

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

**USO DE BARREIRAS FLEXÍVEIS PARA O CONTROLE DE QUEDA DE BLOCOS
DE ROCHA**

Rafael Junqueira Villela

Rio de Janeiro
Setembro de 2011

USO DE BARREIRAS FLEXÍVEIS PARA O CONTROLE DE QUEDAS DE BLOCOS DE ROCHA

Rafael Junqueira Villela

Projeto de Graduação submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientadores:

Professor Marcos Barreto de Mendonça

Professor Mauricio Ehrlich

Examinada por:

Professor Marcos Barreto de Mendonça, D. Sc.

Professor Mauricio Ehrlich, D. Sc.

Professor Willy de Alvarenga Lacerda, D. Sc.

Professor Leonardo De Bona Becker, D. Sc.

Rio de Janeiro
Setembro de 2011

Villela, Rafael Junqueira

Uso de Barreiras Flexíveis para o Controle de Quedas de Blocos de Rocha/Rafael Junqueira Villela – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

xi, 105 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça e Mauricio Ehrlich.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 58.

1.Introdução.2.Revisão Bibliográfica. 3.Caso Estudado. 4.Análises Numéricas para Dimensionamento das Barreiras de Impacto. I. Marcos Barreto de Mendonça. II. Mauricio Ehrlich. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso Engenharia Civil. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, meu maior amigo e referência, pelo amor, carinho e contínuo incentivo. Sempre ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus tios, Eduardo e Claudia, que me acolheram tão bem nestes anos de faculdade, pela orientação e estímulo.

A todos os meus Professores pelos ensinamentos, e, em especial, aos meus orientadores Marcos Barreto e Maurício Ehrlich pela paciência, dedicação e apoio neste momento final do meu curso.

Ao meu orientador acadêmico, Leonardo Becker e ao Professor Willy de Alvarenga Lacerda pela participação na avaliação deste trabalho.

Aos queridos amigos que adquiri nesses anos de UFRJ, pessoas que eu pretendo conviver para o resto da vida e que me ajudaram a conquistar mais esta etapa.

Aos meus colegas do laboratório de geotecnia, em especial, Ronaldo Izzo, profissional com quem tanto aprendi e que me ensinou a gostar da área de pesquisa e ao Professor Claudio Mahler por ter acreditado em mim e me apoiado quando precisei.

À Família Fluxo Consultoria, pelo aprendizado e por alguns dos momentos mais divertidos da vida.

À SOPE Engenharia, empresa aonde eu tive a minha primeira experiência profissional, excelente ambiente de trabalho, motivando a minha escolha pela área de geotecnia. Obrigado por permitir a utilização de uma de suas obras para realização deste projeto e pelo apoio fornecido durante a execução.

À GeoBrugg AG, e em especial ao engenheiro Felipe Gobbi, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, me fornecendo acesso ao programa Rockfall Dr. Spang, além do auxílio técnico para a utilização e por ter me levado em obras que me ajudaram a aprimorar os conhecimentos relativos ao tema.

À Sondotécnica pela compreensão nos meus horários, em especial ao amigo engenheiro José Alfredo. Apoio fundamental para a conclusão deste trabalho.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Uso de Barreiras Flexíveis Para o Controle de Queda de Blocos de Rocha

Rafael Junqueira Villela

Setembro/2011

Orientadores:

Marcos Barreto de Mendonça

Mauricio Ehrlich

Curso: Engenharia Civil

Este trabalho aborda métodos de previsão de queda de blocos que permitem avaliações de risco e o cálculo de estruturas de convivência, em especial, barreiras de impacto flexíveis. É apresentado um estudo de caso onde, com auxílio do programa Rockfall, foi desenvolvido um projeto de barreiras flexíveis para a convivência com blocos de até 10 t desprendendo de um desnível máximo na ordem de 400 m. O caso é descrito desde o projeto até a finalização da obra.

São apresentadas também simulações numéricas para o caso estudado contemplando as situações anterior e posterior à implementação das barreiras e são estudadas disposições alternativas para o posicionamento das barreiras.

Palavras-chave: *Quedas de Blocos, Barreiras de Impacto, Taludes Rochosos, Soluções de Convivência, Trajetória de Blocos.*

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

Use of Flex-Post Fences for Rockfalls Control

Rafael Junqueira Villela

September/2011

Advisor:

Marcos Barreto de Mendonça

Mauricio Ehrlich

Course: Civil Engineer

This paper addresses methods of predicting rockfalls that enable risk assessment and calculation of structures of coexistence, in particular Flex-Post Fences. It presented a case study where, using the software Rockfall, a Flex-Post Fence project was developed for the coexistence with blocks of up to 10 t loosening up a maximum gap on the order of 400 m. The case is described from design to completion of the work. It also presented numerical simulations for the case study looking at the situations before and after the implementation of the fences and analyzed alternative arrangements for the placement of fences.

Keywords: *Rockfalls, Flex-Post Fences, Rock Slope, Coexistence Solutions, Rockfalls Trajectories.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ruptura Circular (Nunes 2008).	3
Figura 2.2 - Ruptura Planar (modificado de Nunes, 2008).	3
Figura 2.3 - Ruptura em Cunha (modificado de Nunes, 2008)	3
Figura 2.4 - Tombamento (Nunes, 2008).	4
Figura 2.5 - Queda de Blocos (modificado de Hoek, 2006).	5
Figura 2.6 - Tipos de movimentos descritos por blocos (modificado de FHWA, 1991)	5
Figura 2.7 - <i>Fahrböschung</i> (F) e <i>Minimum Shadow Angle</i> (MSA) (Modificado de Meußl, 1998, <i>apud</i> Dorren, 2003).	7
Figura 2.8 - Sistema de pontuação RHRS (Hoek, 2006).....	9
Figura 2.9 - Convenção de direção e sentido para os vetores.....	12
Figura 2.10 - Movimentos associados às trajetórias dos blocos (Spang, 2004).	14
Figura 2.11 - Seção Geológica de Cálculo	18
Figura 2.12 - Trajetória e energia cinética calculados manualmente.	22
Figura 2.13 - Soluções de Projetos para Taludes Rochosos (GeoRio, 1999).	23
Figura 2.14 - Vistas dos elementos de um exemplo de uma barreira flexível (Wyllie, 2006). ..	25
Figura 2.15 - Barreira Flexível GeoBrugg (modificado de CRT, 2010). a) – Postes, b) – Aneis de feio (estado inicial e após o acionamento) e c) – Malha de Aneis.....	26
Figura 3.1 - Topografia da área estudada.	27
Figura 3.2 - Vista geral da região aonde está inserida a área estudada (marcação).	28
Figura 3.3. Remoção de bloco após queda na rodovia estudada.	28
Figura 3.4. Queda de blocos na rodovia estudada.	28
Figura 3.5 – Consequências do evento de queda de blocos e deslizamento de terra ocorrido em 16/11/2009.	29
Figura 3.6 - Imagens de satélite antes e depois da ruptura.	29
Figura 3.7 - Segmentos da rodovia ao longo dos 584 m estudados (CRT, 2010).	32
Figura 3.8 - Esboço do trecho da rodovia estudado com as litologias e estruturas geológicas relacionadas a cada segmento (CRT, 2010).	33
Figura 3.9 - Perfil Esquemático A (CRT, 2010).....	34
Figura 3.10 - Perfil Esquemático B (CRT, 2010).....	34
Figura 3.11- Perfil Esquemático C (CRT, 2010).....	34
Figura 3.12 - Perfil Esquemático D (CRT, 2010).	34
Figura 3.13 - Perfil Esquemático E (CRT, 2010).	34
Figura 3.14 - Cicatriz gerada pelo deslizamento com detalhe do talude na cicatriz e fluxo de água oriundo das fraturas (Modificado de CRT, 2010).	36
Figura 3.15 - Detalhe de um dos drenos instalados	36
Figura 3.16 - Croquis esquemático das intervenções emergenciais (CRT, 2010).....	36
Figura 3.17 - Zonas de mesma declividade e de direção de mergulho (CRT, 2010).	37
Figura 3.18 - Ilustração das barreiras especificadas (CRT, 2010).....	38
Figura 3.19 – Vista (de cima para baixo) da cicatriz do deslizamento durante execução da obra da estabilização.....	39

Figura 3.20 - Andaimos para vencer desnível junto à rodovia.	40
Figura 3.21 - Perfuração dos Chumbadores.	40
Figura 3.22 - Descida d'água em degraus.	40
Figura 3.23 - Plano inclinado para acesso a parte superior da encosta.	40
Figura 3.24 - Contrafortes para a contenção dos blocos e lascas maiores.....	40
Figura 3.25 - Montagem das Barreiras	40
Figura 3.26 - Vista da fixação da barreira a montante.....	41
Figura 3.27 - Vista lateral da barreira.....	41
Figura 3.28 – Vista da Barreira da Linha Superior.....	41
Figura 4.1 - Seções estudadas.....	44
Figura 4.2 - Mapa de isoenergias considerando camada de solo em toda a superfície - Situação anterior ao deslizamento.	45
Figura 4.3 - - Mapa de isoenergias considerando camada de solo com rocha aparente somente no local da cicatriz - Situação posterior ao deslizamento.....	46
Figura 4.4- Mapa de isoenergias considerando rocha aparente em toda a superfície - Situação hipotética.	47
Figura 4.5 - Perfil da Seção 06.	48
Figura 4.6 - Seção 06 - Envoltória de Energias (Sem Barreiras).	49
Figura 4.7 - Histograma acumulado de energias de impacto na linha 1.....	49
Figura 4.8 - Histograma acumulado de altura de impacto na linha 1.....	50
Figura 4.9 - Histograma acumulado de energias na linha 2.	50
Figura 4.10 - Histograma acumulado de altura de impacto na linha 2.....	50
Figura 4.11 - Energia Total x Cenário.....	52
Figura 4.12 - Histograma acumulado de uma linha de barreiras.....	54
Figura 4.13 - Área equivalente x nº de linhas de barreiras.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados nas análises.	43
Tabela 2 - Cenários de cálculo e cotas de barreiras.....	51
Tabela 3 - Análise de alternativas para a disposição das barreiras.....	52
Tabela 4 - Características das barreiras disponíveis no mercado.	53
Tabela 5 - Barreiras especificadas de acordo com a disponibilidade no mercado.	53

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1 Principais Mecanismos de Instabilização de Taludes Rochosos	2
2.1.1 Ruptura Circular	2
2.1.2 Ruptura Planar	2
2.1.3 Ruptura em Cunha	3
2.1.4 Tombamento	4
2.1.5 Quedas de Blocos	4
2.2 Métodos para Previsão de Queda de Blocos Rochosos	6
2.2.1 Métodos Empíricos	7
2.2.2 Métodos Numéricos	10
2.2.3 Exemplo de Aplicação dos Fundamentos Teóricos para um Caso Hipotético	18
2.3 Soluções para taludes rochosos	23
2.3.1 Barreiras Flexíveis	24
3. Caso Estudado	27
3.1 Descrição Geral	27
3.2 Levantamento Geológico Geotécnico	31
3.3 Projeto Conceitual para tratamento do talude rochoso	35
4. Análises Numéricas para Dimensionamento das Barreiras de Impacto	42
4.1 Considerações Iniciais	42
4.2 Análise da situação da região estudada antes das intervenções.	44
4.3 Estudo das intervenções realizadas	48
4.4 Análise de Alternativas para a disposição das barreiras em um caso hipotético.....	51
5. Conclusões	56
Referências Bibliográficas	58
ANEXO I.....	60
ANEXO II.....	74
ANEXO III	87

1. Introdução

O presente trabalho aborda o problema de movimentos de blocos de rocha, enfocando métodos de previsão da trajetória dos mesmos e dimensionamento de estruturas de convivência, em especial barreiras de impacto flexíveis.

É apresentado o estudo de caso da obra realizada no km 90 da rodovia BR 116, trecho que liga as cidades do Rio de Janeiro e Teresópolis. Esta obra consistiu principalmente na implantação de barreiras flexíveis para conter blocos de massa com até 10 t se desprendendo a um desnível da ordem de 400 m, sendo parte de um conjunto de intervenções para estabilização da encosta local.

Foi realizado um estudo numérico utilizando o programa Rockfall Dr. Spang, sendo analisados os riscos nas fases anterior e posterior à realização da obra. Fez-se também um estudo de diferentes configurações na disposição das barreiras para se analisar a opção mais viável técnica e economicamente.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas visitas técnicas à obra estudada, desde as primeiras marcações para a locação de barreiras até a vistoria final para aprovação do serviço realizado.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Principais Mecanismos de Instabilização de Taludes Rochosos

A estabilidade dos maciços rochosos é função de uma complexa combinação entre as propriedades da rocha, das descontinuidades e das condições em que o talude se encontra (Nunes, 2008).

Os movimentos são geralmente iniciados por algum evento climático ou biológico que provoca uma mudança nas forças atuantes sobre a rocha. Estes processos podem incluir o aumento de poropressão pela infiltração de águas pluviais, a erosão de materiais circundantes, mudanças de temperatura, intemperismo físico ou químico e crescimento de raízes (Spang, 2004).

Os principais mecanismos de instabilização em taludes rochosos são representados pelas rupturas circular, planar, em cunha, tombamento e queda de blocos (Hoek, 2006). Optou-se por não considerar fluxo de detritos, uma vez que este tipo de movimento envolve materiais de diferentes granulometrias, inclusive argilas.

2.1.1 Ruptura Circular

A ruptura circular ocorre em maciços rochosos compostos de rochas brandas ou muito fraturados, com comportamento semelhante ao de solos isotrópicos. A superfície de ruptura tem um formato conchoidal (Figura 2.1).

2.1.2 Ruptura Planar

Ocorre normalmente quando existe uma família de descontinuidades na mesma direção que intercepta a face do talude, sendo a inclinação deste maior do que o ângulo da superfície da descontinuidade por onde se dá o deslizamento. A Figura 2.2 ilustra o movimento.



Figura 2.1 - Ruptura Circular (Nunes 2008).



Figura 2.2 - Ruptura Planar (modificado de Nunes, 2008).

2.1.3 Ruptura em Cunha

Ocorre em maciços com duas (ou mais) famílias de fraturas, cuja interseção mergulha em direção ao talude. Para que ocorra a ruptura as duas descontinuidades devem aflorar na face do talude.

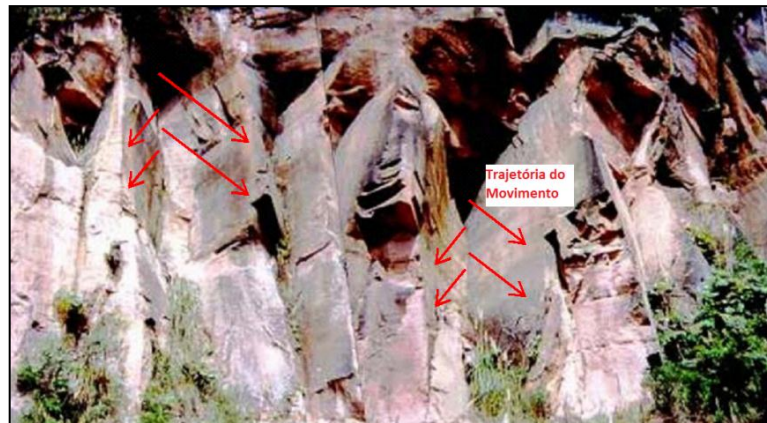


Figura 2.3 - Ruptura em Cunha (modificado de Nunes, 2008)

2.1.4 Tombamento

O tombamento ocorre quando o maciço apresenta descontinuidades com mergulho vertical, paralelas ao talude. O tombamento consiste em uma rotação ou basculamento para fora do talude em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslocada (Cruden&Varnes, 1996 *apud* Rocha, 2009).

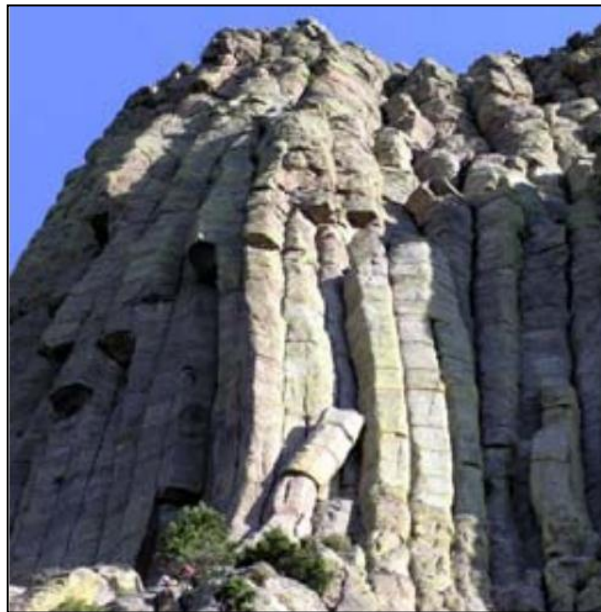


Figura 2.4 - Tombamento (Nunes, 2008).

2.1.5 Queda de Blocos

Quedas de blocos (Figura 2.5), por sua vez, consistem em deslocamentos por gravidade de blocos de rocha com volumes e litologia diversos que se destacam de taludes ou encostas íngremes e deslocam-se ao longo da encosta em movimentos do tipo queda livre, deslizamento, rolamento e salto ao longo de superfícies inclinadas (Figura 2.6).

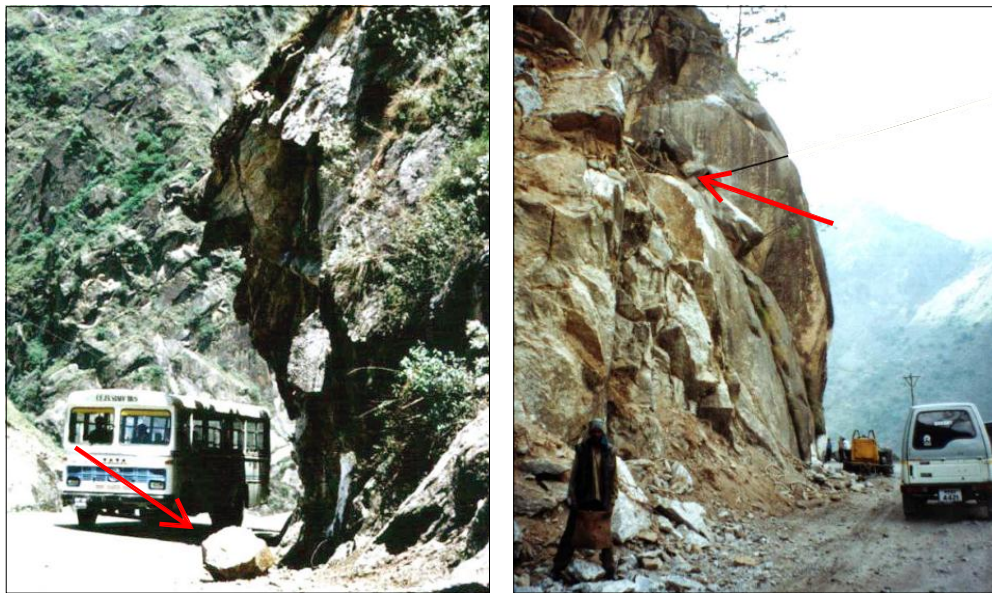


Figura 2.5 - Queda de Blocos (modificado de Hoek, 2006).

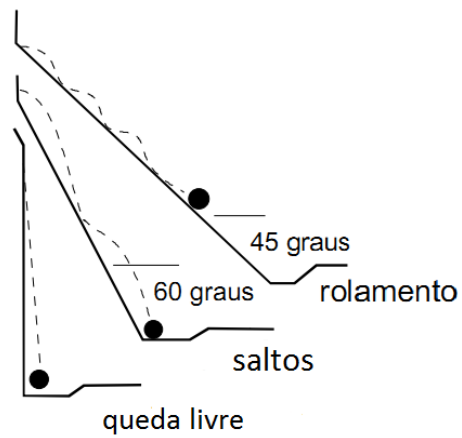


Figura 2.6 - Tipos de movimentos descritos por blocos (modificado de FHWA, 1991)

2.2 Métodos para Previsão de Queda de Blocos Rochosos

Descrever a trajetória do movimento de queda de blocos de rocha de maneira analítica precisa é uma tarefa praticamente impossível. Estão associados ao movimento diversos fatores difíceis de serem determinados tais como as propriedades dos blocos, as condições iniciais do movimento e as propriedades dos materiais das encostas.

Outro fator complexo de ser analisado é a geometria de cálculo a ser adotada. Como a área de risco de desprendimento de blocos geralmente é muito extensa, por exemplo, uma estrada em região montanhosa, a geometria e a área passível de desprendimentos de blocos pode variar consideravelmente ao longo desta distância.

Realizar um levantamento topográfico detalhado e mapear todos os blocos de uma região muitas vezes não é viável devido a razões orçamentárias e as análises tem que ser feitas em algumas seções definidas como representativas de trechos da encosta. Contudo, é sabido que as trajetórias descritas pelos blocos de rocha são sensíveis a pequenas mudanças na geometria (Stevens, 1998), o que mostra que a adoção destas seções para analisar a encosta como um todo deve ser feita com cautela e ciente dos erros inerentes a estas variações.

As trajetórias que os blocos realizam ao se desprender das encostas estão associadas a movimentos que podem englobar quedas livres, saltos, rolamentos e deslizamentos. A Figura 2.6 ilustra tipos de movimentos possíveis.

Ao longo dos tempos foram desenvolvidos mecanismos de previsão que permitem avaliar os riscos associados a cada encosta. Esta previsão pode ser realizada basicamente por métodos empíricos ou por métodos numéricos. Em seguida estes métodos e seus campos de atuação serão abordados mais detalhadamente.

2.2.1 Métodos Empíricos

Os métodos empíricos, de uma maneira geral, se baseiam em correlações entre dados topográficos e posição da zona de deposição de blocos em eventos já ocorridos (Dorren, 2003). Os métodos empíricos apresentados aqui não permitem a descrição das potenciais trajetórias dos blocos, sendo ferramentas que apenas permitem a previsão de zonas atingíveis por eventos de quedas blocos e análises de riscos.

Para previsão das zonas atingíveis por eventos de quedas de blocos, EVENS & HUNGR (1993) *apud* ROCHA (2009) sugere o princípio de *Fahrböschung* (Heim, 1993, *apud* Rocha, 2009). *Fahrböschung* (F) é o ângulo de uma linha reta entre o ponto superior da zona de desprendimento de blocos e o ponto mais afastado de deposição em todos os eventos de queda. EVENS & HUNGR (1993) *apud* ROCHA (2009) apresenta ainda o *Minimum Shadow Angle* (MSA), que é o ângulo de uma linha reta entre o ponto superior de onde se dá o acúmulo de blocos e o ponto mais afastado da deposição em todos os eventos de queda.

A Figura 2.7 ilustra os ângulos F e MSA.

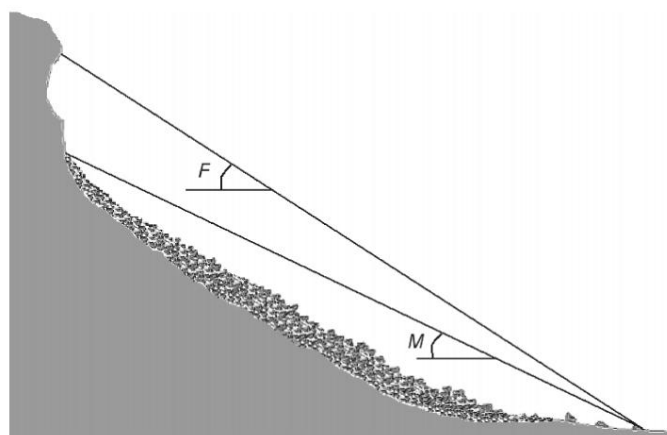


Figura 2.7 - *Fahrböschung* (F) e *Minimum Shadow Angle*(MSA) (Modificado de Meußl, 1998, *apud* Dorren, 2003).

A partir da identificação dos pontos de desprendimento de blocos, pode-se, portanto, estimar as áreas passíveis a serem atingidas durante eventos de queda de blocos.

Com intuito de criar uma ferramenta para classificar as encostas das rodovias e ferrovias de acordo com o risco associado a eventos de quedas de blocos, a Highway Division of Oregon desenvolveu nos Estados Unidos o Rockfall Hazard System (RHRS). O RHRS consiste em um sistema de pontuação de encostas de acordo com fatores que influenciam o risco de acidentes. Os fatores considerados são a geometria da encosta, a permanência de veículos nos pontos sujeitos a quedas, a distância que um condutor enxerga um evento ocorrido, a largura da estrada, a dimensão dos blocos, o clima, a presença de água, as características geológicas e o histórico de quedas.

A Figura 2.8 apresenta a pontuação dos fatores considerados. A pontuação final da encosta se dá pelo somatório dos pontos obtidos para cada fator. A obtenção de valores mais precisos para a pontuação, assim como detalhes sobre a avaliação de cada um dos fatores considerados está apresentada em Hoek (2009).

O sistema RHRS não possui recomendações sobre as ações a serem tomadas para diferentes pontuações, porque considera que existem outros fatores atrelados à decisão, tais como disponibilidades orçamentárias. Todavia, Hoek (2009) relata que no estado de Oregon, locais com uma avaliação menor do que 300 pontos são considerados de baixo risco e para locais com pontuação acima de 500 pontos são indicadas medidas corretivas urgentes.

Os métodos empíricos devem ser utilizados de forma preliminar, porém a tendência indicada por esses métodos, juntamente com o julgamento de um técnico experiente, constitui uma importante ferramenta para se avaliar rapidamente através de inspeções e cálculos simples os riscos envolvidos a uma encosta.

CATEGORY		RATING CRITERIA AND SCORE				
		POINTS 3	POINTS 9	POINTS 27	POINTS 81	
SLOPE HEIGHT		25 FT	50 FT	75 FT	100 FT	
DITCH EFFECTIVENESS		Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
AVERAGE VEHICLE RISK		25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time	
PERCENT OF DECISION SIGHT DISTANCE		Adequate site distance, 100% of low design value	Moderate sight distance, 80% of low design value	Limited site distance, 60% of low design value	Very limited sight distance, 40% of low design value	
ROADWAY WIDTH INCLUDING PAVED SHOULDERS		44 feet	36 feet	28 feet	20 feet	
GEOLOGIC CHARACTER	CASE 1	STRUCTURAL CONDITION	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
		ROCK FRICTION	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	CASE 2	STRUCTURAL CONDITION	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
		DIFFERENCE IN EROSION RATES	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
BLOCK SIZE		1 FT	2 FT	3 FT	4 FT	
QUANTITY OF ROCKFALL/EVENT		3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards	
CLIMATE AND PRESENCE OF WATER ON SLOPE		Low to moderate precipitation, no freezing periods, no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation and long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	
ROCKFALL HISTORY		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Figura 2.8 - Sistema de pontuação RHRS (Hoek, 2006)

2.2.2 Métodos Numéricos

2.2.2.1 Fundamentos Teóricos

Conforme explicitado anteriormente, a previsão da trajetória de blocos é uma tarefa bastante complexa, devido não só aos tipos movimento associados, mas principalmente à incerteza, ou a variabilidade ao longo de uma encosta, dos fatores que influenciam nesta trajetória.

Quanto às propriedades dos blocos, os parâmetros a serem considerados são as dimensões e a massa específica. Para a encosta, as propriedades englobam os coeficientes de restituição normal e tangencial do choque bloco-encosta e os coeficientes de atrito estático e dinâmico, que são abordados no item 2.2.2.2.

Para trabalhar com as variantes descritas, os métodos numéricos de previsão de quedas de blocos associam modelos analíticos de determinação de trajetórias a análises probabilísticas. Desta forma, os parâmetros que não são bem conhecidos podem ser inseridos nas análises através de um intervalo esperado para seus valores, e então, um grande número de análises é realizado através de uma amostragem aleatória dentro dos intervalos especificados. Estas análises produzem uma distribuição de resultados, com dados como energia, altura dos saltos e distância de alcance dos blocos, a partir dos quais a solução para o problema de instabilidade pode ser estudada.

Para cada trajetória simulada, são considerados os movimentos de deslizamento, rolamento, tombamento, queda livre e trajetória parabólica. Estes movimentos são calculados utilizando as leis de movimento e as leis associadas a colisões da física.

Os blocos são considerados como uma massa pontual ou com formatos conhecidos (de esferas, discos e cilindros). Quando o bloco é considerado como uma massa pontual o método não considera o movimento de rolamento, mas sim o de deslizamento (Rocha, 2009).

Abaixo são descritas as considerações utilizadas em cada tipo de movimento.

- Deslizamento:

Define-se o movimento como deslizamento quando sua trajetória é paralela à superfície e o corpo deslizando não sofre rotação. A Figura 2.10-a ilustra o movimento.

No deslizamento, tem-se o coeficiente de atrito se opondo ao movimento do bloco. Portanto, pela Segunda Lei de Newton, tem-se a força resultante (R) obtida pela força (F) associada à componente tangencial da gravidade (a_t) menos a força de atrito,

$$R = F - F_{at}.$$

Onde,

$$F = m \cdot a_t ;$$

$$F_{at} = N \cdot \mu ;$$

$$N = m \cdot a_n ;$$

m é a massa do bloco;

N é a força normal atuando na superfície;

μ é o coeficiente de atrito;

a_n é a componente normal da aceleração.

Se chamarmos a aceleração tangencial resultante de $a_{t\ result}$, podemos reescrever a equação como:

$$m \cdot a_{t\ result} = m \cdot a_t - m \cdot a_n \cdot \mu$$

e

$$a_{t\ result} = a_t - a_n \cdot \mu,$$

onde,

$$a_t = g \cdot \text{sen } \beta$$

e

$$a_n = g \cdot \text{cos } \beta$$

As convenções de sinal para as formulações apresentadas estão em acordo com a Figura 2.9.

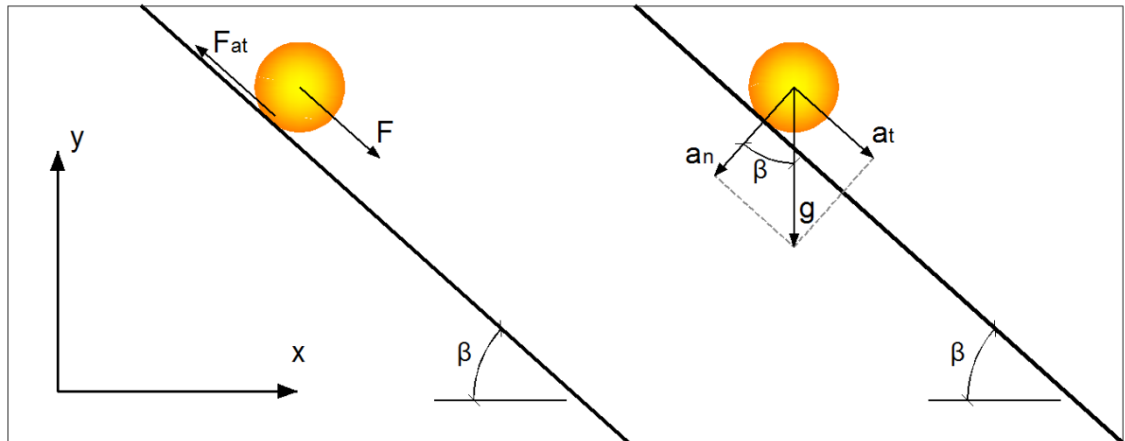


Figura 2.9 - Convenção de direção e sentido para os vetores.

Uma vez calculada a aceleração tangencial resultante, $a_{t \text{ result}}$, pode-se utilizar as equações do Movimento Uniformemente Acelerado $v = v_0 + a_{t \text{ result}} \cdot t$ e $s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{a_{t \text{ result}} \cdot t^2}{2}$ para o cálculo da velocidade e da posição respectivamente (Halliday, 2006).

- Rolamento

O rolamento, por sua vez, é definido como um movimento acelerado, cuja trajetória é paralela à superfície e não existe deslizamento entre a massa e a superfície. A Figura 2.10-b ilustra este movimento. Neste caso, podemos utilizar as mesmas equações apresentadas no deslizamento para o cálculo da velocidade e da posição do bloco ao longo do tempo. No cálculo da aceleração tangencial é necessário levar em consideração o movimento de rotação. Para tal, podemos incluir na fórmula do cálculo da aceleração o fator c escrevendo, $a_{t \text{ result}} = \frac{a_t}{1+c} - \frac{a_n \cdot r}{1+c}$, aonde r é o raio (esfera, disco ou cilindro) e c está relacionado com o momento de inércia, podendo ser escrito como $c = \frac{I_{cm}}{m \cdot r^2}$. I_{cm} é o momento de inércia em torno de um eixo passando pelo centro de massa do bloco e m é a massa do bloco (Halliday, 2006).

- Tombamento

O movimento de tombamento ocorre quando existe uma diferença brusca na inclinação da superfície, conforme ilustrado na Figura 2.10-c. Para este caso, pode se utilizar equações oriundas da conservação de energia para o movimento circular.

Pela conservação de energia, temos que a velocidade angular (ω) pode ser escrita como $\omega = \frac{(E_0 - g \cdot y_i) \cdot 2}{r^2 \cdot (1+c)}$, onde (E_0) é a Energia Cinética determinada por $E_0 = 0,5 \cdot (1 + c) \cdot v^2$ (Halliday, 2006).

- Queda Livre

O movimento de queda livre é definido como um movimento acelerado vertical. Neste movimento, a única força atuante sobre o bloco é devida à aceleração da gravidade g e a velocidade inicial é nula, portanto podemos simplificar as equações do Movimento Uniformemente Acelerado para a velocidade $v = g \cdot t$ e a posição por $s = \frac{g \cdot t^2}{2}$.

- Trajetória Parabólica

Este movimento ocorre quando o bloco é lançado com uma velocidade inicial, porém a única força atuante sobre o mesmo está associada à aceleração da gravidade. Neste caso o movimento horizontal e o movimento vertical são independentes, de forma que podem ser calculados separadamente.

Na direção do eixo x (horizontal), como a aceleração é nula, $a_x = 0$, a velocidade é constante, $v_x = v_{x0}$. Na a direção do eixo y (vertical), a aceleração é igual à aceleração da gravidade, $a_y = g$, e a velocidade pode ser escrita como $v_y = -g \cdot t + v_{y0}$, os sinais da aceleração e das velocidades devem ser expressos de acordo com o sistema de eixos adotado. Este movimento é ilustrado na Figura 2.10-d.

Halliday (2006) demonstra que um corpo com a velocidade em um eixo constante, diferente de zero e no outro eixo com aceleração constante, a equação da trajetória tem a forma $y = a \cdot x + b \cdot x^2$, o que comprova a trajetória parabólica descrita pelo corpo.

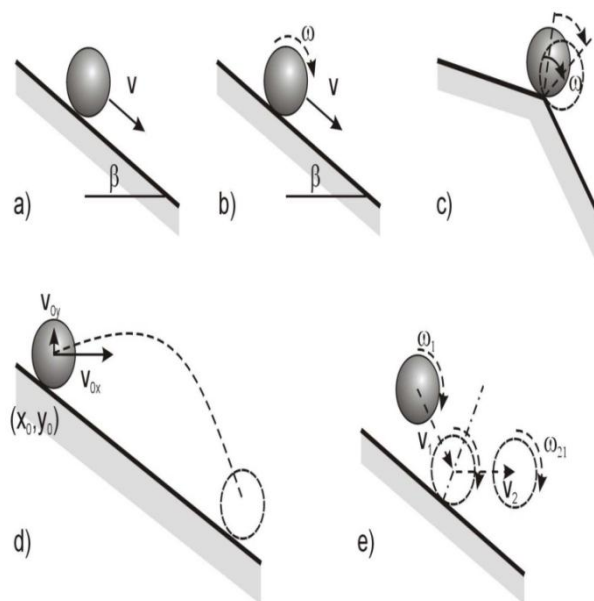


Figura 2.10 - Movimentos associados às trajetórias dos blocos (Spang, 2004).

Além das trajetórias descritas, é importante considerar o comportamento do corpo durante as colisões com a superfície. Esta colisão é modelada considerando um efeito elasto-plástico. Para a determinação da quantidade de energia dissipada durante a colisão são empregados coeficientes de restituição normal e tangencial que representam a razão entre as velocidades posteriores e anteriores ao choque. A Figura 2.10-e ilustra a colisão.

Conforme demonstrado, os métodos numéricos são mais robustos e permitem além da avaliação dos riscos associados aos eventos de quedas de blocos, a estimativa de valores para energia e alcance dos blocos ao longo da trajetória, o que possibilita a utilização destes no dimensionamento de dispositivos de proteção.

2.2.2.2 Obtenção de Parâmetros

Neste item abordaremos os métodos utilizados para a obtenção destes parâmetros. Os parâmetros aqui descritos, relacionados à geometria de cálculo ou às propriedades dos materiais, são a geometria da seção de cálculo, os coeficientes de restituição normal e tangencial, as características das rochas e as condições iniciais do movimento.

- Geometria da seção de cálculo

Para a definição da geometria de cálculo é necessário que seja feito um levantamento topográfico das áreas em análise.

Nos casos das áreas com risco de desprendimento de blocos serem muito extensas, como é comum ocorrer ao longo de vias em regiões montanhosas, é necessário que um engenheiro experiente defina seções a serem estudadas para que depois os resultados possam ser extrapolados ao longo de toda a encosta. A escolha destas seções deve ser realizada com muito cuidado, pois como mencionado anteriormente, a maioria das simulações de quedas de blocos é sensível a pequenas variações na geometria da encosta.

Com auxílio de mapas topográficos de toda a região, hoje obtidos facilmente em meio digital, e visitas de campo deve se avaliar a representatividade das seções estudadas. Estes dados modelados em programas de computador permitem a obtenção de um número grande de seções com razoável facilidade.

Após a determinação das seções, alguns programas permitem ainda atribuir um intervalo para as posições dos vértices aumentando a representatividade das extensões e inclinações de cada trecho da encosta. Cabe ressaltar que os intervalos utilizados para definição das posições dos vértices devem ser adotados nos vértices em que realmente não se tem conhecimento da posição.

- Coeficientes de restituição normal e tangencial

Dentre os parâmetros utilizados nos métodos numéricos, talvez os coeficientes de restituição sejam os mais importantes e difíceis de serem obtidos (Stevens, 1998).

Os coeficientes de restituição representam a energia dissipada durante os choques dos blocos com a superfície da encosta e podem variar de 0 (choque totalmente inelástico) a 1 (choque totalmente elástico). Estes podem ser descritos como a razão entre as velocidades posterior e anterior ao impacto.

As características das superfícies das encostas podem variar consideravelmente a partir da crista até a base do talude o que implica na necessidade da adoção de valores distintos para cada trecho da encosta.

O método que apresenta melhores resultados na obtenção dos valores dos coeficientes de restituição se baseia em lançamentos de blocos *in situ*. É executada uma série de lançamentos de blocos e a trajetória destes é filmada por um conjunto de câmeras posicionadas ao longo do percurso.

Quando não é possível a realização de lançamentos *in situ*, como por exemplo, em rodovias que não podem ser fechadas ao tráfego para tais análises ou encostas de difícil acesso, pode ser realizada uma retro-análise de eventos ocorridos. São mapeados os blocos que já caíram, tenta se identificar o local do desprendimento e calibra-se o programa a partir destes dados. Desta forma pode-se estimar um intervalo para os coeficientes.

Dias & Barroso (2006) propôs uma metodologia para a obtenção do coeficiente de restituição normal em laboratório.

O experimento de Dias & Barroso consiste em soltar uma esfera de rocha a uma altura sobre uma superfície plana também constituída de rocha. Com o auxílio de um microfone interligado a um programa de computador, os sons gerados pelos sucessivos impactos são captados e é gerado um gráfico de frequência de choques versus o tempo, permitindo a obtenção dos intervalos de tempo entre cada choque e com isto as velocidades antes e depois de cada choque.

Em posse destes valores, determina-se o valor do coeficiente de restituição normal. Este experimento deve ser repetido várias vezes para diferentes alturas de queda, obtendo assim uma quantidade de valores que permitam uma representatividade estatística.

- Características das Rochas

As características das rochas (dimensões e peso específico) devem ser definidas com base em mapeamentos da área estudada. Este levantamento pode ser realizado em toda área de estudo ou em trechos e extrapolado.

As geometrias das rochas devem ser aproximadas por formatos passíveis de serem calculados. Os programas numéricos normalmente utilizam em seus cálculos os formatos de esfera, disco, cilindro ou massa concentrada em um ponto.

- Condições Iniciais do movimento

Nas simulações, é necessário definir a localização e a velocidade inicial do movimento.

A localização deve ser definida através do mapeamento da região em estudo e pode ser considerada como um único ponto ou como uma zona de desprendimento de blocos, (“região semeadora”).

2.2.3 Exemplo de Aplicação dos Fundamentos Teóricos para um Caso Hipotético

Com objetivo de ilustrar como se dá a determinação de trajetórias e de energias nos métodos numéricos, foi calculada a trajetória de um bloco de rocha a partir das fórmulas apresentadas no item 2.2.2.1.

Não foi realizada análise estatística, ou seja, foi calculada a trajetória de um bloco com dimensões e condições de início do movimento conhecidos e foram fixados todos os parâmetros.

A seção geológica de cálculo foi considerada homogênea e foi desenhada utilizando 15 segmentos de reta, conforme apresentado na Figura 2.11. Foram considerados os valores de 0,4 e 0,8 para os coeficientes de restituição normal e tangencial, respectivamente, e o valor de 0,1 para os atritos estático e dinâmico.

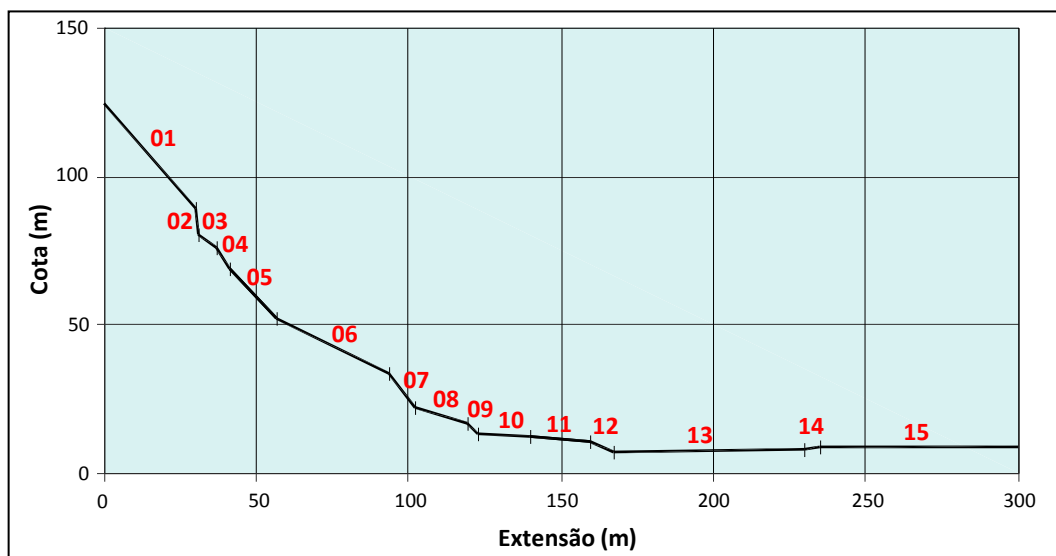


Figura 2.11 - Seção Geológica de Cálculo

Como condição inicial, foi adotado um bloco com dez toneladas iniciando o movimento a partir do repouso na parte superior do segmento de reta 01.

- Etapa 1

Na etapa 1 o bloco iniciou o movimento no ponto (0,00;125,00) e deslizou pelo segmento de reta 01 até o final deste no ponto (30,00;89,00). O segmento de reta 01 descreve um ângulo de $50,2^\circ$ com a horizontal e, com isto, utilizando as equações descritas para o deslizamento no item 2.2.2.1, temos:

$$v_{x0} = 0$$

$$v_{y0} = 0$$

$$a_n = 9,81 \cdot \cos 50^\circ = -6,28 \text{ m/s}^2$$

$$a_t = 9,81 \cdot \sin 50^\circ = 7,54 \text{ m/s}^2$$

$$a_{t \text{ result}} = 7,54 - 6,28 \cdot 0,1 = 6,91 \text{ m/s}^2$$

O comprimento do segmento de reta 01 é 46,86 m, portanto podemos achar o instante que o bloco chega ao final do segmento através da expressão

$$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{a_{t \text{ result}} \cdot t^2}{2}$$

$$46,86 = 0 + 0 \cdot t + \frac{6,91 \cdot t^2}{2}$$

$$t = 3,68 \text{ s}$$

E a velocidade (na mesma direção do segmento de reta) por

$$v = v_0 + a_{t \text{ result}} \cdot t$$

$$v = 0 + 6,91 \cdot 3,68 = 25,45 \text{ m/s}$$

Ao decompor este valor, temos para a velocidade que

$$v_x = 16,29 \text{ m/s}$$

$$v_y = -19,55 \text{ m/s}$$

- Etapa 2

Neste ponto o bloco é considerado como um projétil e descreve uma trajetória descrita por

$$x = x_0 + v_{x0} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}$$

$$x = 30 + 16,29 \cdot t + \frac{0 \cdot t^2}{2}$$

$$x = 30 + 16,29 \cdot t$$

e

$$y = y_0 + v_{y0} \cdot t + \frac{a_y \cdot t^2}{2}$$

$$y = 89 - 19,55 \cdot t + \frac{9,81 \cdot t^2}{2}$$

Ao desenhar esta trajetória, nota-se que ela intercepta a superfície no segmento de reta 05, no ponto (47,77;61,81). A duração desta trajetória pode ser calculada por

$$x = 30 + 16,29 \cdot t$$

$$47,77 = 30 + 16,29 \cdot t$$

$$t = 1,09 \text{ s}$$

Para a velocidade temos que

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$v_x = 16,29 \text{ m/s}$$

$$v_y = -19,55 - 9,81 \cdot 1,09 = -30,25 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{16,29^2 + 30,25^2} = 34,35 \text{ m/s}$$

- Etapa 3

Para calcular a colisão, decompomos a velocidade nas suas componentes normal e tangencial ao segmento de reta 05. O ângulo que a velocidade faz com o segmento de reta no instante do impacto é de 33° . Com isto, antes do impacto, temos que

$$v_n = 34,35 \cdot \text{sen } 33^\circ = -18,71 \text{ m/s}$$

$$v_t = 34,35 \cdot \text{cos } 33^\circ = 28,81 \text{ m/s}$$

Aplicando os coeficientes de restituição normal e tangencial, temos que imediatamente após o impacto

$$v_n = 0,4 \cdot 18,71 = 7,48 \text{ m/s}$$

$$v_t = 0,8 \cdot 28,81 = 23,05 \text{ m/s}$$

$$v = 24,24 \text{ m/s}$$

$$v_x = 23,54 \text{ m/s}$$

$$v_y = -5,76 \text{ m/s}$$

Neste ponto, novamente o bloco é considerado como um projétil e descreve uma trajetória descrita por

$$x = 47,77 + 23,54 \cdot t$$

$$y = 89 - 5,76 \cdot t + \frac{9,81 \cdot t^2}{2}$$

Ao desenhar esta trajetória, nota-se que ela intercepta a superfície no segmento de reta 06, no ponto (90,49;34,81).

Em seguida, o mesmo procedimento foi sendo repetido para as Etapas 4, 5, 6 e 7, tendo o bloco colidido com a superfície nos segmentos de reta 11, 11 novamente, 12 e 12 novamente até o repouso.

Durante todo o percurso do bloco, a energia cinética foi calculada a partir da velocidade resultante, $E = \frac{m \cdot v^2}{2}$.

Na Figura 2.12 estão apresentadas a trajetória completa do bloco simulado e a energia cinética ao longo de todo o percurso.

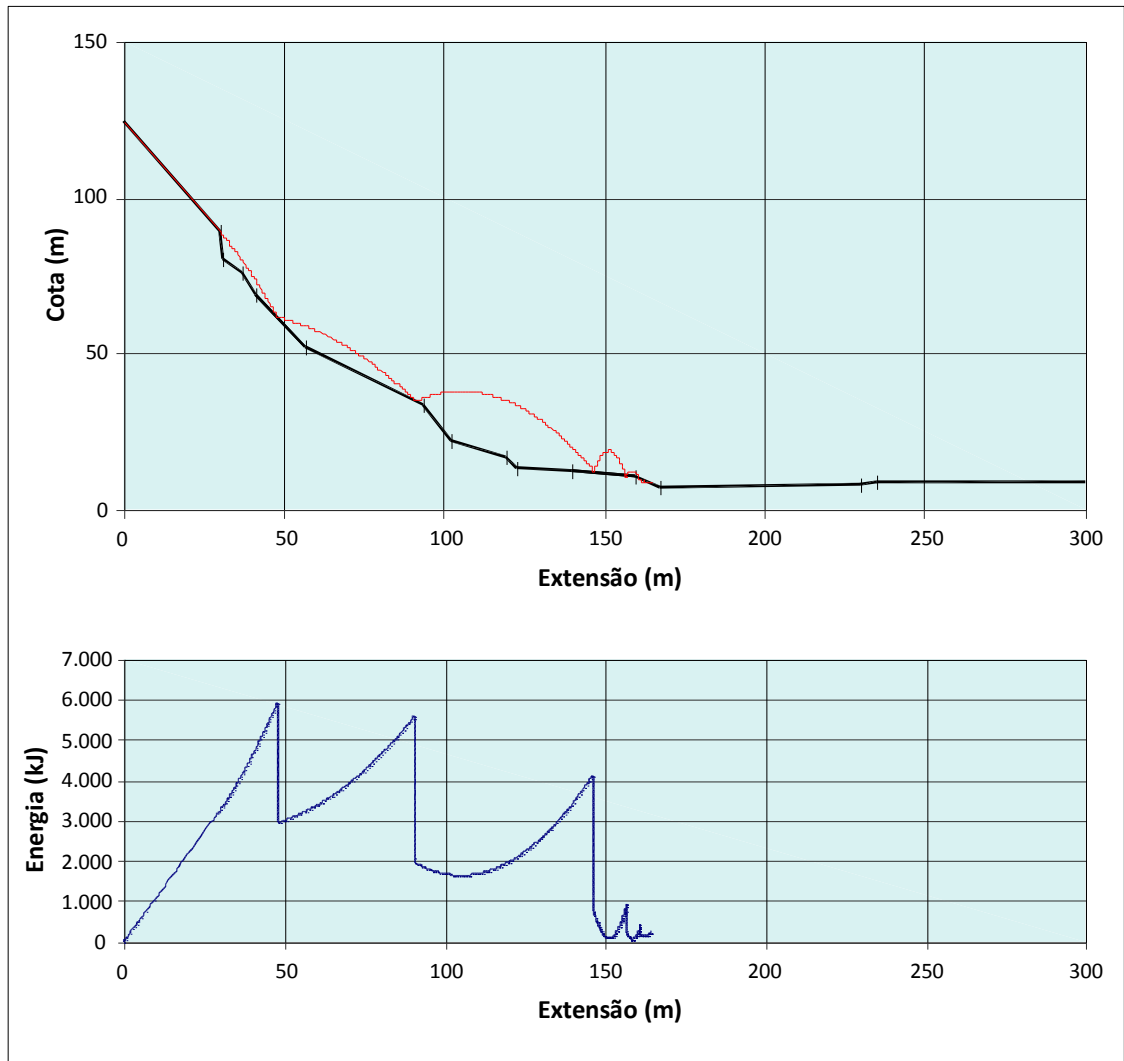


Figura 2.12 - Trajetória e energia cinética calculados manualmente.

2.3 Soluções para taludes rochosos

Conforme a norma NBR 11682 (ABNT, 2009), uma vez identificado um problema de estabilidade em um maciço rochoso, este deve ser caracterizado abordando os aspectos topográficos e geológicos, com especial atenção à inclinação e à altura do talude, além do estudo da litologia, das descontinuidades, do grau de intemperização da rocha, das condições de contato, da possibilidade de sismos e demais riscos envolvidos. Após a definição do tipo de movimento esperado e da análise de estabilidade devem-se definir as intervenções necessárias para a redução dos riscos envolvidos.

As soluções disponíveis para taludes rochosos podem ser divididas em três grandes grupos que são: eliminação do problema, estabilização e convivência com o problema (Rocha, 2009). A Figura 2.13 apresenta um esquema que auxilia a análise de um talude rochoso potencialmente instável.

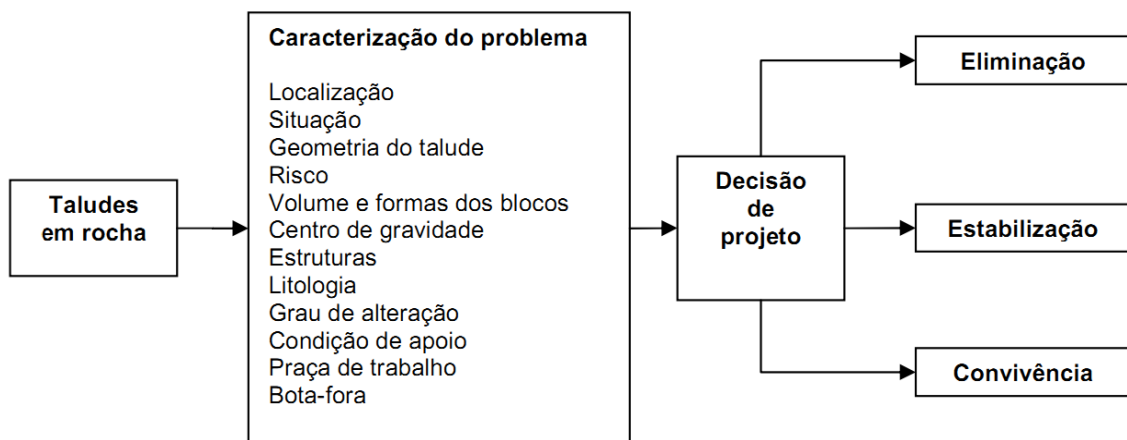


Figura 2.13 - Soluções de Projetos para Taludes Rochosos (GeoRio, 1999).

A eliminação do problema pode ser executada através da remoção manual de blocos e lascas menores ou desmonte a frio ou a fogo de blocos maiores.

As técnicas de estabilização, por sua vez, consistem na fixação ou reforço do talude instável e compreende técnicas como retaludamento, proteção superficial, drenagem e estruturas de suporte como contrafortes, grelhas e telas de alta resistência.

Quanto às técnicas de convivência, estas reúnem as soluções que permitem conviver com taludes potencialmente instáveis minimizando os riscos de acidentes através do controle das consequências do movimento. Dentre as técnicas de convivência, existem as telas metálicas para controle de trajetória de queda de bloco, barreiras de impacto rígidas ou flexíveis, trincheiras para coletas de blocos, bermas dissipadoras de energia e túneis falsos para controle de trajetórias. As Barreiras Flexíveis são o foco deste trabalho, sendo, portanto, melhor detalhadas no subitem 2.3.1.

2.3.1 Barreiras Flexíveis

O conceito básico das barreiras de impacto flexíveis é o de conceder deslocamentos controlados para dissipação de energia e ao mesmo tempo possuir robustez suficiente para frear as rochas em tempo e distância compatíveis com as necessidades.

Estas barreiras são geralmente constituídas por malhas presas a cabos longitudinais, estes por sua vez ligados a postes. Os postes podem possuir apoios rotulados na base e cabos ligando a parte superior destes ao talude a montante. Existem ainda dispositivos dissipadores de energia que impedem que toda a força transmitida aos cabos seja solicitada às ancoragens.

Quando um elemento se choca contra a barreira, a energia se dissipa inicialmente através da soma das deformações dos elementos da malha e as forças restantes são transferidas de modo uniforme à base dos postes e a cabos ancorados no terreno. Na Figura 2.14 são apresentados os principais elementos da barreira. Para impactos menores, as barreiras trabalham em regime elástico, sem necessidade de maiores cuidados. Para impactos maiores ocorre a deformação plástica de alguns elementos da barreira, os quais precisam ser substituídos para que a mesma retome a sua capacidade nominal.

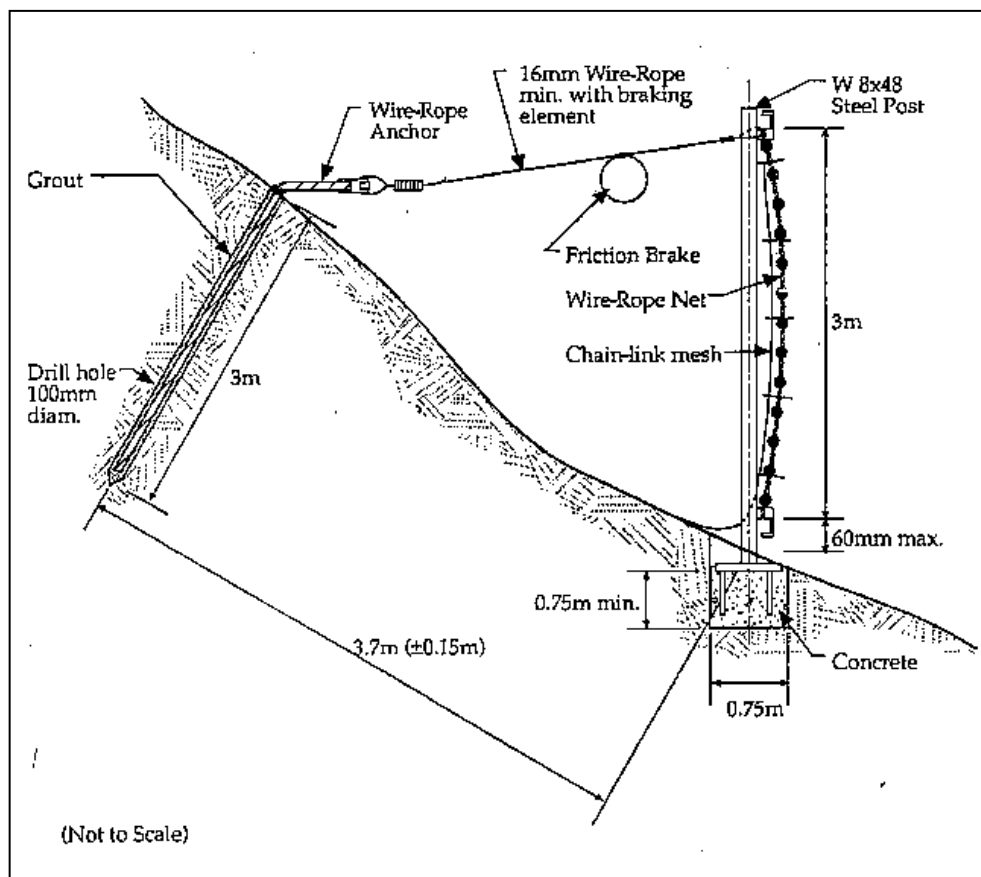


Figura 2.14 - Vistas dos elementos de um exemplo de uma barreira flexível (Wyllie, 2006).

A Figura 2.15 mostra sucintamente um exemplo de barreira flexível (fabricado pela Geobrugg AG) em um campo de testes e em detalhe alguns dos elementos que constituem a estrutura citados anteriormente. Os postes (Figura 2.15-a) são projetados de forma a garantir o posicionamento da barreira e, além disso, a passagem dos cabos dando flexibilidade ao sistema, permitindo a mobilização de todos os elementos. Os anéis de freio (Figura 2.15-b, estado inicial e após acionamento) consistem em dispositivos do tipo “gatilho” que são mobilizados quando a energia se aproxima da máxima energia do sistema. O acionamento destes dispositivos proporciona um aumento dos deslocamentos da barreira e, assim, a redução das cargas atuantes, protegendo os cabos e as ancoragens. A malha de anéis (Figura 2.15-c) consiste em um elemento de elevada resistência e deformabilidade, que garante a dissipação de energia e o suporte das cargas estáticas após o movimento do bloco.

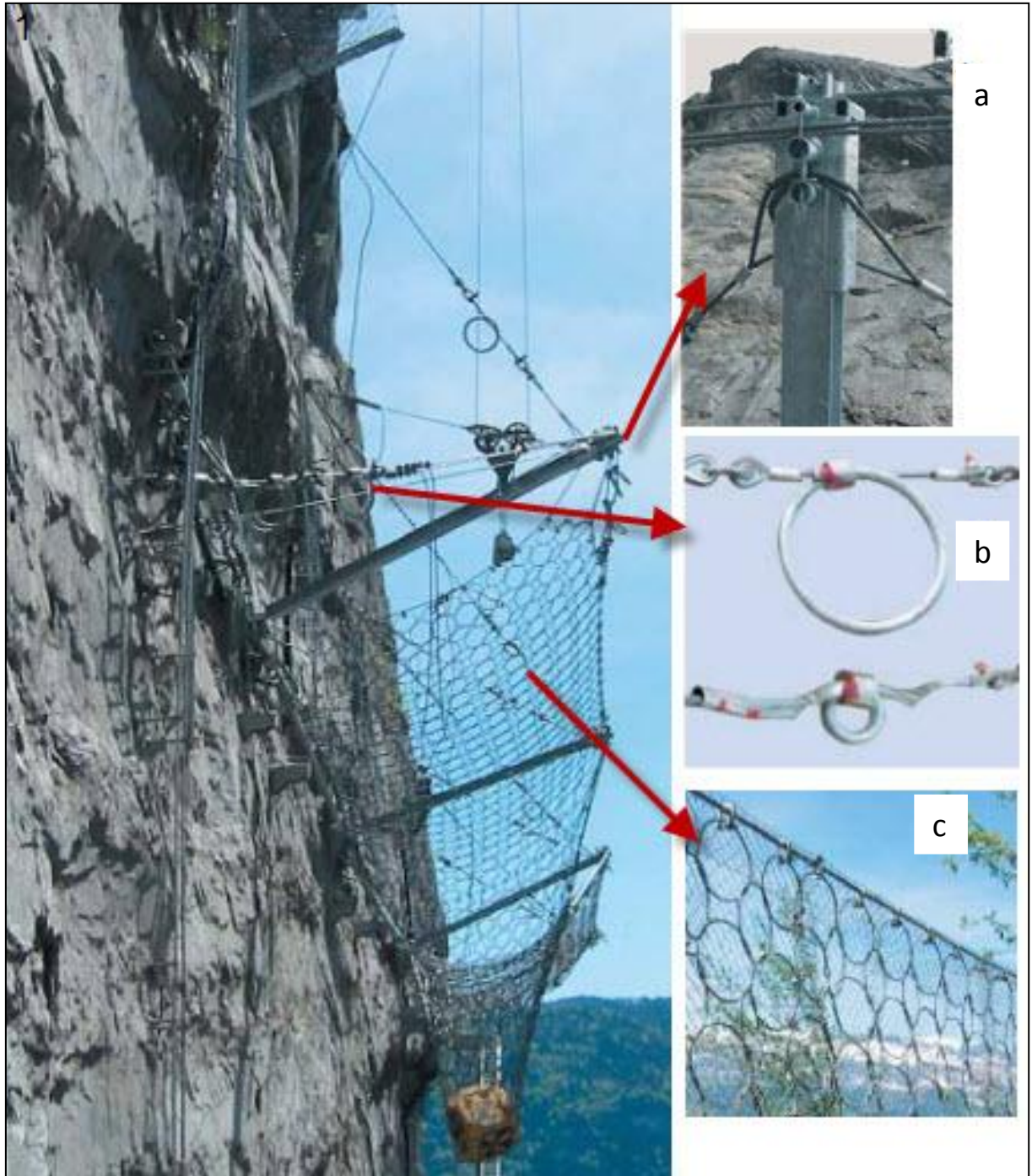


Figura 2.15 - Barreira Flexível GeoBrugg (modificado de CRT, 2010). a) – Postes, b) – Anéis de feio (estado inicial e após o acionamento) e c) – Malha de Anéis.

3. Caso Estudado

3.1 Descrição Geral

A rodovia BR 116, no trecho que liga os municípios de Magé e Teresópolis, no estado do Rio de Janeiro, atravessa a Serra do Mar no interior do Parque Nacional da Serra do Órgãos. Devido ao relevo acidentado da região, sua implantação exigiu a abertura de diversos cortes em solos e rochas que associados às características topográficas, geológicas e climáticas locais, ficaram sujeitos a diferentes tipos de movimentos de massa.

Um dos trechos que demanda maior atenção pela concessionária que opera a rodovia está situado entre os quilômetros 89 e 90, pois este apresenta um histórico de queda de blocos de diferentes tamanhos (desde seixos até matacões) colocando em risco os usuários da rodovia. Este trecho, objeto do presente estudo, possui cerca de 600 m de extensão. A sua parte inferior, ao longo da BR 116, ajusta-se aproximadamente à curva de nível de 820 m e forma um desnível em relação ao divisor (pico de 1.290 m) na ordem de 470 m.

Na Figura 3.1 é apresentada a topografia da área estudada, uma vista geral da região está mostrada na Figura 3.2. Na Figura 3.3 e na Figura 3.4 são apresentados exemplos retirados do histórico de queda de blocos na rodovia.

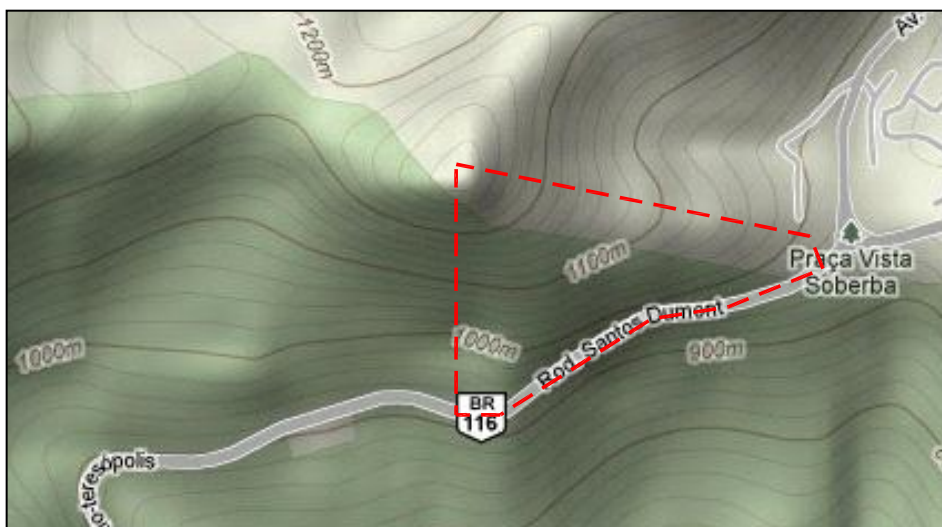


Figura 3.1 - Topografia da área estudada.

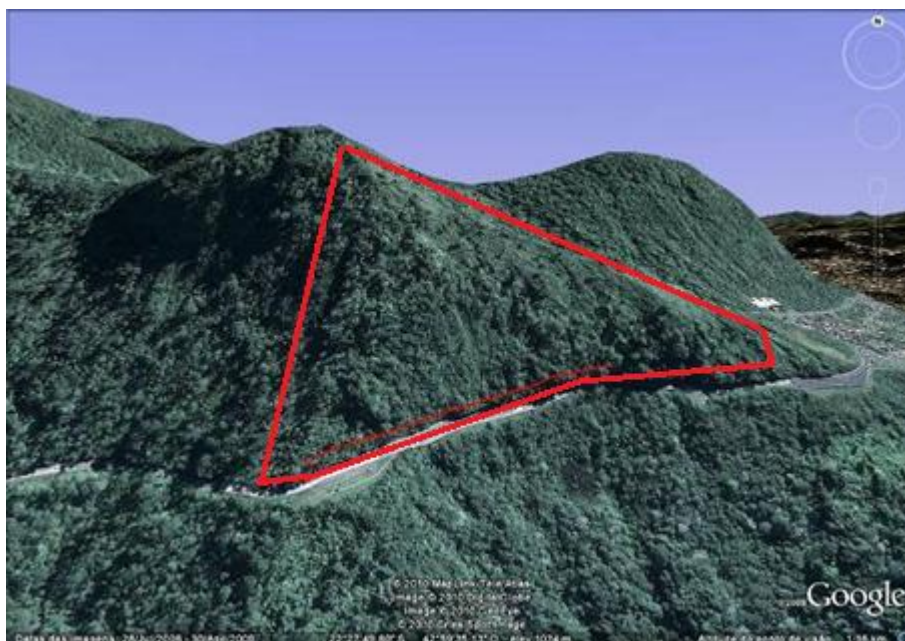


Figura 3.2 - Vista geral da região aonde está inserida a área estudada (marcação).



Figura 3.3. Remoção de bloco após queda na rodovia estudada.



Figura 3.4. Queda de blocos na rodovia estudada.

Diante dos riscos de acidentes na região, que podem gerar desde prejuízos materiais até perdas humanas, a concessionária (Consórcio Rio-Teresópolis) realizou no ano de 2009 um levantamento geológico-geotécnico de detalhe a fim de subsidiar projetos e obras para contenção destes movimentos de massa.

Menos de um mês após a conclusão do estudo, ocorreu um novo deslizamento, coincidente com a parte apresentada como mais susceptível à ocorrência de movimentos de massa, como veremos com mais detalhes posteriormente. Este deslizamento consistiu na

ruptura da fina camada de solo, na interface solo rocha, causando seu desprendimento e atingindo a rodovia. Na Figura 3.5 pode ser visto um veículo atingido pelo deslizamento, acarretando na morte de três pessoas. As setas vermelhas destacam os blocos que se chocaram contra o veículo.



Figura 3.5 – Consequências do evento de queda de blocos e deslizamento de terra ocorrido em 16/11/2009.

Na Figura 3.6 pode ser visto o talude antes e após o escorregamento e a cicatriz gerada, que expôs o talude rochoso.



Figura 3.6 - Imagens de satélite antes e depois da ruptura.

Como intervenção para evitar que novos acidentes ocorram, foi projetado para o local um sistema de drenagem superficial e profunda, além da utilização de barreiras de impacto flexíveis para proteção contra quedas de blocos.

O presente trabalho discutirá os métodos de análise para a definição da solução adotada e as características construtivas das barreiras de impacto flexíveis.

3.2 Levantamento Geológico Geotécnico

O levantamento apresentado a seguir foi obtido em CRT (2009) que refere ao trecho de 584 m entre os km 89 e 90 da Rodovia Rio Teresópolis. Este trecho, situado no setor médio de um segmento naturalmente íngreme da escarpa da Serra dos Órgãos, apresenta solo muito raso (0,5 a 1,0 m), caracterizado como saprolito associado a blocos ‘*in situ*’ e depositados de movimentos antigos, além da exposição de afloramentos de rocha.

Devido à dificuldade de acesso a outros locais, gerada pela topografia e pela vegetação densa (floresta típica da mata Atlântica) o estudo foi realizado em uma faixa ao longo da rodovia.

A região em estudo apresenta rochas variando de metamórficas a ígneas, compostas por migmatitos que contém paleossoma/melanossoma de biotita-gnaise, anfibolitos e leptinitos, e neossoma/leucossoma de rocha granitóide com granulometria fina a média (DRM,1980 apud CRT, 2009).

Do ponto de vista estrutural, foram identificadas principalmente três feições principais: foliações metamórficas, fraturas tectônicas e fraturas de alívio de tensão. Foi identificado um predomínio do sentido do mergulho para NW, com ângulos de mergulho (ângulo máximo de inclinação do plano da descontinuidade e correspondente direção referida aos quadrantes geográficos) elevados em sua maioria (entre 65 e 85°), estando o plano médio orientado em 310°/78° (direção/mergulho).

No que diz respeito à composição mineralógica das rochas, não há nenhum contato litológico abrupto que leve a uma diferença marcante de material rochoso ou saprolítico, de modo que a estabilidade do maciço rochoso está ligada essencialmente às estruturas geológicas presentes e às condições de percolação de água subsuperficial.

Tendo em vista que as fraturas apresentaram valores muito variados quanto à orientação e ao ângulo de mergulho, foi necessário analisar os resultados segundo segmentos da rodovia A, B, C, D e E apresentados na Figura 3.7. Esta opção foi também adotada para facilitar o entendimento das relações geométricas entre a orientação das estruturas e a orientação dos cortes de estrada, a fim de permitir uma avaliação das condições mais ou menos críticas para estabilidade do corte.

Na Figura 3.8, retirada do levantamento geológico geotécnico, é apresentado um croqui esquemático com os trechos da rodovia indicando as direções e ângulos de mergulho das fraturas.

Segmento	Distância a partir do ponto inicial (m)	Comprimento do segmento (m)	Orientação (azimute)
A	de 0 a 160	160	55 ⁰ – 235 ⁰
B	de 160 a 380	220	65 ⁰ – 245 ⁰
C	de 380 a 476	96	90 ⁰ – 270 ⁰
D	de 476 a 492	16	75 ⁰ – 255 ⁰
E	de 492 a 584	92	65 ⁰ - 245 ⁰

Figura 3.7 - Segmentos da rodovia ao longo dos 584 m estudados (CRT, 2010).

Como pode ser observado na Figura 3.8, o mergulho da foliação metamórfica apresenta sentido para o interior do corte da estrada, o que indica em primeiro momento que esta condição é favorável a estabilidade do corte. Todavia, como o mergulho é muito íngreme, quase vertical, esta condição pode favorecer a instabilidade através do mecanismo de tombamento, descrito no item 2.1.4. Acrescenta-se ainda a possibilidade de atuação de elevada pressão neutra devido à percolação subsuperficial ao longo da foliação, que pode advir de locais distantes a montante, com desníveis de cerca de 450 m em relação ao nível da rodovia.

A situação se torna mais crítica quando é incluída na análise a atitude (direção e mergulho) das fraturas tectônicas e de alívio de tensão que, frequentemente associadas à foliação, formam em geral uma combinação de comportamento desfavorável à estabilidade. Cabe ressaltar que a água subsuperficial percola mais facilmente através das fraturas do que na foliação, tornando estas mais instáveis.

Nos perfis esquemáticos dos segmentos A e B, Figuras 3.9 e 3.10, fica nítido que as fraturas de alívio de tensão mergulham para fora do corte e são, portanto, altamente desfavoráveis a estabilidade dos cortes. Observa-se uma melhor condição de estabilidade para a atitude das fraturas tectônicas, embora deva ser considerado sempre que se trata de uma tendência média de orientação e que, na área estudada, esta categoria de fratura é muito mais heterogênea do que as fraturas de alívio de tensão.

Os perfis representativos das demais seções, Figuras 3.11 a 3.13, mostram que há maior estabilidade do que nos casos anteriores, uma vez que tanto a foliação como as fraturas

mais predominantes estão com mergulho para o interior do maciço rochoso, caracterizando-se, portanto, como uma condição geotécnica mais estável. Cabe ressaltar, que também apresentam maior ocorrência de solo (com índice maior para saprolito), que pode estar relacionado ao aumento de estabilidade do material, o que permitiu a realização do corte da estrada sem a necessidade de exposição de rocha.

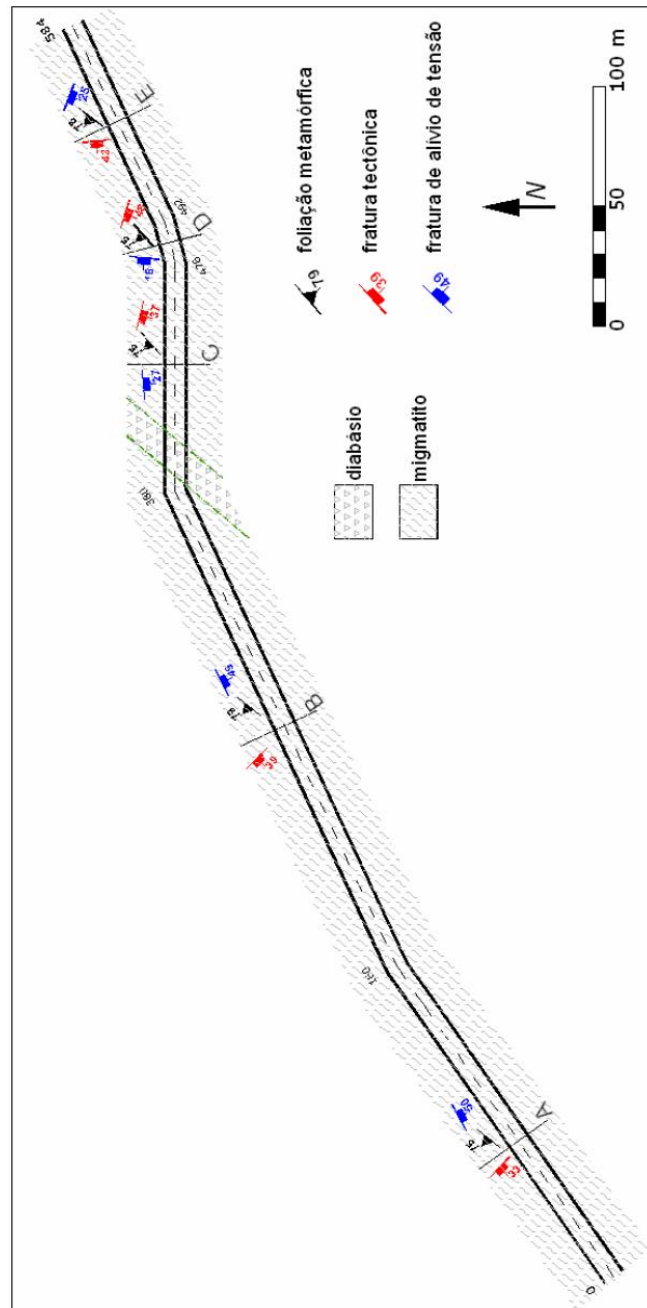


Figura 3.8 - Esboço do trecho da rodovia estudado com as litologias e estruturas geológicas relacionadas a cada segmento (CRT, 2010).

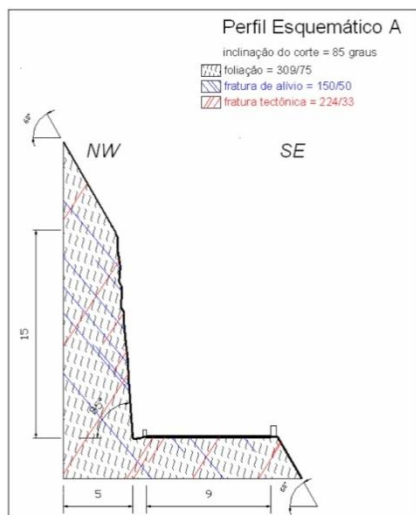


Figura 3.9 - Perfil Esquemático A (CRT, 2010).

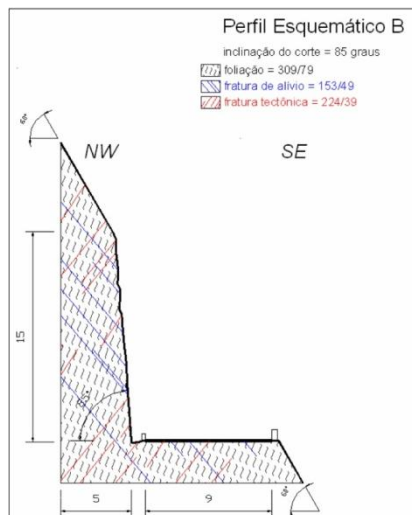


Figura 3.10 - Perfil Esquemático B (CRT, 2010).

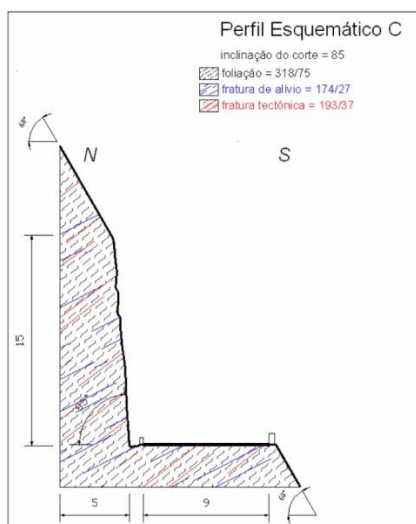


Figura 3.11- Perfil Esquemático C (CRT, 2010).

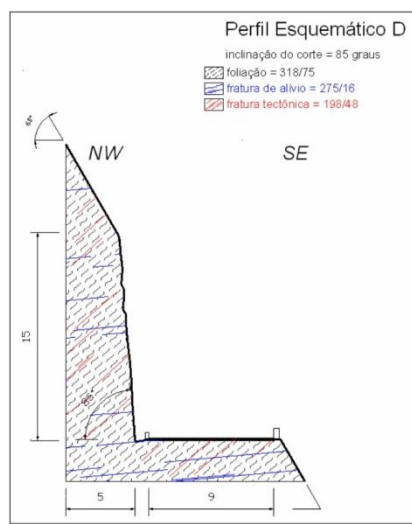


Figura 3.12 - Perfil Esquemático D (CRT, 2010).

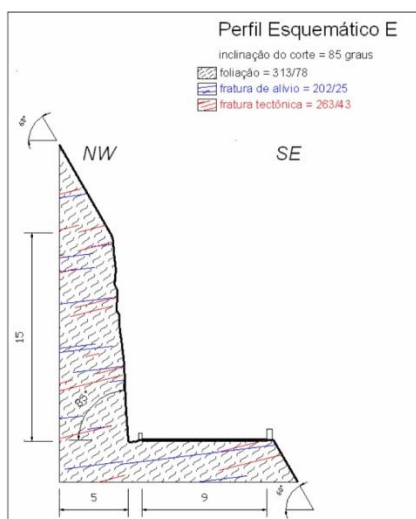


Figura 3.13 - Perfil Esquemático E (CRT, 2010).

3.3 Projeto Conceitual para tratamento do talude rochoso.

O detalhamento do projeto e a execução das obras para o tratamento do talude rochoso foram desenvolvidos em paralelo, partindo-se de uma solução inicial que foi sendo adequada ao passo em que eram obtidas informações mais detalhadas sobre as condicionantes geológico-geotécnicas. Isto se deu devido a grande dificuldade em se fazer um levantamento minucioso na fase de pré-projeto, uma vez que a região é de difícil acesso devido à vegetação muito densa, típica da Mata Atlântica, e de relevo muito acidentado. Condições estas, que exigiram inclusive a utilização de técnicas de escalada e rapel e de acompanhamento do corpo de bombeiros nas primeiras vistorias no local do deslizamento.

Outro fator condicionante foi o fato de ser uma unidade de preservação ambiental, integrante do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, o que limita atividades como roçada e abertura de acessos, além de limitar a solução final adotada.

A primeira atividade realizada, como solução emergencial para minimizar riscos ao tráfego na rodovia, foi a limpeza das cicatrizes geradas pelo deslizamento. Foi feita a remoção de detritos e da capa de solo remanescente. Identificou-se que a rocha no local apresenta-se fissurada com significativa abertura de juntas em alguns trechos. A Figura 3.14 mostra a cicatriz com detalhe para a surgência de água nas fraturas do maciço. Cabe ressaltar que esta surgência foi identificada mesmo fora dos períodos de ocorrência de chuvas.

Nesta primeira etapa, o acesso foi realizado através de rampas montadas às margens da rodovia, que permitiram vencer o desnível vertical de aproximadamente 30 metros gerado pelo corte da rodovia, e picadas na mata.

As intervenções emergenciais incluíram também a implantação de 19 drenos sub-horizontais (Figura 3.15) junto à estrada, com 30 m de comprimento, espaçados de 20 m, de forma a diminuir as pressões de água nas juntas. Foi instalado ainda um medidor para monitorar o nível d'água na encosta. A Figura 3.16 apresenta um croquis esquemático dessas intervenções emergenciais.



Figura 3.14 - Cicatriz gerada pelo deslizamento com detalhe do talude na cicatriz e fluxo de água oriundo das fraturas (Modificado de CRT, 2010).



Figura 3.15 - Detalhe de um dos drenos instalados

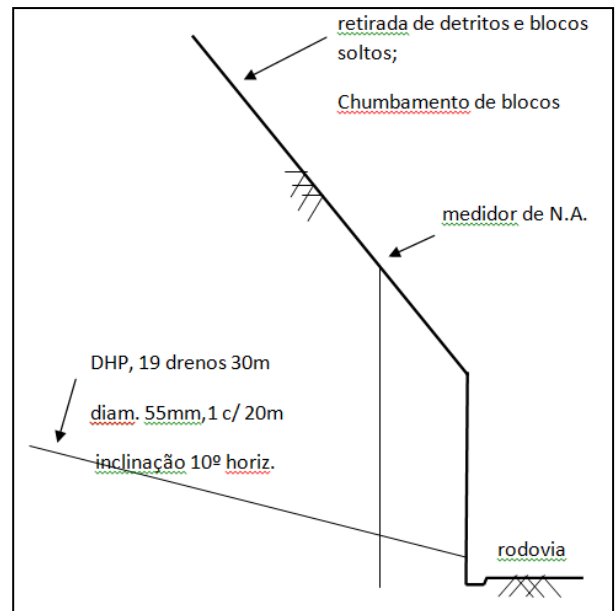


Figura 3.16 - Croquis esquemático das intervenções emergenciais (CRT, 2010).

A região de influência para o trecho da rodovia estudado foi separada em três zonas, A, B e C, cada uma, com mesma declividade e direção do mergulho, Figura 3.17.

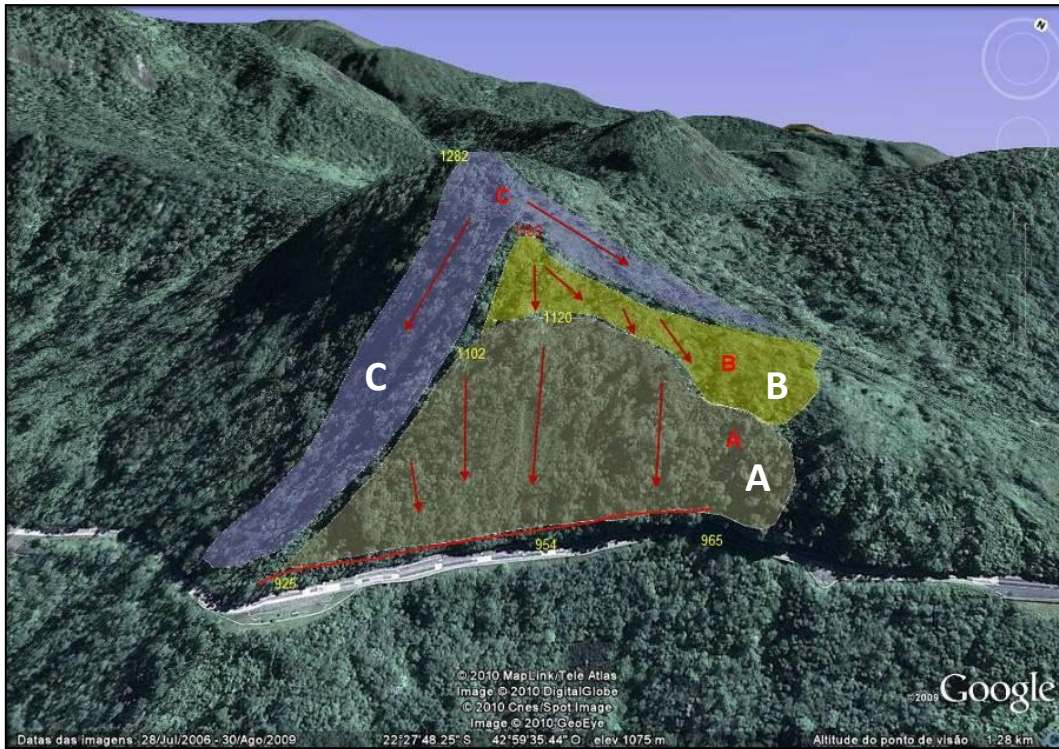


Figura 3.17 - Zonas de mesma declividade e de direção de mergulho (CRT, 2010).

A zona denominada A apresenta maior risco associado a quedas de blocos na estrada devido à sua elevada inclinação em direção à rodovia. A zona denominada como B também apresenta inclinação na direção do trecho da rodovia em estudo, porém com menor inclinação e, portanto significa uma zona de menor risco.

A zona denominada C, por sua vez, representa uma área de onde dificilmente um bloco atingirá o trecho da rodovia em estudo, pois em caso de alguma movimentação este tenderá a uma trajetória para fora desta área, portanto de menor risco.

Além destas três zonas identificadas, todas com uma fina cobertura de solo sobre rocha, existem ainda as cicatrizes geradas pelo referido deslizamento, que aumentaram o apresentam o risco devido, aos altos coeficientes de restituição gerados pela superfície em rocha que antes era solo.

Com a abertura de acesso ao local, puderam ser realizados os primeiros estudos topográficos que, associados a um levantamento de aerofotogrametria do local, permitiram definir seções de cálculo dentro e fora da cicatriz de ruptura para a análise das possíveis trajetórias dos blocos. No trecho junto às rupturas mencionadas foram observados blocos de diferentes dimensões, variando entre volumes de 0,5 m x 0,5 m x 1 m a 2 m x 2 m x 8 m.

As análises de quedas blocos foram realizadas utilizando o software Rockfall Dr. Spang e foram estudadas alternativas de disposição de barreiras flexíveis.

Tomou-se como partido de projeto o desprendimento de um bloco de massa de 10 t e um desnível de 200 m. O levantamento topográfico fundamentou esta orientação básica de implantação. O projeto previu o emprego de dois níveis de barreiras, para a cota 1.120 m foi prevista uma barreira com capacidade de 1000 kJ de 180 m de comprimento. Para a cota 965 foi prevista uma linha de barreira com 380 m de comprimento, dividida em três trechos, sendo dois com capacidade de 2.000 kJ (um de 220 m e outro de 100 m de comprimento) e um trecho com capacidade de 3.000 kJ (com 60m de comprimento, situado na região da cicatriz formada pelos deslizamentos observados em novembro de 2009) - Figura 3.18.

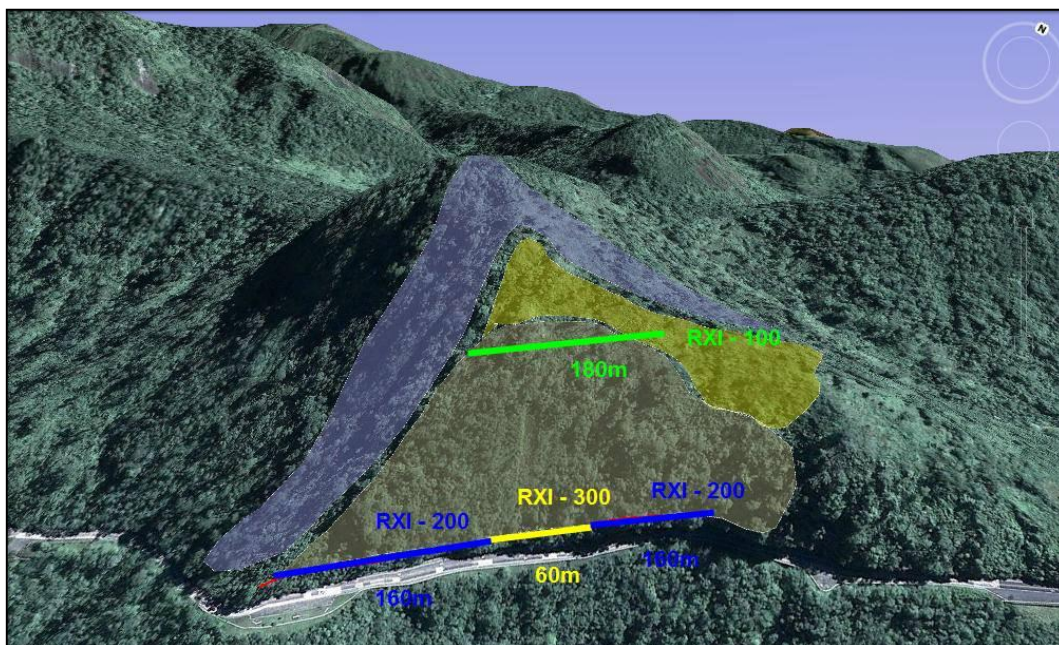


Figura 3.18 - Ilustração das barreiras especificadas (CRT, 2010).

Conforme abordado anteriormente, a concepção do projeto contemplou o disciplinamento das águas superficiais e a instalação de drenos sub-horizontais como medidas para aumentar o fator de segurança à ruptura, duas linhas de barreiras de impacto flexíveis para impedir que a rodovia fosse atingida por quedas de blocos e da fixação de blocos maiores através de contrafortes chumbados em rocha.

Quanto aos aspectos construtivos, a maior dificuldade observada foi o acesso ao local da obra. Após a montagem das rampas às margens da rodovia iniciou-se a construção de uma série de andaimes para dar acesso aos diversos pontos. Foram adotados alguns procedimentos para facilitar a disposição de materiais no local dos serviços, como um elevador de carga com 30 m de altura, um plano inclinado com 250 m de extensão e uma grua com 40 m de alcance.

Nas Figuras 3.19 a 3.28 estão ilustradas fases executivas da obra projetada.



Figura 3.19 – Vista (de cima para baixo) da cicatriz do deslizamento durante execução da obra de estabilização.



Figura 3.20 - Andaimes para vencer desnível junto à rodovia.



Figura 3.23 - Plano inclinado para acesso a parte superior da encosta.



Figura 3.21 - Perfuração dos Chumbadores.



Figura 3.24 - Contrafortes para a contenção dos blocos e lascas maiores.



Figura 3.22 - Descida d'água em degraus.



Figura 3.25 - Montagem das Barreiras



Figura 3.26 - Vista da fixação da barreira a montante



Figura 3.27 - Vista lateral da barreira.



Figura 3.28 – Vista da Barreira da Linha Superior.

4. Análises Numéricas para Dimensionamento das Barreiras de Impacto

4.1 Considerações Iniciais

Com o objetivo de estudar o dimensionamento das barreiras de impacto utilizando métodos numéricos foram realizadas algumas análises com base em dados do caso estudado, apresentado no item anterior, e um caso hipotético. Inicialmente foram analisadas as situações da encosta antes e depois do deslizamento. Esta análise foi feita para verificar a influência da perda da camada de solo, resultante do deslizamento, na energia para o dimensionamento das barreiras. Após o deslizamento, como o topo rochoso fora exposto, os coeficientes de restituição são maiores do que aqueles da condição anterior. Em seguida analisou-se a condição após intervenções realizadas. Por fim, são feitas análises para um caso hipotético considerando diferentes configurações das barreiras de forma a avaliar a viabilidade técnica e econômica dessas opções.

Cabe ressaltar que o enfoque deste capítulo é acadêmico. Algumas vezes, para permitir a interpretação de alguns dados, foram realizadas considerações que não condizem com a situação real da encosta apresentada, portanto os resultados aqui apresentados não têm o objetivo nem podem ser utilizados para avaliar o projeto apresentado.

As análises apresentadas neste capítulo foram realizadas utilizando o programa Rockfall Dr. Spang, com licença e auxílio técnico cedidos pela Geobrugg AG para o desenvolvimento deste estudo.

Quanto aos parâmetros de projeto (Tabela 1) os mesmos foram definidos para dois tipos de superfície, granito sem cobertura, representando a cicatriz e granito com fina camada de solo, representando os demais locais. Considerou-se na análise uma faixa de variação desses parâmetros.

Consoante com a concepção do projeto, foram simulados blocos com massa de aproximadamente dez toneladas e dois metros de diâmetro. Como descrito anteriormente, para o caso estudado, previu-se a fixação dos blocos com mais de 10 t utilizando contrafortes chumbados em rocha.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados nas análises.

Superfície	Ângulo de Atrito Dinâmico		Ângulo de Atrito Estático		Coeficiente de Restituição Normal		Coeficiente de Restituição Tangencial		Resistência ao Rolamento		Rugosidade	
	Valor	Variação	Valor	Variação	Valor	Variação	Valor	Variação	Valor	Variação	Amplitude	Frequência
Granito sem cobertura.	20°	5%	30°	5%	0,07	5%	0,90	5%	0,02	5%	1	5
Granito com fina camada de solo	20°	10%	30°	10%	0,04	5%	0,80	10%	0,1	5%	0	0

4.2 Análise da situação da região estudada antes das intervenções.

Neste item foram mapeadas as envoltórias de energia observadas ao longo das potenciais trajetórias de blocos antes e após o acidente. Foi mapeada ainda a envoltória de energias da encosta para o caso hipotético desta ser integralmente com superfície em rocha aparente.

Para definição da geometria do talude considerado nos cálculos foi feita a composição dos levantamentos topográficos realizados na cicatriz, nas linhas de barreiras e canaletas com um levantamento aerofotogramétrico da região, permitindo representar toda a área estudada.

Foram traçadas doze seções perpendiculares às curvas de nível na área de estudo (Figura 4.1).

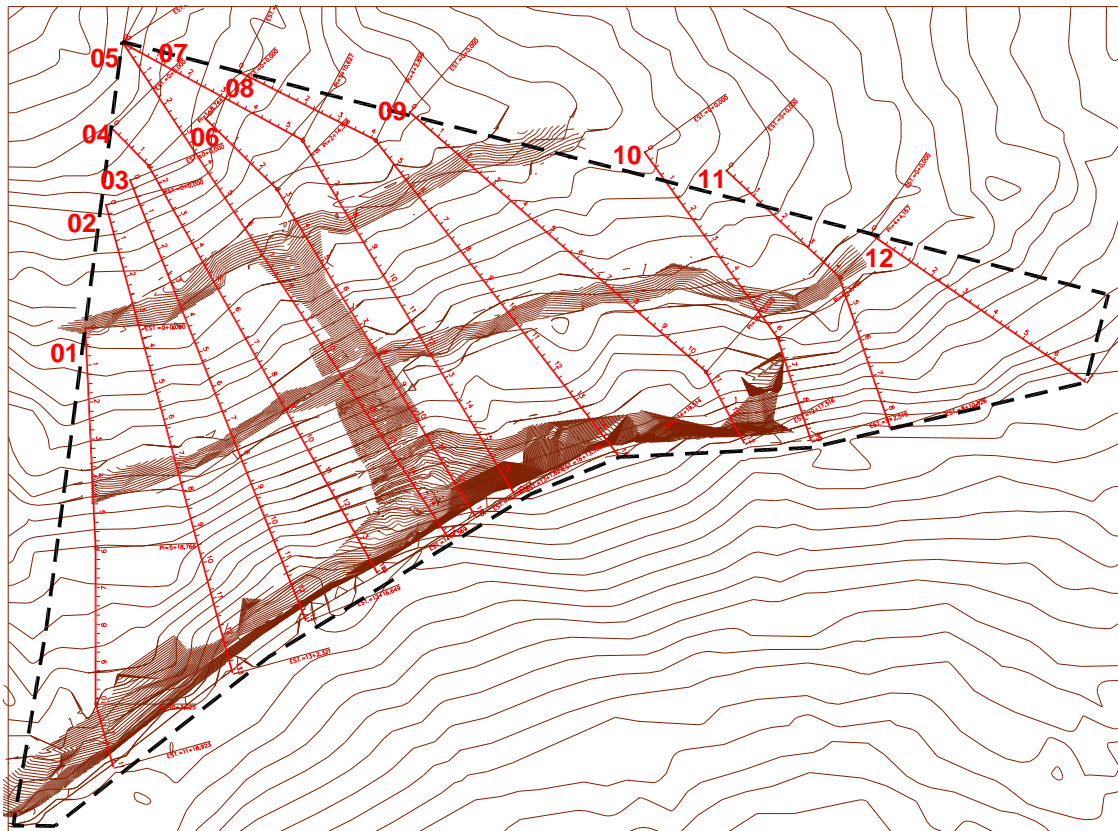


Figura 4.1 - Seções estudadas.

Para as doze seções definidas foi simulada inicialmente a situação anterior ao deslizamento ocorrido, tendo como material superficial uma fina camada de solo sobre rocha. As saídas do programa com as trajetórias, envoltórias de energias e de alturas dos saltos estão apresentadas no Anexo I.

Em seguida, a análise foi repetida simulando novamente as doze seções, porém considerando a superfície em rocha. As saídas do programa com as trajetórias, envoltórias de energias e de alturas dos saltos estão apresentadas no Anexo II.

Em todas as simulações, os valores da envoltória energia foram tabelados de 5 em 5 m metros ao longo das seções. Com isto, obtiveram-se cerca de mil e quinhentos pontos com valores de energia máxima distribuídos na área estudada.

Utilizando estes valores foram criados mapas de isoenergias para a situação anterior ao deslizamento (Figura 4.2.), após deslizamento (Figura 4.3) e uma situação hipotética com superfície toda em rocha (Figura 4.4).

Na situação anterior do deslizamento (Figura 4.2), verifica-se que a envoltória de energias as margens da rodovia possui valores que variam de 0 (bloco entra em repouso antes de atingir a rodovia) a cerca de 3.000 kJ.

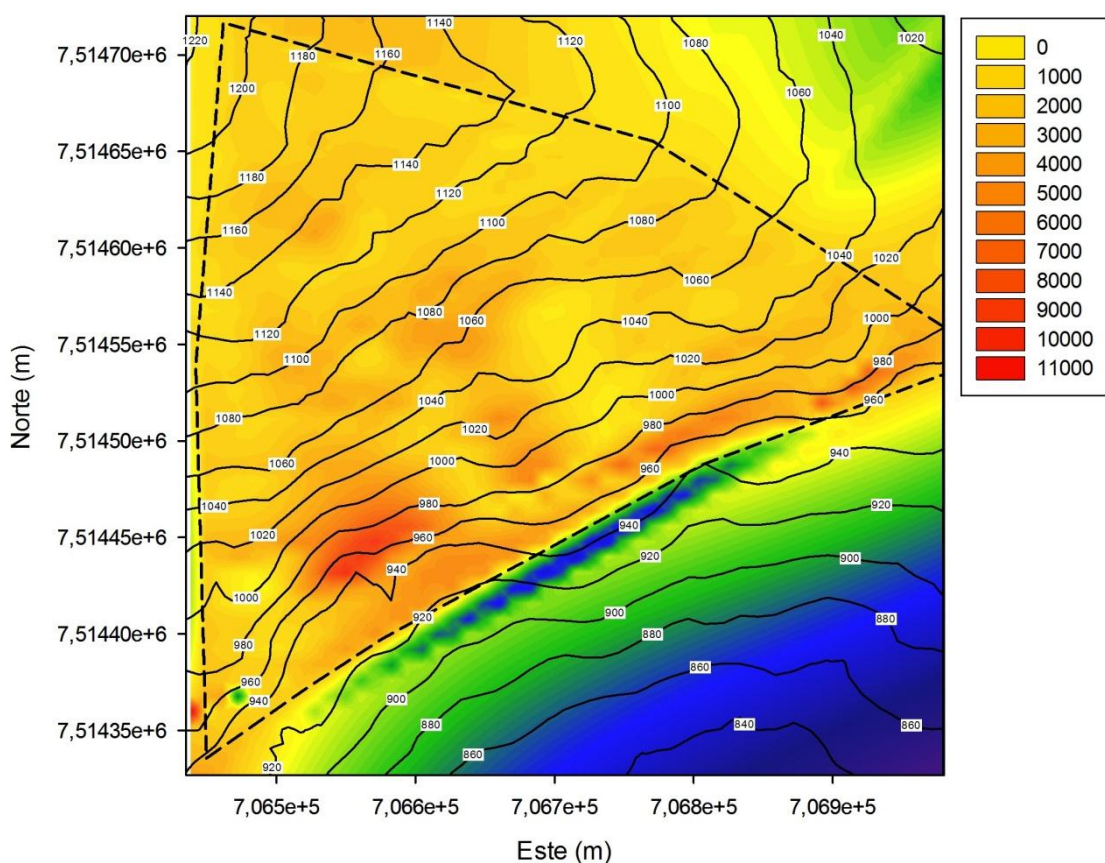


Figura 4.2 - Mapa de isoenergias considerando camada de solo em toda a superfície - Situação anterior ao deslizamento.

Na situação real após o deslizamento (Figura 4.3), observa-se que a região da cicatriz, que possui rocha exposta, apresenta os maiores valores para a envoltória de energias.

Na situação hipotética com a superfície toda em rocha (Figura 4.4), verifica-se que a envoltória apresenta energias mais elevadas do que nas situações anteriores, atingindo às margens da rodovia valores que variam de cerca de 2.000 a cerca de 10.000 kJ.

Como explicado, as energias são maiores para as superfícies em rocha. Apesar de ter diversas variáveis envolvidas, de uma forma geral, percebe-se também uma elevação da energia quando se tem uma região a montante com uma declividade maior.

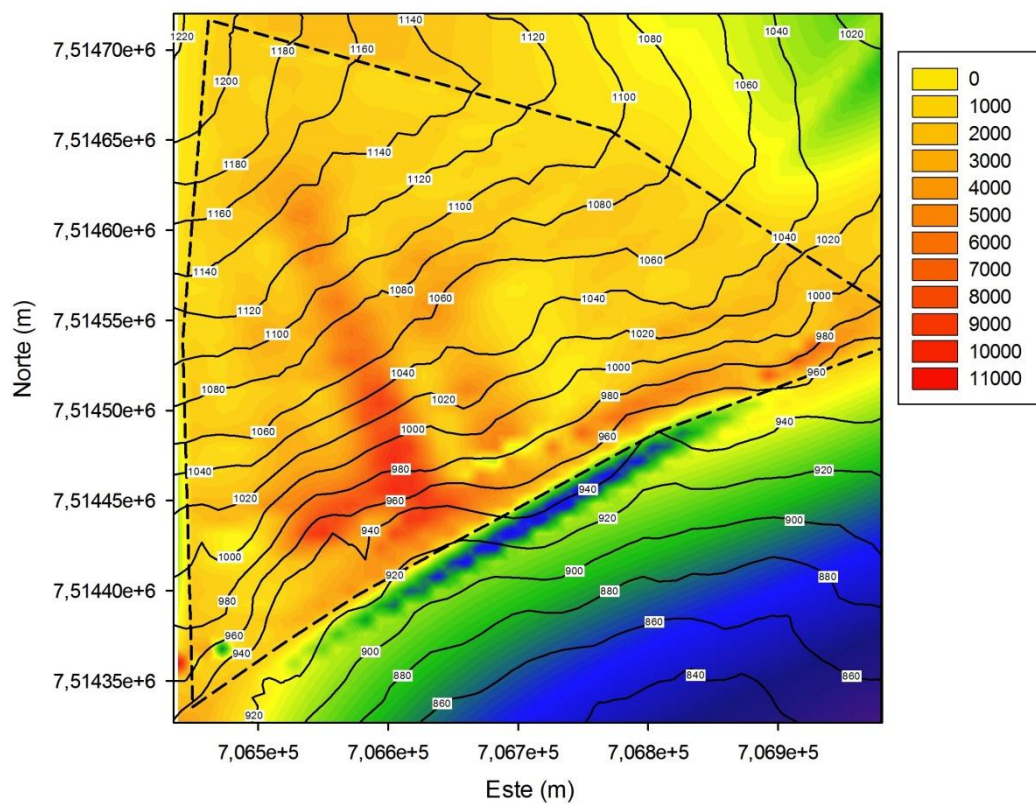


Figura 4.3 - - Mapa de isoenergias considerando camada de solo com rocha aparente somente no local da cicatriz - Situação posterior ao deslizamento.

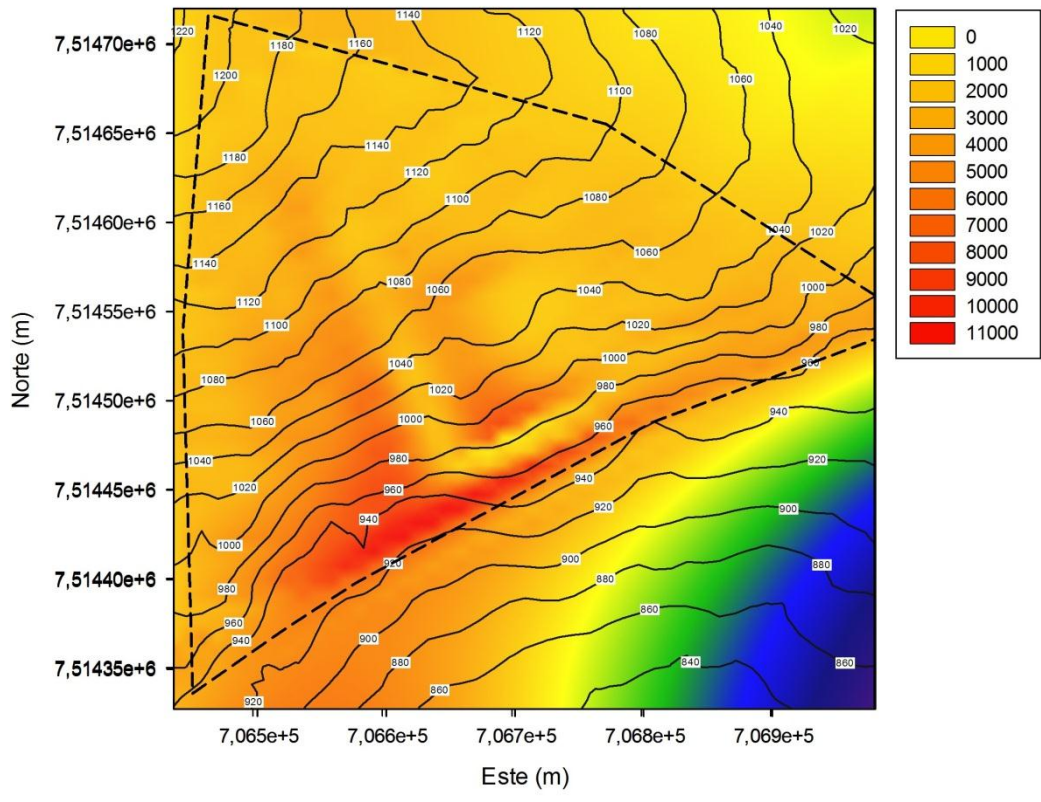


Figura 4.4- Mapa de isoenergias considerando rocha aparente em toda a superfície - Situação hipotética.

4.3 Estudo das intervenções realizadas

Conforme apresentado no capítulo 3, a solução de convivência adotada para os blocos com menos de dez toneladas consiste na instalação de duas linhas principais barreiras de impacto, sendo a primeira na cota 965 m, com 4,5 m de altura, e a segunda na cota 1.120 m com 4 m de altura. A seguir serão simuladas as trajetórias dos blocos e suas energias ao longo da encosta após a instalação dessas barreiras.

Foi considerado desprendimento de blocos ao longo de toda a encosta, sendo distribuídas duas unidades a cada metro.

Para a realização da análise foi escolhida a seção número 6 (Figura 4.5), por ter sido uma seção que atravessa a cicatriz do deslizamento, além de ser formada por um trecho com solo e um trecho em rocha aparente, o que gera uma configuração de cálculo interessante.

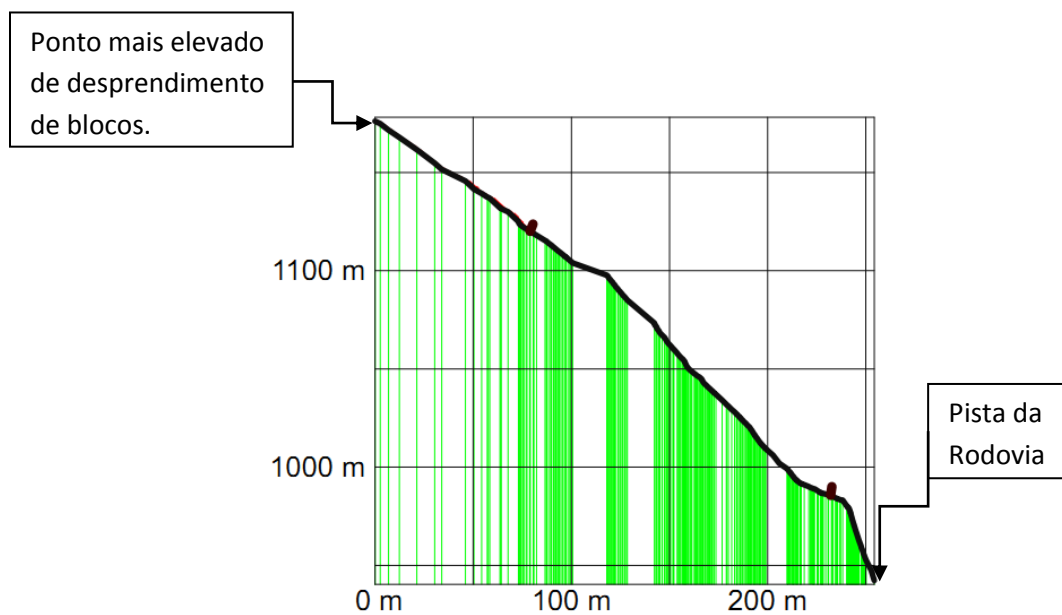


Figura 4.5 - Perfil da Seção 06.

Na Figura 4.6 é apresentada a envoltória de energias cinéticas para as trajetórias simuladas na seção 6. Como pode ser observado, os blocos podem atingir altos valores de energia, atingindo a pista com mais de 3.000 kJ.

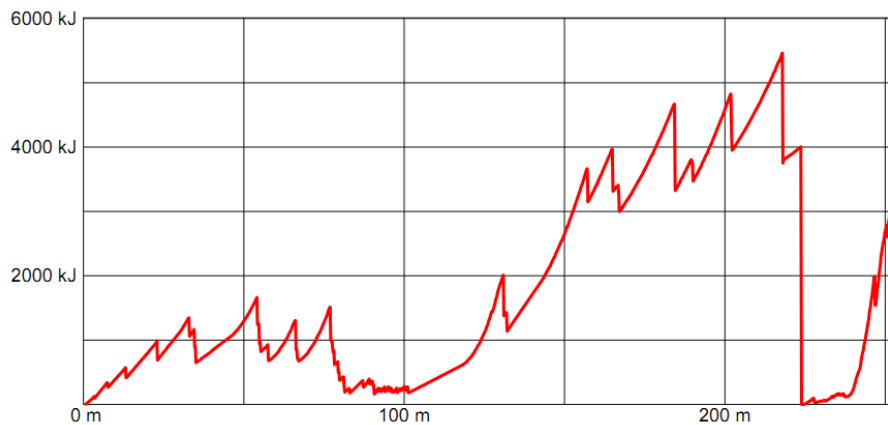


Figura 4.6 - Seção 06 - Envoltória de Energias (Sem Barreiras).

Após a simulação da seção 6 para a configuração final da obra, foram extraídos do programa as estatísticas obtidas nas duas linhas de barreiras, conforme apresentado nas Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10. O eixo das ordenadas da Figura 4.7 indica a porcentagem de blocos que alcançam a barreira na posição definida no programa com energia indicada no eixo das abcissas. Na Figura 4.8 o eixo das abcissas indica a altura que os blocos atingem no ponto considerado. As energias de impacto máximas calculadas foram de 2.580 kJ na barreira 1 e de 694 kJ na barreira 2 e as alturas de impacto máximas calculadas foram de 2,77 m e 1,00 m. Verificou-se que as alturas e capacidades de absorção de energia das barreiras especificadas no caso estudado estão em acordo com os valores obtidos.

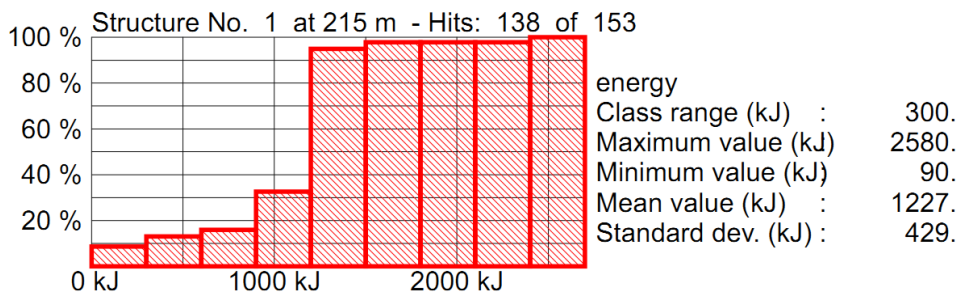


Figura 4.7 - Histograma acumulado de energias de impacto na linha 1.

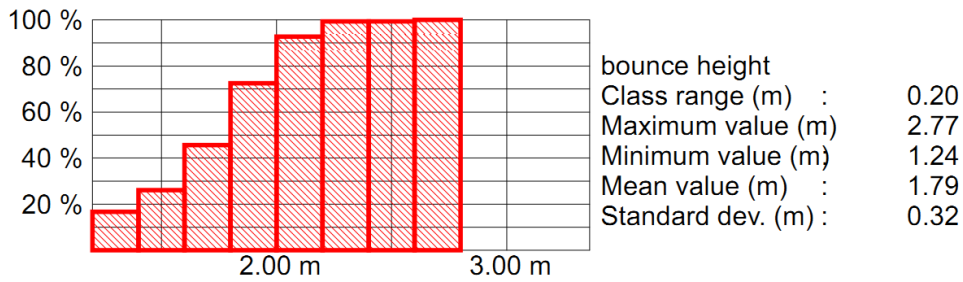


Figura 4.8 - Histograma acumulado de altura de impacto na linha 1.

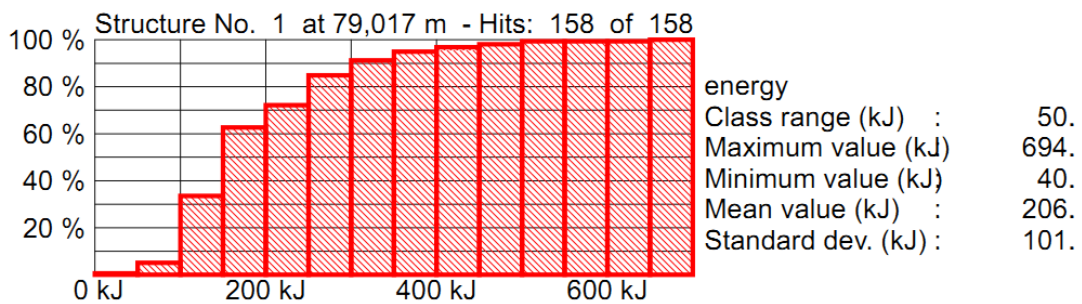


Figura 4.9 - Histograma acumulado de energias na linha 2.

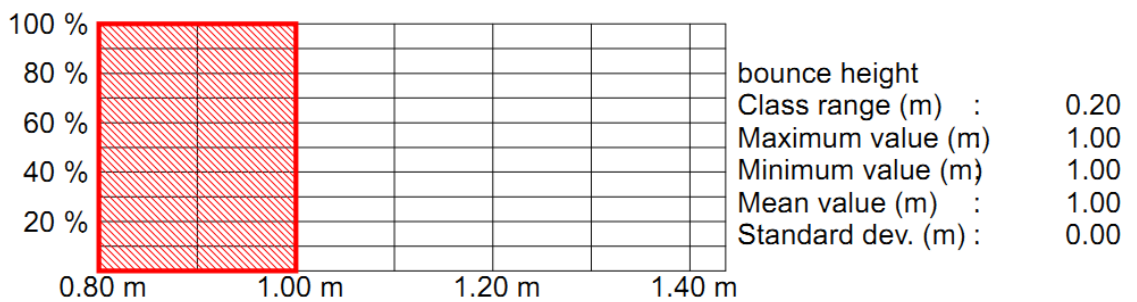


Figura 4.10 - Histograma acumulado de altura de impacto na linha 2.

4.4 Análise de Alternativas para a disposição das barreiras em um caso hipotético.

Muitos condicionantes podem existir na hora de definir quantas linhas de barreiras serão utilizadas. No caso estudado, por exemplo, podemos ver pelas simulações realizadas no item 4.1, que a adoção de uma única linha de barreiras ocasionaria ter que trabalhar com barreiras que suportam energias muito altas, inclusive maiores do que as disponíveis no mercado. Por outro lado, por questões ambientais, quanto menor o número de linha de barreira, melhor seria a solução.

Este item tem, portanto, o objetivo de avaliar a influência do número de linhas de barreiras na quantidade de energia que precisará ser suportada e no custo do material empregado.

Para esta análise foi utilizada a geometria da seção 5, porém com parâmetros referentes à rocha em toda a superfície (para facilitar a interpretação dos dados), não representando a realidade, mas sim um caso hipotético.

Foram simulados quatro cenários de cálculo alterando o número de linhas utilizado, conforme detalhados na Tabela 2. Em cada cenário as barreiras foram posicionadas de forma a se ter, aproximadamente, a mesma diferença de cotas entre as mesmas.

Tabela 2 - Cenários de cálculo e cotas de barreiras

Cenário	Cota (m)			
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4
I	958	-	-	-
II	958	1103	-	-
III	958	1050	1141	-
IV	958	1024	1089	1155

Nas simulações foram considerados blocos de massa de 10 t distribuídos uniformemente ao longo da superfície com distribuição de 2 blocos por metro. Foram obtidas as energias máximas e alturas máximas de choque de blocos contra as barreiras (Tabela 3). As saídas do programa com as trajetórias, envoltórias de energias e de alturas dos saltos estão apresentadas no Anexo III.

Tabela 3 - Análise de alternativas para a disposição das barreiras.

	Energia Máxima de Impacto				Altura Máxima de Impacto			
	CenárioI	CenárioII	CenárioIII	CenárioIV	CenárioI	CenárioII	CenárioIII	CenárioIV
Linha 1	9.562	4.992	1.791	1.592	7,42	3,42	1,01	1,01
Linha 2	-	4.011	2.048	2.778	-	3,13	2,13	3,34
Linha 3	-	-	2.192	1.263	-	-	3,19	1,00
Linha 4	-	-	-	1.481	-	-	-	0,99

A Figura 4.11 apresenta o gráfico do somatório das energias máximas medidas nas linhas de barreiras de acordo com cada cenário.

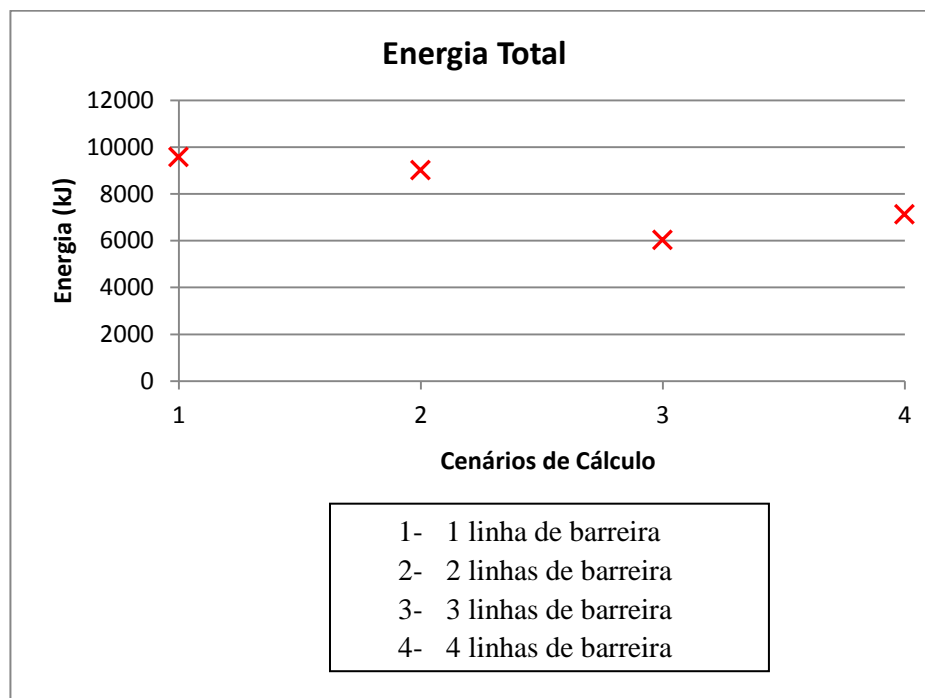


Figura 4.11 - Energia Total x Cenário.

Além da definição das energias com as quais os blocos atingem as barreiras, faz-se necessário saber a altura que os mesmos alcançaram no momento do choque.

Para permitir a análise entre as áreas necessárias de barreira entre os quatro cenários apresentados, foram adotados os valores para as alturas das barreiras de acordo com as especificações de mercado para cada classe de energia. A Tabela 4 apresenta as alturas mínimas e máximas para as barreiras disponíveis no mercado e a relação entre o

custo por metro quadrado em cima destas barreiras. O acréscimo no custo apresentado na tabela abaixo é em relação à barreira de 500 kJ, sendo que somente está considerado o valor dos elementos da barreiras.

Tabela 4 - Características das barreiras disponíveis no mercado.

Capacidade Nominal (kJ)	Altura mínima (m)	Altura máxima (m)	Acréscimo de custo em relação 500kJ* (por m ²)
500	2	4,5	0%
1000	3	6	43%
2000	4	7,5	94%
3000	4	7,5	125%
5000	4	9	217%

Levando em consideração os valores apresentados, na Tabela 5 estão apresentadas as classes de energias e alturas disponíveis no mercado que precisariam ser adotadas para cada um dos quatro cenários estudados.

Tabela 5 - Barreiras especificadas de acordo com a disponibilidade no mercado.

	Energia				Altura			
	CenárioI	CenárioII	CenárioIII	CenárioIV	CenárioI	CenárioII	CenárioIII	CenárioIV
Linha 1	-	5.000	2.000	2.000	7,5	4,0	4,0	4,0
Linha 2	-	5.000	3.000	3.000	-	4,0	4,0	4,0
Linha 3	-	-	3.000	2.000	-	-	4,0	4,0
Linha 4	-	-	-	2.000	-	-	-	4,0

Pode ser observado que, no caso da adoção de apenas uma linha de barreiras, a energia máxima prevista seria de 9.562 kJ, valor superior a capacidade nominal das barreiras disponíveis no mercado. Caso, ainda assim, se desejasse trabalhar com uma única linha de barreira, poderiam ser analisados os riscos associados. Neste caso, pode-se ver pelo histograma acumulado de energias máximas apresentado (Figura 4.12) que a barreira disponível de 5.000 kJ seria suficiente para comportar aproximadamente 95% das trajetórias simuladas.

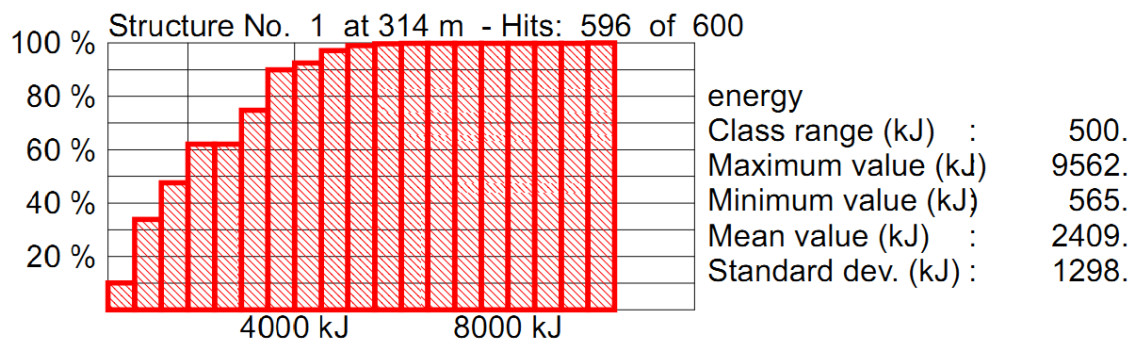


Figura 4.12 - Histograma acumulado de uma linha de barreiras.

Para a análise comparativa entre cenários não será considerado o cenário 1, posto que para este caso não seria garantida a segurança de 100% dos blocos, situação diferente das demais.

Para a viabilidade econômica comparativa é apresentado na Figura 4.13 o gráfico da área total de barreiras por metro de extensão da obra corrigido pelo acréscimo em relação à barreira de 500 kJ para cada cenário. Como exemplo, no caso do cenário 2, onde é necessária uma área de 8m² (por metro de extensão da obra) de barreira de classe de 5000 kJ (custo por m² 217% a mais do que a de 500kJ) a área equivalente é de $8 \cdot (1 + 2,17) = 25,36 \text{ m}^2$.

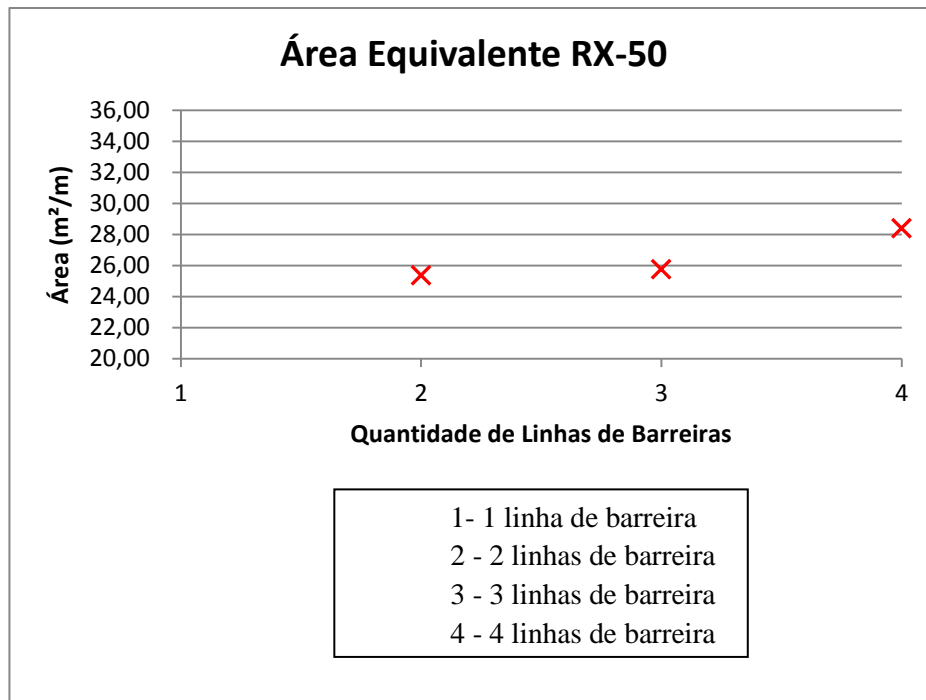


Figura 4.13 - Área equivalente x nº de linhas de barreiras.

Verifica-se que os cenários 2 e 3 são economicamente mais vantajosos por apresentarem menores áreas equivalentes (25,36 m² e 25,76 m² , respectivamente). Entre estas duas opções o cenário 2 é mais viável pelo fato de promover menor impacto ambiental ao só necessitar de 2 linhas ao invés de 3.

5. Conclusões

Quedas de blocos são geralmente eventos de movimentos de massa abruptos, o que pode levar a prejuízos materiais a perda de vidas humanas.

Para a avaliação dos riscos inerentes a queda de blocos e concepção de medidas mitigadoras, é necessária a determinação da trajetória do movimento, energia de impacto e o alcance máximo do bloco em queda.

Essas informações são obtidas através da aplicação de leis da física que regem o movimento e as colisões. Para tal é necessário se conhecer a geometria, coeficientes de atrito e coeficientes de restituição da superfície, massa e formato dos blocos e as condições iniciais do movimento.

Foram realizadas análises da movimentação de blocos utilizando o programa Rockfall Dr. Spang para o caso da rodovia BR 116. O programa se mostrou de fácil utilização, simplicidade na entrada de dados e rapidez no processamento das trajetórias. A saída de dados permite a apresentação dos resultados através de envoltórias de valores ou histograma, que nos permitiu ainda realizar análises estatísticas nos resultados. Conclui-se que, para o caso estudado:

Comparando-se a situação anterior (superfície do talude em solo) e posterior (superfície com cicatriz em rocha) a ocorrência do deslizamento observou-se um aumento da energia com a qual possíveis blocos atingem a pista da rodovia após a ocorrência do evento. Verificou-se também um aumento de energia em regiões de encosta cujo trecho a montante apresenta maior declividade.

Analisando a situação posterior a realização das obras de estabilização, concluiu-se que as barreiras estão devidamente dimensionadas para suportar a energia e a altura que os blocos atingem na trajetória de queda.

Fez uma análise de queda de blocos para um caso hipotético considerando 4 cenários de disposição de barreira de impacto (1 linha, 2 linhas, 3 linhas e 4 linhas). Observou-se que para 1 linha não existia barreira comercial no mercado, diante da elevada energia. Comparando-se os 3 outros cenários de solução, verificou-se que a

utilização de 2 ou 3 linhas apresentavam-se mais viáveis economicamente, sendo desprezível a diferença entre estas. E, portanto, a opção de 2 linhas se mostrou mais viável por causarem menor impacto ambiental.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

Concessionária Rio Teresópolis – CRT: **Detalhamento barreiras de proteção de queda de blocos**. Rio de Janeiro, 2011.

Concessionária Rio Teresópolis – CRT: **Linhas de barreira – RXI 200 (linhas 2 e 4)**. Rio de Janeiro, 2010.

Concessionária Rio Teresópolis – CRT: **Relatório de investigação geológico-geotécnico**. Rio de Janeiro, 2009.

DIAS, G.P.; BARROSO, E.V. **Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas**: Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas. Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, Vol. 29, 2006.

DORREN, L.K.A. **A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approches**. Progress in Physical Geography, 27. USA, 2003.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA: **Highway Safety Manual**. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/resources/training.cfm>. Acesso em 01 de setembro de 2011.

Halliday, D. **Fundamentos de Física**, Volume 1, 6. ed., 2006.

HOEK. **Practical Rock Engineering**. 1. ed. North Vancouver, 2007.

NUNES, A.L.L.S. **Estabilidades de Taludes Rochosos em Estradas**.

In: 6º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – Geosul. Florianópolis, 2008.

ROCHA, J. S. A. **Estudos Numéricos sobre Trajetórias de Queda de Blocos Rochosos**, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2009.

ROCSCIENCE. **Advanced Tutorial – Determining Input Parameters for a Rockfall Analysis**. Roc News Fall, 2003.

SPANG, R.M. **Integral approach to the design of rockfall mitigation measures**. National Conference on the Rainfall and Slope Stabilization. Seoul, South Korea, 2004.

STEVENS, W.D. **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, 1998.

WYLLIE, D.C.; NORRISH, N.I. **Stabilization of Rock Slopes**, in: Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report, 1996.

ANEXO I

Resultados das Análises Numéricas para a Situação Anterior ao Deslizamento

ANEXO II

Resultados das Análises Numéricas Considerando Superfície em Rocha

ANEXO III

Resultados das Análises Numéricas para a Disposição das Barreiras