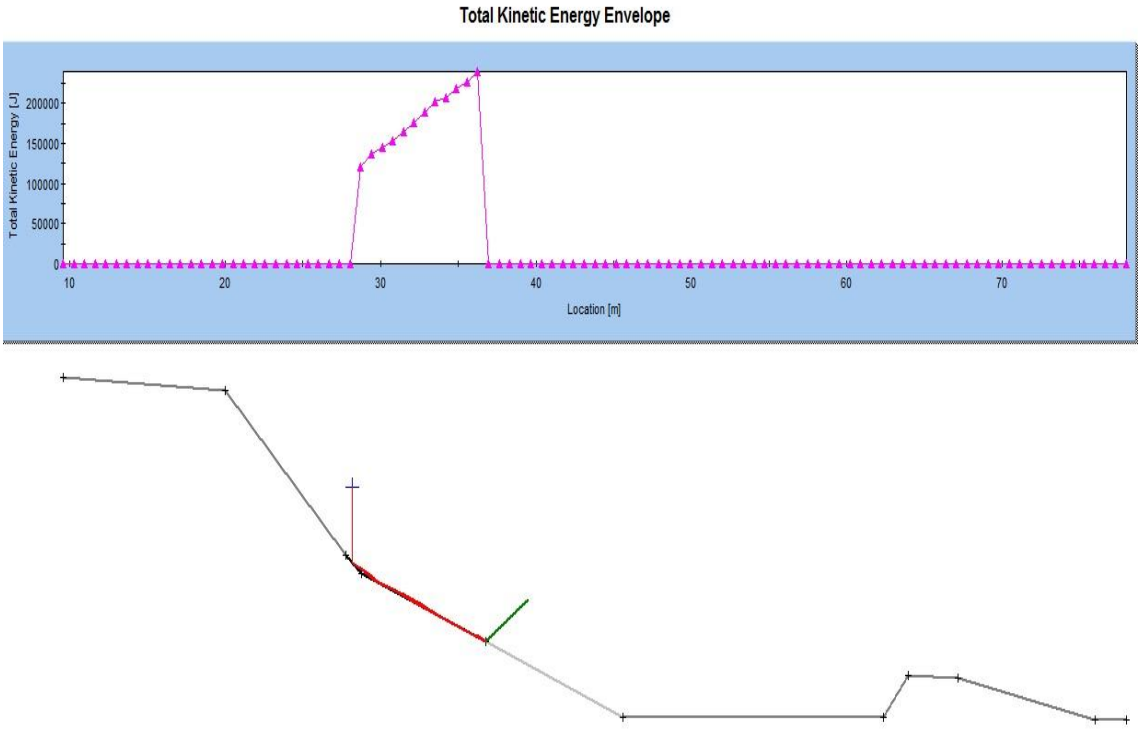

Figura 4.9 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo B com altura de liberação de 9 m.

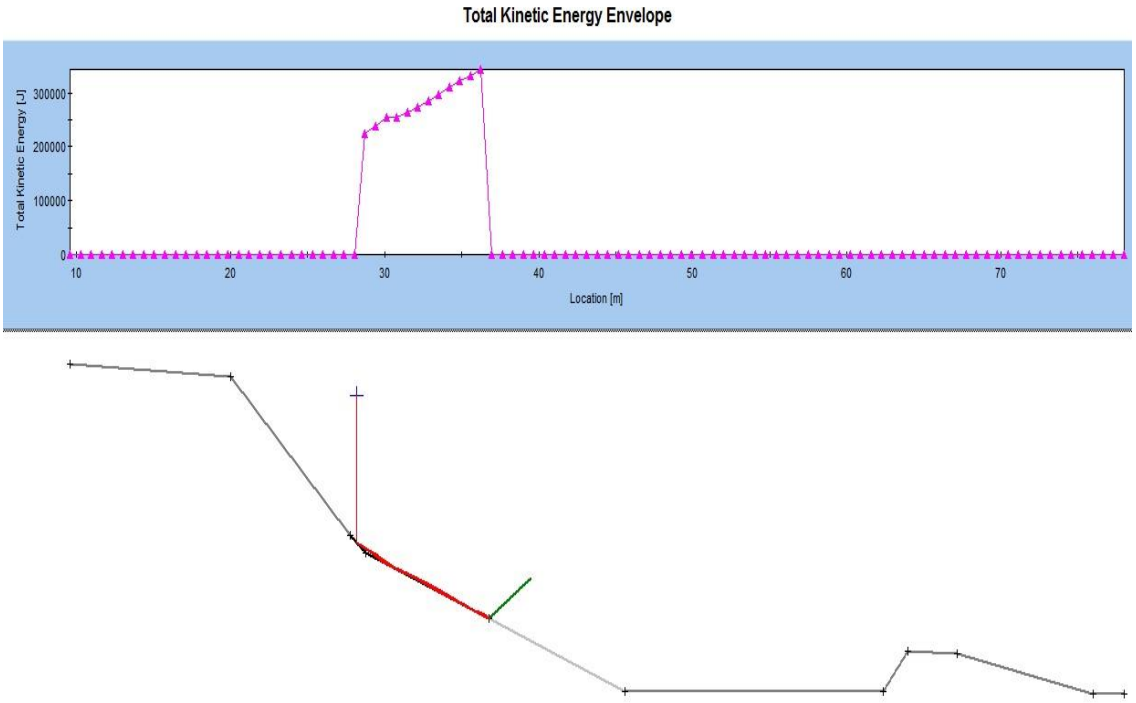

Figura 4.10 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo B com altura de liberação de 18 m.

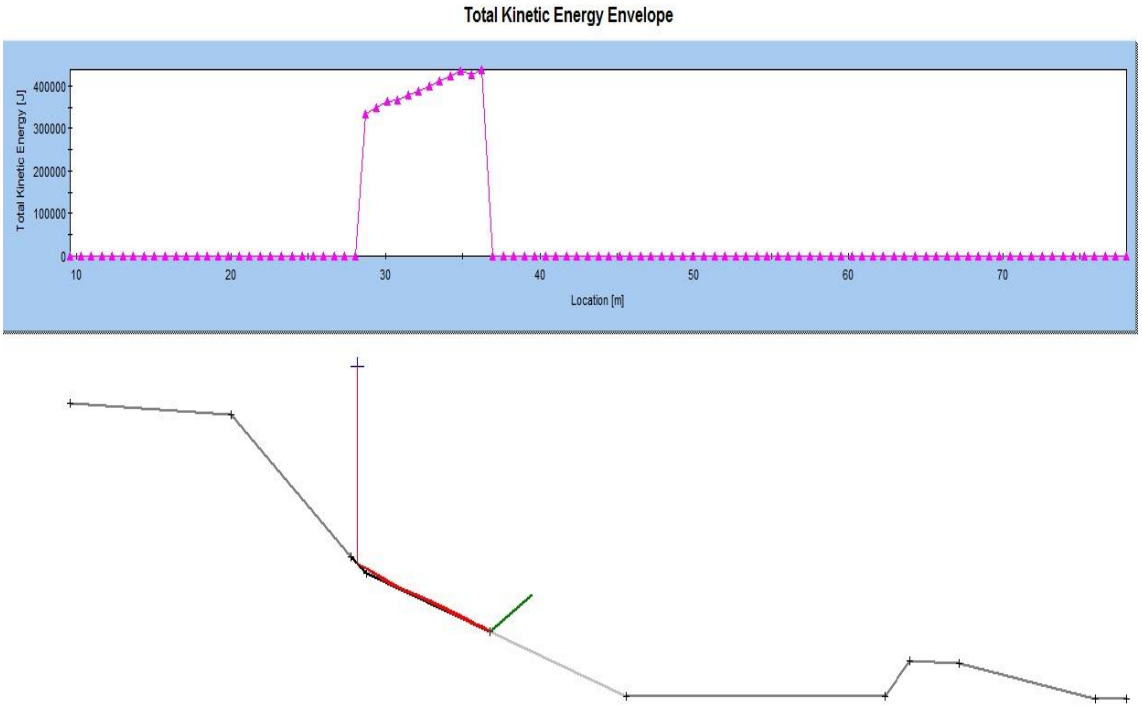

Figura 4.11 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo B com altura de liberação de 27 m.

A Tabela 4.16 resume os resultados apresentados nas Figuras 4.9 a 4.11. A tabela apresenta o valor médio de energia cinética total máxima observado nos ensaios para o bloco do tipo B com alturas de liberação de 9,0; 18,0 e 27,0 metros, além de apresentar o valor obtido no modelo numérico de simulação e uma comparação entre estes valores.

Tabela 4.16 – Valores experimentais e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo B e respectivas alturas de liberação.

Bloco Ensaiado			Energia Cinética Total Máxima (kJ)		Comparação
Tipo de Bloco	Massa do Bloco (kg)	Altura de Liberação (m)	Valor Médio Experimental	Valor Simulado	Desvio
B	1695	9	227	219	-3,5%
		18	319	340	6,6%
		27	453	439	-3,1%

Nota-se que o movimento do bloco é do tipo queda livre até o impacto com o anteparo, predominando o movimento do tipo salto ao longo da rampa, atingindo um valor máximo de energia de 219 kJoules para altura de liberação de 9 m, 340 kJoules para altura de liberação de 18 m e 439 kJoules para altura de liberação de 27 m, ressaltando que, assim com o observado experimentalmente, as energias cinéticas máximas verificadas na simulação ocorreram no momento do impacto do bloco contra a barreira.

4.5.3 Bloco Tipo C – 1577 kg

Foram realizados 6 ensaios com o bloco do tipo C, todos com altura de liberação de 18 m. De maneira análoga as análises anteriores, a Figura 4.12 apresenta as trajetórias de movimento do referido bloco e as energias cinéticas totais envolvidas no movimento. Nota-se que o movimento do bloco é do tipo queda livre até o impacto com o anteparo, predominando o movimento do tipo salto ao longo da rampa, atingindo um valor máximo de energia de 310 kJoules no impacto com a barreira.

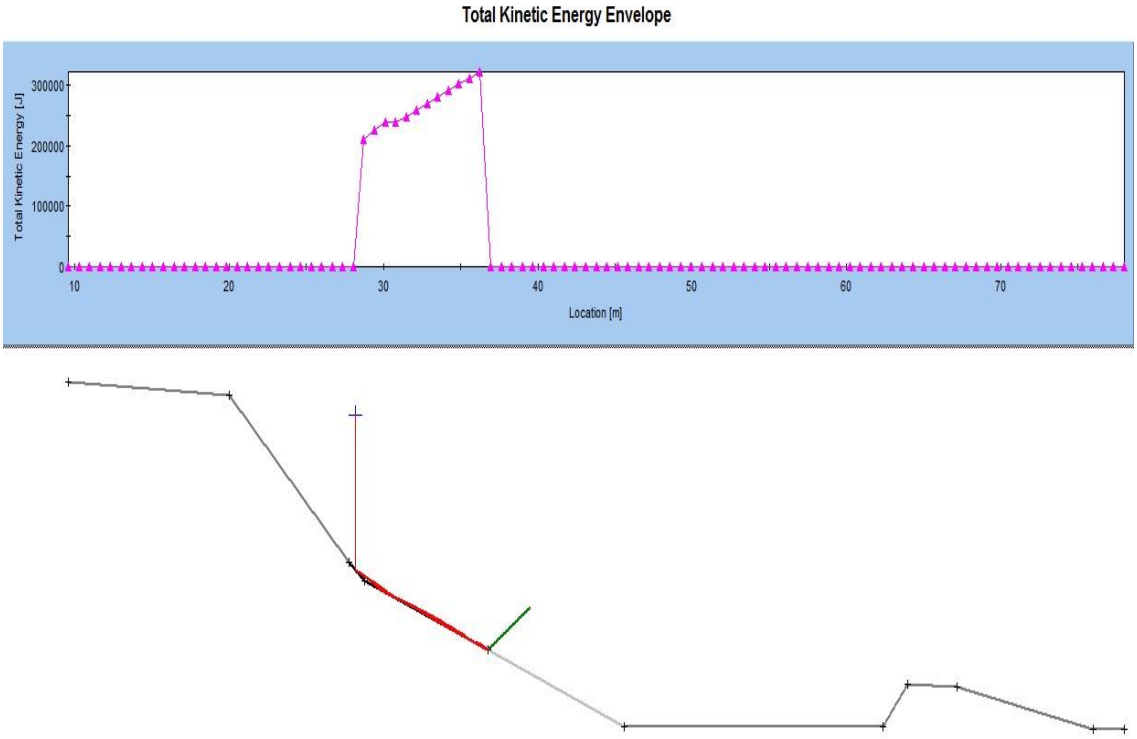

Figura 4.12 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo C com altura de liberação de 18 m.

Também de maneira análoga às análises anteriores, a Tabela 4.17 resume os resultados apresentados na Figura 4.12. A tabela apresenta o valor médio de energia cinética total máxima observado nos ensaios para o bloco do tipo C com altura de liberação de 18 m, além de apresentar o valor obtido no modelo numérico de simulação e uma comparação entre estes valores.

Tabela 4.17 – Valores experimental e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo C, com altura de liberação de 18 m.

Bloco Ensaiado			Energia Cinética Total Máxima (kJ)		Comparação
Tipo de Bloco	Massa do Bloco (kg)	Altura de Liberação (m)	Valor Médio Experimental	Valor Simulado	Desvio
C	1577	18	307	310	1,0%

4.5.4 Bloco Tipo D – 2259 kg

Assim como o bloco do tipo B, o bloco do tipo D também foi liberado das três alturas determinadas para a campanha de ensaios. Dos 41 ensaios analisados, 11 foram realizados com o bloco do tipo D, sendo seis ensaios com altura de liberação de 9,0 metros, quatro ensaios com altura de liberação de 18,0 metros e apenas um ensaio com altura de liberação de 27,0 metros. As Figuras 4.13 a 4.15 apresentam as trajetórias de movimento do bloco e as energias cinéticas totais envolvidas em seu movimento ao longo da rampa.

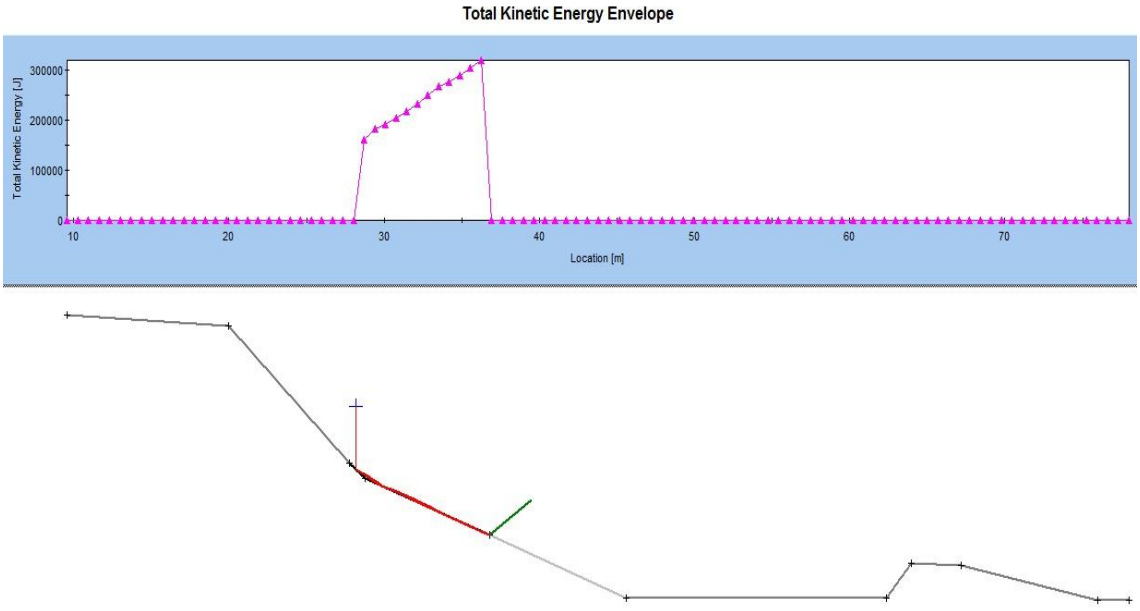

Figura 4.13 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo D com altura de liberação de 9 m.

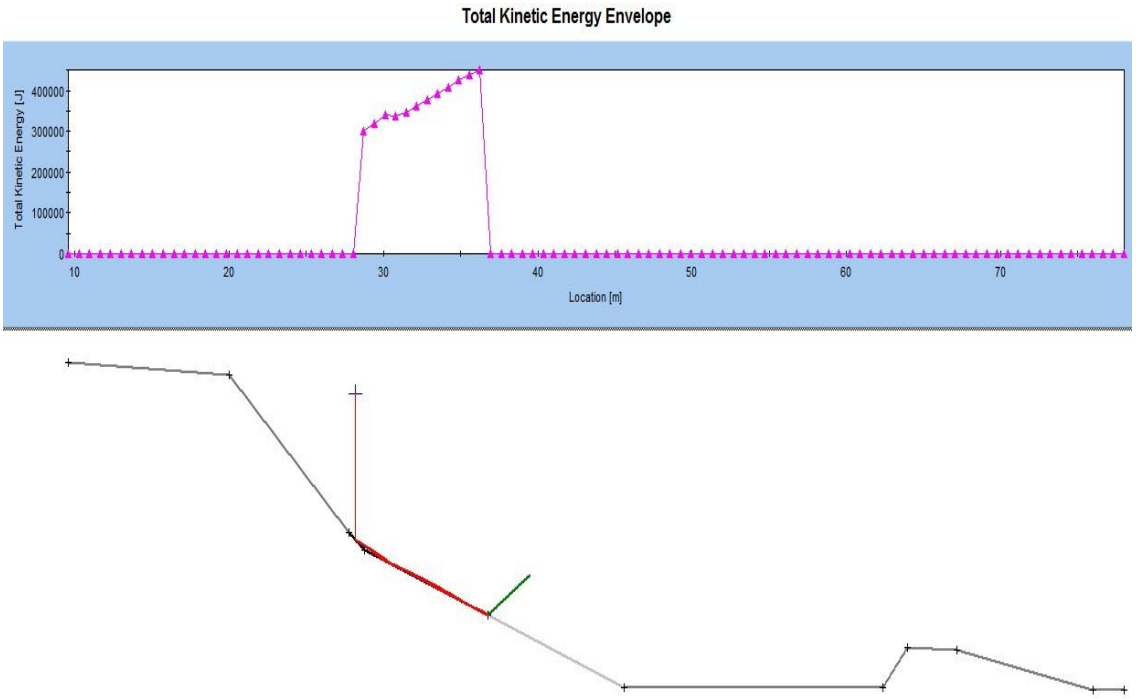

Figura 4.14 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo D com altura de liberação de 18 m.

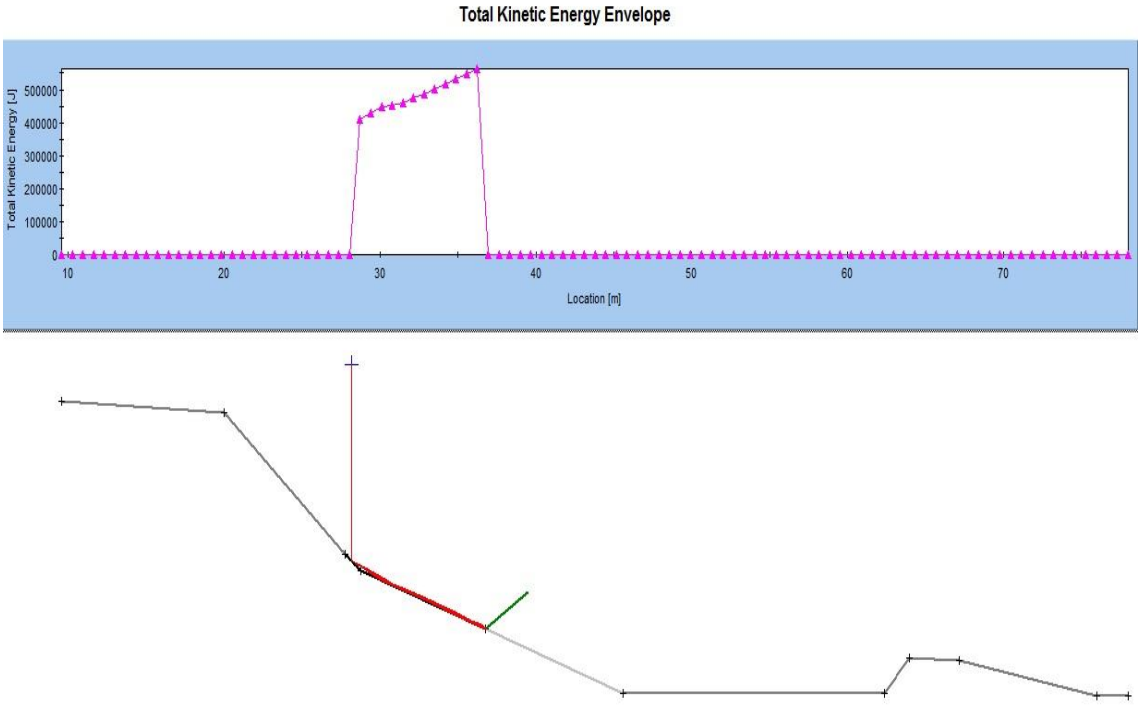

Figura 4.15 - Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo D com altura de liberação de 27 m.

A Tabela 4.18 resume os resultados apresentados nas Figuras 4.13 a 4.15. A tabela apresenta o valor médio de energia cinética total máxima observado nos ensaios para o bloco do tipo D com alturas de liberação de 9, 18 e 27 metros, além de apresentar o valor obtido no modelo numérico de simulação e uma comparação entre estes valores.

Tabela 4.18 – Valores experimentais e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo D e respectivas alturas de liberação.

Bloco Ensaiado			Energia Cinética Total Máxima (kJ)		Comparação
Tipo de Bloco	Massa do Bloco (kg)	Altura de Liberação (m)	Valor Médio Experimental	Valor Simulado	Desvio
D	2259	9	347	315	-9,2%
		18	512	451	-11,9%
		27	502	568	13,1%

Nota-se que o movimento do bloco é do tipo queda livre até o impacto com o anteparo, predominando o movimento do tipo salto ao longo da rampa, atingindo um valor máximo de energia de 315 kJoules para altura de liberação de 9 m, 451 kJoules para altura de liberação de 18 m e 568 kJoules para altura de liberação de 27 m, ressaltando que, assim como observado experimentalmente, as energias cinéticas máximas verificadas na simulação ocorreram no momento do impacto do bloco contra a barreira.

4.5.5 Bloco Tipo E – 2173 kg

Apenas um ensaio com o bloco do tipo E foi analisado, sendo este ensaio realizado com altura de liberação de 9,0 metros. De maneira análoga as análises anteriores, a Figura 4.16 apresenta as trajetórias de movimento do referido bloco e as energias cinéticas totais envolvidas no movimento. Nota-se que os movimentos predominantes do bloco são do tipo salto em queda livre, atingindo um valor máximo de energia de 297 kJoules no impacto com a barreira.

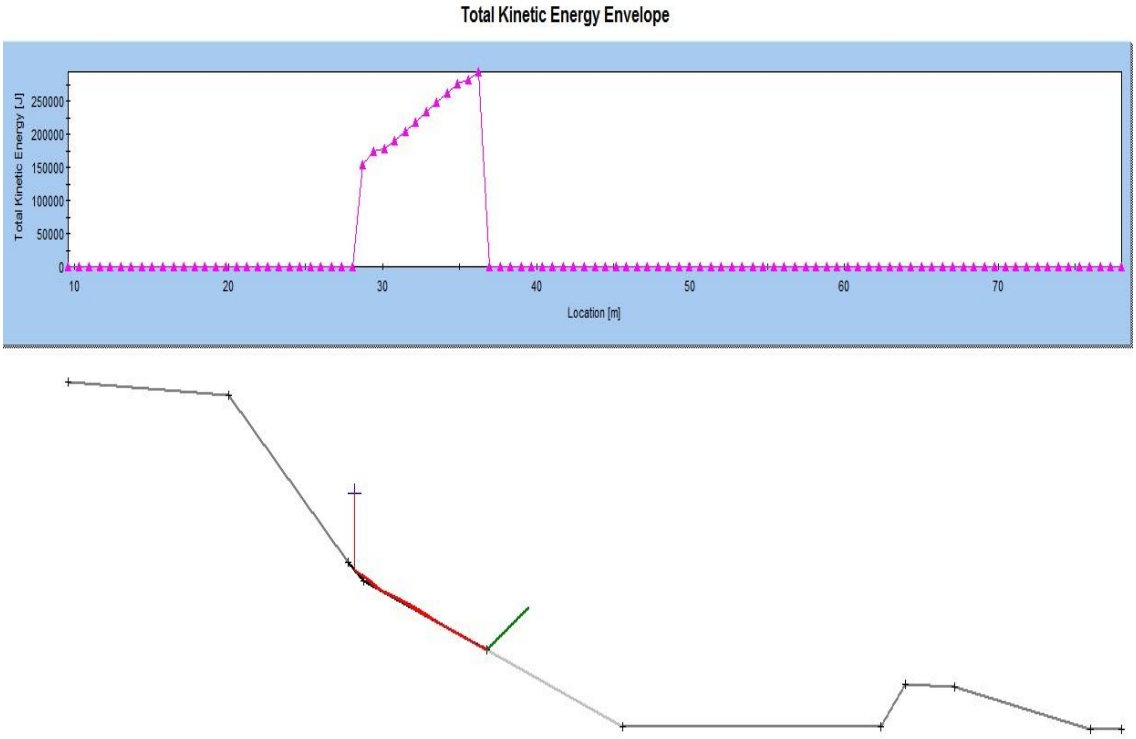

Figura 4.16 – Trajetórias de queda e envoltória de energia cinética para o bloco do tipo E com altura de liberação de 9 m.

A Tabela 4.19 resume os resultados apresentados na Figura 4.14. A tabela apresenta o valor médio de energia cinética total máxima observado nos ensaios para o bloco do tipo E com altura de liberação de 9,0 metros, além de apresentar o valor obtido na simulação e uma comparação entre estes valores.

Tabela 4.19 – Valores experimental e de simulação numérica da energia cinética total máxima para o bloco do tipo E, com altura de liberação de 9 m.

Bloco Ensaiado			Energia Cinética Total Máxima (kJ)		Comparação
Tipo de Bloco	Massa do Bloco (kg)	Altura de Liberação (m)	Valor Médio Experimental	Valor Simulado	Desvio
E	2173	9	288	297	3,1%

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta a avaliação e os resultados das análises numéricas realizadas com base em um ensaio realizado, em escala real, em um campo experimental nos Alpes franceses e em um ensaio, também em escala real, realizado no estado americano do Colorado, bem como, em um caso histórico de queda de bloco de rocha ocorrido na cidade de *Provo*, estado americano de *Utah*.

A etapa inicial do estudo visou analisar os tipos de movimentos desenvolvidos pelos blocos durante o seu percurso ao longo das encostas estudadas. Nesta etapa foram avaliados, principalmente, os pontos de parada alcançados pelos blocos. Os resultados experimentais/reais foram confrontados com os resultados obtidos nas análises numéricas.

A Tabela 4.20 apresenta um resumo dos resultados dos pontos de parada alcançados pelos blocos nos casos de estudo I (ensaio da França) e II (caso de *Utah*). Constatou-se que, para ambos os casos, os trechos com maior acúmulo de blocos coincidiram com os pontos de parada reais. Estes trechos apresentaram cerca de 60% de acúmulo de blocos para ambos os casos.

Tabela 4.20 – Resumo dos resultados dos pontos de parada alcançados pelos blocos analisados.

	Ponto de Parada Experimental/Real (m)	Valores de Simulação		
		Trechos com Maior Acúmulo (m)	Percentual de Blocos Acumulados	Ponto com Maior Acúmulo de Blocos (m)
Ensaio da França	391	391 - 410	59%	392
Caso de *Utah*	1270	1230 - 1300	61%	1261

Na segunda etapa do estudo foram realizadas análises numéricas com o objetivo de avaliar os resultados de energia cinética total máxima obtidos na campanha de ensaios

do Colorado. Foram considerados os diferentes tipos de blocos utilizados e as suas respectivas alturas de queda.

A Tabela 4.21 resume as informações relativas à avaliação da energia cinética total máxima apresentando as características de cada bloco utilizado na campanha de ensaios do Colorado, alturas de queda correspondentes, valores médios experimentais de energia cinética total máxima, valores de energia cinética total máxima obtidos na simulação numérica e, principalmente, o desvio entre os valores experimentais e de simulação numérica.

Nota-se que, em geral, os valores de energia cinética total máxima obtidos com o modelo numérico de simulação se aproximaram de maneira satisfatória dos valores experimentais, de modo que, o menor desvio observado foi de apenas 1,0% para o bloco do tipo C com altura de queda de 18 m. O maior desvio avaliado foi de 13,1% para o bloco do tipo D com altura de queda de 27 m, porém, este valor deve ser analisado com ressalva, uma vez que, para este tipo de bloco e respectiva altura de queda, foi realizado apena um ensaio (Tabela 4.10) entre os 41 ensaios da campanha de testes.

Verifica-se a capacidade do programa em repetir resultados coerentes. Em todos os testes avaliados os valores de energia cinética máxima foram observados no momento do impacto do bloco contra o sistema atenuador, e os valores de energia cinética cresciam à medida que a altura de lançamento era aumentada.

Tabela 4.21 – Resumo da avaliação dos resultados de energia cinética total máxima.

Bloco Ensaiado			Energia Cinética Total Máxima (kJ)		Comparação
Tipo de Bloco	Massa do Bloco (kg)	Altura de queda (m)	Valor Médio Experimental	Valor de Simulação	Desvio
A	1618	18	335	320	-4,5%
B	1695	9	227	219	-3,5%
		18	319	340	6,6%
		27	453	439	-3,1%
C	1577	18	307	310	1,0%
D	2259	9	347	315	-9,2%
		18	512	451	-11,9%
		27	502	568	13,1%
E	2173	9	288	297	3,1%

Os resultados obtidos indicam que o modelo numérico utilizado apresenta a capacidade de simular eventos reais, sendo uma ferramenta para previsão de trajetórias de queda de blocos e para a avaliação das principais variáveis envolvidas.

O modelo numérico adotado se apresenta com um instrumento importante para as tomadas de decisões e elaboração de projetos de mitigação. Entretanto, é muito importante ressaltar que toda modelagem numérica requer uma avaliação criteriosa das condições de campo. Em geral, é praticamente impossível caracterizar completamente as condições naturais abrangendo todos os pormenores de uma caracterização geológico-geotécnica. O modelo numérico deve representar de maneira mais aproximada possível as condições de campo e, portanto, o papel do especialista é crucial.

As quedas de blocos rochosos são eventos que envolvem variáveis de complexa caracterização e, desta forma, necessitam de uma constante avaliação e adaptação. Os

ensaios de campo realizados em escala real se apresentam como o melhor instrumento para esta avaliação.

Em conclusão, o autor considera emblemática a imagem apresentada pela Figura 4.17, a qual mostra claramente o avanço da cidade de *Provo* (caso de *Utah*) até um determinado ponto da região inferior da encosta. Este contexto ressalta a importância da capacidade de previsão da trajetória de movimento e do ponto de alcance de um bloco de rocha em queda pelos modelos numéricos de simulação, sendo este um dos temas centrais desta dissertação.

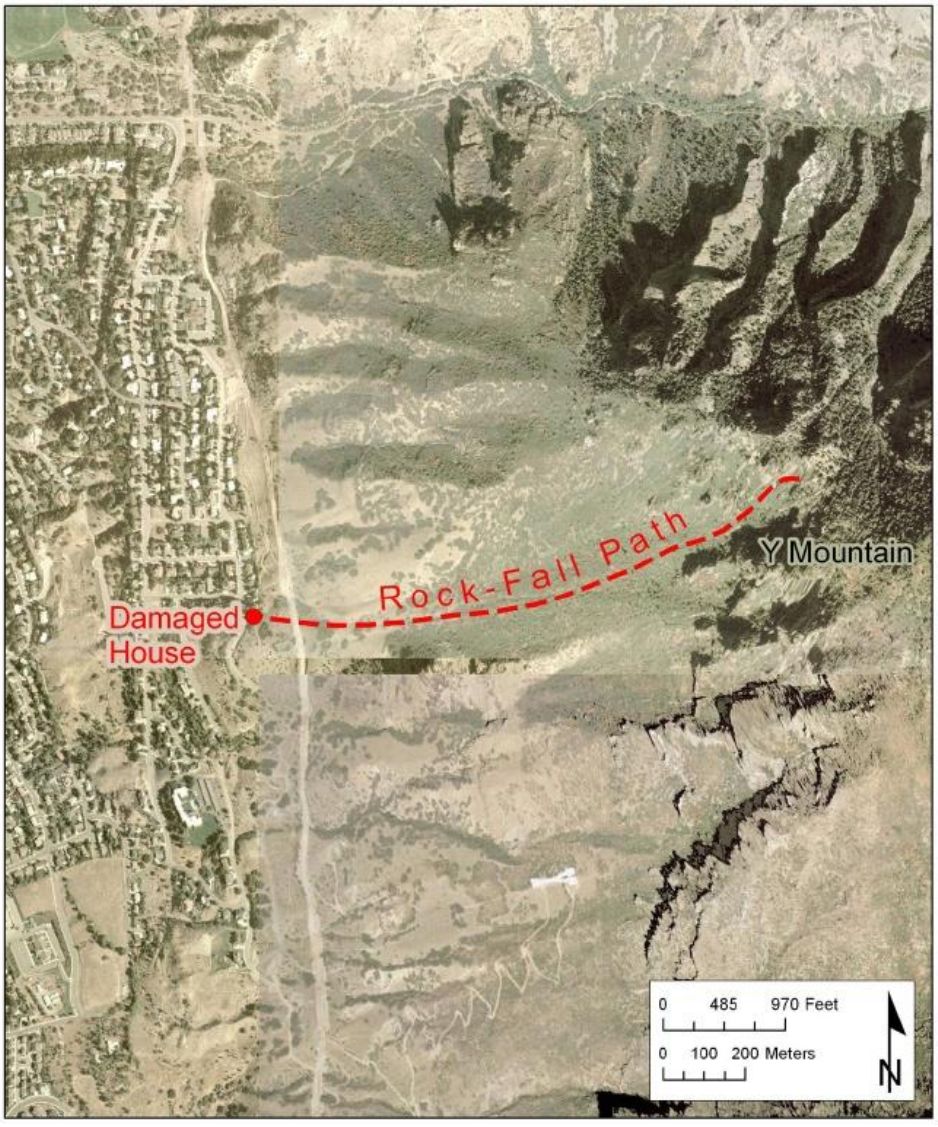

Figura 4.17 – Vista geral do avanço da cidade na região inferior da encosta (Giraud e Christenson, 2005).

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visou analisar os tipos de movimento, pontos de parada e energia cinética total máxima desenvolvida por blocos rochosos instáveis. A avaliação foi realizada por meio de análises numéricas de simulação da trajetória de queda de blocos com a utilização do programa *RocFall* v 4.0 (*Rocscience Inc*.).

Os estudos foram conduzidos com base em resultados experimentais de duas campanhas de ensaios realizadas em escala real e de um caso histórico de queda de bloco, são eles:

(i) Caso de estudo I – Campanha de ensaios de queda de blocos rochosos em escala real realizada em um campo experimental nos Alpes franceses pelo Mistério Francês de Ecologia e Desenvolvimento Sustentável;

(ii) Caso de estudo II – Caso histórico de queda de bloco de rocha ocorrido em maio de 2005 na cidade de *Provo*, estado americano de *Utah*. O evento foi estudado pelo Serviço de Inspeção Geológica de *Utah*;

(iii) Caso de estudo III – Campanha de ensaios de queda de blocos em uma área de testes projetada em escala real no estado americano do Colorado.

As análises seguiram a sequência usualmente aplicada à prática de projeto de medidas mitigadoras. A etapa inicial do estudo avaliou os tipos de movimento e os pontos de parada alcançados pelos blocos. Nesta etapa foram utilizados os dados dos casos de estudo I e II.

A segunda etapa do estudo avaliou as energias cinéticas totais máximas desenvolvidas pelos blocos ao longo da sua trajetória. Nesta etapa foram utilizados os dados do caso de estudo III.

A etapa final deste trabalho pretendeu comparar os resultados experimentais e observados com os resultados obtidos nas simulações numéricas. Esta etapa permitiu avaliar a capacidade do modelo numérico em simular as trajetórias e as principais grandezas envolvidas no movimento de queda de bloco.

5.2 CONCLUSÕES

Os resultados das análises numéricas desenvolvidas nesta pesquisa permitem ressaltar algumas conclusões. A primeira se refera à simplicidade de entrada de dados e à agilidade de processamento apresentada pelo programa *RocFall*.

Em referência à avaliação das trajetórias de movimento, pontos de parada e energia cinética total máxima desenvolvida pelos blocos analisados, pode-se destacar as conclusões relacionadas a seguir:

(i) Avaliação das Trajetórias de Movimento e Pontos de Parada dos Blocos

1. O alcance real do bloco no caso de estudo I (ensaio da França) foi de 391m (projeção horizontal) em relação ao ponto de liberação. As análises probabilísticas indicaram que cerca de 65% dos 5000 blocos analisados se acumularam no trecho 350-410m. Destaca-se que o ponto com maior acúmulo de blocos neste trecho foi 392m, ou seja, muito próximo do ponto de chegada real. Entretanto, cabe ressaltar que, 35% dos blocos se acumularam no trecho 180-234m, ficando mais afastado do ponto de parada real;

2. As análises numéricas para o caso de estudo II (caso de *Utah*) indicam que os pontos de parada de todos os 5000 blocos avaliados se concentraram em torno do ponto de parada real, portanto, não foram observados trechos de acúmulo mais afastados. O ponto de parada real do bloco, em projeção horizontal, foi de 1270m, sendo que 61% dos blocos analisados se depositaram no trecho 1230-1300m e o ponto com maior acúmulo de blocos neste trecho foi 1261m, assim como no ensaio da França, muito próximo do ponto de parada real;

3. As análises probabilísticas mostram que os tipos de movimentos predominantes apresentados pelos blocos ao longo das encostas foram rolamentos intercalados com saltos de alturas variadas. Estes tipos de movimentos foram convergentes com os movimentos reais desenvolvidos pelos blocos nos casos utilizados para avaliação deste parâmetro, ensaio da França e caso de *Utah*;

4. Os resultados dos pontos de parada e tipos de movimentos desenvolvidos pelos blocos mostram que a maior parte das trajetórias simuladas se aproximou de maneira satisfatória das trajetórias reais desenvolvidas pelos blocos.

(ii) Avaliação da Energia Cinética Total Máxima

1. Os resultados das análises numéricas indicaram que, assim como observado experimentalmente, os valores de energia cinética total aumentam à medida que a altura de liberação dos blocos também é aumentada e os valores máximos de energia cinética total foram observados no momento do impacto do bloco contra o sistema atenuador. Estes resultados podem parecer simples e intuitivos, mas revelam a capacidade do modelo numérico em emitir resultados coerentes;

2. A comparação entre os valores médios experimentais e os valores apresentados pelo modelo numérico mostra que os desvios encontrados são reduzidos. O menor desvio encontrado foi de apenas 1% para o bloco do tipo C (1577 kg), com altura de queda de 18m, apresentando o valor médio experimental de energia cinética total máxima de 307 kJ e o valor de simulação numérica de 310 kJ. O maior desvio foi de 13,1% para o bloco do tipo D (2259 kg), com altura de queda de 27m, apresentando o valor médio experimental de 502 kJ e o valor de simulação numérica de 568kJ;

3. Cabe destacar os desvios apresentados para o bloco do tipo B (1695 kg), por ser o bloco com maior número de ensaios realizados, 20 dos 41 testes. O desvio para altura de queda de 9m foi de -3,5%, tendo como valor médio experimental 227 kJ e o valor de simulação numérica de 219 kJ. O desvio para altura de queda de 18m foi de 6,6%, tendo como valor médio experimental 319 kJ e o valor de simulação numérica de 340 kJ. O desvio para altura de queda de 27m foi de -3,1%, tendo como valor médio experimental 453 kJ e o valor de simulação numérica de 439 kJ;

5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base nos resultados e análises desta dissertação, são apresentadas algumas sugestões e recomendações para pesquisas futuras:

1. Realização de estudo numérico em programas de simulação de trajetórias de queda de blocos tridimensionais;

2. Realização de ensaios de queda de blocos em campo experimental, variando a massa do bloco, topografia e outras características da superfície, com avaliação da variação dos parâmetros envolvidos;

3. Realização de ensaios de queda de blocos em campo experimental para avaliação do comportamento de barreiras flexíveis para diferentes níveis de energia cinética total;

4. Realização de análises numéricas com base em resultados de campos experimentais diferentes para comparação com os resultados obtidos neste trabalho;

5. Desenvolvimento de modelos reduzidos para simulação de movimentos de queda de blocos em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2009). Estabilidade de Encostas. NBR 11682. Rio de Janeiro, 2009.

ALEJANO, L. R., PONS, B., BASTANTE, F. G., ALONSO, E. & STOCKHAUSEN, H. W. (2007). Slope Geometry Design as a Means for Controlling Rockfalls in Quarries. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44, pp. 903-921.

ANDERHEGGEN, E., VOLKWEIN, A., GRASSL, H. (2002). Numerical Simulation of Highly Flexible Rockfall Protection Systems, 9p.

ARNDT, B., ORTIZ, T. & TURNER, A. K. (2009). TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C141. Colorado's Full-Scale Field Testing of Rockfall Attenuator Systems.

AZZONI, A., LA BARBERA, G. & ZANINETTI, A. (1995). Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 32, pp. 709-724.

BAUTISTA, L. E. C. (2007). Influência das Tensões de Origem Térmica em Problemas de Estabilidade de Blocos Rochosos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUCRio, 71p.

BERGER, F. & DORREN, L. (2006). Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides. Objective Comparison of Rockfall Models using Real Size Experimental Data, pp. 245-252.

BERTOLO, P.; OGGERI, C.; PEILA, D. (2009). Full-scale testing of draped nets for rock fall protection. Canadian Geotechnical Journal, 46, pp. 306–317.

BOZZOLO, D. & PAMINI, R. (1986). Simulation of Rockfalls Down a Valley Side. Acta Mechanica, 63, pp. 113-130.

CANTARELLI, G.; GIANI, G. P.; GOTTARDI, G.; GOVONI, L. (2008) Modelling rockfall protection fences. 1st World Landslide Forum, Tokyo, pp. 662-667.

CHAU, K.T., WONG, R.H.C., LEE, C.F. (1996) "Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Vol. 35, Section 4-5, pp. 662-663.

CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. (1996) - Landslide types and processes, In: Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, Washington, USA, pp. 36-75.

DE LUCA TUPPUTI SCHINOSA, F. (2003). La Valutazione della Stabilità di Versanti in Roccia: Aspetti Metodologici ed Applicazioni su Aree Campione del Território Campano. Dottorato di Ricerca in Analisi dei Sistemi Ambientali, Universitá Degli Studi di Napoli, Itália, 206p.

DESCOEUDRES, F.; STOFFEL, S. M.; BOLL, A.; GERBER, W. & LABIOUSE, V. (1999). Disaster Resilient Infrastructure, Commissioned by the Secretariat for the International Decade for Natural Disaster Reduction, Chapter 9, Rockfalls, Secretariat Swiss Federal Institute of Technology. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie and Glaziologie (VAW). Geneve. pp. 37-47.

DIAS, G. P. & BARROSO, E. V. (2006). Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas: Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em

Encostas. Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, Vol. 29 - 2 / 2006 pp. 149-167.

DORREN, L. K. A. (2003). A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approches. Progress in Physical Geography, 27, USA, pp. 69-87.

EVANS, S. G. & HUNGR, O. (1993). The Assessment of Rockfall Hazards at the Base of Talus Slopes. Canadian Geotechnical Journal, 30/4, pp. 620-636.

FHWA. (Federal highway Administration), (2009). TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C141. Colorado's Full-Scale Field Testing of Rockfall Attenuator Systems.

GEOBRUGG (2004). TECCO Slope Stabilization System. Summary of Published Technical Papers in the Period of 1998 - 2004. Switzerland, 27p.

GEOBRUGG (2009). Rockfall deflector protection Avers-Reno di Lei / Switzerland. Deflector protection / Photo documentation / March 2009, 4p.

GEORIO (1999). Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1ª edição.

GERBER, W. (2001). Guideline for the approval of rockfall protection kits. Environment in practice. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Swiss Federal Research Institute WSL. Berne. 39 p.

GERBER, W. & HALLER, B. (1997). Safe and economical rockfall protection barries. LEE, H.K., YANG, H.S.; CHUNG, S.K. (eds) Proceedings of the 1st Asian Rock Mechanics Symposium: ARMS 97. A regional Conference of ISRM / Seoul / Korea. Environmental and Safety Concerns in Underground Construction 2. Balkema: Rotterdam. pp. 915-920.

GIANI, G. P.; GIACOMINI, A.; MIGLIAZZA, M. & SEGALINI, A. (2004). Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. 2º Rock Mechanics and Rock Engineering, 37, pp. 369-389.

GIRAUD, R. E. & CHRISTENSON, G. (2005). Investigation of the May 12, 2005, 1550 East Provo rock fall, Provo, Utah. Utah Geological Survey Report, 9p.

GRASSL, H., BARTELT, P., VOLKWEIN, A., and WARTMANN, S.: Experimental and numerical modelling of highly flexible rockfall protection barriers, in: Proceedings of 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cambridge, Massachusetts, USA, 22–26 June 2003, 2589-2594, 2003.

GUZZETTI, F., CROSTA, G., DETTI, R. & AGLIARDI, F. (2002). STONE: a Computer Program for the Three-Dimensional Simulation of Rock-Falls. Computers and Geosciences, 28, 9, pp. 1079-1093.

HANSEN, M. J. (1987). Strategies for Classification of Landslides. In: Brunsden, D. & Prior, D. (eds), Slope Stability, pp.1-25.

HEIM, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 77, 218 pp.

HOEK, E. (2001). Big tunnels in bad rock, 2000. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* No. 9, Sept 2001, pages 726-740.

HOEK, E. (2007). Practical Rock Engineering. Chapter 9, Analysis of Rockfall Hazards, Canada, 25p.

MEISSL, G. (1998). Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispeile zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler

Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28. Universität Innsbruck, Austria, 249p.

NOMURA, T., INOUE, S., FUCHIGAMI, M., YOKOTA, Y., KUBO, T., TATTA, N., and ARAI, K. (2002). Experimental research of reinforced soil wall for rock-fall protection, in: Proceedings of 7th International conference on geosynthetics, Nice, France, 22–27 September, 303–308.

NUNES, A. L. L. S. (2004). Geomecânica de Encostas, Publicação Didática, Programa de Engenharia Civil COPPE-UFRJ, 160p.

NUNES, A. L. L. S. (2008). Estabilidades de Taludes Rochosos em Estradas. In: 6º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul - Geosul 2008, Florianópolis. Anais do 6º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Geosul 2008. Florianópolis, ABMS, 11p.

NUNES, A. L. L. S. e RIOS FILHO. (2009). Instabilidade por Queda de Blocos no Morro do Escalavrado, RJ, 14º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cobramseg 2008, Búzios, Rio de Janeiro, ABMS, pp. 552-559.

ORTIGÃO, J. A. R. E SAYÃO, A. S. F. J. (2000). (Eds) Manual técnico de encostas. GeoRio, 2ª Edição, v.IV, 184p.

PEILA, D., PELIZZA, S., SASSUDELLI, F. (1998). Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests. Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer-Verlag, 24p.

PEILA, D., OGGERI, C., CASTIGLIA, C., RECALCATI, P., RIMOLDI, P. (2002) Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments subject to high energy rock impacts. Geosynthetics - 7 ICG - Delmas, Gourc & Girard (eds). Swets & Zeitlinger, Lisse ISBN 90 5809 523 1.4p.

PFEIFFER, T. J., HIGGINS, J. D. and TURNER, A. K. (1990). Computer aided rock fall hazard analysis. Proc. Sixth Int. Congress, Int. Association Engineering Geology, Amsterdam, Belkma, Rotterdam, Netherlands.

PFEIFFER, T. J. & BOWEN, T. (1989). Computer Simulation of Rockfalls. Association Engineering Geology, 26(1), pp. 135-146.

PIERSON, L. A., GULLIXSON, C. F., CHASSIE, R. G. (2001). Rockfall Catchment area design Guide, Final Report SPR-3(032), FHWA-OR-RD-02-04, 92 pp.

PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T. H. Para Entender a Terra – 4. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006. 656p.: Il.; 28 cm.

RIBEIRO, R. S., BARROSO, E.V., BORGES, A.F. (2008). Simulação do Alcance de Blocos Rochosos em Encosta Urbana Ocupada no Município de Petrópolis (RJ). In: 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2008, Porto de Galinhas. Desafios para o Crescimento Brasileiro, Porto de Galinhas (PE), pp. 1-11.

RITCHIE, A. M. (1963). Evaluation of Rockfall and its Control. Highway Research Record, USA, 17, pp. 13-28.

ROCHA, J. S. de A. (2009). Estudos Numéricos sobre Trajetórias de Queda de Blocos Rochosos. Dissertação de mestrado do Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 138p.

ROCSCIENCE (2003). Advanced Tutorial – Determining Input Parameters for a Rocfall Analysis. RocNews Fall, 8p.

RODRIGUEZ, T. T. (2005). Proposta de Classificação Geotécnica para Colúvios Brasileiros. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 370p.

ROTH, A., KASTLI, A., and FRENEZ, Th. (2004). Debris Flow Mitigation by Means of Flexible Barriers. Proc. Internationales Symposion. Riva del Garda, Italy. 12p.

SHARPE, C. F. S. (1938). Landslides and Related Phenomena. Pageant Books, Inc., NewJersey, U.S.A., 137p.

SKEMPTON, A. W. & HUTCHINSON, J. N. (1969). Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, State-of-the Art, ISSMGE, pp. 291-340.

STEVENS, W. D. (1998). Rocfall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. Master Thesis of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 31p.

TAGLIAVINI, F., REICHENBACH, P., MARAGNA, D., GUZZETTI,F. & PASUTO, A. (2008). Comparison of 2-D and 3-D Computer Models for the M. Salta Rock Fall, Vajont Valley, Northern Italy. Geoinformatica, Springer Sciense, 11p.

VARNES, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In, Special Report 176: R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.), Landslides: Analysis and Control, National Research Council, Washington, USA, pp. 11-33.

VIEIRA, B. C., VIEIRA, A.C.F., AMARAL, C.P., FERNANDES, N. F. (1997). Estudo Comparativo dos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1996 nas Bacias do Quitite e do Papagaio (RJ): Uma Abordagem Geomorfológica. In: COBRAE 2, Simpósio Pan-Americano de Escorregamentos de Terra. Rio de Janeiro. Anais ABMS/ABGE/ISSMGE, v.1, pp. 165-174.

VOLKWEIN, A., MELIS, L., HALLER, B., PFEIFER, R. (2005). Protection from Landslides and High Speed Rockfall Events–Reconstruction of Chapman's Peak Drive. Proc. Structures and Extreme Events, IABSE Symposium, Lissabon.

WIECZOREK, G. F., STOCK, G. M., REICHENBACH, P., SNYDER, J. B., BORCHERS, J. W. & GODT, J. W. (2008). Investigation and Hazard Assessment of the 2003 and 2007 Staircase Rock Falls, Yosemite National Park, California, USA. Natural. Hazards Earth System Science, 8, pp. 421-432.