

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Condicionantes geotécnicas e análise de quedas de blocos rochosos
da rodovia RS471 / BR153, lote 2**

Jorge Hernán Flórez Gálvez

Porto Alegre
2012

JORGE HERNÁN FLÓREZ GÁLVEZ

**CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS E ANÁLISE DE
QUEDAS DE BLOCOS ROCHOSOS DA RODOVIA RS471 /
BR153, LOTE 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Porto Alegre

2012

CIP - Catalogação na Publicação

Flórez-Gálvez, Jorge Hernán

Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da rodovia RS471/BR153, lote 2 / Jorge Hernán Flórez-Gálvez. -- 2012.
164 f.

Orientador: Luiz Antônio Bressani.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2012.

1. Quedas de rochas. 2. Formação Serra Geral. 3. Martelo Schmidt. 4. Coeficientes de restituição. 5. Rochas vulcânicas. I. Bressani, Luiz Antônio, orient. II. Título.

JORGE HERNÁN FLÓREZ GÁLVEZ

**CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS E ANÁLISE DE
QUEDAS DE BLOCOS ROCHOSOS DA RODOVIA RS471 /
BR153, LOTE 2**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 6 de julho de 2012

Prof. Luiz Antônio Bressani
Ph.D. pelo Imperial College, University of
London
orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro (UFSM)
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Andre Cezar Zingano (UFRGS)
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero me desculpar com as pessoas que, mesmo sendo importantes para o desenvolvimento deste presente trabalho, não foram incluídas neste modesto reconhecimento. Tomara possa expressar a cada uma delas a minha gratidão.

À República Federativa do Brasil, representada neste caso pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela ótima oportunidade de estudo, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo fornecimento da bolsa de estudos que fez possível que eu e a minha esposa conseguíssemos morar no Brasil ao longo destes pouco mais de dois anos.

Dentro da UFRGS, agradeço ao corpo docente, discente e administrativo do PPGEC pela sincera amizade e ensinamentos. Gostaria de enfatizar os agradecimentos ao Professor Luiz Antônio Bressani, pela oportunidade de ter sido seu orientando ao longo deste processo.

À coautora deste Mestrado, minha esposa Adriana, pela bela experiência de vida ao longo dos últimos cinco anos, e os que vêm pela frente. À minha mãe, que tem batalhado durante toda a nossa vida para nos garantir uma vida feliz e digna. Ao meu pai, que mesmo não tendo conseguido chegar com vida até hoje, é uma das minhas principais fontes de admiração e respeito. Ao meu irmão e irmã, que sempre estão para mim, ainda que às vezes eu não consiga estar para eles.

À minha família toda, em Pereira, Popayán e nos diferentes pontos onde cada um habita, pela força, ajuda e ensinamentos ao longo de todos estes anos.

Aos amigos na Colômbia e no Brasil, os que ainda estão e os que se encontram fora, que, mesmo espalhados em diferentes latitudes, seguem me trazendo sorrisos e ensinamentos todos os dias. Um agradecimento especial aos membros da *Cátedra Javier Cuadros*, a minha família não sanguínea.

Finalmente, quero agradecer ao povo do Brasil por ter nos acolhido com carinho durante estes pouco mais de dois anos de estar aqui. Porque, mesmo com as nossas diferenças culturais, nunca deixamos de nos sentir dentro da *Nossa América*.

RESUMO

FLÓREZ-GÁLVEZ, J.H. Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da Rodovia RS471 / BR153, lote 2. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A RS471/BR153 é uma importante rodovia de integração, pois atravessa o estado do RS diagonalmente (Noroeste – Sudeste). O trecho estudado nesta dissertação localiza-se entre os municípios de Herveiras e Vera Cruz, coincidente com descida do planalto até a região central do estado. Durante o detalhamento do projeto e na construção da obra foram encontrados diversos problemas geotécnicos, os quais são sucintamente descritos. O texto apresenta as condicionantes geotécnicas de três subtrechos: (a) planalto, composto de rochas ácidas de origem vulcânica e grau de fraturamento muito alto; (b) descida da serra, composto pelos derrames da formação Serra Geral (brechas ácidas e basálticas e derrames basálticos) e (c) planície, com a presença de rochas sedimentares e materiais coluvionares. Além disto, há uma região especial onde o traçado atravessa uma sela topográfica coincidente com uma falha regional, com cortes de cerca de 60 m de altura através de rochas ácidas, básicas e brechas vulcânicas. A dissertação apresenta estudos dos processos de quedas de blocos rochosos que têm ocorrido nos cortes da rodovia. Foi utilizado um procedimento que correlaciona as leituras obtidas com o martelo Schmidt (Esclerômetro) e o coeficiente de restituição normal (R_N) das rochas em diversos locais. Utilizando estes dados experimentais, foram executadas simulações de queda de blocos em quatro seções transversais bastante distintas com o uso do programa *RocFall*. Para cada seção foram simulados cinco cenários: (a) a existência de alargamentos para construção de áreas de retenção de blocos, (b) inexistência destas áreas, (c) a existência de preenchimento de uma ou várias banquetas existentes nos taludes de corte, e (d) o abatimento da seção com eliminação das banquetas. Foram também simulados quatro tipos de elementos de proteção: barreiras de baixa altura em concreto, camadas de areia fofa, barreiras metálicas flexíveis e proteção superficial dos taludes. A existência de áreas de retenção de blocos mostrou ser uma ótima medida, com frequências de invasão de pista geralmente abaixo de 1%, podendo chegar a 6,5% em condições de grande acúmulo de material. O melhor desempenho foi obtido pela instalação de camadas de areia fofa, obtendo-se todas as frequências abaixo de 2%. O uso de barreiras rígidas de 81 cm de altura teve um bom desempenho para taludes de baixa altura, chegando a detenções de até 25% dos blocos em trajetória de invasão. As barreiras flexíveis e proteções superficiais geraram resultados satisfatórios, mas que podem ser melhorados com outras modulações e dimensões.

Palavras-chave: Quedas de rochas; Formação Serra Geral; Martelo Schmidt; Esclerômetro; Coeficientes de restituição; Rochas vulcânicas.

ABSTRACT

FLÓREZ-GÁLVEZ, J.H. Geotechnical conditions and rockfall analysis of the RS71 / BR153 Highway, section 2. 2012. Dissertation (Master in Engineering) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The RS471/BR153 is an important road of integration, that cross RS state diagonally (northwest - southeast). The segment studied on this dissertation is located between the towns of Vera Cruz and Herveiras, coincident with the descent way from the plateau to the central state region. During the design and during the road construction several geotechnical problems were faced, which are briefly described. The text presents the geotechnical constraints of 3 segments: (a) plateau, composed of acid rocks of volcanic origin and very high degree of fracturing, (b) hills of the mountain, made up of volcanic rocks of *Serra Geral* formation (acid and basaltic breccias, basaltic flows) and (c) the plain, with the presence of sedimentary rocks and colluvial materials. There is also a special region where the road crosses a topographic saddle which it coincides with a regional fault, with cuts of about 60 m high through acid and basic rocks and volcanic breccia. The dissertation presents studies of rock falls that have occurred in the road cuts. A procedure that correlates the readings obtained with the Schmidt hammer (rebound hammer) and the normal coefficient of restitution (R_N) of the rocks was carried out for measures taken at several locations. With these experimental data, simulations of falling boulders in four very different cross sections were done using the program *RocFall*. For each section five situations were simulated: (a) enlargements for the construction of rockfall catchment areas (b) the absence of these areas, (c) the existence of accumulation in the benches of the cuts, and (d) the reduction of the section with bench removal. Four types of elements of protection were tested: concrete low barriers, layers of sand, flexible metal barriers and slope surface protection. The existence of rockfall catchment areas was shown to be a very good measure with frequencies of track invasion usually below 1% reaching 6.5% on conditions of large material accumulation. The best performance was obtained by the installation of sand layers, with all frequencies below 2%. The use of rigid barriers of 81 cm high had a good performance for low-slope heights, reaching up to 25% block retention. The use of flexible barriers and surface protections also had a good performance.

Key-words: Rock falls; *Serra Geral* Formation; Schmidt hammer; Rebound hammer; Coefficients of Restitution; Volcanic rocks.

RESUMEN

FLÓREZ-GÁLVEZ, J.H. Condicionantes geotécnicos y análisis de caídas de rocas en la carretera RS471/BR153, tramo 2. 2012. Disertación (Maestría en Ingeniería) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

La RS471/BR153 es una importante carretera de integración, atraviesa el estado de RS diagonalmente (Noroeste-Sureste). El tramo estudiado en esta disertación se localiza entre los municipios de Herveiras y Vera Cruz, y coincide con el descenso desde el altiplano hasta la región central del estado. Durante las etapas de detalle y construcción de la obra fueron encontrados diversos problemas geotécnicos que son brevemente descritos. El texto presenta los condicionantes geotécnicos de tres subtramos: (a) altiplano, compuesto por rocas ácidas de origen volcánico y grado de fracturamiento muy alto; (b) descenso de la sierra, compuesto por los derrames de la formación *Serra Geral* (brechas ácidas y basálticas e derrames basálticos) y (c) planicie, con rocas sedimentarias y materiales coluviales. Además, hay una región donde el trazado atraviesa una “silla” topográfica que coincide con una falla regional, con cortes de aproximadamente 60 m de altura a través de rocas ácidas, básicas y brechas volcánicas. La disertación presenta estudios de procesos de caídas de rocas que han ocurrido en algunos cortes. Fue utilizado un procedimiento que correlaciona las lecturas obtenidas con el martillo Schmidt (Esclerómetro) y el coeficiente de restitución normal (R_N) de las rocas en diferentes lugares. Con estos datos experimentales, fueron ejecutadas simulaciones de caídas de rocas en cuatro secciones transversales bastante distintas usando el programa *RocFall*. En cada sección fueron simulados cinco escenarios: (a) existencia de sobreechamientos para la construcción de áreas de retención de rocas, (b) inexistencia de estas áreas, (c) existencia de relleno en una o más gradas existentes en los taludes de corte, y (d) disminución de la pendiente de los taludes y eliminación de las gradas. También fueron simulados cuatro tipos de elementos de protección: barreras de baja altura en concreto, capas de arena suelta, barreras metálicas flexibles y protección superficial de los taludes. La existencia de áreas de retención de rocas mostró ser una excelente medida, con frecuencias de invasión de pista generalmente inferiores a 1%, pudiendo llegar a 6,5% en condiciones de gran acumulación de material. El mejor desempeño fue obtenido con la instalación de capas de arena suelta, con todas las frecuencias por debajo de 2%. El uso de barreras rígidas de 81 cm de altura tuvo un buen desempeño para taludes de baja altura, llegando a detenciones de hasta 25% de los bloques en trayectoria de invasión. Las barreras flexibles y protecciones superficiales generaron resultados satisfactorios, que podrían ser mejorados con otras modulaciones y dimensiones.

Palabras-clave: Caídas de rocas; Formación *Serra Geral*; Martillo Schmidt; Esclerómetro; Coeficientes de restitución; Rocas volcánicas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO	20
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. TIPOS DE DESLIZAMENTOS	25
2.2. TIPOS DE INSTABILIDADES EM BLOCOS ROCHOSOS	29
2.2.1. Ruptura circular.....	31
2.2.2. Ruptura planar	32
2.2.3. Ruptura em cunha.....	32
2.2.4. Ruptura por tombamento.....	33
2.3. ASPECTOS GERAIS DAS QUEDAS DE BLOCOS.....	33
2.3.1. Principais agentes deflagradores de quedas	34
2.3.2. Tipos de mecanismos e trajetórias de queda.....	35
2.3.2.1. Deslizamento	35
2.3.2.2. Rolamento.....	38
2.3.2.3. Queda livre	40
2.3.2.4. Repique.....	42
2.3.3. Parâmetros envolvidos no cálculo de trajetórias de queda de blocos	45
2.3.3.1. Coeficientes de restituição.....	47
2.3.3.2. Variações dos outros fatores envolvidos	50
2.3.4. Procedimentos de estudo das quedas	52
2.3.4.1. Procedimentos de campo	53
2.3.4.2. Procedimentos de laboratório	56

2.3.4.3. Análise computacional	57
2.4. ELEMENTOS DE PROTEÇÃO OU DE MITIGAÇÃO DOS EFEITOS NEGATIVOS DAS QUEDAS.....	59
2.4.1. Proteções ativas	60
2.4.1.1. Proteções superficiais	61
2.4.1.2. Estruturas de contenção ou de suporte	62
2.4.1.3. Drenagem	63
2.4.2. Proteções passivas	64
2.4.2.1. Corte em banquetas	66
2.4.2.2. Implantação de áreas para retenção de blocos.....	67
2.4.2.3. Barreiras rígidas verticais	68
2.4.2.4. Barreiras flexíveis.....	69
2.4.2.5. Túnel falso	72
2.4.2.6. Muro de impacto.....	73
2.4.3. Estudos para dimensionamento de áreas de retenção laterais.....	74
3. PROJETO DA RODOVIA RS-471/BR-153 – LOTE 2	77
3.1. LOCALIZAÇÃO	77
3.2. CONDICIONANTES GEOMÉTRICAS DE IMPLANTAÇÃO	78
3.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS.....	78
3.3.1. Formação Serra Geral	81
3.3.2. Geomorfologia	82
3.4. DESCRIÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICO- GEOTÉCNICOS DOS SUBTRECHOS	82
3.4.1. Planalto.....	83
3.4.2. Descida da serra	86
3.4.3. Sela topográfica.....	88

3.4.4. Planície	89
4. METODOLOGIA	91
4.1. DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO NORMAL (R_N).....	92
4.1.1. O Martelo Schmidt.....	93
4.1.2. Seleção dos locais para avaliação da restituição	94
4.1.3. Correção por ângulo de aplicação do martelo.....	100
4.1.4. Correção por tipo de martelo.....	102
4.1.5. Cálculo do valor do coeficiente de restituição normal (R_N)	103
4.2. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL E CONDIÇÕES PARA AS SIMULAÇÕES	104
4.2.1. Velocidade angular.....	105
4.2.2. Fator de ajuste do coeficiente de restituição normal.....	105
4.2.3. Coeficientes de restituição normal e tangencial.....	107
4.2.4. Rugosidade do talude	108
4.2.5. Ângulo de atrito da superfície do talude	109
4.2.6. Massas dos blocos e velocidades de deslocamento iniciais	110
4.3. IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE PROTEÇÃO	111
4.3.1. Barreira vertical de baixa altura no bordo da pista	111
4.3.2. Camada de areia fofa substituindo parcialmente a área de retenção	113
4.3.3. Barreiras compostas por redes metálicas sobre a face do talude	114
4.3.4. Instalação de proteção superficial ao longo da face do talude.....	115

5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS MOVIMENTOS DE BLOCOS...	117
5.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO	
NORMAL.....	119
5.2. DEFINIÇÃO DAS FONTES DE QUEDA DE BLOCOS	124
5.3. SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE	
SUPERFICIAL	125
5.4. ESTUDO DE ALTERNATIVAS GEOMÉTRICAS PARA A	
SEÇÃO TRANSVERSAL.....	130
5.4.1. Seção sem alargamento - com banquetas.....	130
5.4.2. Seção com alargamento - com banquetas	133
5.4.3. Material acumulado nas banquetas	134
5.4.4. Seção sem banquetas e com talude abatido	136
5.4.5. Resumo do comportamento para os quatro pontos estudados	138
5.5. ESTUDO DE ALTERNATIVAS COM USO DE ELEMENTOS DE	
PROTEÇÃO.....	140
5.5.1. Barreiras verticais no bordo da pista.....	140
5.5.2. Camada de areia fofa substituindo parcialmente a área de retenção	
de blocos.....	147
5.5.3. Barreiras compostas por redes metálicas sobre a face do talude	149
5.5.4. Com a instalação de proteção superficial ao longo da face do talude	151
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	153
6.1. CONCLUSÕES.....	153
6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	157
REFERÊNCIAS	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Principais tipos de deslizamentos	28
Figura 2.2: Mecanismos de ruptura em taludes rochosos.....	31
Figura 2.3: Relação do ângulo do talude com o tipo de trajetória de queda	34
Figura 2.4: Condições e variáveis envolvidas nas trajetórias por deslizamento	36
Figura 2.5: Condições e variáveis envolvidas nas trajetórias por rolamento	38
Figura 2.6: Condições e variáveis envolvidas nas trajetórias por queda livre.....	40
Figura 2.7: Condições e variáveis envolvidas no cálculo envolvendo repique.....	43
Figura 2.8: Modelo mecânico que representa os parâmetros associados ao repique de blocos.....	47
Figura 2.9: Parâmetros medidos para a colisão de uma esfera com um plano inclinado	49
Figura 2.10: Proposta gráfica para identificar intervalos de coeficiente de restituição para grandes grupos de materiais.....	51
Figura 2.11: Procedimento de lançamento de blocos	54
Figura 2.12: Reconstrução da trajetória de queda mediante filmagem de alta velocidade	55
Figura 2.13: Marcas deixadas por impactos de blocos em árvores	56
Figura 2.14: Trajetória de queda obtida para um elemento esférico sobre uma laje fixa.....	57
Figura 2.15: Aplicação de concreto projetado.....	61
Figura 2.16: Estabilização por redes metálicas e chumbadores	62
Figura 2.17: Uso de contrafortes e grelhas ancoradas	63
Figura 2.18: Capacidades de dissipação de energia para diferentes elementos de proteção	65
Figura 2.19: Corte rochoso em banquetas	66
Figura 2.20: Área de retenção de blocos	67
Figura 2.21: Barreiras de proteção rígidas	68
Figura 2.22: Barreiras flexíveis com ancoragem no cabo de retenção.....	70
Figura 2.23: Imagem frontal da barreira com cabos de retenção	70
Figura 2.24: Barreiras flexíveis com ancoragem na fundação	71
Figura 2.25: Solução Híbrida Rede - Cortina.....	71
Figura 2.26: Solução tipo "Túnel falso"	72

Figura 2.27: Alternativa para Túnel falso "flexível"	73
Figura 2.28: Solução mediante muro de impacto	73
Figura 2.29: Proposta gráfica para dimensionamento de áreas de retenção de blocos.....	75
Figura 2.30: Formato e elementos da área de retenção de blocos tipo vala	75
Figura 2.31: Ábaco para dimensionamento de áreas de retenção de seção triangular, taludes com declividade 4V:1H e alturas entre 24 e 38 m.....	76
Figura 3.1: Localização do Trecho 2 da RS-471/BR-153	77
Figura 3.2: Vista geral e setorização do lote 2	79
Figura 3.3: Traçado em planta e principais formações geológicas.....	80
Figura 3.4: Representação da estrutura de um derrame e morfologia de uma escarpa constituída por derrames basálticos	83
Figura 3.5: Condições predominantes no planalto da serra.....	84
Figura 3.6: Diferentes geometrias definidas para os taludes de corte	85
Figura 3.7: Condições predominantes na descida da serra.....	86
Figura 3.8: Aspecto do corte no 61+200 em que a banquetta de corte foi feita coincidente com a transição de derrames (e presença de arenito brando)	87
Figura 3.9: Vista geral da sela topográfica antes da obra.....	88
Figura 3.10: Traçado em planta da rodovia através da sela topográfica	89
Figura 3.11: Rupturas lentas em corpos de colúvio no segmento “Planície”	90
Figura 3.12: erosão em siltitos com presença de materiais expansivos no segmento “Planície”	90
Figura 4.1: Metodologia de atividades do trabalho	92
Figura 4.2: Martelo Schmidt empregado no presente estudo	94
Figura 4.3: Geometria da seção transversal no 50+840 – planalto.....	95
Figura 4.4: Geometria da seção transversal no 55+360 – planalto.....	95
Figura 4.5: Condição visual de uma seção transversal no planalto, próxima das estudadas....	95
Figura 4.6: Geometria da seção transversal no 57+800 – descida da serra.....	96
Figura 4.7: Geometria da seção transversal no 58+460 – descida da serra.....	96
Figura 4.8: Condição visual de uma seção transversal na descida da serra, próxima das estudadas.....	97
Figura 4.9: Posicionamento da sequência de locais ensaiados ao longo do eixo e transferência (projeção) para a seção transversal 57+800 estudada	98

Figura 4.10: Representação dos locais transferidos (projetados) para as quatro seções estudadas.....	98
Figura 4.11: Fotos dos procedimentos de campo	99
Figura 4.12: Convenção para a definição da direção do martelo Schmidt	100
Figura 4.13: Partes do martelo empregado.....	101
Figura 4.14: Curvas de normalização obtidas com relação à direção horizontal	103
Figura 4.15: Representação de entrada de dados - condições gerais de projeto adotadas.....	105
Figura 4.16: Variação do fator de ajuste de R_N com relação à velocidade do bloco ($K = 9,144$ m/s).....	107
Figura 4.17: Parâmetros para cada superfície do talude impactada	108
Figura 4.18: Condições de rugosidade geométrica testadas – (a) 40 cm e (b) 10 cm	109
Figura 4.19: Detalhe barreira <i>New Jersey</i>	112
Figura 4.20: Representação esquemática da barreira instalada no bordo do acostamento, junto da área de retenção	113
Figura 4.21: Representação da camada de areia fofa preenchendo parcialmente a área de retenção de blocos.....	113
Figura 4.22: Representação esquemática da barreira composta por redes metálicas instalada na superfície do talude.....	115
Figura 4.23: Representação esquemática da proteção superficial contra quedas instalada na face dos taludes	116
Figura 5.1: Vista geral do talude localizado na estaca 57+800	118
Figura 5.2: Detalhe da estrutura do pavimento e da área de retenção de blocos.....	119
Figura 5.3: Valores de leituras médias de rebote obtidas com martelo Schmidt tipo "L" $H_{R(L)}$ calculadas para a seção 57+800.....	122
Figura 5.4: Valores do coeficiente de restituição normal (R_N) obtidos para a seção 57+800	122
Figura 5.5: Valores médios do coeficiente de restituição normal (R_N) empregados nas simulações.....	123
Figura 5.6: Faixas de origem das quedas de blocos	125
Figura 5.7: Trajetórias de queda de blocos na seção 57+800 (taludes sem rugosidade visível) (500 blocos, 10 kg massa média).....	126
Figura 5.8: Localizações típicas dos blocos após as quedas	127
Figura 5.9: Trajetórias de queda de blocos na seção 57+800 (taludes com rugosidade de amplitude 10 cm) (500 blocos, 10 kg massa média).....	128

Figura 5.10: Trajetórias de queda de blocos (taludes com rugosidade de amplitude 40 cm) (500 blocos, 10 kg massa média).....	129
Figura 5.11: Geometria da seção transversal no 57+800 (sem alargamento para áreas de retenção de blocos).....	131
Figura 5.12: Detalhe da estrutura do pavimento e da sarjeta em concreto.....	132
Figura 5.13: Localização final dos blocos na seção 57+800 (projeto sem alargamento e talude com rugosidade de amplitude 40 cm) (10000 blocos, 10 kg massa média).....	133
Figura 5.14: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento e talude com rugosidade de amplitude 40 cm) (10.000 blocos, 10 kg massa média).....	133
Figura 5.15: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento, talude com rugosidade de amplitude 40 cm e as duas banquetas inferiores preenchidas com material fofo) (10.000 blocos, 10 kg massa média).....	135
Figura 5.16: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento, talude com rugosidade de amplitude 40 cm, com a banquetta inferior não-preenchida) (10.000 blocos, 10 kg massa média).....	136
Figura 5.17: Geometria da seção transversal 57+800 (com alargamento, sem banquetas e abatimento do talude para 3V:1H).....	137
Figura 5.18: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento, declividade de 3V:1H, talude com rugosidade de amplitude 40 cm e sem banquetas) (10000 blocos, 10 kg massa média).....	138
Figura 5.19: Presença de blocos dentro da pista de rolamento para as quatro seções estudadas	139
Figura 5.20: Resultados das simulações com barreira de h=0,81 m - frequências de invasão da pista para as diferentes geometrias transversais	141
Figura 5.21: Frequência de blocos que impactam as barreiras do lado direito	143
Figura 5.22: Frequência de blocos que danificam as barreiras do lado direito	144
Figura 5.23: Frequência de blocos que impactam as barreiras do lado esquerdo	145
Figura 5.24: Frequência de blocos que danificam as barreiras do lado esquerdo	145
Figura 5.25: Envoltórias de alturas dos blocos para as várias situações, na seção 57+800 ...	146
Figura 5.26: Frequências de invasão da pista por blocos, quando se utiliza camada de areia fofa (e = 0,40 m) para as diferentes geometrias transversais	148
Figura 5.27: Envoltórias de energia cinética para blocos de 500 kg (57+800).....	150
Figura 5.28: Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais (com barreira em rede metálica L = 4,0 m).....	150
Figura 5.29: Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais considerando proteção superficial ao longo da face do talude	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Causas dos deslizamentos e mecanismos deflagradores	24
Quadro 2.2. Glossário para nomenclatura dos deslizamentos	27
Quadro 2.3. Escala de velocidade de deslizamentos	29
Quadro 2.4. Parâmetros que determinam o comportamento das quedas de rochas	46
Quadro 2.5. Resumo das diferentes tendências dos parâmetros de análise, obtidas por pesquisadores, relacionadas aos coeficientes de restituição	51
Quadro 2.6. Principais programas empregados para a definição das trajetórias de queda de blocos, e características básicas	59
Quadro 3.1. Resumo de parâmetros para projeto geométrico	78
Quadro 4.1. Resumo dos parâmetros para os materiais empregados nas simulações de quedas de blocos	110
Quadro 5.1. Constantes para martelo “NR” Proceq©	120
Quadro 5.2. Leituras de campo e processamento para local correspondente ao 57+800	121

LISTA DE SÍMBOLOS

a :	Ângulo da linha tangente ao início da trajetória parabólica do bloco, medido em relação à horizontal.
a_x :	Componente horizontal da aceleração tangencial.
a_y :	Componente vertical da aceleração tangencial.
C_{F1}, C_{F2} :	Constante empírica própria do material.
E :	Energia do impacto.
F_1 :	Função de atrito.
F_2 :	Função de escala.
g :	Aceleração da gravidade.
$H_{R(L)}$:	Número de dureza de rebote, medido com o martelo Schmidt tipo “L”.
$H_{R(L)\text{-bloco}}$:	Número de dureza de rebote para o bloco que cai.
$H_{R(L)\text{-superf}}$:	Número de dureza de rebote para a superfície do talude.
$H_{R(N)}$:	Número de dureza de rebote, medido com o martelo Schmidt tipo “N”.
$H_{R(N)(\theta)}$:	Número de dureza de rebote, medido com o martelo Schmidt tipo “N” na direção normal à superfície da rocha.
h_n :	Altura de queda livre antes do primeiro repique, medido na direção vertical.
h_{n+1} :	Altura máxima de repique, medido na direção vertical.
I :	Momento de inércia do bloco rochoso.
I_1^- :	Impulso do bloco antes do impacto.
I_2^+ :	Impulso do bloco após do impacto.
K :	Constante de ajuste para o cálculo do fator de ajuste de R_N .
k :	Constante da mola do martelo Schmidt.
k_{des} :	Fator definido pela declividade da superfície e pelo ângulo de atrito das superfícies.
K_n :	Constante da mola na direção normal.
M :	Massa do pistão.
m :	Massa do bloco.

q :	Declividade média entre o ponto inicial e final da trajetória em queda livre (diferente da declividade do talude).
r :	Radio do bloco (ao considerar elemento esférico).
R_E :	Coeficiente de restituição em função da energia cinética
R_N :	Coeficiente de restituição normal.
R_T :	Coeficiente de restituição tangencial.
s :	Comprimento de deslocamento durante deslizamento (medido na direção paralela à do segmento).
t :	Tempo considerado para cálculo de velocidade e posição do bloco.
u :	Distância entre a linha de aplicação da força normal e o centro de gravidade do bloco.
V_{bloco} :	Velocidade do bloco logo antes de impactar a superfície.
V_i :	Velocidade do bloco antes do impacto.
V_r :	Velocidade do bloco após o impacto.
V_{N1} :	Velocidade normal à superfície, logo antes do impacto.
V_{N2} :	Velocidade normal à superfície, logo após do impacto.
V_{T1} :	Velocidade tangencial à superfície, logo antes do impacto.
V_{T2} :	Velocidade tangencial à superfície, logo após do impacto.
V_{X0} :	Componente horizontal da velocidade inicial, em queda livre.
V_{X1} :	Componente horizontal da velocidade final, em queda livre.
V_{X2} :	Componente horizontal da velocidade inicial para a segunda trajetória, em queda livre.
V_{Y0} :	Componente vertical da velocidade inicial, em queda livre.
V_{Y1} :	Componente vertical da velocidade final, em queda livre.
V_{Y2} :	Componente vertical da velocidade inicial para a segunda trajetória, em queda livre.
$V_{0 \text{ des}}$:	Velocidade inicial do bloco em deslizamento (tangente à direção do segmento).
$V_{0 \text{ rol}}$:	Velocidade inicial do bloco em rolamento (tangente à direção do segmento).
V_1 :	Velocidade do pistão quando toca o êmbolo (durante o disparo), medida na direção horizontal.

$V_{1\text{ des}}$:	Velocidade do bloco no final ou dentro do segmento de geometria constante, em deslizamento (tangente à direção do segmento).
$V_{1\text{ rol}}$:	Velocidade do bloco no tempo “t” de recorrido dentro do segmento de geometria constante, em rolamento (tangente à direção do segmento).
V_2 :	Velocidade inicial do pistão após o rebote, medida na direção horizontal.
$V_{2(\theta)}$:	Velocidade inicial do pistão após o rebote, medida para o ângulo de leitura do martelo.
w:	Teor de umidade.
w_{ot} :	Teor ótimo de umidade.
w_1 :	Velocidade angular antes do impacto.
w_2 :	Velocidade angular após do impacto.
X_0 :	Posição inicial do bloco. Em deslizamento e rolamento é medida paralela à superfície. Em queda livre é medida na direção horizontal.
X_1 :	Posição do bloco no tempo “t” de recorrido. Em deslizamento e rolamento é medida paralela à superfície. Em queda livre é medida na direção horizontal (primeiro impacto).
x_1 :	Extensão máxima da mola do martelo Schmidt (quando completamente carregada).
x_2 :	Máximo alongamento da mola do martelo Schmidt, após o rebote.
Y_0 :	Coordenada vertical inicial do bloco.
Y_1 :	Coordenada vertical final (primeiro impacto) do bloco
α :	Ângulo de declividade do talude ou do segmento de análise, medido em relação ao plano horizontal.
β :	Declividade média entre o ponto inicial e final da trajetória em queda livre (diferente da declividade do talude).
θ :	Ângulo de disparo do martelo, medido em relação ao plano horizontal.
ϕ :	Ângulo de atrito das superfícies em contacto durante o deslizamento, rolamento o repique.
ϕ_d :	Ângulo de atrito ao rolamento.
η_n :	Relação de amortecimento normal.
μ :	Coefficiente de atrito.
μ_r :	Coefficiente de atrito ao rolamento.

1. INTRODUÇÃO

Como parte do processo de desenvolvimento econômico e social do estado do Rio Grande do Sul e do Brasil, se tem implementado uma série de projetos de infraestrutura que permitirão melhorar as condições da integração intermodal nas diferentes etapas dos processos de intercâmbio de mercadorias e de passageiros, tanto em nível estadual quanto nacional e internacional.

Além do objetivo direto de integração e diminuição dos incrementos nos custos finais decorrentes do transporte, para o caso do transporte rodoviário tenta-se evitar o aumento nos fluxos veiculares dentro das zonas urbanas, que além de gerar atrasos nos deslocamentos fazem com que a infraestrutura urbana sofra rápido deterioro, necessitando investimentos com cada vez maior frequência.

Um dos projetos rodoviários mais importantes para o estado do Rio Grande do Sul é a construção da Rodovia RS-471 (identificada pelo DAER como BR-153), cujo traçado se inicia no município de Soledade (Noroeste do estado do Rio Grande do Sul) e termina na cidade de Chuí (fronteira com o Uruguai), totalizando uma extensão de 671,2 km. Esta rodovia terá um efeito importante no crescimento e viabilidade do projeto portuário de Rio Grande por facilitar o acesso das regiões agrícolas ao porto.

Embora todas as etapas da rodovia RS-471 já se encontrem em operação, diversos problemas atrasaram a entrega do Lote 2 ao tráfego. Este trecho, compreendido entre Herveiras e Vera Cruz, atravessa uma parte da Serra Gaúcha, tendo sido afetado por uma série de dificuldades técnicas que, em alguns casos não poderiam ser consideradas como superadas. Dentre as dificuldades destacam-se os processos de quedas de blocos rochosos que vem acontecendo em alguns cortes em caixão e em meia encosta, principal razão para a elaboração do presente estudo.

O Lote 2, mencionado acima, foi liberado oficialmente pelo governo do Estado para o tráfego veicular no dia 15 de dezembro do 2010. Poucas atividades tiveram que ser continuadas com o fluxo veicular liberado. Os trabalhos continuaram praticamente até o mês de junho do ano 2011 devido à ação das chuvas e problemas decorrentes da instabilização de alguns cortes pelo próprio processo construtivo.

Além dos problemas já encontrados, provavelmente outros virão a ocorrer, podendo gerar interrupções parciais ou totais no fluxo veicular e trazendo prejuízos econômicos tanto pelas obras civis necessárias para a sua correção quanto para as empresas que dependem da rodovia.

1.1. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

Taludes e encostas rochosas com descontinuidades apresentam riscos variáveis de instabilização por queda de lascas e blocos. Estes mecanismos geralmente envolvem velocidades e energias cinéticas elevadas que, além de aumentar os potenciais de danos materiais, não permitem em muitos casos que as pessoas consigam fugir sem nenhum prejuízo.

Nos casos em que a queda de rochas possa afetar populações residentes em sua zona de influência, se faz necessário implementar preferivelmente medidas que impeçam que estes mecanismos se desenvolvam. Em alguns casos onde não há presença permanente de pessoas ou as condições do projeto ou da instabilidade mesma o exijam, é possível optar por soluções que não impeçam o movimento, mas que permitam controlar seu efeito destrutivo, seja pela atenuação da energia de queda, seja pela limitação das trajetórias dos blocos, ou ambas.

Para os casos em que a topografia e o custo de desapropriação não impeçam modificações na seção transversal, o estabelecimento de áreas de retenção ou de medidas implantadas próximas do greide serve como limitação para a trajetória de queda de blocos, além de permitir operações de limpeza sem gerar interrupções totais na operação normal da rodovia.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral estabelecer de maneira objetiva se, ainda após a implementação de correções do tipo geométricas na seção transversal da rodovia, existe um risco elevado pelo efeito das quedas de blocos rochosos dentro da faixa de operação veicular. Objetiva-se compreender quais seriam os principais parâmetros geométricos a serem alterados para conseguir um comportamento seguro, ainda que haja quedas eventuais de blocos.

Para atingir o objetivo proposto, dentro do presente estudo foram definidas as seguintes etapas com resultados concretos:

- a) obter informações geológicas, geotécnicas e geométricas do projeto de construção da rodovia;

- b) dividir o Lote 2 em setores homogêneos segundo as condições geológicas e mecanismos de instabilidade presentes;
- c) identificar mediante simulações computacionais para algumas seções transversais, segundo a sua forma atual, as possíveis trajetórias de blocos rochosos e suas respectivas posições finais após consumida sua energia durante a queda;
- d) comparar os efeitos da queda de blocos rochosos com as diferentes propostas de geometria transversal da rodovia;
- e) comparar os efeitos das quedas de blocos rochosos quando implantados diferentes tipos de elementos de proteção, de uso comum principalmente em aplicações rodoviárias;
- f) definir quais das combinações entre geometrias transversais e elementos de proteção poderiam brindar o menor nível de perigo para a operação veicular.

As simulações de trajetórias de queda de blocos serão feitas por meio do programa *RocFall v. 4.0*, comercializado pela *Rocscience Inc.*(Canadá).

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Procurando uma melhor compreensão da problemática, o trabalho será dividido em seis capítulos, incluindo a sua introdução.

Será apresentada no Capítulo 2 uma revisão de bibliografia acerca dos elementos conceituais gerais dos tipos de mecanismos de instabilidade, enfatizando o que diz respeito aos maciços rochosos, elementos para o estudo da queda de blocos e elementos de proteção contra os efeitos negativos deste fenômeno.

A descrição do lote 2 da RS-471/BR-153 será feita no Capítulo 3, tanto no que diz respeito aos elementos operacionais do projeto rodoviário, quanto aos elementos geológicos que permitirão definir os setores homogêneos dentro do lote.

No Capítulo 4 será apresentada a metodologia empregada para a determinação dos parâmetros de entrada das simulações computacionais. Neste capítulo se enfatizam dois elementos fundamentais do estudo: (a) aplicação do método para a determinação do coeficiente de restituição normal (R_N) mediante o martelo Schmidt e (b) procedimentos para a obtenção das

simulações de trajetória de queda de blocos mediante o programa *RocFall*.

Os resultados das diferentes simulações feitas serão apresentados e discutidos no Capítulo 5. Serão abordadas as combinações entre geometria e elementos de proteção para a diminuição do risco por impactos de blocos.

No Capítulo 6 serão apresentadas as considerações finais da presente dissertação, assim como algumas sugestões para pesquisas posteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em termos gerais, o termo deslizamento (ou *Landslide* como é conhecido na literatura internacional) descreve o movimento relativo de uma massa de rocha, detritos ou terra na direção descendente de uma encosta ou talude com relação a uma superfície estável (CRUDEN, 1978; CRUDEN e VARNES, 1996). Existem maneiras diversas de nomear este fenômeno, como a proposta por Heidemann (2011) ao empregar o termo “Movimentos gravitacionais de Massa (MGM)”, que faz alusão aos mecanismos para os quais a força gravitacional é o principal parâmetro envolvido.

Giani (1992) aponta que, em termos gerais, as causas diretas que determinam os deslizamentos dependem dos fenômenos que contribuíram para que sejam gerados acréscimos nas tensões cisalhantes ou a diminuição da resistência ao cisalhamento no material. Para o caso do aumento das tensões cisalhantes, existem três grandes grupos de sobrecargas definidas pela condição de aplicação sobre a superfície do talude, que em algumas condições poderiam chegar a se tornar excessivas:

- a) naturais, devidas a carregamentos por água ou neve, ou pela percolação de água entre os poros do solo ou descontinuidades da rocha;
- b) devidas à ação de atividades humanas, como terraplenagem, construção de edificações, mineração, deposição de resíduos industriais;
- c) acidentais, que podem ser tanto naturais (movimentos sísmicos, atividade vulcânica) como de origem humana (detonação de cargas explosivas, equipamento pesado).

A diminuição da resistência ao cisalhamento do talude está relacionada com:

- a) erosão por cursos de água, glaciares, ciclos de molhagem e secagem;
- b) subsidências, quedas prévias de rochas, tombamentos, deslizamentos;
- c) fenômenos ligados com atividades humanas como a mineração ou escavações para obras civis.

Highland e Bobrowsky (2008) sintetizam no Quadro 2.1 as diferentes causas e situações

deflagradoras de deslizamentos.

Quadro 2.1. Causas dos deslizamentos e mecanismos deflagradores.

Causas Físicas - Deflagradoras
<ul style="list-style-type: none"> – Chuvas intensas. – Derretimento rápido de neve. – Precipitações intensas e prolongadas. – Rebaixamento rápido ou enchimentos (de fluxos e marés). – Terremotos. – Erupções vulcânicas. – Descongelamento. – Intemperismo por ciclos de congelamento e descongelamento. – Intemperismo por expansão e contração. – Inundações.

Causas Naturais	
Causas geológicas	Causas Morfológicas
– Materiais fracos, por exemplo, algumas encostas vulcânicas ou de sedimentos marinhos não adensados.	– Elevação tectônica ou vulcânica.
	– Soerguimento glacial.
– Materiais suscetíveis.	– Degelo glacial explosivo.
– Materiais intemperizados.	– Erosão fluvial no pé do talude.
– Materiais cisalhados.	– Erosão glacial no pé do talude.
– Materiais com juntas ou fissurados.	– Erosão das margens laterais.
– Descontinuidades com orientações adversas (acamamento, xistosidade).	– Erosão subterrânea (Dissolução, <i>piping</i>).
– Contrastes na permeabilidade.	– Cargas de deposição no talude ou no topo.
– Contrastes na rigidez (materiais densos e rígidos acima de materiais plásticos).	– Remoção da vegetação (por incêndios florestais, secas).

Fonte: Modificado de Highland e Bobrowsky (2008)

Quadro 2.1. (*continuação*) Causas dos deslizamentos e mecanismos deflagradores.

Causas Humanas
<ul style="list-style-type: none"> – Escavação da face do talude ou no pé. – Uso de materiais instáveis para aterros. – Carregamento da face do talude o do seu topo, como a construção de aterros no topo. – Esvaziamento ou enchimento (de reservatórios). – Desmatamento – Corte de árvores para aproveitamento ou para estabelecimento de culturas. – Irrigação de lavouras e de pastos. – Contenção de resíduos de mineração. – Vibrações artificiais, tais como as geradas por cravação de estacas, explosões, ou outras vibrações fortes do solo. – Infiltrações de água de instalações, tal como aqueduto ou esgoto. – Desvio (planejado ou não) de cursos de rios ou correntes litorâneas pela construção de molhes, diques, barragens etc.

Fonte: Modificado de Highland e Bobrowsky (2008)

Para cada um dos casos anteriores têm sido feitos amplos estudos sobre os deslizamentos, não apenas pelo seu papel na evolução das formas de relevo, mas também em função de suas implicações práticas e de sua importância desde o ponto de vista econômico (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Devido à grande diversidade de enfoques, à complexidade dos processos envolvidos e à multiplicidade de ambientes de ocorrência, não tem sido possível chegar a um sistema único de classificação dos deslizamentos (GUIDICINI e NIEBLE, 1984), mas se dispõe de algumas propostas que têm conseguido identificar e explicar uma grande quantidade de processos e mecanismos deflagradores.

2.1. TIPOS DE DESLIZAMENTOS

A multiplicidade de fatores envolvidos na geração de deslizamentos faz com que para sua identificação seja necessária a definição de mais de um parâmetro inerente a cada caso. Além disso, as diferentes conceituações geradas em diferentes momentos históricos, assim como o

fato dos campos de estudo terem sido desenvolvidos em países diferentes, resultaram em diversas propostas de critérios de classificação. Porém, em muitos casos há dificuldades para sua aplicação em condições diferentes das existentes nas regiões para as quais foram propostas.

Uma das propostas de maior aceitação, e que tem se permitido ser aplicada em nosso contexto regional, é a definida por Cruden e Varnes (1996) baseada na proposta de Varnes (1978). O critério de identificação dos deslizamentos segundo este sistema está baseado na descrição do tipo do material acompanhado por um tipo de movimento. Os materiais envolvidos são condensados em (a) solo, (b) detritos ou (c) rocha. Os movimentos em (a) queda, (b) tombamento, (c) deslizamento, (d) escoamento e (e) corridas. Quando em um mesmo deslizamento ocorrem vários movimentos de forma simultânea, a denominação do mecanismo é feita mediante a repetição destes dois parâmetros quantas vezes for necessário.

Nos casos em que se dispõe de uma maior quantidade de informação sobre as condições do deslizamento, estas poderão auxiliar na definição mais precisa do mecanismo analisado. Alguns descritores, definidos por Varnes (1978) e reproduzidos no Quadro 2.2 descrevem condições como:

- a) estado: refere-se ao comportamento do deslizamento em relação a diferentes tempos de análise;
- b) distribuição: tenta explicar as possíveis direções da massa em movimento;
- c) estilo: indica de que maneira os diferentes movimentos contribuem no deslizamento;
- d) velocidade: constitui-se em um dos principais fatores ao se associar os tipos de danos que os deslizamentos possam causar. Também permite estabelecer se o processo permitirá ou não certos tipos de intervenções ou se pelo menos a evacuação poderá ser feita (ver Quadro 2.3);
- e) teor de umidade: descritor de tipo qualitativo, que poderá ajudar na definição de fenômenos que envolvam principalmente solos;
- f) material: para o caso de rochas este termo indica o estado do material no início do deslizamento. Em solos permite definir um pouco melhor o material predominante da massa deslocada;
- g) tipo: um dos elementos básicos para a classificação do deslizamento junto ao

tipo de material. Cada uma das opções representa um modelo cinemático, em outras palavras, como o movimento é distribuído ao longo da massa deslocada (ver Figura 2.1).

Quadro 2.2. Glossário para nomenclatura dos deslizamentos.

ATIVIDADE			
Estado	Distribuição	Estilo	
Ativo	Em avanço	Complexo	
Reativado	Retrogressivo	Composto	
Suspenso	Com alargamento	Múltiplo	
Inativo:	Com ampliação	Sucessivo	
Dormente	Confinado	Simple	
– Abandonado	Com diminuição		
– Estabilizado	Em movimento		
– Reliquiar			
DESCRIÇÃO DO MOVIMENTO			
Velocidade	Teor de umidade	Material	Tipo
Extremadamente rápido	Seco	Rocha	Queda
Muito rápido	Úmido	Solo:	Tombamento
Rápido	Encharcado	– Terra	Deslizamento
Moderado	Muito encharcado	– Detritos	Escoamento
Lento			Fluxo / Corrida
Muito lento			
Extremadamente lento			

Fonte: Adaptado de Cruden e Varnes (1996)

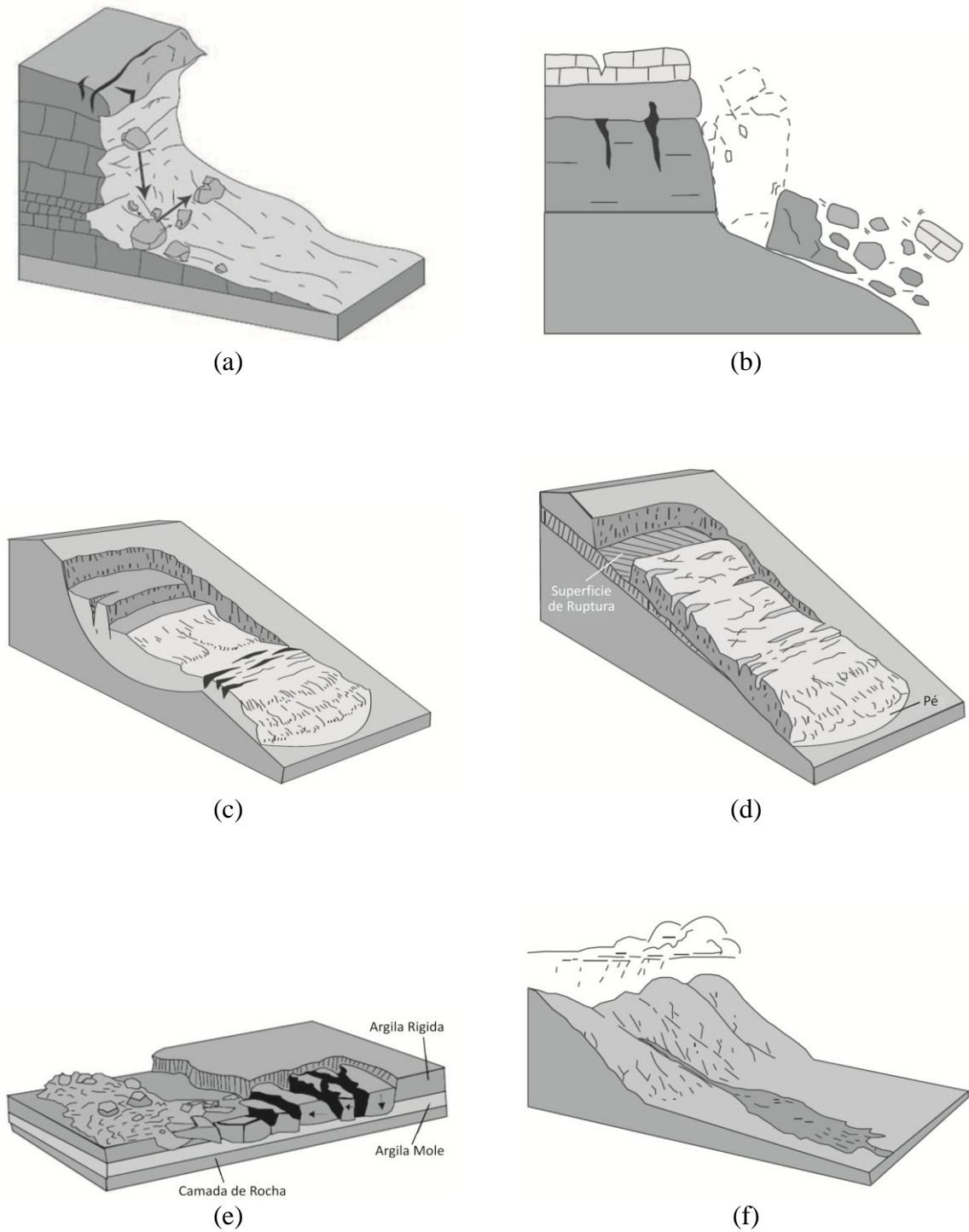


Figura 2.1: Principais tipos de deslizamentos: (a) queda; (b) tombamento; (c) deslizamento rotacional; (d) deslizamento translacional; (e) escoamento; (f) fluxo ou corrida (modificado de HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Quadro 2.3. Escala de velocidade de deslizamentos.

Classe	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade típica	Prováveis danos associados
7	Extremadamente rápido			Catastrófico. Construções destruídas pelo impacto, muitas mortes, mínima possibilidade de fuga.
		5×10^3	5 m/s	
6	Muito rápido			Algumas mortes. Devido à alta velocidade não é possível a fuga de todas as pessoas.
		5×10^1	3 m/min	
5	Rápido			Evacuação possível. Destruição de estruturas, bens e equipamentos.
		5×10^{-1}	1,8 m/h	
4	Moderado			Algumas estruturas temporárias podem ser temporariamente mantidas.
		5×10^{-3}	1,3 m/mês	
3	Lento			Obras de remediação podem ser executadas durante o movimento. Estruturas não sensíveis com manutenção frequente.
		5×10^{-5}	1,6 m/ano	
2	Muito lento			Algumas estruturas permanentes não são danificadas.
		5×10^{-7}	16 mm/ano	
1	Extremamente lento			Imperceptível sem instrumentação. Construções são possíveis se tomadas algumas precauções.

Fonte: Modificado de Cruden e Varnes (1996)

2.2. TIPOS DE INSTABILIDADES EM BLOCOS ROCHOSOS

Com exceção dos casos (pouco comuns) de maciços rochosos completamente intactos, na maioria dos casos as formações rochosas podem ser consideradas como sendo conjuntos de blocos limitados nas três dimensões por sistemas de descontinuidades (NORRISH e WYLLIE, 1996). Essas descontinuidades podem ocorrer sem seguir um padrão definido, ou seja, como distribuições aleatórias, ou também podem ser identificadas famílias de descontinuidades dentro de uma unidade rochosa.

Os sistemas de descontinuidades geralmente estão referidos a uma textura com implicações de tipo estrutural, podendo consistir em acamamentos, juntas, foliações ou qualquer outro tipo de descontinuidade dentro da massa da rocha.

Com a intenção de identificar algumas propriedades básicas das descontinuidades, sem levar em conta sua influência na resposta do padrão estrutural do maciço rochoso, foram definidos alguns parâmetros básicos de identificação:

- a) orientação: definida por dois parâmetros angulares, um primeiro horizontal chamado de direção do mergulho ou *dip direction* (definido como o azimute da linha normal ao plano da descontinuidade), e um segundo chamado de

mergulho ou *dip* (definido como a inclinação vertical do plano da descontinuidade com relação ao plano horizontal). A orientação também pode ser definida pela combinação do *dip* (mergulho) e o *strike* (correspondente ao azimute da linha que representa o plano em superfície);

- b) persistência: refere-se à continuidade da descontinuidade dentro do maciço rochoso. Este parâmetro ajuda a definir o volume da massa potencial de falha, mas sua quantificação não é simples. O método com maior nível de precisão é o mapeamento das camadas expostas;
- c) espaçamento: corresponde à distância entre duas descontinuidades dentro do mesmo conjunto medida na direção normal a elas. Juntas, a persistência e o espaçamento definem o tamanho dos blocos (PRIEST e HUDSON, 1981);
- d) propriedades superficiais: a forma das descontinuidades assim como as suas irregularidades constituem sua propriedade superficial, tendo efeito direto no comportamento ao cisalhamento;
- e) preenchimentos: este parâmetro se refere aos minerais e alguns outros materiais que possam aparecer no meio das descontinuidades. Minerais secundários como quartzos ou calcitas podem ajudar a incrementar a coesão ao longo dos planos de descontinuidade. Os materiais que compõem os preenchimentos apresentam grande suscetibilidade a serem danificados por vibrações, como as geradas por explosões, anulando totalmente o aporte coesivo para a rocha.

Estes parâmetros são fundamentais para o cálculo das condições de equilíbrio dos blocos ou da massa envolvida no deslizamento, pois além de fornecer informação geométrica sobre o problema a analisar, permitem ao projetista se aproximar à determinação das propriedades de resistência ao cisalhamento do maciço rochoso.

Os parâmetros anteriormente descritos são comuns a qualquer tipo de mecanismo de instabilidade, mas são suas grandezas que permitem determinar qual dos modelos é o mais representativo da situação em campo. A seguir, na Figura 2.2 são resumidas as formas de ruptura em taludes rochosos segundo Hoek e Londe (1974).

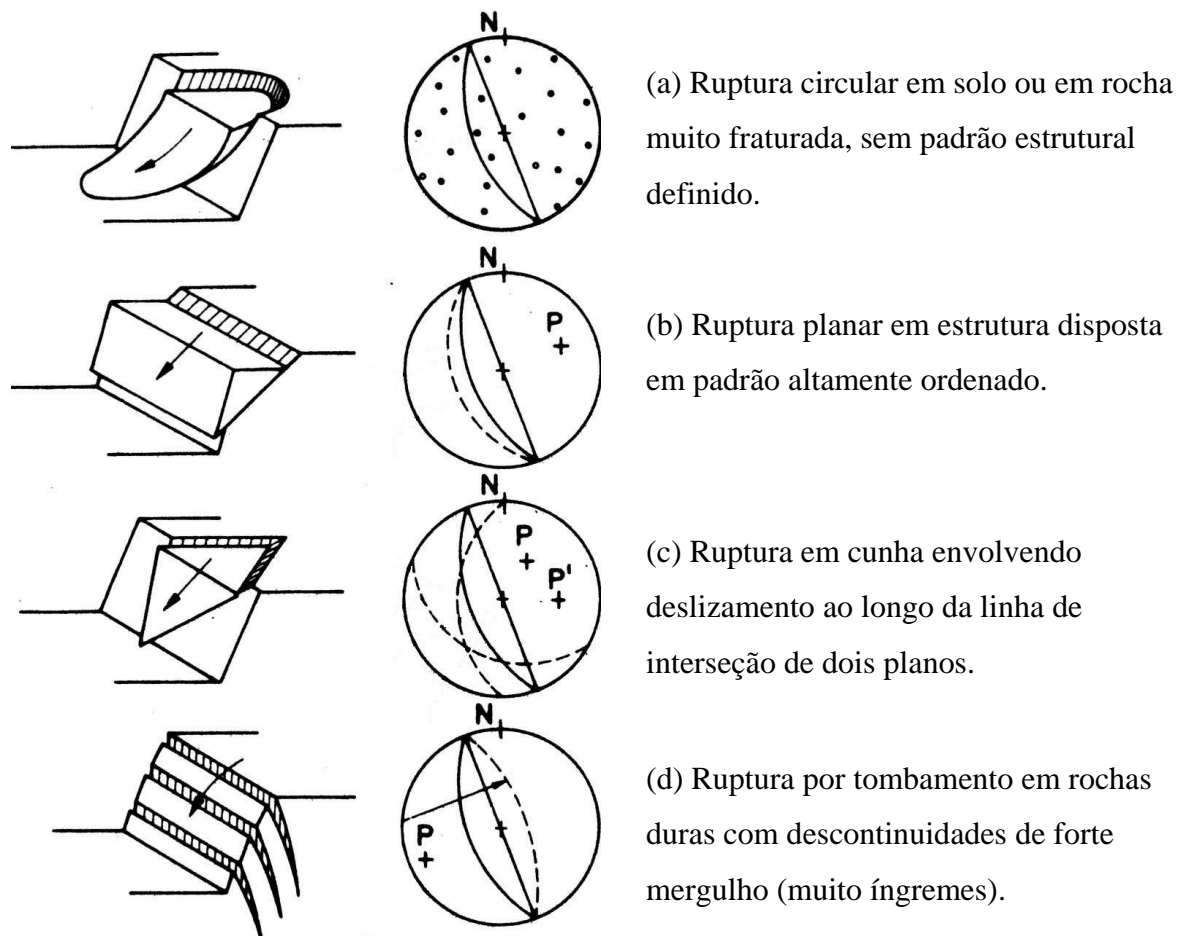


Figura 2.2: Mecanismos de ruptura em taludes rochosos (modificado de HOEK e LONDE, 1974).

2.2.1. Ruptura circular

Este mecanismo de ruptura ocorre em rochas onde a superfície de falha não é controlada predominantemente pelas descontinuidades estruturais, o que faz com que geralmente se aproxime com um arco de circunferência (ver Figura 2.2a). Os materiais nos quais este tipo de ruptura pode se desenvolver são, principalmente, rochas muito intemperizadas e com um alto grau de fraturamento. Nesse sentido, o material deste tipo de rupturas pode ser considerado como um solo com tamanho de grão muito grande.

Estes tipos de rupturas acontecem em casos em que os outros mecanismos não conseguem se desenvolver ou ocorrem de maneira simultânea sem guardar padrões visíveis, o que aconteceria quando as descontinuidades não guardassem nenhum padrão e quando as estruturas principais não estivessem orientadas com relação às condições necessárias para os outros mecanismos.

2.2.2. Ruptura planar

São aquelas em que o movimento ocorre pelo deslizamento ao longo de uma superfície simples com formato similar ao plano (ver Figura 2.2b). Norrish e Wyllie (1996) identificaram quatro condições estruturais para que este mecanismo possa se desenvolver:

- a) a direção do mergulho da descontinuidade não deve diferir em mais de 20° da direção do mergulho da face do talude;
- b) o mergulho da descontinuidade deve ser menor do que o mergulho do talude e deve aflorar na face do talude;
- c) o mergulho da descontinuidade deve ser maior do que o ângulo de atrito da superfície;
- d) o comprimento longitudinal da descontinuidade deve estar claramente definido (condição fundamental para que o processo de análise de estabilidade possa ser feito).

2.2.3. Ruptura em cunha

Este tipo de ruptura ocorre quando as massas rochosas deslizam ao longo de duas descontinuidades que se interceptam e que mergulham para fora do talude, o que permite a formação de um bloco com forma de cunha (ver Figura 2.2c). As condições identificadas para que possa acontecer esta ruptura são:

- a) o azimute da linha de intersecção das duas descontinuidades deve se aproximar com a direção do mergulho da face do talude;
- b) o mergulho da linha de intersecção deve ser menor do que o mergulho da face do talude (sob esta condição a linha de intersecção aflora na face do talude);
- c) a inclinação da linha de intersecção das duas descontinuidades deverá ser maior do que o ângulo de atrito da superfície.

A presença de níveis de poropressão significativos ao longo dos planos de falha pode, em alguns casos, incrementar as probabilidades de falhas em cunha.

2.2.4. Ruptura por tombamento

Este tipo de rupturas ocorre principalmente em maciços rochosos que apresentam acamamentos ou estão subdivididos em colunas, formando fraturas com direções de mergulho (*dip direction*) aproximadamente perpendiculares com a face do talude e mergulhos muito íngremes dentro do talude (ver Figura 2.2 d). Os tipos de rochas mais suscetíveis a este tipo de ruptura são os basaltos colunares e as rochas sedimentares com superfícies de acamamento bem definidas. As condições básicas para este tipo de ruptura são:

- a) a direção das camadas (medida angular horizontal da superfície da camada ou *strike*) deve ser aproximadamente paralela à face do talude (tem sido determinada uma diferença máxima de 20° nos *strikes* para que possa ocorrer este tipo de ruptura);
- b) o mergulho das camadas deve estar dentro do talude, não deve aparecer na face.

Em muitas situações ocorrem combinações de rochas com solos finos ou sucessões de camadas destes tipos de materiais. Nesses casos, fatores como a disposição das camadas, os tipos de materiais presentes e as propriedades de cada material individualizado ajudam a estabelecer um modelo geomecânico que permita definir qual dos materiais controlará o mecanismo de ruptura.

2.3. ASPECTOS GERAIS DAS QUEDAS DE BLOCOS

As quedas de blocos ou *Rockfalls* correspondem a processos associados à presença de descontinuidades dentro dos maciços somados ao intemperismo físico e químico (ROCHA, 2009), os quais geram elementos como blocos ou lascas de diferentes tamanhos que podem ser destacados de superfícies de rocha muito íngremes (GIANI, 1992). As quedas não necessariamente se encontram associadas a processos de ruptura maiores. Dentro da escala de velocidades proposta por Cruden e Varnes (1996) (ver Quadro 2.3), podem ser localizadas dentro das categorias de rápido até muito rápido, embora possa não existir correspondência com os níveis de dano descritos devido à variabilidade nos tamanhos dos blocos envolvidos. O deslocamento dos blocos pode ocorrer por queda livre, rolamento, deslizamento ou por salto (repique), em função da geometria da superfície do talude e do bloco, assim como da declividade (ver Figura 2.3).

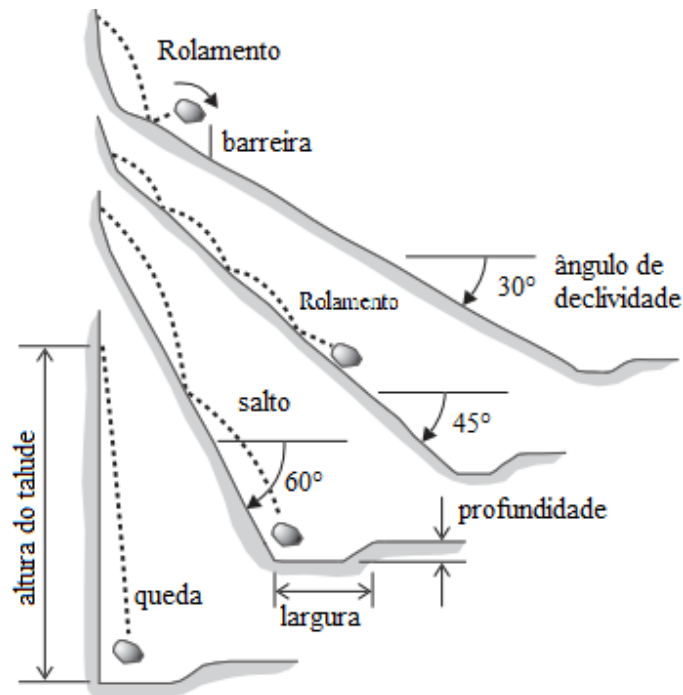


Figura 2.3: Relação do ângulo do talude com o tipo de trajetória de queda (modificado de RITCHIE, 1963).

2.3.1. Principais agentes deflagradores de quedas

Em boa parte das situações, as oscilações térmicas diárias ou sazonais provocam variações volumétricas nos maciços rochosos, as quais podem conduzi-los ao destaque de blocos (GUIDICINI e NIEBLE, 1984) ao levar as descontinuidades a condições de pressão neutra ou com resultante de forças desfavorável (GOMES, 2009). Os processos de intemperismo físicos e químicos também contribuem para o incremento da ocorrência de quedas.

Outros fatores que podem gerar quedas no momento da sua aplicação ou ainda contribuir para ocorrências futuras são as vibrações transmitidas por fontes tais como:

- a) terremotos;
- b) explosões (fator de alta incidência durante o processo construtivo ou permanente se for o caso de um minério ou uma jazida);
- c) tráfego pesado.

Em muitos casos, mesmo após um talude produzido por um corte rodoviário ter completado algumas décadas, ele pode manter quedas constantes de blocos decorrentes dos processos de intemperismo, que fazem com que as propriedades mecânicas da superfície mudem,

geralmente diminuindo a resistência da sua superfície (WYLLIE e MAH, 2004). Em obras novas, o efeito ainda se atribui ao processo executivo e aos fatores mencionados anteriormente.

Nos casos em que as quedas possam constituir fatores de perigo para as populações, caso não seja possível conter totalmente os blocos, sempre será melhor evitar a ocupação das áreas localizadas dentro das suas respectivas trajetórias de queda.

2.3.2. Tipos de mecanismos e trajetórias de queda

Durante o processo de queda será gerada uma trajetória em função da energia desenvolvida pelo bloco em movimento e da sua geometria, assim como da topografia da superfície de contacto, decorrente da combinação de diferentes mecanismos básicos de queda, para os quais existem procedimentos de análise claramente diferenciados.

Uma parte muito importante no estudo das quedas de blocos é a definição de modelos matemáticos que permitam calcular o alcance e energia desenvolvidos por cada bloco, visando a obtenção de parâmetros para o dimensionamento dos elementos de proteção necessários para a mitigação ou eliminação do seu poder destrutivo. As diferentes expressões matemáticas propostas por vários autores (RITCHIE, 1963; WU, 1985; PFEIFFER e BOWEN, 1989; AZZONI *et al*, 1995; GIANI, 2004) têm a sua origem direta nos conceitos da física clássica de movimento parabólico, da conservação da quantidade de movimento e de colisões, mas em alguns casos há necessidade da incorporação de critérios de ajuste.

2.3.2.1. Deslizamento

Para condições em que a resultante das forças atuantes sobre o bloco é mantida dentro do plano de contato com a superfície do talude, ocorrerá deslocamento por deslizamento. Também será necessário que as forças normais à superfície do talude sejam o suficientemente pequenas em relação às tangenciais, para evitar assim que o bloco comece a descrever trajetórias parabólicas ou a executar repiques. A ocorrência deste tipo de mecanismo, assim como os principais parâmetros requeridos para a sua análise matemática são ilustrados na Figura 2.4.

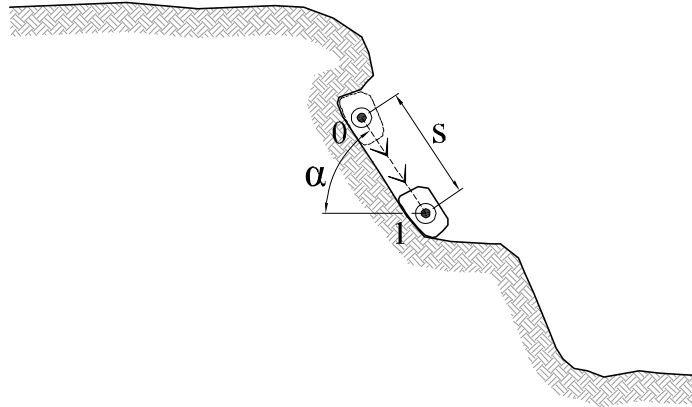


Figura 2.4: Condições e variáveis envolvidas nas trajetórias por deslizamento.

Este tipo de mecanismo tende a acontecer em blocos com formato aplanado até prismático, e quando a topografia da superfície do talude e a sua textura forem o suficientemente lisas para não gerarem saltos ou rotação.

Em muitos casos os autores tendem a combinar as equações para este mecanismo com as de rolamento, devido às escassas situações em que este tipo de mecanismo ocorre, além que em muitos casos, na medida em que os blocos ganhem velocidade, o mais comum é que eles comecem a executar rolamentos e repiques, gerando fraturamento dos cantos até se aproximar com blocos com formato arredondado, situação mais comum em rochas sedimentares ou, em geral, com graus de alteração elevados (GIANI, 1992).

As condições para que o mecanismo de deslizamento possa se desenvolver estão determinadas, em primeiro lugar, pela declividade da superfície do talude, existindo três situações possíveis (STEVENS, 1998):

- a) $\alpha = \phi$: o ângulo de declividade do talude é igual ao ângulo de atrito das superfícies em contato, o valor da força atuante é igual ao da resistente. Sob esta condição poderá acontecer que (a) o bloco deslize com velocidade constante ou (b) também poderá se manter em equilíbrio estático ($V = 0$);
- b) $\alpha > \phi$: a declividade do talude é maior que o ângulo de atrito entre as duas superfícies em contato. O deslizamento sofrerá variações de velocidade, podendo ser positivas ou negativas em função do ângulo de deslocamento. A velocidade do bloco é determinada pela Equação 1:

$$V_{1\text{des}} = \sqrt{V_{0\text{des}}^2 - 2 * s * g * k_{\text{des}}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $V_{1\text{des}}$: velocidade do bloco no final ou dentro do segmento de geometria constante;

$V_{0\text{des}}$: velocidade inicial do bloco (tangente à direção do segmento);

s : comprimento do deslocamento (medido em direção paralela à do segmento);

g : aceleração da gravidade;

k_{des} : fator definido pela declividade da superfície e pelo ângulo de atrito das superfícies.

O valor de k_{des} é definido segundo a Equação 2:

$$k_{\text{des}} = \pm \text{sen } \alpha - \text{cos } \alpha * \tan \phi \quad \text{Equação 2}$$

Onde: α : declividade da superfície no segmento de análise;

ϕ : ângulo de atrito entre as duas superfícies em contato (talude e bloco);

\pm é positivo quando a direção da velocidade do bloco é descendente ou zero;

\pm é negativo quando a direção da velocidade do bloco é ascendente.

c) $\alpha < \phi$: o ângulo de declividade do talude é menor que o ângulo de atrito das superfícies em contato, a força resistente é maior do que a força gerada pelo deslocamento. O bloco diminuirá a sua velocidade, podendo se deter dentro do segmento analisado se este for o suficientemente extenso. A determinação da distância necessária para que o bloco consiga se deter é feita mediante a Equação 3:

$$s = \frac{V_{0\text{des}}^2}{2 * g * k_{\text{des}}} \quad \text{Equação 3}$$

Caso a distância seja maior do que a disponível no segmento, devem-se

verificar as condições e o tipo de trajetória do bloco dentro do segmento seguinte. As condições iniciais para a análise seguinte correspondem às finais para o segmento anterior.

2.3.2.2. Rolamento

Como foi mencionado no item anterior, alguns autores tendem a combinar os mecanismos de rolamento e deslizamento, principalmente para efeitos do desenvolvimento de ferramentas de análise computacional. Algumas ferramentas consideram o rolamento como sendo o mecanismo mais crítico ao desconsiderar para as suas análises a dissipação de energia por causa do atrito.

Para efeitos da apresentação completa dos mecanismos de queda, decidiu-se fornecer as equações próprias para o rolamento (AZZONI *et al*, 1995) sem levar em conta as considerações da ferramenta empregada para o presente estudo. Os parâmetros envolvidos no cálculo das condições de rolamento encontram-se resumidos na Figura 2.5.

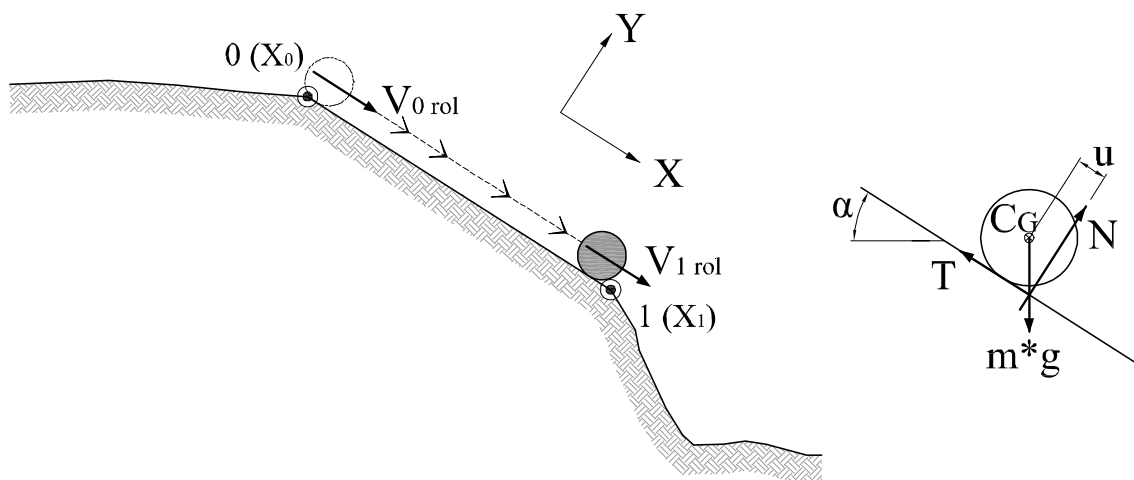


Figura 2.5: Condições e variáveis envolvidas nas trajetórias por rolamento.

O modelo proposto por Azzoni *et al* (1995) considera que os blocos em rolamento mantêm um formato esférico e que a superfície do talude não apresenta irregularidades, permitindo desprezar qualquer possibilidade de repique do bloco;

De forma análoga ao caso dos deslizamentos (item 2.3.2.1), podem acontecer três situações em função da declividade do talude e do ângulo de atrito do bloco. Neste caso o ângulo de

atrito está associado a um coeficiente de atrito ao rolamento expressado como μ_r ou como a tangente de ϕ_d . Algumas ferramentas de análise consideram $\phi_d = \phi$ (para deslizamento), permitindo assim integrar ambos os mecanismos em um só. Segundo Azzoni *et al* (1995), o valor do coeficiente de atrito ao rolamento é determinado pela a Equação 4.

$$\mu_r = \frac{u}{r} = \tan \phi_d = \tan \alpha - \frac{V_{1\text{ rol}}^2 - V_{0\text{ rol}}^2}{2 * A * g * \cos \alpha * (X_1 - X_0)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: $\mu_r = \tan \phi_d$: coeficiente de atrito ao rolamento;

u: distância entre a linha de aplicação da força normal e o centro de gravidade do bloco;

$V_{0\text{ rol}}$: velocidade inicial do bloco;

$V_{1\text{ rol}}$: velocidade do bloco no tempo “t”;

X_0 : posição inicial do bloco;

X_1 : posição do bloco no tempo “t”;

α : declividade da superfície;

A: Parâmetro calculado pela Equação 5.

$$A = \frac{m}{m + \frac{I}{r^2}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: m: massa do bloco;

I: momento de inércia do bloco (ver Equação 20);

r: radio do bloco (considerando elemento esférico).

Durante o deslocamento por rolamento só há componente da velocidade paralela à superfície do talude, a qual se determina com a Equação 6.

$$V_{1\text{ rol}} = \sqrt{2 * A * g * \cos \alpha * (\tan \alpha - \tan \phi_d) * (X_1 - X_0) + V_{0\text{ rol}}^2} \quad \text{Equação 6}$$

Caso a superfície apresente alguma variação na sua declividade, o segmento com declividade diferente terá que ser considerado como um segmento diferente do anterior.

Caso o bloco em rolamento chegar a se deter antes de percorrer a totalidade do segmento com declividade constante, a Equação 7 permitirá determinar a sua posição:

$$X_1 = \frac{1}{2} * A * g * \cos \alpha * (\tan \alpha - \tan \phi_d) * t^2 + V_{0_{rol}}^2 * t + X_0 \quad \text{Equação 7}$$

O tempo necessário para o bloco chegar à posição de repouso poderá ser calculado mediante a Equação 8.

$$t = \frac{V_{1_{rol}} - V_{0_{rol}}}{A * g * \cos \alpha * (\tan \alpha - \tan \phi_d)} \quad \text{Equação 8}$$

2.3.2.3. Queda livre

Para os casos em que o bloco consiga se afastar da superfície de contato, seja por declividades muito íngremes ou por variações abruptas na geometria do talude, surgirá o mecanismo de queda livre, descrevendo uma trajetória parabólica até atingir novamente alguma superfície (ver Figura 2.6).

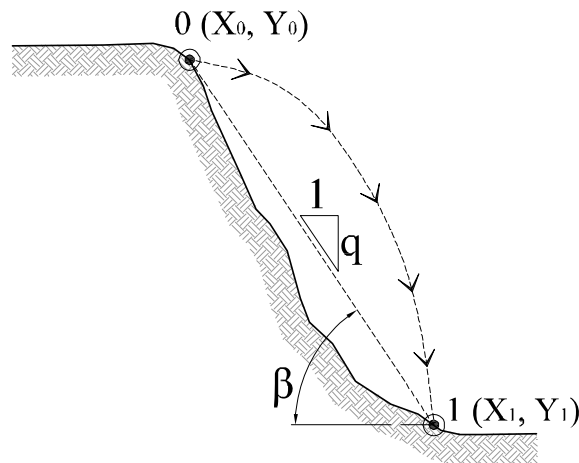


Figura 2.6: Condições e variáveis envolvidas nas trajetórias por queda livre.

Para o estudo de quedas de blocos desconsidera-se o efeito do atrito gerado pelo contato entre o bloco e o ar, fazendo com que o mecanismo de queda se ajuste às condições apresentadas nas Equações 9 e 10:

$$a_x = 0 \quad \rightarrow \quad V_{x1} = V_{x0} \quad \text{Equação 9}$$

$$a_y = -g \quad \rightarrow \quad V_{y1} = V_{y0} + g * t \quad \text{Equação 10}$$

- Onde: V_{x1} : componente horizontal da velocidade final (primeiro impacto);
 V_{y1} : componente vertical da velocidade final (primeiro impacto);
 V_{x0} : componente horizontal da velocidade inicial;
 V_{y0} : componente vertical da velocidade inicial;
 a_x : componente horizontal da aceleração tangencial;
 a_y : componente vertical da aceleração tangencial.

O ponto de impacto corresponde à interseção entre a parábola descrita pelo bloco com a linha reta que representa a superfície do talude. Para a sua determinação é necessário determinar o tempo requerido para o impacto, a partir da resolução da equação quadrática apresentada na Equação 11:

$$\left(\frac{1}{2}g\right) * t^2 + (V_{y0} - q * V_{x0}) t + [Y_0 - Y_1 + q * (X_1 - X_0)] = 0 \quad \text{Equação 11}$$

- Onde: t : tempo até o primeiro impacto do bloco na superfície;
 g : aceleração da gravidade;
 X_0 : coordenada horizontal inicial do bloco;
 Y_0 : coordenada vertical inicial do bloco;
 X_1 : coordenada horizontal final (primeiro impacto) do bloco;
 Y_1 : coordenada vertical final (primeiro impacto) do bloco;
 q : declividade média entre o ponto inicial (saída) e final (primeiro impacto) do bloco.

Uma vez determinado o tempo até o impacto, as coordenadas deste ponto poderão ser calculadas segundo as Equações 12, 13 e 14:

$$X_1 = V_{x0} * t + X_0 \quad \text{Equação 12}$$

$$Y_1 = \frac{1}{2} * g * t^2 + V_{Y0} * t + Y_0 \quad \text{Equação 13}$$

$$\beta = \tan^{-1}(q) \quad \text{Equação 14}$$

Uma vez que o impacto aconteça, deverá de ser analisado o próximo mecanismo deste bloco, definindo-se o ponto final da trajetória anterior como sendo o ponto inicial da trajetória seguinte.

2.3.2.4. Repique

Diferentemente dos mecanismos anteriores, o repique não corresponde a um mecanismo que pode ocorrer de maneira independente dos outros mencionados. Mais precisamente, o repique se encontra associado à ocorrência inicial de uma queda livre, podendo depois acontecer qualquer um dos outros três.

Para que após o repique o movimento possa se tornar deslizamento ou rolamento é necessário que a componente da velocidade normal ao talude seja muito pequena em relação à horizontal. Devido ao fato de numericamente não ser fácil obter uma altura de repique igual a zero, é recomendado principalmente por autores que têm desenvolvido ferramentas computacionais, a adoção de um valor mínimo de altura a partir do qual seja considerada uma mudança no mecanismo de queda. Para o caso do programa *RocFall*, a altura mínima considerada é 0,02 mm (STEVENS, 1998).

A descrição do mecanismo de repique com queda livre após o impacto se encontra ilustrada na Figura 2.7. Para o caso de rolamento ou deslizamento, após o impacto, a primeira parte do mecanismo é mantida constante e, na segunda parte, só o vetor de velocidade normal adotará um valor de zero. Se houver deslizamento, o vetor de velocidade angular também adotará um valor nulo.

Conforme apresentado na Figura 2.7, a primeira parte do processo está definida pela queda livre do bloco (Equação 11 até 14). Uma vez que o bloco atinja a superfície do talude, para efeito de dissipação de energia pelo impacto, a velocidade deverá ser definida em termos da direção normal e tangencial (ver Equações 15 e 16).

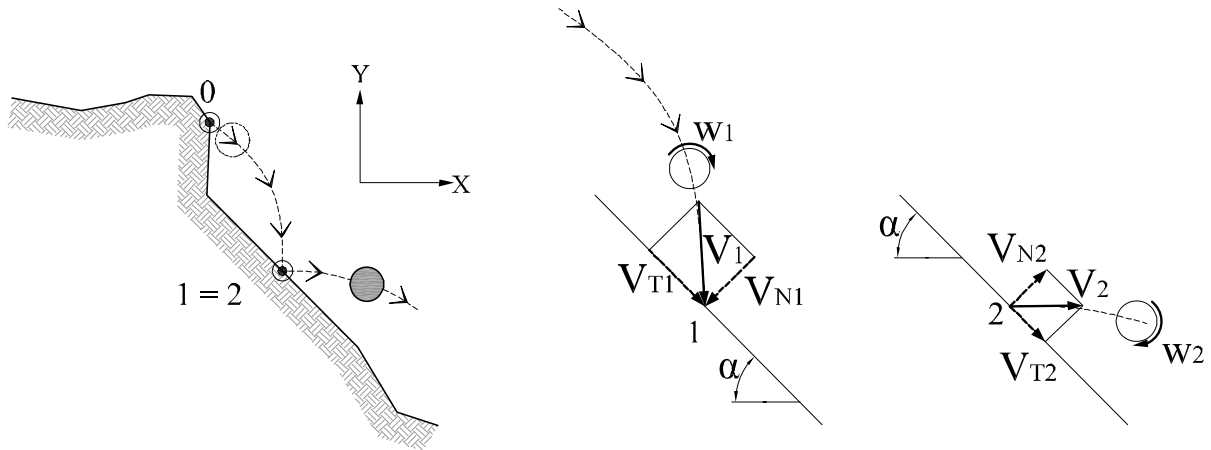


Figura 2.7: Condições e variáveis envolvidas no cálculo envolvendo repique.

$$V_{N1} = V_{Y1} * \cos \alpha - V_{X1} * \sin \alpha \quad \text{Equação 15}$$

$$V_{T1} = V_{Y1} * \sin \alpha + V_{X1} * \cos \alpha \quad \text{Equação 16}$$

- Onde: V_{N1} : componente da velocidade normal à superfície do talude (logo antes do primeiro impacto);
 V_{T1} : componente da velocidade tangencial à superfície do talude (logo antes do primeiro impacto).

A partir das condições determinadas logo antes do impacto será possível calcular as condições após o impacto, aplicando os coeficientes de restituição normal e tangencial. Se desconsiderado efeito da rotação do bloco poderão ser empregadas as Equações 17 e 18:

$$V_{N2} = V_{N1} * R_N \quad \text{Equação 17}$$

$$V_{T2} = V_{T1} * R_T \quad \text{Equação 18}$$

- Onde: V_{N2} : componente da velocidade normal à superfície do talude (logo após do primeiro impacto);
 V_{T2} : componente da velocidade tangencial à superfície do talude (logo após do primeiro impacto), desconsiderando-se o efeito de rotação do bloco.

Considerando-se o efeito de rotação gerado no bloco após o impacto contra a superfície,

Pfeiffer e Bowen (1989) propuseram a seguinte expressão (Equação 19):

$$V_{T2} = \sqrt{\frac{r^2 * (I * w_1^2 + m * V_{T1}^2) * F_1 * F_2}{I + m * r^2}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde: r: raio do bloco (considerado como sendo esférico);
 I: momento de inércia do bloco;
 w₁: velocidade angular (logo antes do impacto);
 m: massa do bloco;
 F₁: função de atrito;
 F₂: função de escala;

A Equação 19 considera o bloco como sendo esférico. O valor do momento de inércia para elementos esféricos é dado pela Equação 20:

$$I = \frac{2}{5} m * r^2 \quad \text{Equação 20}$$

Os valores das funções F₁ e F₂ são dados pelas seguintes Equações 21 e 22:

$$F_1 = R_T + \frac{1 - R_T}{\left(\frac{V_{T1} * w_1 * r}{C_{F1}}\right)^2 + 1.2} \quad \text{Equação 21}$$

$$F_2 = \frac{R_T}{\left(\frac{V_{N1}}{C_{F2} * R_N}\right)^2 + 1} \quad \text{Equação 22}$$

C_{F1} e C_{F2} correspondem a constantes empíricas próprias de cada tipo de material. Devido à falta deste tipo de informação em vários pontos onde foram desenvolvidos seus trabalhos, Dorren *et al* (2004) modificaram a Equação 19 ficando da seguinte maneira:

$$V_{T2} = \sqrt{\frac{r^2 * (I * w_1^2 + m * V_{T1}^2) * R_T}{I + m * r^2}} \quad \text{Equação 23}$$

Tendo considerado a velocidade angular, o valor de V_{N2} é determinado mediante a Equação 17.

Para calcular as condições iniciais para a segunda trajetória descrita pelo bloco, as velocidades se expressaram em relação ao sistema X-Y, seguindo as Equações 24 até 26, a seguir:

$$V_{X2} = V_{N2} * \text{sen } \alpha + V_{T2} * \text{cos } \alpha \quad \text{Equação 24}$$

$$V_{Y2} = V_{T2} * \text{sen } \alpha - V_{N2} * \text{cos } \alpha \quad \text{Equação 25}$$

$$w_2 = \frac{V_{T2}}{r} \quad \text{Equação 26}$$

Esta análise será feita para cada segmento de talude, considerando-se cada processo de lançamento, voo e impacto como uma série de individual de cálculos. Para cada análise, as condições finais do impacto anterior corresponderão às iniciais do seguinte, conforme segue:

- a) $X_{1 \text{ (anterior)}} = X_{0 \text{ (novo)}}$;
- b) $Y_{1 \text{ (anterior)}} = Y_{0 \text{ (novo)}}$;
- c) $V_{X2 \text{ (anterior)}} = V_{X0 \text{ (novo)}}$;
- d) $V_{Y2 \text{ (anterior)}} = V_{Y0 \text{ (novo)}}$;
- e) $w_2 = w_1$.

2.3.3. Parâmetros envolvidos no cálculo de trajetórias de queda de blocos

Nas quedas de blocos além do processo sofrido pelo elemento que cai, ocorre interação com os materiais que compõem as diferentes superfícies por ele impactadas.

Para a definição das condições e efeitos de uma queda de blocos, também é necessária a caracterização da totalidade dos elementos envolvidos e o conhecimento prévio dos possíveis mecanismos a serem desenvolvidos em cada caso.

Diversos autores têm procurado resumir os principais parâmetros que determinam as quedas de blocos, em uma tentativa de melhorar o nível de compreensão do fenômeno a partir da definição objetiva de cada parâmetro. A seguir, no Quadro 2.4 é apresentada uma classificação, considerada abrangente e didática, proposta por Pfeiffer e Bowen (1989).

Quadro 2.4. Parâmetros que determinam o comportamento das quedas de rochas .

Fator	Parâmetro
Geometria do talude	Declividade do talude.
	Comprimento do talude.
	Rugosidade superficial.
	Variabilidade lateral.
Propriedades do material do talude	Coefficientes do talude.
	Coefficientes da rocha.
Geometria do bloco	Tamanho da rocha.
	Forma da rocha.
Propriedades do material do bloco	Durabilidade da rocha.
	Massa da rocha.

Fonte: Pfeiffer e Bowen (1989)

Devido à dificuldade para a determinação dos diversos parâmetros apresentados acima, segundo o método de análise adotado são feitas algumas considerações para cada um dos fatores descritos.

No mesmo trabalho, Pfeiffer e Bowen (1989) listam uma série de considerações visando a redução no número de parâmetros e possíveis incertezas que poderiam atrapalhar a definição das trajetórias e efeitos das rochas que caem. No presente estudo, em função das ferramentas empregadas, estas considerações foram adaptadas conforme segue:

- a) embora alguns modelos permitam analisar as quedas considerando o talude como uma superfície (análises 3D), ainda hoje boa parte dos modelos trabalha considerando o talude como um perfil (análises 2D). Neste este último caso, o perfil crítico de queda de blocos será determinado pelas investigações de campo, de maneira que o perfil resultante poderá ou não coincidir com a seção transversal normal do local. Sob esta condição a variabilidade lateral do talude é desconsiderada;
- b) devido às dificuldades para gerar a combinação dos parâmetros bloco – superfície pela quantidade de situações possíveis de acontecer, principalmente quando os blocos forem oriundos de diferentes camadas dentro do mesmo talude que impactam, se assume que as propriedades definidas para a superfície

também correspondem às do bloco;

- c) durante a queda qualquer quebra do bloco se constitui como um fator de dissipação de energia. A situação mais crítica corresponde àquela em que o bloco mantenha a sua forma inicial, pelo que em muitos tipos de análises é desconsiderada a quebra do material;
- d) para a determinação da inércia do bloco, muitas ferramentas os consideram como sendo esféricos, por ser a geometria que conduz aos resultados mais críticos quando comparados com outras formas geométricas.

Como parte do presente estudo, são apresentados em detalhe os elementos conceituais dos coeficientes de restituição, por ser o elemento central a ser obtido de maneira experimental. Os outros parâmetros serão mencionados em termos da sua sensibilidade segundo a experiência compilada por diversos autores.

2.3.3.1. Coeficientes de restituição

Em termos conceituais, Jiang *et al* (2008) propuseram um modelo mecânico tentando ilustrar o mecanismo de interação entre um elemento em movimento de colisão e uma superfície inclinada, podendo identificar as variáveis envolvidas. Para este estudo o modelo foi adaptado, sendo apresentado na Figura 2.8.

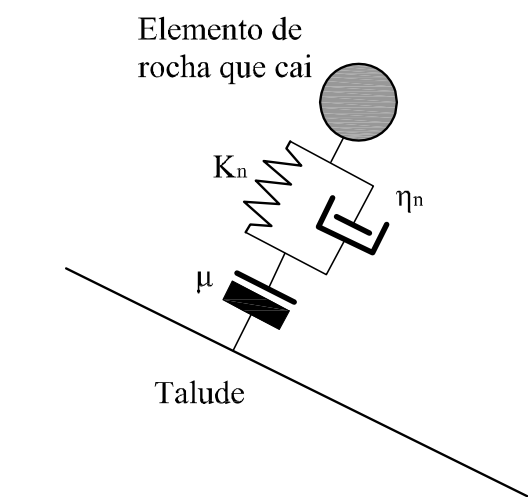


Figura 2.8: Modelo mecânico que representa os parâmetros associados ao repique de blocos (modificado de Jiang *et al*, 2008).

Onde: K_n : constante da mola na direção normal;
 η_n : relação de amortecimento normal;
 μ : coeficiente de atrito.

Na Figura 2.8 são apresentados três parâmetros: os dois primeiros afetando a direção normal à superfície e o terceiro relacionado à direção tangencial à superfície de impacto.

Dentro da área de estudo das quedas de rochas, esta análise é feita pela comparação das propriedades de movimento do bloco logo antes e logo após o impacto. O fator resultante desta comparação é chamado coeficiente de restituição.

Estes parâmetros, definidos pela física clássica dentro da teoria de colisões, visam estabelecer a quantidade de energia dissipada pelo impacto entre dois corpos, permitindo assim definir as condições do deslocamento após o contato.

Ainda não existe consenso na definição do conceito de coeficiente de restituição, mas há consenso na necessidade de diferenciá-lo separadamente, segundo a direção normal e a direção tangencial à superfície de impacto. Em concordância com o modelo apresentado na Figura 2.8 se pode afirmar que o coeficiente definido pela parcela normal à superfície está relacionado com um efeito combinado, ao se considerar uma parcela elástica (K_n) e uma plástica dada pelo amortecimento do impacto (η_n). A parcela tangencial à superfície está condicionada pelo atrito entre as duas superfícies em contato (μ).

Devido às diferentes abordagens pelas quais têm sido estudados os coeficientes de restituição, alguns deles estão definidos da mesma maneira que na teoria de colisões de Newton como a relação de velocidades antes e após o impacto (WU, 1985; SPANG e RAUTENSTRAUCH, 1989) (Equações 27 e 28):

$$R_N = \frac{V_{N2}}{V_{N1}} \quad \text{Equação 27}$$

$$R_T = \frac{V_{T2}}{V_{T1}} \quad \text{Equação 28}$$

Outras abordagens, como a apresentada por Chau (1999), em função do impulso antes do impacto e posterior ao mesmo. Se a massa do bloco não apresentar variação, a equação ficaria expressa em termos da velocidade do bloco (Equação 29):

$$R_I = \frac{I_2^+}{I_1^-} = \frac{V_r}{V_i} \quad \text{Equação 29}$$

Em outros trabalhos os coeficientes têm sido expressos em função da dissipação de energia cinética (CHAU, 1999; 2002). No final, se o bloco não sofrer alteração por perda de massa, a equação será expressa também em termos de velocidade (Equação 30):

$$R_E = \frac{\frac{1}{2} * m * V_r^2}{\frac{1}{2} * m * V_i^2} = \frac{V_r^2}{V_i^2} \quad \text{Equação 30}$$

Quando considerada a energia rotacional do bloco, o coeficiente de restituição poderá ser calculado mediante a Equação 31:

$$R_E = \frac{\frac{1}{2} * m * V_r^2 + \frac{1}{2} * I * w_2^2}{\frac{1}{2} * m * V_i^2 + \frac{1}{2} * I * w_1^2} \quad \text{Equação 31}$$

Para a determinação dos coeficientes de restituição a partir de técnicas laboratoriais ou de campo, Dias e Barroso (2006) empregam as Equações 32 e 33 em função das alturas antes e após o primeiro repique de um bloco esférico. A descrição das variáveis de cálculo é ilustrada na Figura 2.9.

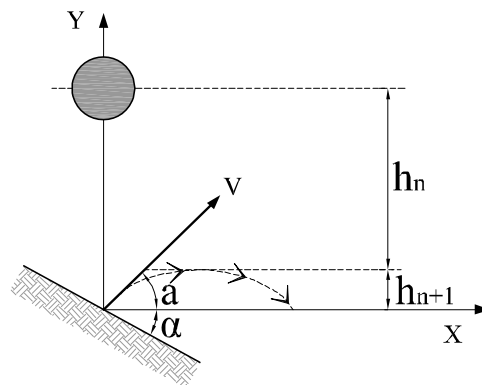


Figura 2.9: Parâmetros medidos para a colisão de uma esfera com um plano inclinado (DIAS e BARROSO, 2006).

$$R_N = \frac{\text{sen}(a + \alpha)}{\text{sen } a * \text{sen } \alpha} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad \text{Equação 32}$$

$$R_T = \frac{\cos(a + \alpha)}{\sin a \cdot \sin \alpha} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad \text{Equação 33}$$

Quanto à classificação das faixas dos coeficientes de restituição normal e tangencial, Chau (2002) apresenta uma proposta com base em uma coletânea de valores obtidos em diferentes pesquisas, tanto próprios como de outros autores (ver Figura 2.10). Nota-se que mediante ensaios em campo, em algumas pesquisas recentes, se tem encontrado valores maiores do que a unidade (BUZZI *et al*, 2012).

2.3.3.2. Variações dos outros fatores envolvidos

Segundo Wadell (1932) *apud* Wang e Lee (2010), os padrões geométricos assim como as propriedades dos materiais que caem, terão influência no comportamento do processo de queda:

- a) quando a esfericidade aumentar, o número de vezes que o bloco repicará diminuirá, mas aumentará a sua altura;
- b) o formato da rocha também gerará impactos nos deslocamentos horizontais (deslizamento);
- c) o volume das rochas que caem gera um impacto menor quando elas atingem certo nível de velocidade;
- d) Okura *et al* (2000) apontam que a distância de repique de rochas com dimensões iguais não é influenciada pela sua massa;
- e) no mesmo trabalho, Okura *et al* (2000) também concluem que a distância alcançada pelos blocos é diretamente proporcional ao seu volume (ou número de blocos envolvidos);
- f) a distância do centro de gravidade de um acúmulo de rochas, após serem depositadas, é inversamente proporcional ao volume.

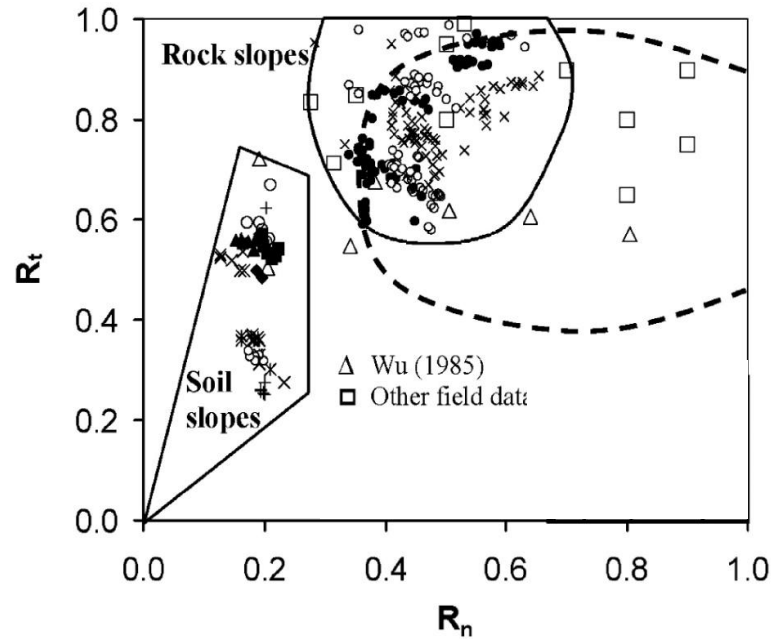


Figura 2.10: Proposta gráfica para identificar intervalos de coeficiente de restituição para grandes grupos de materiais (CHAU, 2002).

Heidenreich (2004) apresenta um resumo das diferentes tendências obtidas por pesquisadores relacionadas aos coeficientes de restituição (ver Quadro 2.5).

Quadro 2.5. Resumo das diferentes tendências dos parâmetros de análise, obtidas por pesquisadores, relacionadas aos coeficientes de restituição.

	Parâmetro	R_N	R_T	Material do solo	Referência
BLOCO	Massa do bloco ↑	↓		Concreto, rocha	Ushiro <i>et al</i> , 2000
				Concreto	Kamijo, 2000
	Angularidade ↑ (mudança do formato desde esfera até bloco angular, ex: cubo)	↓	↑ (levemente)	Granito	Wong <i>et al</i> , 2000
MATERIAL DO SOLO	Módulo de Elasticidade ↑	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$: -	↓ (levemente)	Gesso	Chau <i>et al</i> , 2000
		$60^\circ < \alpha < 75^\circ$: ↑			
		↑	↑	Encostas naturais	Pfeiffer e Bowen, 1989
	Densidade seca ↑	↑	↑	Encostas naturais	Fornaro <i>et al</i> , 1990
		↑	↑	Solo, gesso, rocha	Chau <i>et al</i> , 2002; Wu, 1985
Teor de água ↑	$w < w_{ot}$: ↑	$w < w_{ot}$: ↑	Solo, gesso	Chau <i>et al</i> , 1999	
	$w > w_{ot}$: -	$w > w_{ot}$: -			
	$w < w_{ot}$: -	$w < w_{ot}$: -			
	$w > w_{ot}$: ↑	$w > w_{ot}$: ↓			

Quadro 2.5. (Continuação) Resumo das diferentes tendências dos parâmetros de análise, obtidas por pesquisadores, relacionadas aos coeficientes de restituição.

Parâmetro		R_N	R_T	Material do solo	Referência
CINEMÁTICA	Ângulo de impacto $\theta \uparrow$ em relação ao Ângulo do talude $\alpha \downarrow$	↓	↑ (levemente)	Madeira, rocha	Wu, 1985
		↓ (levemente)		Granito, concreto projetado	Wong <i>et al</i> , 2000
		↓		Gesso, solo	
		↓ (levemente)	-	Granito, concreto projetado	Chau <i>et al</i> , 2002
		↓	-	Gesso, solo	
	Altura de queda $H \uparrow$ em relação à Velocidade de impacto \uparrow	↓ (menos do que R_T)	↓	Calcário	Urciuoli, 1988
				Concreto	Kamijo, 2000
		↓ (levemente)	-	Concreto, rocha	Ushiro <i>et al</i> , 2000

Fonte: Modificado de Heidenreich (2004)

2.3.4. Procedimentos de estudo das quedas

Devido à impossibilidade de conseguir a determinação de todos os fatores envolvidos nos processos de quedas, além da grande variabilidade de alguns deles, os estudos práticos e pesquisas têm seguido dois métodos básicos:

- a) observação do fenômeno de queda, e obtenção dos parâmetros mediante retro-análise;
- b) definição dos parâmetros de maior influência seja por procedimentos experimentais ou empregando fontes bibliográficas. Com estes valores será possível obter os pontos de impacto ou da totalidade da trajetória definida pelo bloco.

Seja qual for o método seguido, será necessário o uso de mais do que um dos procedimentos descritos a seguir, às vezes por necessidade de obter valores pontuais, ou também para obter correlações com valores propostos.

2.3.4.1. Procedimentos de campo

Dentre as vantagens deste tipo de procedimentos ressalta-se o fato de eles levarem em conta as condições próprias do local de estudo tais como:

- a) geometria;
- b) rugosidade superficial;
- c) tipos de materiais, níveis diferenciados de alteração e de fraturamento.

Além da observação direta do fenômeno, os resultados das quedas ou dos lançamentos controlados de blocos ao longo das superfícies podem ser registrados para a determinação dos parâmetros de restituição por retro-análise, seja pela medição direta dos pontos de início, impacto e posição final do bloco, seja pela filmagem de todo o processo empregando câmeras de alta velocidade (SPADARI et al, 2012). A seguir são descritos alguns dos procedimentos mais comuns executados em campo:

- a) **obtenção da posição final (de repouso) do bloco:** este procedimento tem a vantagem de poder ser executado a partir de quedas aleatórias de blocos como também por lançamentos controlados (RITCHIE, 1963; WU, 1985; PIERSON et al, 2001). Quando são estudadas unicamente as quedas aleatórias, dificilmente poderá ser visualizado o ponto de origem da queda limitando a análise, sobretudo quando existem diferentes fontes de queda distribuídas na altura do talude.

Quando são executados lançamentos, recomenda-se o emprego de blocos com o maior tamanho provável para o local para visualizar a condição mais crítica para uma queda, sendo recomendado o emprego de equipamentos com capacidade suficiente para manipular as rochas de ensaio, além de conseguir manter fixas as condições iniciais da queda (posição e velocidade) (ver Figura 2.11);



Figura 2.11: Procedimento de lançamento de blocos (PIERSON *et al*, 2001).

b) **obtenção da trajetória de queda:** este procedimento permite a visualização completa da trajetória de bloco, a partir do emprego de câmeras de alta velocidade localizadas paralelamente à direção da queda e com marcos de referência para a posterior leitura das coordenadas do bloco nos tempos correspondentes a cada quadro de filme.

A obtenção da trajetória completa pode ser feita mediante a inserção das diferentes posições do bloco dentro de um mesmo quadro (ver Figura 2.12).

Um dos requisitos para este tipo de procedimento é que as dimensões e massa do bloco devem ser mantidas constantes ao longo do processo de queda, caso isto não fosse possível para totalidade da trajetória, a retro-análise só será válida para a parcela em que as condições foram mantidas constantes.

O outro requisito necessário para a retro-análise é a obtenção do perfil topográfico detalhado do plano da trajetória e a identificação dos diferentes tipos de materiais presentes nele.

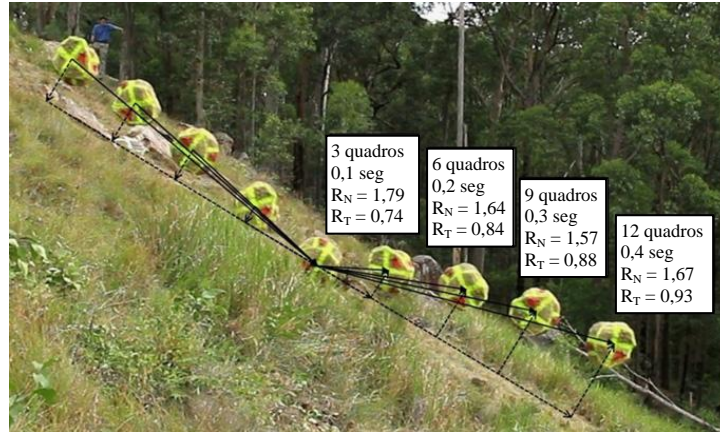


Figura 2.12: Reconstrução da trajetória de queda mediante filmagem de alta velocidade (SPADARI *et al*, 2012).

Durante a análise dos quadros de filmagem também é possível determinar a velocidade angular do bloco, para o que será útil desenhar pontos de referência em diferentes pontos dele.

c) **estudos de evidências em elementos da paisagem:** este tipo de procedimento, baseado na identificação de pontos de impacto em elementos do local, principalmente em árvores, permite obter informação sobre quedas acontecidas em vários anos, desde que os blocos tenham impactado algum elemento.

A informação pode ser obtida mediante a identificação de cicatrizes nos troncos das árvores. A obtenção das datas aproximadas das quedas é realizada mediante uma técnica chamada de “dendrogeomorfologia” explicada amplamente por Stoffel (2005), que consiste na determinação da idade da árvore segundo os anéis existentes no seu tronco e do período entre formação de anéis consecutivos. Assim, quando encontrada uma cicatriz em um determinado anel, é possível obter informação sobre o ano de ocorrência do impacto.

Esta técnica, mais do que permitir a determinação de trajetórias de queda, permite obter informação com alguma precisão sobre a frequência de ocorrência de quedas e os caminhos preferenciais dos blocos. Uma desvantagem desta técnica é que nem em todos os casos os blocos impactam as árvores (ver Figura 2.13 direita), além da alteração que estes impactos conferiram às trajetórias dos blocos.

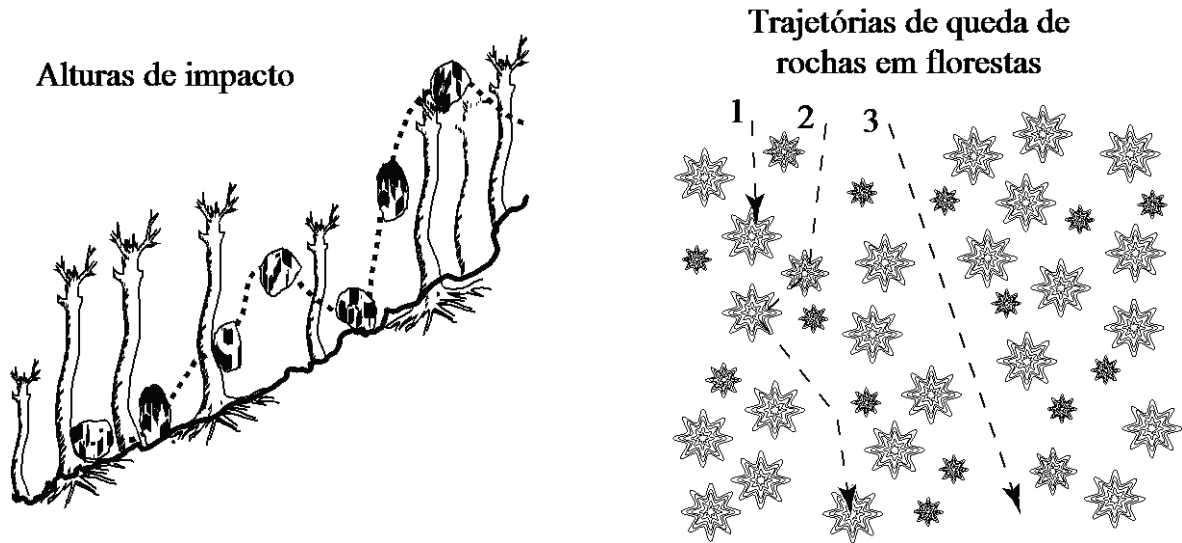


Figura 2.13: Marcas deixadas por impactos de blocos em árvores (STOFFEL, 2005).

As maiores dificuldades para a realização de ensaios em campo estão associadas com os custos e segurança das pessoas e infraestruturas localizadas próximas de pontos das trajetórias. No entanto, sempre que possível recomenda-se a realização deste tipo de ensaios, para permitir ajustar modelos matemáticos e soluções propostas para casos determinados.

2.3.4.2. Procedimentos de laboratório

Este tipo de procedimento pode ser realizado em modelos reduzidos ou em alguns casos, a grande escala (HEIDENREICH, 2004). Dependendo do caso, é obtida informação para a totalidade da trajetória (CHAU *et al*, 2002; GIANI *et al*, 2004), ou também para o primeiro impacto somente (RAYUDU, 1997; PENG, 2000).

Uma das vantagens deste tipo de procedimentos é o de poder isolar a variabilidade de materiais em campo, visando a determinação de parâmetros de restituição para um único material, permitindo obter valores típicos.

Neste tipo de procedimentos, a trajetória de queda de um bloco não é o resultado de maior importância, mas ela serve para a determinação de todos ou de alguns parâmetros necessários para a aplicação em condições de campo.

As metodologias de captura da informação fornecida pelo ensaio guardam estreita relação com as de campo. Na Figura 2.14 é apresentado um procedimento comum de ensaio, com um elemento esférico e a rocha posicionada sobre uma superfície fixa.

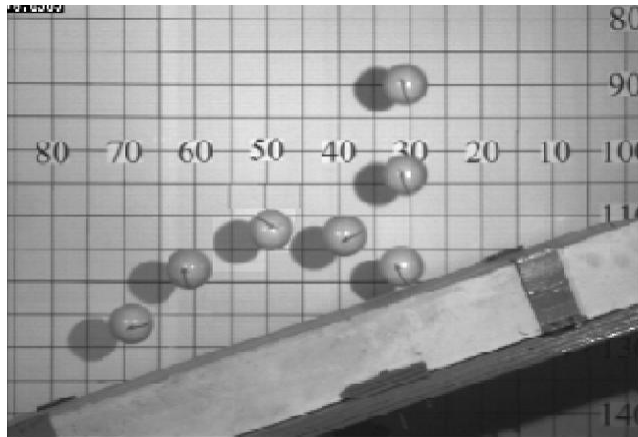


Figura 2.14: Trajetória de queda obtida para um elemento esférico sobre uma laje fixa (CHAU *et al*, 2002).

Outros autores, como Dias e Barroso (2006) a partir do trabalho desenvolvido por Cavalcante (2002), determinaram para uma superfície plana (ângulo de declividade = 0) o valor do coeficiente de restituição normal (R_N) mediante a medição do tempo entre registros sonoros emitidos por cada impacto de uma esfera sobre a superfície do material estudado. Heidenreich (2007) fez determinações em modelos a grande escala, variando o formato do bloco assim como o ângulo de impacto, sobre superfícies de areia. Nos trabalhos desenvolvidos por Rayudu (1997) e por Peng (2000), de grande interesse para o presente estudo, foram obtidas correlações com as leituras feitas com o martelo Schmidt. No estudo feito por Rayudu, foram ensaiadas superfícies de rocha impactado-as com esferas de aço e, no caso de Peng, foram ensaiadas superfícies impactado-as com esferas de aço, de rocha, e com blocos não esféricos.

2.3.4.3. Análise computacional

Conforme o avanço da tecnologia computacional, diversos programas têm sido criados para auxiliar o processo de simulação de quedas de blocos. Estes programas dependem das condições próprias para cada local e dos parâmetros dos materiais, obtidos por ensaios em campo, em laboratório, ou em alguns casos, pela experiência consignada na bibliografia.

Tal como descreve Heidenreich (2004), os principais objetivos dos programas de cálculo de quedas de blocos são:

- a) trajetórias potenciais;
- b) alturas de repique, velocidades e energias alcançadas durante a queda;
- c) distâncias máximas de deslocamento, visando determinar áreas sob-risco.

Os resultados obtidos mediante estes programas são de grande ajuda durante o processo de dimensionamento de elementos de proteção e na delimitação de áreas de alto risco.

Os programas podem ser classificados em duas categorias, segundo a formulação utilizada (GIANI, 1992):

- a) **métodos rigorosos (*rigorous methods*)**: levam em conta o formato do bloco, seu volume e massa. Permitem considerar os quatro tipos de movimento gerador de trajetória (ver 2.3.2). São considerados os de maior nível de precisão, porém os que maior quantidade de informação requerem, sendo também os de mais difícil aplicação;
- b) **métodos de massa concentrada (*lumped-mass methods*)**: desconsideram o formato do bloco e o seu volume. Geralmente a resistência do ar também é desconsiderada. Este tipo de método não permite levar em conta o movimento por rotação, obrigando a fazer ajustes nos coeficientes de restituição se este tipo de movimento for esperado.

Alguns programas fazem algumas considerações internas sobre a geometria do bloco (geralmente considerado como sendo esférico), visando incluir a rotação dentro dos parâmetros da trajetória, sendo chamados comumente de “híbridos”.

A maioria dos programas desenvolvidos contempla o deslocamento dos blocos unicamente dentro do plano, deixando a tarefa de identificação do plano crítico em campo ao julgamento e experiência das pessoas encarregadas do processo. Alguns programas permitem fazer análises tridimensionais, exigindo para isto um maior volume de dados sobre o perfil do terreno.

As variações impostas pelas irregularidades do bloco e da superfície, assim como pelos parâmetros de cálculo, fazem com que alguns programas permitam o ingresso das propriedades do material considerando uma variabilidade estatística, assim como variações locais na geometria da superfície. Nos programas que não admitem estas variações, chamados de “determinísticos”, a simulação será feita considerando os valores como sendo os mais críticos, e as trajetórias geradas a partir de um mesmo ponto sempre serão iguais. Para o caso contrário dos programas classificados como “probabilísticos”, para um mesmo ponto de origem serão geradas múltiplas trajetórias de queda, em função das dispersões impostas aos materiais e às superfícies (ver Quadro 2.6.).

Quadro 2.6. Principais programas empregados para a definição das trajetórias de queda de blocos, e características básicas.

Ano	Autor(es)	Nome do programa	Dimensões	Aproximação	Probabilístico
1976	Piteau e Clayton	<i>Computer Rockfall Model</i>	2-D	Massa concentrada	Parcialmente
1982, 86	Bozzolo e Pamini	SASS – MASSI	2-D	Híbrido	Sim
1985	Bassato <i>et al</i>	<i>Rotolamento Salto Massi</i>	2-D	Massa concentrada	Não
1987	Descoedres e Zimmermann	Eboul	3-D	Rigorouso	Não
1989, 91	Pfeiffer e Bowen	CRSP	2-D	Híbrido	Sim
1990	Kobayashi <i>et al</i>	-	2-D	Rigorouso	Não
1991, 95	Azzoni <i>et at</i>	CADMA	2-D	Híbrido	Sim
1991	Scioldo	Rotomap	3-D	Massa concentrada	Não
1998	Stevens	RocFall	2-D	Híbrido	Sim
1999	Paronuzzi e Artini	Mobyrock	2-D	Massa concentrada	Sim
2000	Jones <i>et al</i>	CRSP 4.0	2-D	Híbrido	Sim
2002	Guzzetti <i>et al</i>	STONE	3-D	Massa concentrada	Sim

Fonte: Modificado de Guzzetti *et al* (2002)

2.4. ELEMENTOS DE PROTEÇÃO OU DE MITIGAÇÃO DOS EFEITOS NEGATIVOS DAS QUEDAS

Nos casos em que não for possível a definição de mudanças ou relocação dos projetos, seja por questões técnicas, econômicas ou sociais, se faz necessário estabelecer medidas de proteção para evitar ou, ao menos, diminuir o perigo de danos à infraestrutura, ferimentos ou fatalidades nas pessoas que as usam e moram próximo delas.

Para estas situações, GeoRio (1999) *apud* Rocha (2009), estabeleceu uma divisão geral dos tipos de decisões a respeito de taludes rochosos, sendo que para um mesmo caso podem ser definidas uma ou várias repostas segundo a complexidade técnica e o nível de perigo, a saber:

- a) **eliminação do problema de instabilidade:** consiste na remoção do elemento instável (bloco ou lascas). Este tipo de solução é viável em casos em que existem condições para o processo executivo e quando a eliminação do elemento não geraria outras instabilidades ou impactos maiores. O processo de remoção pode ser feito mediante técnicas manuais, explosivos, ou por meios

mecânicos (equipamento pesado ou polímero expansivo) (ROCHA, 2009);

- b) **estabilização:** neste caso, o elemento instável ou potencialmente instável será estabilizado por meios físicos ou mecânicos, tentando levar as deformações no maciço até um valor de zero ou diminuir o avanço dos processos de intemperismo. As soluções de estabilização são chamadas também de Ativas (2.4.1). Dentro destas técnicas são também levados em conta os processos de modificação geométrica ou de abatimento do talude;
- c) **convivência com o problema:** estes tipos de decisões incluem todas as alternativas que, mesmo permitindo a ocorrência da queda do bloco, impedem com que este venha a gerar impactos negativos, seja pela proteção pontual da infraestrutura ou ao impedir que este desenvolva a sua trajetória de queda completamente. Estes tipos de soluções são conhecidas também como Passivas (item 2.4.2).

A seguir, é apresentada uma coletânea de alguns dos principais elementos de proteção, tanto ativos quanto passivos encontrados em diferentes fontes. Observe-se que não foi feita a descrição da totalidade dos elementos existentes, mas estão apresentados os mais empregados no Brasil e América Latina.

As soluções envolvendo revegetação de espécies gramíneas ou de grande porte não foram contempladas no presente estudo, pois foram consideradas só as medidas de proteção de rápida execução. Devido à diversidade de soluções ecotecnológicas, não é possível enquadrá-las dentro de um único tipo de proteção, podendo fazer parte de ambas simultaneamente. No trabalho desenvolvido por Lemes (2001) são feitas algumas recomendações sobre a conveniência ou não da adoção deste tipo de soluções. Norris *et al* (2008) fornecem alguns procedimentos para o cálculo dos espaçamentos entre árvores ao longo da encosta em função das dimensões dos blocos prováveis de cair. CARVALHO (1991) faz uma série de recomendações orientadas a taludes rodoviários.

2.4.1. Proteções ativas

Tal como foi mencionado acima, o objetivo deste tipo de mecanismos de proteção é o de eliminar qualquer sinal de deslocamento dos blocos, sejam eles gerados pelo desconfinamento do maciço seja pelos processos de intemperismo nas faces expostas.

Os muros de arrimo, quando possíveis, são considerados também como soluções ativas. No entanto, embora a sua aplicação possa diminuir possíveis quedas de blocos, a sua função principal está associada com a contenção de encostas cuja estabilidade global se encontre comprometida.

2.4.1.1. Proteções superficiais

Dentro destas proteções identificam-se quatro técnicas principais: revestimento com argamassa, instalação de redes metálicas ancoradas, drenagem (superficial e/ou profunda), e revegetação.

- a) **Revestimento com argamassa:** esta técnica é aplicada comumente mediante o uso do concreto projetado, com a ajuda de malhas metálicas de reforço para variações de temperatura e processos de retração mecânica, chumbadores e elementos de drenagem profunda (ver Figura 2.15).



Figura 2.15: Aplicação de concreto projetado (Fonte: Solofort).

O emprego desta técnica permite auxiliar o maciço de duas maneiras: Estabilizando os blocos prováveis de cair, e protegendo a superfície contra os processos de degradação por intemperismo.

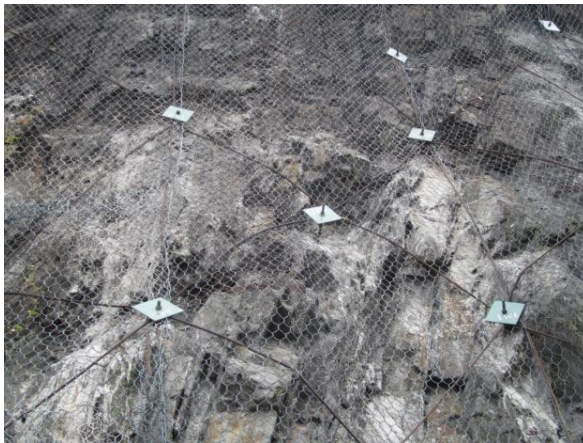
Esta técnica não é recomendada quando o maciço encontra-se em condições de fraturamento intenso, devido às dificuldades para conseguir uma ancoragem estável dos chumbadores.

Os processos de acumulação de água e incrementos na pressão hidrostática no

tardoz da camada de concreto podem chegar a destruir áreas completas do revestimento. Além disto, a degradação do concreto pelo ataque químico da água e o intemperismo podem chegar a diminuir dramaticamente a vida útil desta técnica.

b) **Instalação de redes metálicas ancoradas:** esta técnica, empregada cada vez com maior frequência, possui a vantagem de não precisar de drenagem para o seu funcionamento (salvo se a integridade do maciço assim a requeira). A proteção contra erosão da superfície pode ser realizada mediante o uso de elementos para revegetação de maneira combinada com os elementos de suporte estruturais (ver Figura 2.16).

Nesta técnica, o elemento principal de contenção superficial corresponde à rede ou redes metálicas, a reação é fornecida por um sistema de chumbadores como no caso do concreto projetado.



(a)



(b)

Figura 2.16: Estabilização por redes metálicas e chumbadores (Fonte: Geobrugg).

Uma das principais vantagens desta técnica são os rigorosos controles de qualidade, que com exceção dos chumbadores, são feitos a partir da fábrica (GERBER, 2006; FHWA, 2005).

2.4.1.2. Estruturas de contenção ou de suporte

Para casos em que o tamanho do bloco em condição de instabilidade potencial é importante, e a sua remoção é difícil, a sua estabilização mediante elementos pontuais tais como grelhas ancoradas ou contrafortes é uma solução atraente (ver Figura 2.17).

As grelhas correspondem a estruturas tipicamente constituídas por vigas horizontais e verticais em concreto reforçado, que são adaptadas às irregularidades da face do talude rochoso, protegendo uma área específica, e com ancoragens protendidas posicionadas nas interseções das vigas (ABNT, 2009). Este tipo de elemento se emprega em taludes rochosos fraturados com presença de blocos muito grandes justapostos ou taludes com foliação de mergulho desfavorável (ROCHA, 2009).

Os contrafortes são estruturas de concreto reforçado, adaptadas às irregularidades da face do talude rochosos, associadas ou não a ancoragens, chumbadores ou grampos, trabalhando principalmente à compressão e aplicadas como apoio ou calçamento de blocos rochosos (ROCHA, 2009).



Figura 2.17: Uso de contrafortes e grelhas ancoradas (Fonte: Geo-Rio).

2.4.1.3. Drenagem

Esta técnica de estabilização comumente se encontra associada com alguma das soluções anteriores, salvo nos casos em que a instabilidades são geradas unicamente por excessos nas pressões hidrostáticas dentro do maciço ou por fluxos contínuos ou sazonais entre as descontinuidades do maciço.

Dependendo da situação particular, podem-se usar um ou mais dos seguintes tipos de drenagem:

- a) **superficial:** estes elementos têm como função a captação do escoamento das águas superficiais (CARVALHO, 1991) e a sua condução para um local

conveniente. Com o emprego da drenagem superficial evitam-se os fenômenos de erosão na superfície dos taludes e reduz-se a infiltração da água nos maciços.

Em muitos casos, a execução deste tipo de estruturas consegue uma elevada relação benefício/custo, uma vez que, com investimentos bastante reduzidos, conseguem-se excelentes resultados.

Os principais elementos empregados para a drenagem superficial são as sarjetas ou valetas para a captação das águas de escoamento, e por canais tipo “escadas d’água” ou por tubulações para a sua condução até lugares adequados. Para topografias bastante íngremes, se faz necessária a construção de caixas de dissipação da energia hidráulica, diminuindo com isto o risco de erosão da própria estrutura de drenagem.

- b) **profunda:** neste caso, o objetivo principal é retirar as águas de percolação interna do talude (do fluxo através dos poros em materiais finos ou de discontinuidades em maciços rochosos ou saprolíticos) (CARVALHO, 1991), diminuindo assim as vazões de percolação e as pressões hidrostáticas.

Os elementos de drenagem profunda sempre estarão associados a elementos de drenagem superficial para condução do fluido drenado do maciço para um lugar adequado.

Dependendo das condições do maciço e das vazões a serem retiradas do seu interior, podem ser utilizados drenos sub-horizontais profundos (DHP), trincheiras, galerias e barbacãs.

2.4.2. Proteções passivas

Às vezes, por limitações técnicas ou econômicas, não existem condições para impedir o destacamento de blocos e sua posterior queda, sendo necessária então a convivência com o problema garantindo a integridade das estruturas possíveis a serem afetadas, assim como a vida das pessoas.

Em muitos dos casos, a instalação do elemento de proteção é feita visando economia no processo executivo, e também facilidade de manutenção, reparação, e quando forem necessárias, operações de remoção de blocos durante a operação. É assim como a maioria

deste tipo de estruturas encontra-se tipicamente localizada próxima a estradas ou zonas com fácil acesso veicular.

A decisão de implantar um destes tipos de elementos de proteção é condicionada por fatores como:

- a) disponibilidade e conhecimento do tipo de tecnologia;
- b) custos de instalação e de manutenção;
- c) resistência máxima ante os impactos;
- d) durabilidade do sistema;

Em termos da resistência para alguns tipos de elementos, Descoeudres (1997) estabeleceu uma proposta de escala para auxiliar a decisão em função da energia desenvolvida pelo bloco de projeto (Figura 2.18).

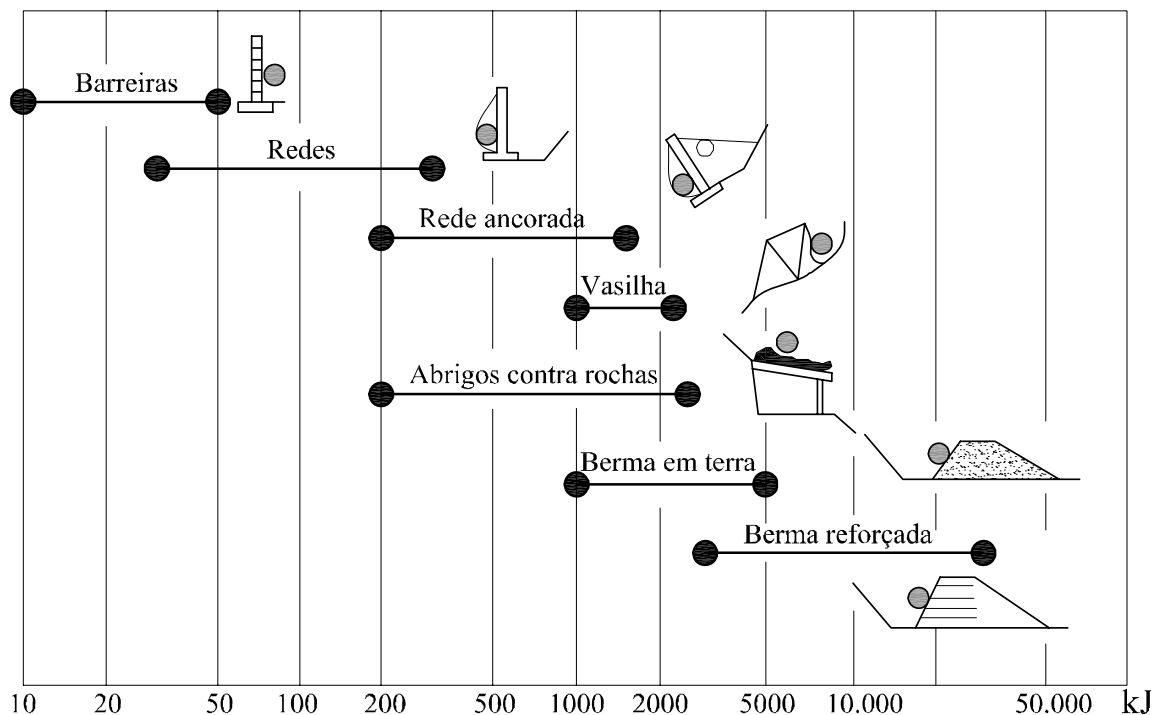


Figura 2.18: Capacidades de dissipação de energia para diferentes elementos de proteção (DESCOEUDRES, 1997).

Em relação à figura anterior é preciso comentar que, para muitos dos casos ilustrados, o nível de desenvolvimento tecnológico de alguns sistemas vem fazendo com que estes limites estejam sendo ultrapassados de forma significativa. Só como exemplo, já existem redes

ancoradas sendo comercializadas com capacidades de projeto de até 8.000 kJ (GEOBRUGG, 2012).

2.4.2.1. Corte em banquetas

Uma das principais vantagens deste método é a sua facilidade de implantação ao longo do processo executivo (com exceção dos taludes naturais). Para o caso de taludes em rocha, existem ainda outras vantagens, tais como:

- a) pode ajudar na estabilidade global do talude ao se conseguir uma diminuição das tensões na base do talude;
- b) permite limitar os ganhos de velocidade e energia cinética dos blocos mediante trajetórias mais curtas de queda livre;
- c) para o caso de desmonte com explosivos, não é comum encontrar perfuratrizes com alcances muito longos, tendo que criar pelo menos algumas banquetas para permitir a operação do equipamento.

O resultado típico da construção de banquetas é apresentado na Figura 2.19.



Figura 2.19: Corte rochoso em banquetas.

No entanto, em alguns casos a existência das banquetas faz com que, durante os processos de repique, alguns blocos consigam atingir grandes distâncias nas suas trajetórias. Além disto, o processo de manutenção e limpeza destas banquetas pode ser bastante complicado e custoso em algumas situações, principalmente para aquelas localizadas em taludes muito altos.

Os efeitos da existência ou não das banquetas serão apresentados no capítulo 5 do presente estudo.

2.4.2.2. Implantação de áreas para retenção de blocos

A existência de uma área destinada para ser impactada pelos blocos oriundos do talude, e que também sirva para retenção e depósito destes materiais, vem sendo estudado amplamente por diferentes pesquisadores e instituições, principalmente em estradas. Com isto os blocos não põem em risco a infraestrutura, veículos e pessoas. Uma das principais vantagens deste tipo de solução é a sua facilidade construtiva (ver Figura 2.20), com uma limitação topográfica em alguns casos.



Figura 2.20: Área de retenção de blocos.

A partir da observação de muitas quedas, Ritchie (1963) conseguiu estabelecer algumas relações entre altura e declividade do talude, para assim definir as dimensões mínimas de uma área localizada no pé do talude a partir da qual os blocos conseguissem invadir a área destinada ao tráfego veicular. A FHWA (1989) adaptou a proposta do Ritchie em um gráfico para projeto, permitindo assim sua rápida aplicação.

Posteriormente, Pierson *et al* (2001) fizeram novos testes ampliando o intervalo de declividades para o talude e para a área de retenção de blocos, assim como a declividade do talude, para assim definir umas cartas de projeto atualizadas, incorporando valores de efetividade como parâmetro de decisão para o projetista. Pantelidis (2010) fez a comparação com curvas obtidas mediante simulação numérica.

Este tipo de solução tende a apresentar um bom comportamento, mas que pode ser facilmente melhorado com a incorporação de outro tipo de medida de proteção, como será apresentado no capítulo 5.

Infelizmente, mesmo as correções e atualizações feitas ao processo de dimensionamento destas áreas, em alguns casos ainda podem representar perigo para a operação veicular, principalmente em situações possíveis de tombamento pelos fortes desníveis entre pista e o fundo da área.

2.4.2.3. Barreiras rígidas verticais

Em alguns casos, a instalação de uma barreira rígida próxima da área de tráfego veicular ou de presença de pessoas pode ajudar a conter uma boa parte dos blocos que, de outra forma conseguiriam ingressar nela.

Segundo ABNT (2009), este tipo de estrutura encontra-se associada a uma área plana atrás da face interna do muro, destinada ao amortecimento do impacto. A largura da área de amortecimento e a altura do muro devem ser determinadas de tal maneira que seja possível atender às trajetórias dos blocos e as suas energias (ver Figura 2.21).



(a)



(b)

Figura 2.21: Barreiras de proteção rígidas (Fonte: (a) Geobruigg; (b) PANTELIDIS e KOKKALIN, 2011).

Algumas das principais dificuldades deste tipo de sistema são listadas a seguir:

- a) em algumas situações são necessárias grandes alturas para obter altas percentagens de retenção, não sendo compatível com as requeridas para impacto de veículos (NCHRP, 1993; 2010);

- b) este tipo de solução requer uma área para acumulação de blocos, embora menor que para o caso anterior, além da área destinada para acostamento e drenagem superficial da pista de rolamento, fazendo com que somatória da largura total da escavação possa ser bastante grande;
- c) as tarefas de manutenção da barreira consistem na maioria dos casos em substituição de um módulo completo, caso este tenha sido danificado pelo impacto de um ou mais blocos;

2.4.2.4. Barreiras flexíveis

O conceito sob o qual se projetam estes tipos de elementos é o de conseguir a detenção dos blocos de uma maneira gradual, reduzindo assim a existência de picos de carga durante o impacto.

A combinação de elementos de alta resistência e com grande capacidade global de deformação fazem com que o sistema possa conter solicitações de alta energia, quando comparados com barreiras rígidas (ver Figura 2.18).

Estão constituídas por uma série de elementos esbeltos de aço: postes, redes de aço, redes de anéis de aço, cabos, dispositivos de frenagem e ancoragens. A energia cinética dos blocos é absorvida através de deformações elásticas e/ou plásticas dos materiais, assim como pelo deslizamento entre os seus componentes (FARRAND, 2007).

Uma vantagem deste tipo de sistemas é a sua versatilidade, podendo ser empregados concomitantemente com outras soluções, ou também como solução única quando as limitações de espaço impedem a implantação de algum outro sistema de proteção (ex: locais com taludes muito íngremes e de grande altura, sem possibilidade de áreas de retenção de blocos).

Algumas das disposições mais comuns para este tipo de barreiras são apresentadas a seguir:

- a) **barreira ancorada com cabos:** em casos quando além de evitar que o bloco atinja uma área determinada, não se dispõe de espaço para a sua disposição, é necessário que a barreira esteja habilitada para acumular os materiais até que eles possam ser removidos do local (ver Figura 2.22).

Nesses casos, a barreira estará ancorada diretamente no maciço, e conectada por um cabo que também estará equipado com mecanismos dissipadores de

energia, caso ocorra uma carga de magnitude próxima à de projeto.

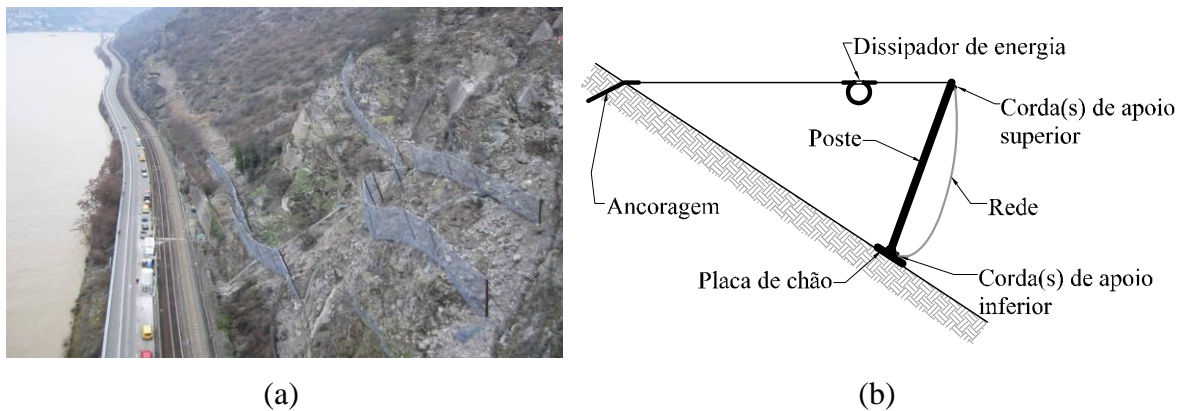


Figura 2.22: Barreiras flexíveis com ancoragem no cabo de retenção (Fonte: (a) Geobrugg; (b) GERBER, 2001).

Este tipo de barreiras não possui limitações importantes em termos de largura de instalação, sendo que podem ser replicadas quantas vezes seja preciso, mas sempre mantendo condições de ancoragem nos extremos da instalação (ver Figura 2.23).

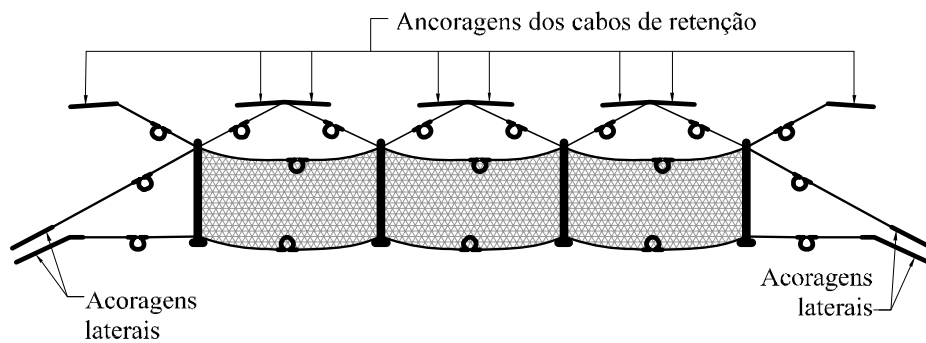


Figura 2.23: Imagem frontal da barreira com cabos de retenção (GERBER, 2001).

b) **barreira com ancoragem na fundação:** quando existem áreas para acumulação dos blocos, será possível manter a ancoragem da barreira diretamente na sua fundação, diminuindo assim o número de elementos de aço da barreira (ver Figura 2.24). Nestes casos, a barreira pode ser instalada de tal maneira que as tarefas de remoção do material possam ser feitas com um mínimo de dificuldade. Isto não impede o uso dos cabos de ancoragem. A sua

adoção terá que ser analisada durante o dimensionamento da barreira (FHWA, 2005).

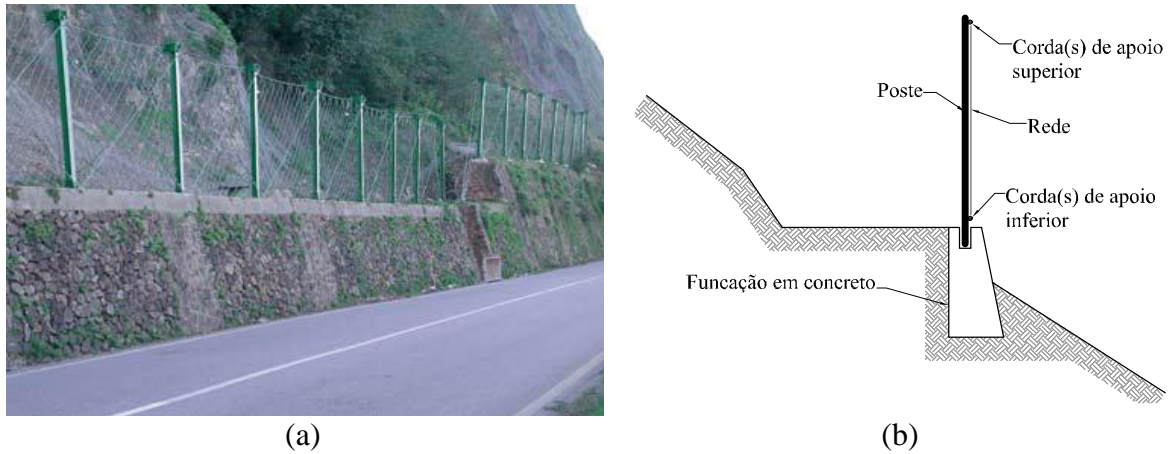


Figura 2.24: Barreiras flexíveis com ancoragem na fundação (Fonte: (a) Maccaferri; (b) GERBER, 2001).

c) **solução híbrida barreira – cortina:** em situações em que não seja necessária a contenção total dos blocos, mas sim a limitação nas suas trajetórias, vem sendo empregada uma solução híbrida que, mesmo não impedindo a queda dos blocos, faz com que a sua velocidade e a sua capacidade de repicar sejam restritas (Figura 2.25). Salvo nos casos em que a remoção dos blocos não seja crítica, nesta solução sempre será preciso levar em conta a necessidade de uma área de acumulação (Figura 2.25b).

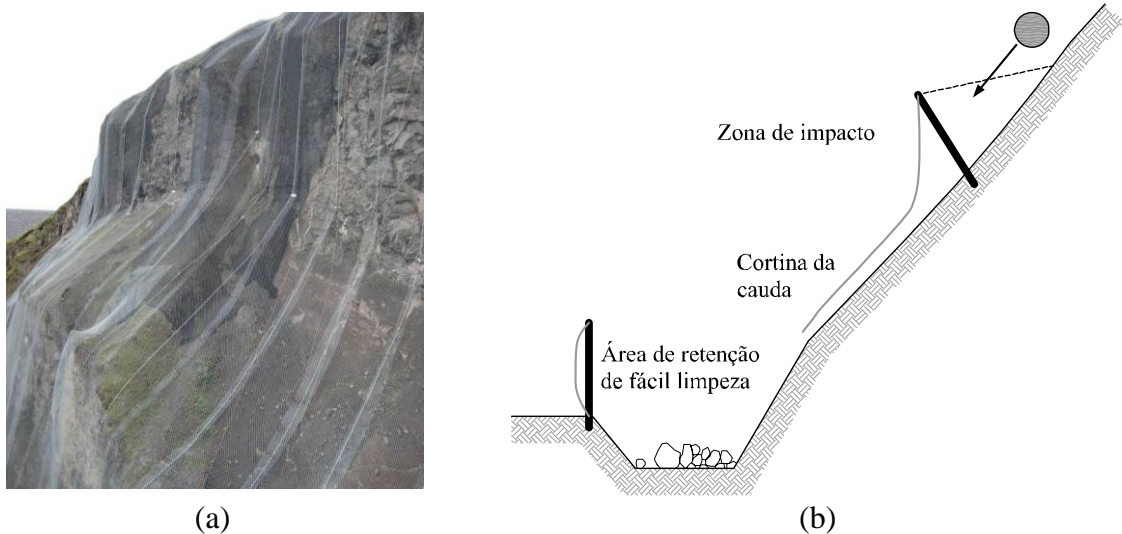


Figura 2.25: Solução Híbrida Rede - Cortina (Fonte: (a) Geobrug; (b) WSL, 2012).

2.4.2.5. Túnel falso

Segundo ABNT (2009), este elemento de proteção tem como o seu principal objetivo o de receber e/ou desviar avalanches e quedas de blocos ou detritos. Aplica-se principalmente em rodovias e ferrovias, permitindo manter a operação mesmo durante as tarefas de remoção dos materiais acumulados.

Algumas das principais razões ao se decidir pela implantação deste sistema são apresentadas a seguir:

- a) a energia desenvolvida pelos blocos que caem é grande demais para optar por outro sistema, seja pelo tamanho dos blocos ou alturas de queda muito grandes;
- b) o volume total dos blocos destacados do talude é grande demais para uma tarefa periódica de manutenção;
- c) a frequência de quedas faz com que não existam condições de segurança para as tarefas de manutenção;
- d) o nível de fraturamento e a resistência do material impedem a execução de ancoragens estáveis.

A metodologia de projeto para este tipo de elementos começa com a determinação das cargas e dos pontos de impacto como as principais incertezas. Com o auxílio das ferramentas de análise numérica e a realização de ensaios a escala reduzida, tem sido possível melhorar bastante os critérios para o seu dimensionamento (SCHELLENBERG, 2008).

Geometricamente, o túnel deve permitir tanto a operação veicular cômoda e segura, assim como as tarefas de limpeza, salvo quando esteja projetado para evitar acúmulo de materiais (ver Figura 2.26).

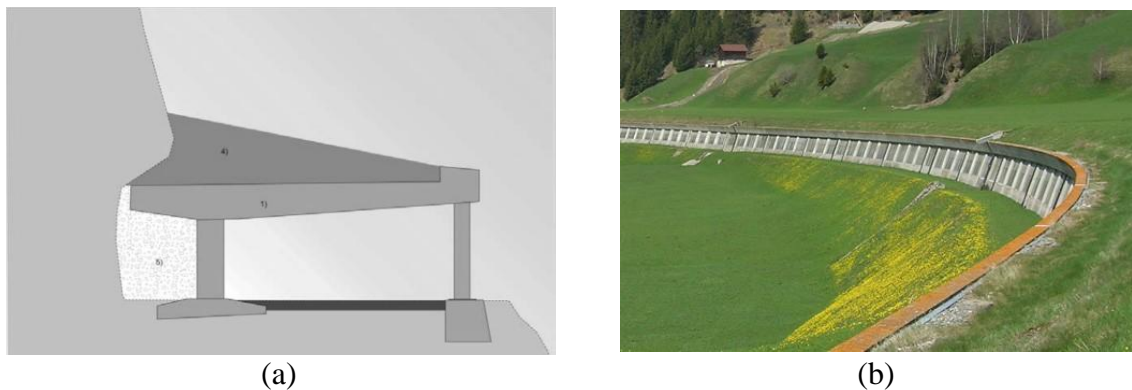


Figura 2.26: Solução tipo "Túnel falso" (Fonte: (a) Geobrug; (b) EBP-Suíça).

Para situações em que a energia cinética não for muito alta, vêm sendo desenvolvidas algumas soluções contemplando o uso dos elementos normais das barreiras flexíveis (Figura 2.27).

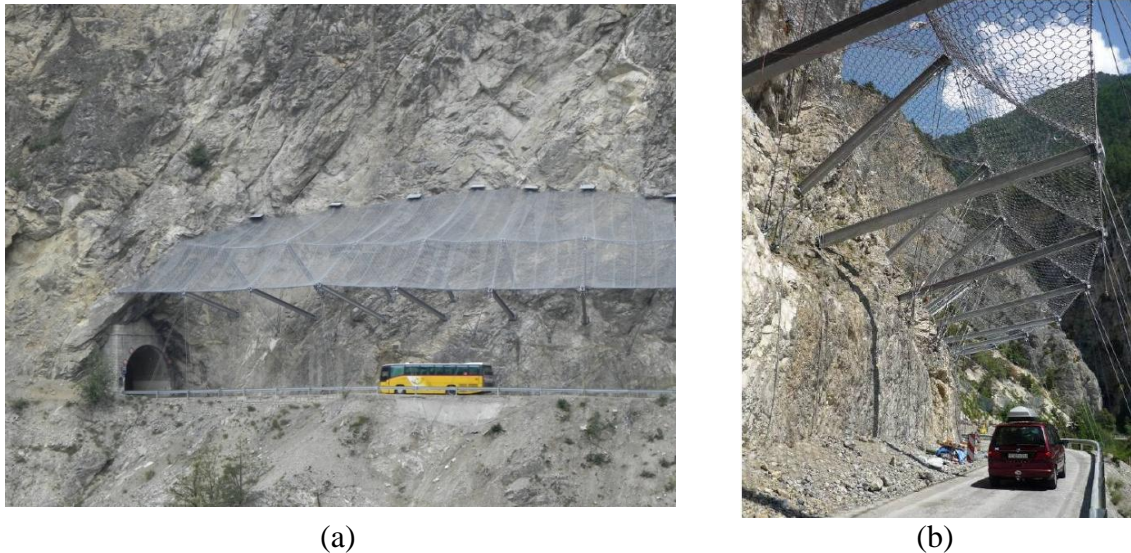


Figura 2.27: Alternativa para Túnel falso "flexível" (Fonte: Geobrugg).

2.4.2.6. Muro de impacto

Este tipo de estrutura cumpre uma função similar à das barreiras rígidas, com a diferença que estes estão capacitados para energias cinéticas muito maiores. Dependendo de cada situação, é factível reforçar o elemento para aumentar a sua capacidade resistente (ver Figura 2.28).

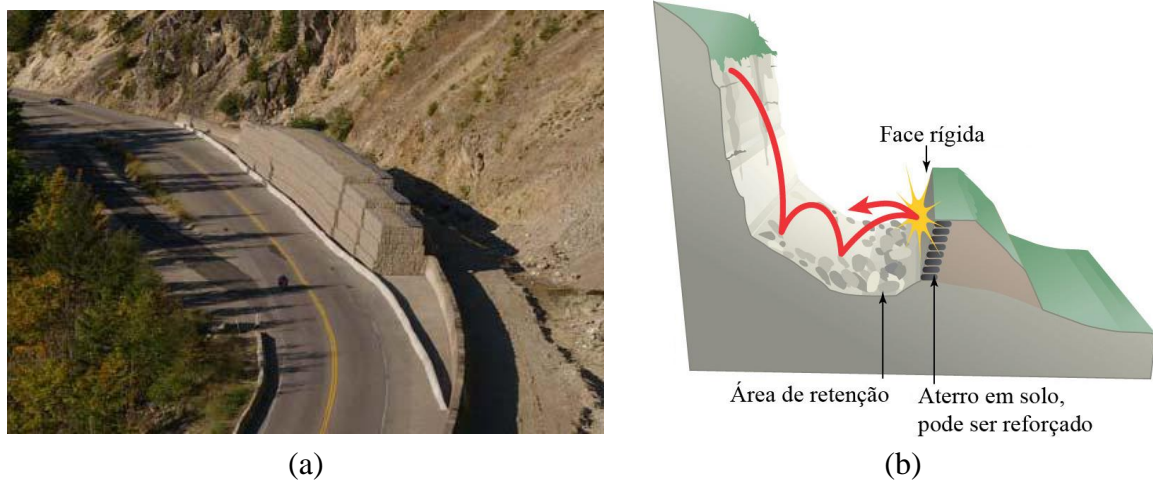


Figura 2.28: Solução mediante muro de impacto (Fonte: (a) PEILA, 2010; (b) MEDD-DPPR).

O processo de projeto deste tipo de elemento tem dois parâmetros básicos: a energia de

impacto do bloco e a trajetória de queda. Para os casos de muros reforçados, existem diferentes elementos empregados e em desenvolvimento: geotêxteis, reforços em malhas de aço, pneus, etc (LORENTZ, 2006; GRIMOD e GIACCHETTI, 2011).

A principal vantagem deste método é a pouca manutenção requerida por estas estruturas, mesmo após uma colisão. A principal desvantagem é a grande área ocupada por este tipo de soluções, fazendo com que esta técnica não seja utilizada em muitos casos.

2.4.3. Estudos para dimensionamento de áreas de retenção laterais

Diversos estudos têm ocorrido dentro desta área, sendo um dos primeiros e de grande relevância o desenvolvido por Ritchie (1963), mediante o qual foi possível definir uma série de critérios para classificar os tipos de trajetórias geradas por algumas centenas de blocos, e propor algumas equações para o cálculo dos parâmetros envolvidos em cada tipo de queda. Uma das contribuições importantes propostas por Ritchie foi o estabelecimento de critérios para permitir antecipação do tipo predominante de trajetória em função da declividade do talude (ver Figura 2.3), e a proposta para o dimensionamento de áreas destinadas à retenção de blocos com seção trapezoidal (ver Figura 2.29).

Pierson *et al* (2001) conduziram um estudo feito em taludes com diferentes declividades (4V:1H, 2V:1H, 1.33V:1H, 1V:1H), com diferentes alturas (12.2, 18.3 e 24.4 m) e três declividades da área de retenção de blocos (plana, 1V:6H e 1V:4H), através do lançamento de 11.250 blocos. O intuito da pesquisa era ampliar a faixa de geometrias de taludes além de melhorar algumas deficiências do formato proposto pelo estudo de Ritchie (1963). Este trabalho forneceu uma série de cartas para o dimensionamento da largura de uma área de retenção de blocos de seção triangular (ver Figura 2.30), a partir da declividade e altura do talude, da declividade da própria área de retenção e do grau de efetividade expressado pela percentagem de retenção requerida (ver Figura 2.31).

Além das cartas para dimensionamento, os autores aportaram algumas conclusões para auxiliar o projetista na definição de critérios básicos iniciais:

- a) a inclinação da área de captação, seja esta plana ou inclinada, terá um efeito leve na localização do ponto do primeiro impacto do bloco que cai;
- b) a localização do ponto do primeiro impacto será fortemente influenciada por irregularidades na superfície do talude, chamadas comumente de “feições de lançamento” (*launch features*). Estas feições de lançamento surgem nas

escavações como resultado de detonações no processo construtivo, assim como as protuberâncias decorrentes das propriedades da rocha.

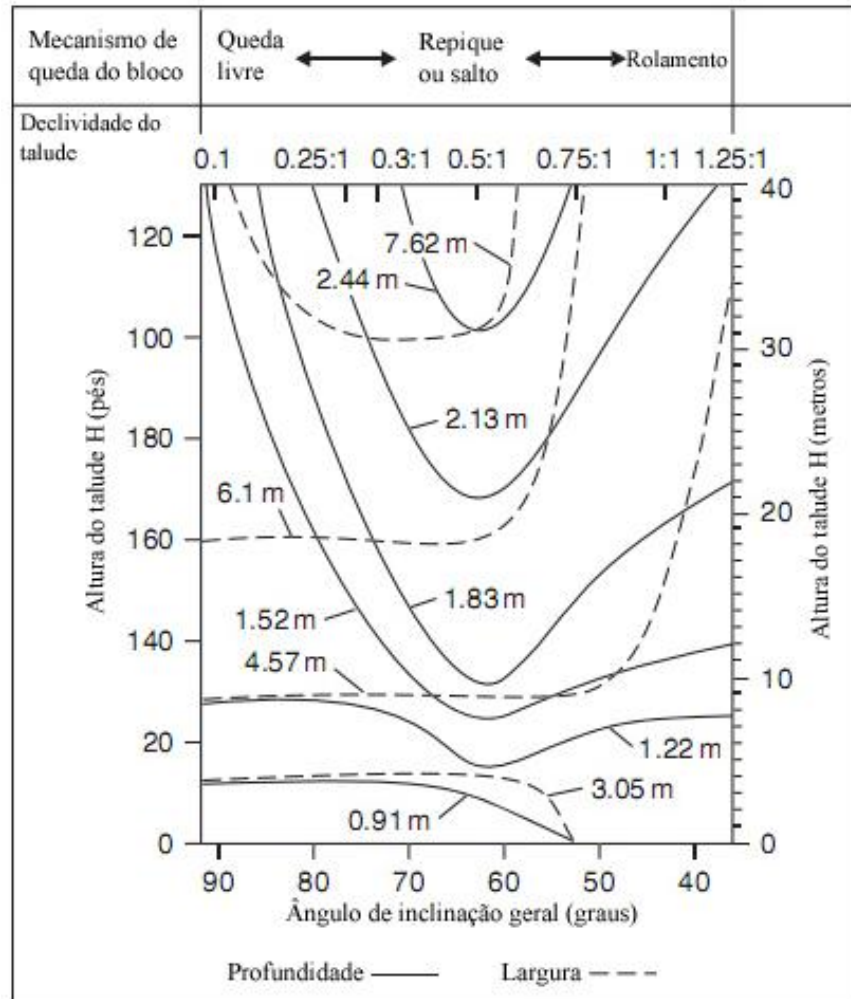


Figura 2.29: Proposta gráfica para dimensionamento de áreas de retenção de blocos (modificado de FHWA, 1989)

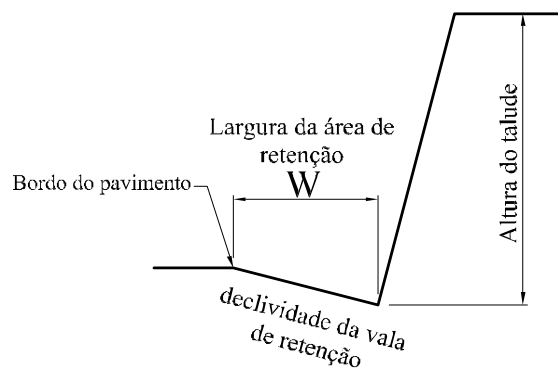


Figura 2.30: Formato e elementos da área de retenção de blocos tipo vala (modificado de PIERSON *et al*, 2001)

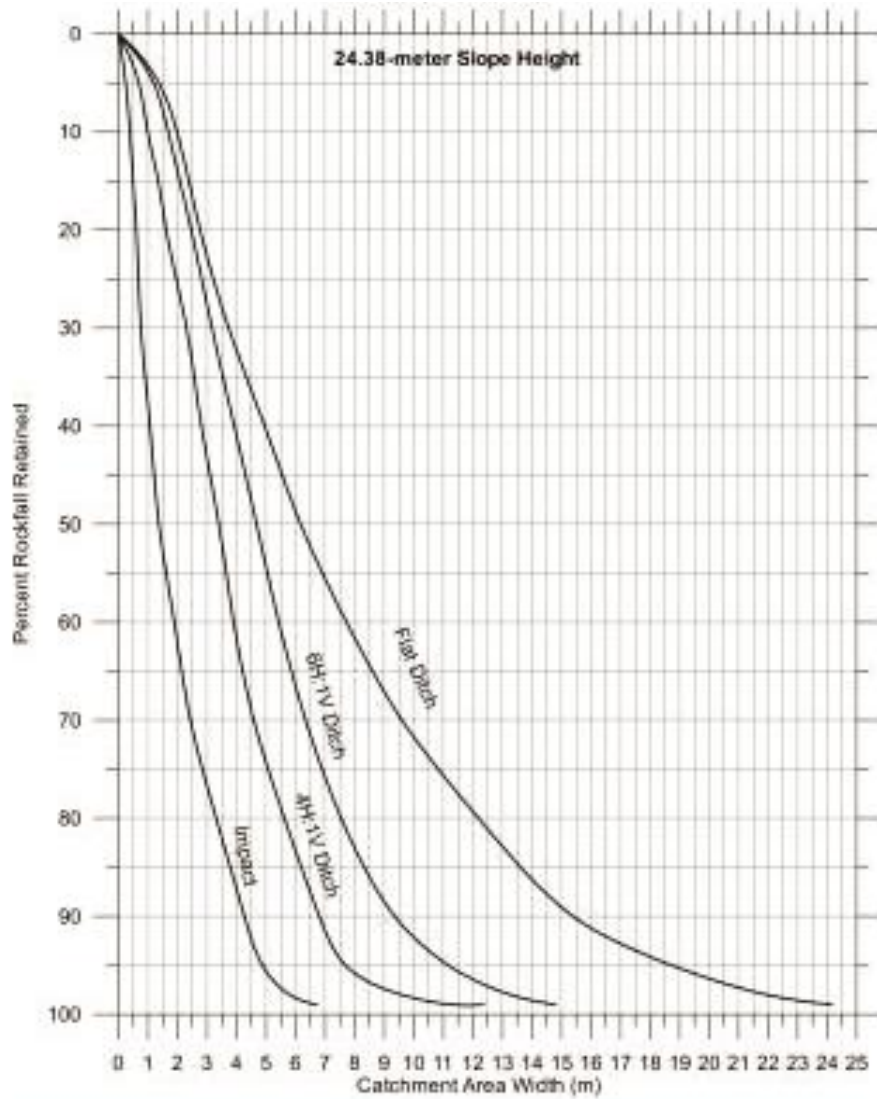


Figura 2.31: Ábaco para dimensionamento de áreas de retenção de seção triangular, taludes com declividade 4V:1H e alturas entre 24 e 38 m (PIERSON et al, 2001)

3. PROJETO DA RODOVIA RS-471/BR-153 – LOTE 2

3.1. LOCALIZAÇÃO

A Rodovia RS-471 faz parte do projeto de implantação e melhora da BR-153 que virá para interligar duas regiões do estado de Rio Grande do Sul, representadas por Soledade (Noroeste do Estado) e Chuí (Sudeste, fronteira com a República do Uruguai). Esta rodovia pretende melhorar a dinâmica econômica entre o norte e o sul do estado, além de proporcionar nova alternativa de mobilidade às mercadorias que entram e saem do porto de Rio Grande.

O setor mais crítico do seu projeto corresponde ao lote 2, o qual começa no município de Barros Cassal e termina no município de Vera Cruz, próximo ao centro do estado do Rio Grande do Sul, com uma extensão aproximada de 85,20 km (ver Figura 3.1). O presente trabalho está focado no sub-trecho Herveiras – Vera Cruz, com uma extensão de 35,21 km e um desnível total de 590 m (cotas 40 em Vale do Sol até a cota 630 em Herveiras).

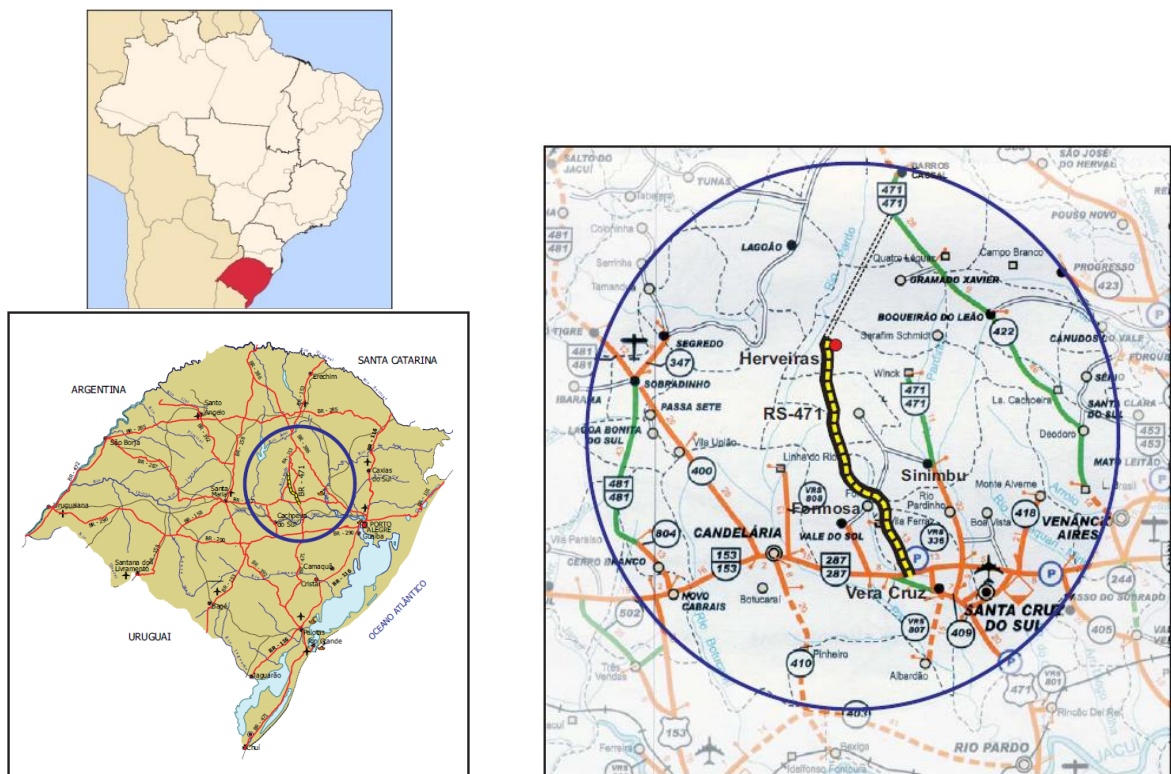


Figura 3.1: Localização do Trecho 2 da RS-471/BR-153 (DAER, 2002a).

3.2. CONDICIONANTES GEOMÉTRICAS DE IMPLANTAÇÃO

O projeto geométrico deste trecho foi realizado considerando-se dois sub-trechos. O segmento correspondente ao topo da serra e a descida (serra propriamente dita) foi considerado como montanhoso, e as cotas inferiores aqui denominadas de planície tiveram o projeto considerando uma topografia ondulada (ver Figura 3.2). Em todo o sub-trecho montanhoso (DAER, 1991) foram projetadas e construídas terceiras faixas para subida de veículos lentos, alargamentos para pontos de parada de ônibus e estacionamento temporário. No Quadro 3.1 é apresentado o resumo dos parâmetros básicos que foram adotados durante a etapa de projeto.

Quadro 3.1. Resumo de parâmetros para projeto geométrico.

Categoria da Rodovia segundo DAER-RS (1991)	II	
Tipo de Relevo	Montanhoso	Ondulado
Extensão do sub-trecho	18.684,71 m (*) (km 46+900 a 65+580)	16.523,34 m (*) (km 68+524,85 a 85+103,83)
Velocidade diretriz	60 km/h	80 km/h
Largura da pista de rolamento	2 x 3,50 m	
Largura do acostamento	2 x 1,00 m	
Rampa máxima	7,5 %	

* há uma igualdade de locação : km 65+580 \equiv km 68+524,85
Fonte: DAER (2002a)

3.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

Ao longo do eixo construído foram identificados três conjuntos de materiais coincidentes com a setorização proposta dentro do presente capítulo. Os materiais de maior presença correspondem às rochas da Formação Serra Geral, seguidos por uma zona de solos residuais sobre um substrato rochoso e, em suas cotas inferiores, uma série de materiais sedimentares pertencentes às Formações Botucatu e Rosário do Sul (ver Figura 3.3).

Setores para projeto geométrico (ver Quadro 3.1)

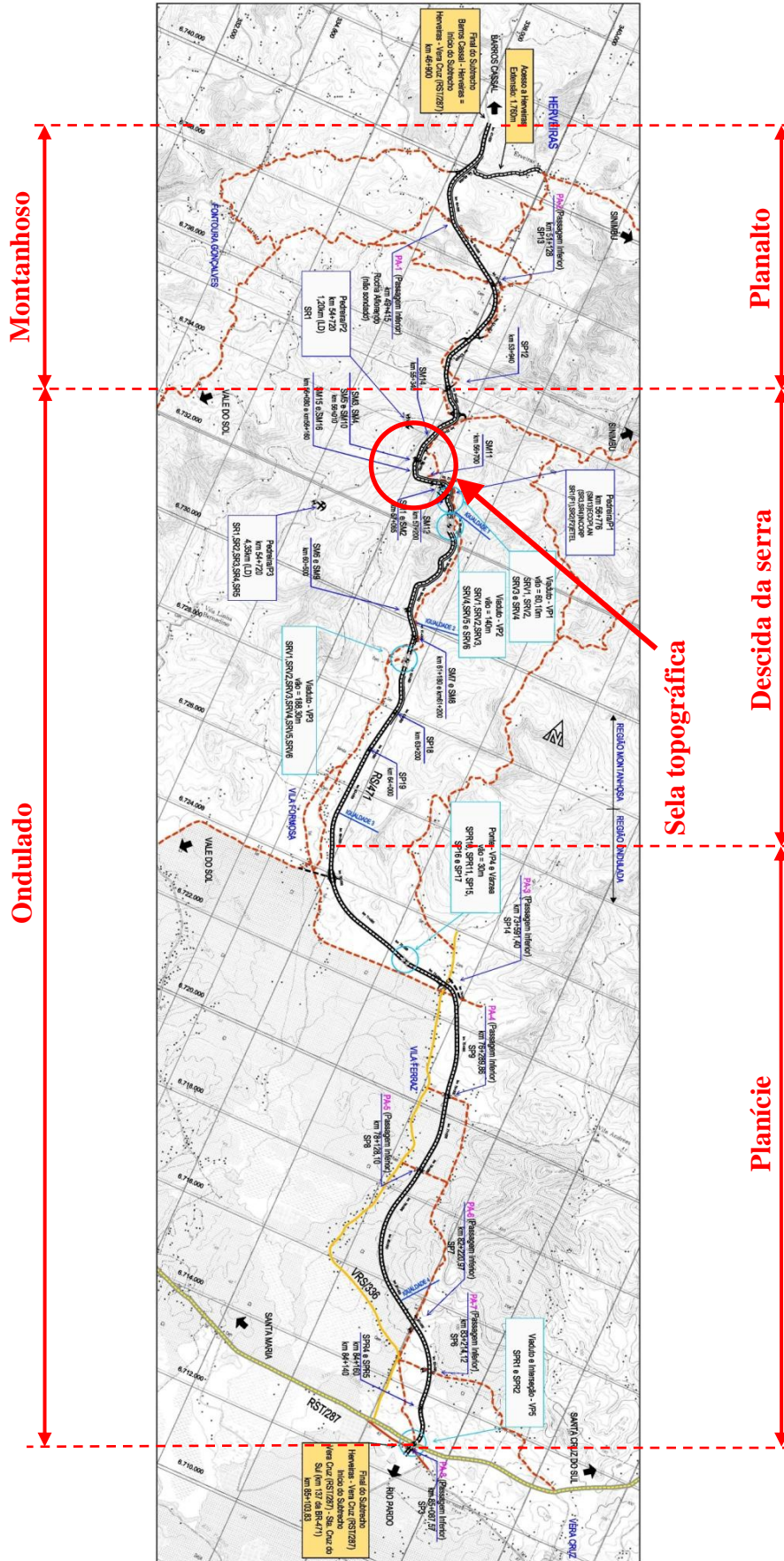


Figura 3.2: Vista geral e setorização do lote 2 (Fonte: DAER, 2002a)

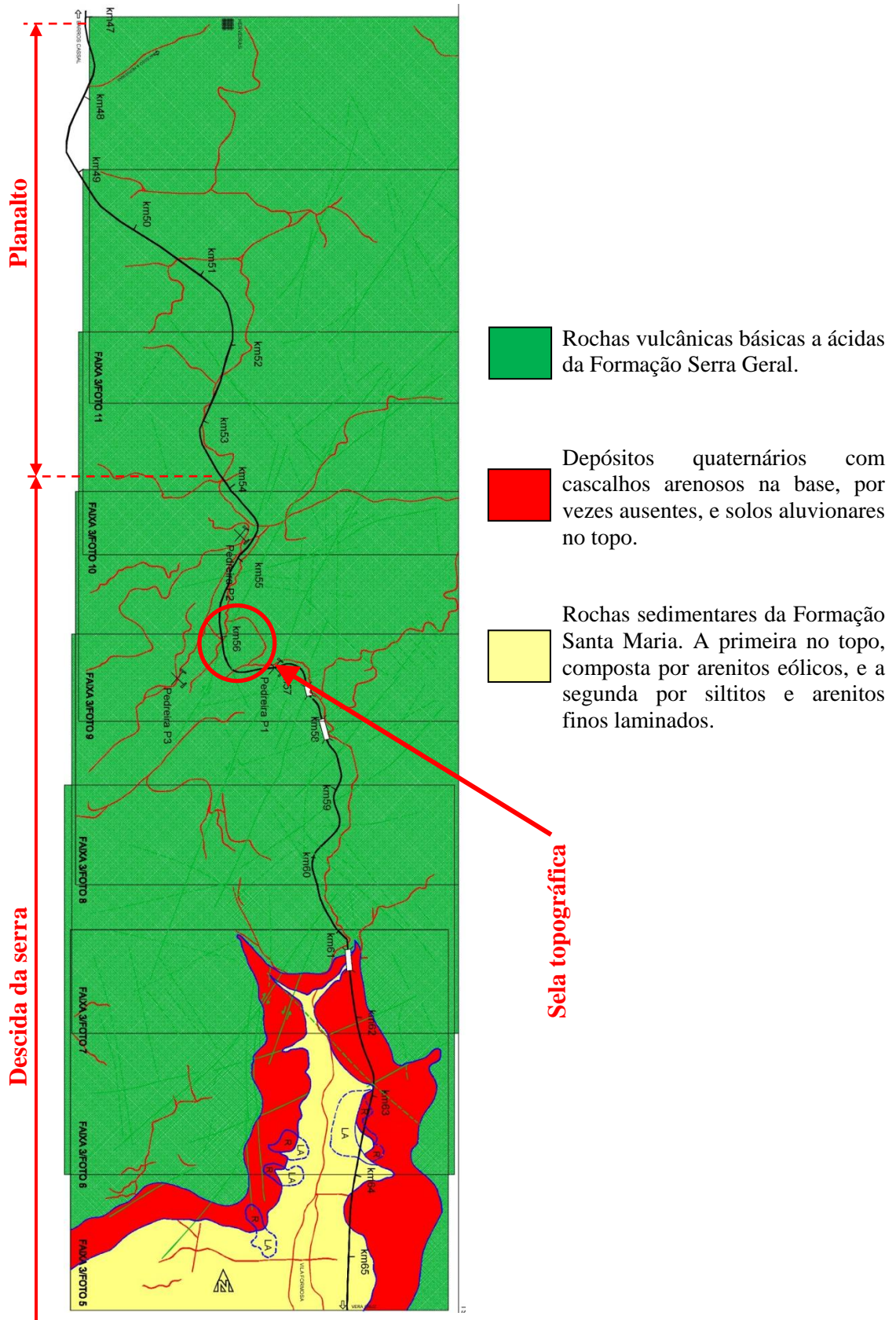


Figura 3.3: Traçado em planta e principais formações geológicas (Fonte: DAER, 2002b).

3.3.1. Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é originada por uma sucessão de corridas de lavas, principalmente básicas, e possui um domínio de efusivas ácidas na parte superior (IBGE, 1986). O início do seu processo de formação tem sido datado como sendo durante o Triássico Superior (250 Ma), tendo seus maiores desenvolvimentos durante o Juracretáceo (145 Ma), estando fortemente vinculados aos processos geodinâmicos que culminaram com a abertura do Atlântico sul e a separação continental América do Sul - África.

O processo de evolução geológica das rochas desta formação está em consonância com um modelo de evolução vulcânica progressiva, possivelmente contínua. Sendo assim, os basaltos teriam sido originados durante uma etapa de vulcanismo inicial fissural, os materiais intermediários estariam associados a um estágio de vulcanismo de escudo, e os materiais ácidos da parte superior teriam sido originados por um estágio dômico final.

Os derrames da formação Serra Geral correspondem a cerca de 75% da área da Bacia do Paraná (MELFI *et al*, 1988), cobrindo uma área aproximada de 1.200.000 km². A sequência ácida superior abrange uma área total de 150.000 km², correspondendo ao estado de Rio Grande do Sul uma área aproximada de 50.000 km² (ROISEMBERG e VIERO, 2000).

A espessura determinada por diferentes pesquisadores para todo o pacote de derrames oscila desde uns poucos metros até os 1500 metros, tendo 800 metros de espessura média (ROISEMBERG e VIERO, 2000). No Rio Grande do Sul, a espessura máxima do pacote é de 850 metros. Na sequência básica inferior, a espessura do pacote de derrames pode variar de 20 a 550 metros, com valor médio em torno de 330 metros. O pacote de derrames da sequência ácida superior possui espessura total variando entre 60 e 400 metros, com valor médio em torno de 280 metros. Considerando-se uma espessura total média de 660 metros, o volume estimado do pacote de derrames da formação é de 790.000 km³.

Segundo IBGE (1986), a sequência de rochas básicas da Formação Serra Geral é composta por rochas pertencentes a três grandes grupos: basaltos, andesitos e basaltos com vidro. Nestas sequências de rochas também se encontram associadas intercalações de arenitos interderrames e litologias subordinadas, como brechas basálticas e sedimentares.

A sequência ácida é composta por quatro grandes grupos de rochas: basaltos pórfiros, dacitos e riocacitos felsíticos, riolitos felsíticos e fenobasaltos vítreos.

Segundo IBGE (1986), frequentemente as brechas estão associadas aos derrames básicos,

podendo ser divididas em vulcânicas, quando a matriz for de natureza vulcânica ou vulcano-sedimentar, ou em sedimentares quando a matriz for de natureza sedimentar. As brechas podem atingir espessuras superiores a 20 m. Este tipo de rochas não foi encontrado associado à sequência ácida de topo da Formação Serra Geral. Em alguns locais, as rochas ácidas encontram-se assentadas sobre o que parece ser a última brecha vulcânica básica, sem que acima do primeiro derrame ácido haja recorrência deste tipo de material.

Existem em alguns locais camadas descontínuas de arenitos eólicos interpostas entre derrames basálticos, que representam a persistência de condições desérticas semelhantes às aquelas que perduravam durante a deposição da Formação Botucatu.

3.3.2. Geomorfologia

Conforme Leinz & Amaral (1978) *apud* Rigo (2005), a base de um derrame é constituída por uma camada de material vítreo e brecha vulcânica formada devido ao movimento e ao resfriamento rápido da lava em contato com o substrato frio. Esta camada muda gradativamente para uma rocha com fraturas predominantemente horizontais, formando o que se chama de zona de diaclasamento horizontal. A parte central do derrame é formada por rocha maciça, com fraturas predominantemente verticais, sendo denominada zona de diaclasamento vertical. Em sua parte superior os derrames são formados por um arranjo irregular de brecha vulcânica, rocha amigdalár e/ou vesicular e material vítreo. A Figura 3.4 ilustra a estrutura interna de um derrame.

3.4. DESCRIÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DOS SUBTRECHOS

Embora para efeitos de definição da geometria as normas de projetos rodoviários (DAER, 1991) só permitam fazer uma diferenciação do terreno como sendo plano, ondulado ou montanhoso, durante a elaboração do projeto (DAER, 2002a) foram definidos três segmentos que permitiram detalhar, de uma maneira mais coerente, tanto as particularidades do traçado quanto os tipos de materiais e condições geomorfológicas do subtrecho. Uma recomendação feita durante o projeto da obra foi inserir, como um segmento especial com necessidades de detalhamento e controle de execução diferenciada, a região localizada entre as estacas 55+840 até 56+220, correspondente a uma topografia do tipo “sela”. Embora este trecho se encontre

dentro do segmento de descida da serra, a sua complexidade sob o ponto de vista geológico e geotécnico obrigou à elaboração de detalhamentos adicionais para permitir a execução da obra. Estes segmentos são:

- a) planalto - 7,3 km com uma variação de cotas de 286 metros;
- b) descida da serra - 10,8 km com diferença de cotas de 535 metros;
- c) planície - 17,38 km com diferença de cotas de 61 metros.

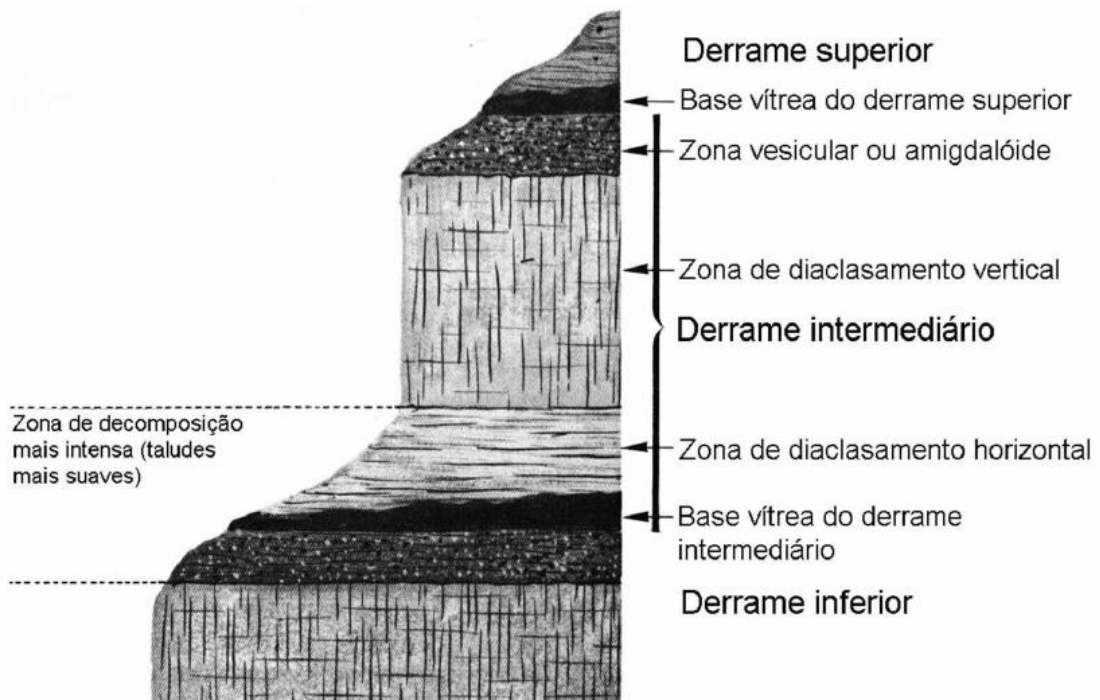


Figura 3.4: Representação da estrutura de um derrame e morfologia de uma escarpa constituída por derrames basálticos (Fonte: Leinz & Amaral, 1978 *apud* Rigo, 2005).

3.4.1. Planalto

Neste segmento com 7,3 km de extensão, os materiais predominantes correspondem às rochas ácidas do topo da formação Serra Geral das fácies Palmas/Caxias, principalmente riolitos e riodacitos. O grau de alteração do material é geralmente baixo, embora variável tanto vertical quanto lateralmente, porém o alto grau de fraturamento faz que com que a queda de blocos de rocha seja um problema importante nos cortes de rocha executados.

O projeto original dos cortes rochosos deste trecho concebido com inclinações de 4V:1H (usual nos cortes rochosos) teve que ser modificado para aumentar a segurança. A

modificação foi feita de forma que os rolamentos de blocos rochosos, comuns durante a construção, não atingissem as pistas. Para evitar a construção de estruturas de contenção dispendiosas e de execução não prevista, foram estudadas alternativas de solução com retaludamento e alargamento da plataforma de corte de maneira a criar uma área de retenção dos blocos.

A Figura 3.5 mostra o caráter ondulado do trecho e o padrão sub-vertical dos fraturamentos, além do aspecto de fraturamento horizontal intenso. É importante notar a variabilidade de tamanhos dos blocos gerados.



Figura 3.5: Condições predominantes no planalto da serra.

Para todos os cortes em rocha, durante a etapa de projeto foram concebidas inclinações de 4V:1H, tal como recomendado pelo DAER (1991). Esta geometria de corte teve que ser alterada durante a execução para aumentar a segurança com relação a quedas de blocos, bastante frequentes tanto neste segmento quanto na “descida da serra”.

Para evitar incrementos excessivos nos custos do projeto decorrentes da execução de estruturas de contenção não previstas, baseados na proposta de Azambuja Engenharia Ltda (MEZZOMO, 2009) utilizada no sub-trecho Barros Cassal – Herveiras (Lote 1), foram definidas duas modificações na seção transversal dos cortes do Lote 2:

- a) alargamento da pista, visando estabelecer uma área de retenção de blocos de cada lado, com largura de 4 m e profundidade de 0,70 m;
- b) retaludamento do corte, variando os ângulos de inclinação e com uso de

bancadas intermediárias (ver Figura 3.6) (nota: em alguns casos estas bancadas não foram adotadas).

Na Figura 3.6 é possível ver quatro tipos diferentes de geometrias para os taludes de corte (FLÓREZ-GÁLVEZ e BRESSANI, 2012):

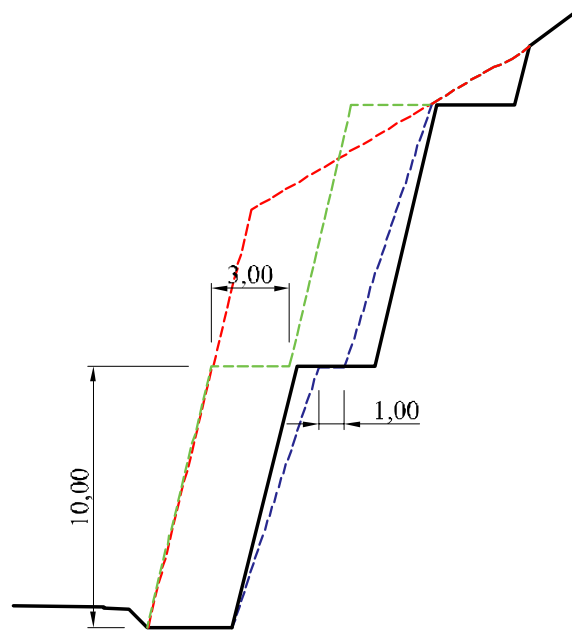


Figura 3.6: Diferentes geometrias definidas para os taludes de corte.

- a) linha vermelha (tracejada): corresponde à condição proposta no projeto inicial (DAER, 2002b), com declividade 4V:1H, com o pé do talude junto ao bordo da pista;
- b) linha verde (tracejada): corresponde à introdução de bancadas para facilitar a construção e diminuir tensões cisalhantes; bancadas a cada 10 metros de altura, com largura de 3 metros, declividade de 4V:1H. Esta alternativa não incluía nenhum alargamento da pista;
- c) linha preta (cheia): introdução de um alargamento da pista para a conformação da área de retenção de blocos. Esta foi a seção transversal adotada com maior frequência ao longo dos segmentos “planalto” e “descida da serra”;
- d) Linha azul (tracejada): abatimento dos taludes para uma declividade de 3V:1H, com bancadas operacionais com somente 1,0 m de largura, conforme proposta

de Bressani (2010). Este arranjo objetivava a diminuição nas distâncias de projeção dos blocos que, ao cair, repicavam e invadiam a pista veicular. Esta geometria foi adotada em alguns pontos do segmento de planalto, não tendo sido adotada em cortes já realizados.

3.4.2. Descida da serra

Neste trecho houve uma variação considerável de cotas ao descer da serra à planície. Toda a sequência de derrames da serra foi atravessada: (a) derrames ácidos no topo com graus de fraturamento variáveis; (b) brechas alteradas ácidas; (c) brechas basálticas alteradas; (d) derrames basálticos alterados entremeados com brechas; (e) arenitos intertrápicos e siltitos eólicos entre derrames.

Ao longo de quase todos os cortes foi encontrada a seguinte seção transversal básica: (a) uma camada de espessura variável de solo coluvionar/residual no topo dos cortes; (b) derrame vulcânico da Formação Serra Geral com grau variado de alteração e nível alto a muito alto de fraturamento; (c) outro derrame, com níveis de fraturamento e alteração, às vezes muito diferenciadas do anterior, incluindo brechas, etc.

Neste segmento, devido à topografia da serra e a geometria do eixo da rodovia, foi necessário executar grandes cortes nas encostas, alguns chegando a cerca de 50 m de altura. A Figura 3.7a mostra um aspecto geral dos cortes de grande altura com sua variabilidade geológica (sequência de derrames). A Figura 3.7b mostra um contato nítido de solo coluvionar com rocha, encontrado em muitos casos.



Figura 3.7: Condições predominantes na descida da serra.

As mudanças na geometria dos cortes foram impostas pela forte presença de fraturas nas camadas rochosas, especialmente nas basálticas, sendo necessário o retaludamento na maior parte dos pontos. As soluções aqui implementadas foram as mesmas que para o segmento “planalto” (3.4.1), ilustradas na Figura 3.6.

As duas situações apresentadas na Figura 3.7 fizeram com que as camadas de material residual do topo das encostas começassem a sofrer instabilidade, tanto pelo ângulo do talude, quanto pela presença de água.

Nos cortes projetados para as cotas topográficas inferiores (59+900 a 61+200) ocorreram duas circunstâncias que levaram a soluções de projeto similares: Num dos cortes ocorria a presença de material mais brando (siltito e arenito eólico) no contato de dois derrames, sendo que este contato ficava na metade da altura do corte. A solução adotada foi fazer com que a banqueteta de 3,0 m de largura coincidissem exatamente com este contato (Figura 3.8). Isto reduziu a possibilidade de queda de blocos e aumentou a estabilidade do corte de forma imediata. No segundo corte o contato apresentava um fraturamento visível e instabilidade bem localizada. Novamente, a decisão de estabelecer ali uma banqueteta estabilizou o corte. Isto criou uma situação geométrica de corte diferente da usual, onde as banquetetas são definidas em relação ao greide da rodovia, pois nestes casos o controle foi geológico e a banqueteta ficou com uma curvatura longitudinal em relação ao eixo.



Figura 3.8: Aspecto do corte no 61+200 em que a banqueteta de corte foi feita coincidente com a transição de derrames (e presença de arenito brando) (Foto: L. A. Bressani).

3.4.3. Sela topográfica

A sela topográfica refere-se a um ponto característico da paisagem em que o traçado fora obrigado a atravessar por questões geométricas (ver Figura 3.9). Embora o projeto geométrico da rodovia tenha procurado seguir a rodovia municipal existente, por questões ambientais, a única possibilidade viável neste trecho foi atravessar a sela, com túnel ou com corte caixão. A alternativa de corte entre os km 55+840 até o km 56+220 foi a escolhida por razões financeiras (ver Figura 3.10).

Em função das cotas e geologia da área, o corte atravessa os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, tanto os ácidos das fácies Palmas /Caxias (riolitos e riodacitos) quanto os básicos da fácies Gramado (basaltos e basalto-andesitos). Na base do corte previsto havia uma brecha vulcânica avermelhada e com grau de alteração variável. O topo do pacote apresenta uma camada de solo argilo-arenoso com presença de fragmentos de basalto. Em uma extensão considerável do corte executado existe uma grande interferência com uma falha regional de grande porte, a qual atravessa o eixo de forma diagonal e tem larguras (zona de falha) entre 17 e 35 metros.



Figura 3.9: Vista geral da sela topográfica antes da obra (DAER, 2002a).

As rochas dos diversos derrames vulcânicos têm graus de fraturamento crescentes entre 5 e 20 frat/m em função da distância do falhamento que atravessa o segmento na direção NE-SW. O fraturamento dos derrames sem alteração é do tipo planar, com aberturas inferiores a 1 mm, com pouco ou nenhum preenchimento. Foi observado que, durante o desmonte com explosivos, muitas das fraturas tiveram sua abertura aumentada (DAER, 2010).

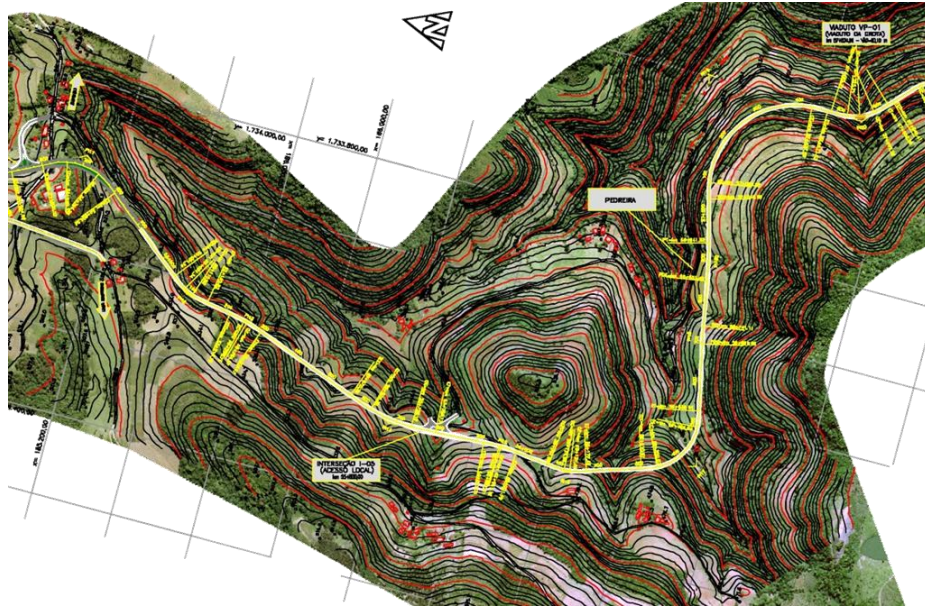


Figura 3.10: Traçado em planta da rodovia através da sela topográfica

3.4.4. Planície

Em termos gerais, a parte baixa do Lote 2 de construção é constituída por rochas sedimentares e materiais coluvionares tanto de origem vulcânica quanto sedimentar (DAER, 2002a). Existem alguns arenitos mais resistentes com pequenas evidências da Formação Botucatu, mas, principalmente, arenitos e siltitos da Formação Santa Maria. Mas, na maior parte do trecho, o eixo da rodovia atravessa uma série de corpos coluvionares, muitos dos quais foram identificados, e em grande parte evitados, durante a fase de projeto através do deslocamento lateral do eixo. O acerto desta medida simples e econômica pode ser verificado através da presença de sinais de movimentação e outras evidências de rupturas lentas destes colúvios que ocorrem na direção da pista atual (ver Figura 3.11).

Em dois cortes executados em siltitos deste segmento, a rocha apresentou um processo de intemperização muito rápido com empastilhamento e queda de fragmentos e blocos com evolução rápida, dentro de poucos meses. Esta desagregação, além de gerar um aspecto esteticamente ruim, afeta diretamente a integridade da drenagem longitudinal da pista e, como tem uma evolução acentuada, poderá causar instabilidades importantes. A taxa com que o material tem sofrido alteração é um forte indicador da presença de material expansivo (ver Figura 3.12). A revegetação dos cortes com gramíneas foi experimentada em 2003, durante a primeira fase de construção da rodovia, mas sem efetividade devido à intensa desagregação do material.



Figura 3.11: Rupturas lentas em corpos de colúvio no segmento “Planície”.



Figura 3.12: erosão em siltitos com presença de materiais expansivos no segmento “Planície”.

4. METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho teve como principal ferramenta o material bibliográfico produzido e disponibilizado acerca dos aspectos geológicos e geotécnicos sobre a região de implantação da rodovia RS-471/BR-153, além da produção sobre classificação de mecanismos de ruptura em rochas, particularmente sobre quedas de blocos.

Para a realização do trabalho foram definidas quatro etapas de estudo: (I) compilação de informação bibliográfica regional sobre o projeto da rodovia; (II) determinação dos parâmetros a serem empregados nas simulações de queda de blocos e elaboração de descrições dos condicionantes geotécnicos envolvidos no projeto; (III) realização das simulações computacionais sob as diferentes condições do problema e (IV) análise dos resultados das simulações e conjugação com as descrições dos condicionantes da obra.

Na primeira etapa de trabalho, a documentação referente ao projeto inicial e estado final da rodovia foi fornecida pela empresa ECOPLAN, responsáveis pelo projeto inicial e pela fiscalização da obra e de fontes bibliográficas.

A segunda etapa de trabalho correspondeu ao processo de determinação dos parâmetros inerentes aos materiais necessários para as simulações computacionais, feito a partir dos trabalhos em campo e de fontes bibliográficas.

Para a realização das simulações de trajetórias de quedas de blocos ao longo da terceira etapa, foi empregado o programa *RocFall* v. 4.0, comercializado pela *Rocscience Inc.*

Na terceira etapa, foram analisadas quatro seções transversais consideradas, pela experiência, como sendo críticas para a ocorrência dos fenômenos de quedas de blocos. Cada uma das seções foi analisada sob diferentes considerações de acerca de sua geometria, começando pela situação real e aplicando-se algumas opções corretivas.

Na quarta e última etapa deste presente trabalho foi feita a incorporação de algumas medidas de proteção, para que, uma vez combinadas com as diferentes alternativas geométricas definidas na etapa anterior, pudessem ser obtidas algumas relações de efetividade para cada local estudado.

Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma das atividades desenvolvidas como parte do trabalho de pesquisa. Na parte esquerda da figura encontram-se as quatro etapas de estudo

anteriormente mencionadas.

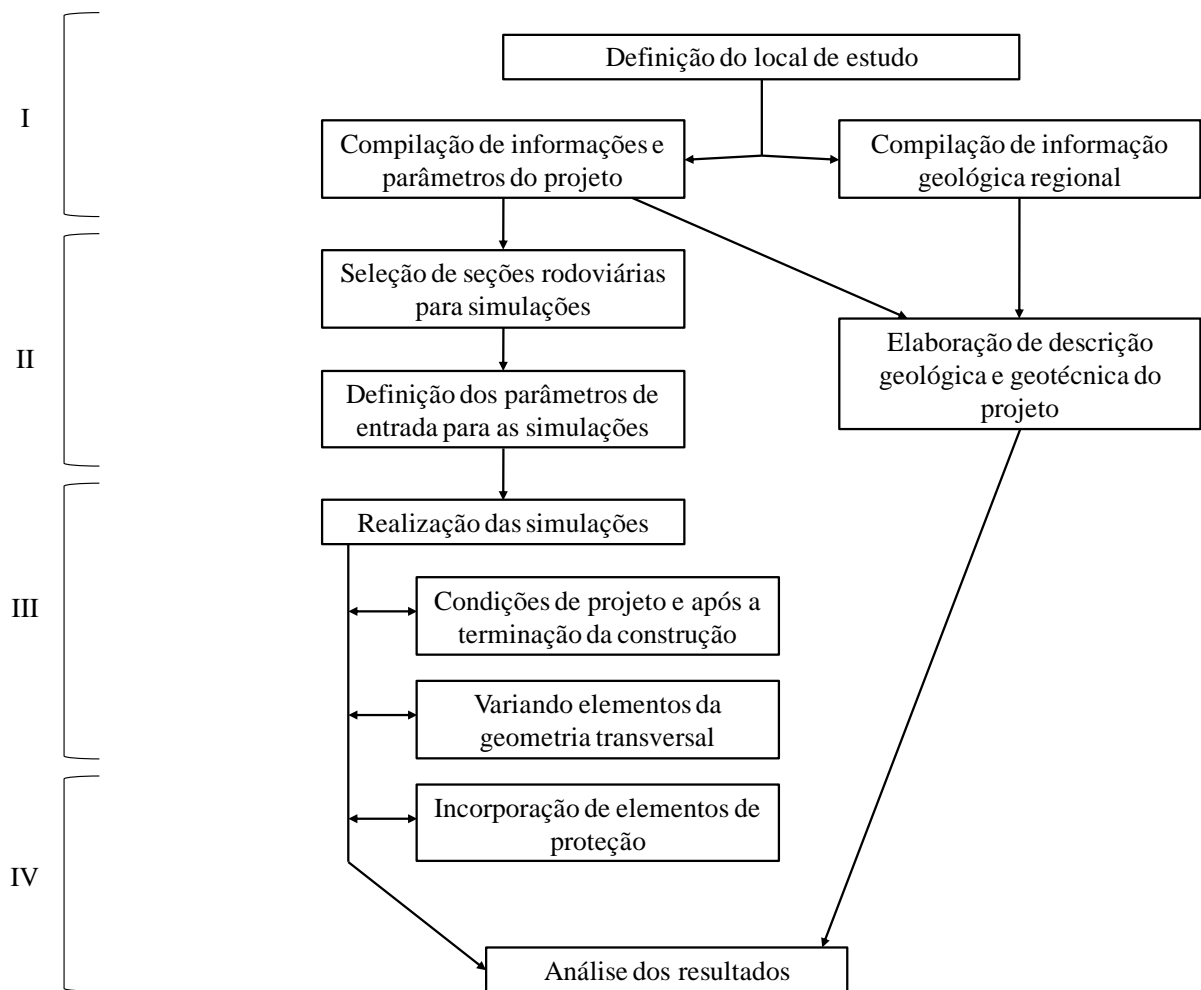


Figura 4.1: Metodologia de atividades do trabalho.

4.1. DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO NORMAL (R_N)

Esta parte da metodologia foi dividida em duas atividades principais: a seleção de algumas seções transversais e as determinações dos parâmetros requeridos para levar a cabo as simulações de quedas de blocos.

A seleção das seções transversais foi feita dentro dos segmentos de “descida da serra” e no “planalto”, por duas razões principais:

- a) pelo fato de serem os dois segmentos com ocorrência de quedas de blocos, já

que no segmento “planície”, ocorrem outros tipos de mecanismos de instabilidade;

- b) a partir de inspeções de campo nos segmentos selecionados, foram escolhidos setores com ocorrências frequentes de quedas de blocos, tanto na pista de rolamento quanto no acostamento e áreas de retenção de blocos.

4.1.1. O Martelo Schmidt

A técnica do uso do martelo Schmidt teve a sua origem na caracterização de elementos de concreto, a partir do estabelecimento de correlações entre testemunhos moldados para serem ensaiados em laboratório e os elementos existentes em obra. Para cada situação particular (tipo de concreto e equipamento), a Norma ASTM C805/C805M-08 estipula a necessidade de gerar uma correlação própria, fazendo com que a utilização do equipamento fique restrita mais como uma referência do que como um elemento de decisão final. Ainda hoje, este tipo de equipamento continua sendo uma técnica de ensaio não destrutivo de bastante aplicação no campo dos concretos, auxiliando bastante em tarefas de verificação da homogeneidade de elementos moldados.

A determinação dos parâmetros físicos e mecânicos de rochas a partir de amostras “representativas” de campo é um grande desafio em virtude da heterogeneidade dos materiais, os valores adotados em projeto dependem em grande medida do julgamento de engenharia dos técnicos envolvidos.

Neste caso, para a caracterização de maciços rochosos, o martelo Schmidt tem tido bastante aplicabilidade. A facilidade fornecida pelo martelo no momento de definir zonas com comportamento similar, em muitos casos auxilia a seleção de pontos de amostragem. Além disto, é possível estabelecer correlações entre um ou mais parâmetros do material, permitindo a avaliação de um grande número de valores a partir deste ensaio expedito de campo.

As correlações entre os resultados do ensaio e algumas propriedades físicas e mecânicas dos maciços têm sido apresentadas em diferentes trabalhos. Exemplos de curvas de correlação entre os valores de H_R e densidade seca, porosidade efetiva e total, Módulo de Elasticidade Tangente são apresentados por Deere e Miller (1966) (martelo tipo “L”), Aydin e Basu (2005) (martelos tipo “L” e “N”).

Para aplicações em rocha, o martelo recomendado pela ISRM (1978) era o de tipo “L”, limitando com isto o uso do equipamento de maior capacidade (tipo “N”). Assim, a maioria

das equações e cartas de correlação foram definidas para o martelo tipo “L”. Trabalhos mais recentes vêm incorporando o martelo tipo “N” para aplicações em rocha (AYDIN, 2009). A Norma ASTM D5873-05, seguida para o presente trabalho, não discrimina o martelo empregado, desde que seja feita a descrição do equipamento dentro do relatório de ensaio.

Para o presente trabalho foi empregado um martelo Schmidt tipo “NR” da marca Proceq, de propriedade do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ver Figura 4.2).



Figura 4.2: Martelo Schmidt empregado no presente estudo.

4.1.2. Seleção dos locais para avaliação da restituição

Em função das características da geologia e tipos de cortes encontrados na rodovia, foram selecionadas para estudo quatro seções transversais, duas dentro do segmento de planalto e duas dentro da descida da serra. As Figuras 4.3 e 4.4 correspondem às seções transversais dentro do segmento “planalto”. A condição superficial encontrada é apresentada na Figura 4.5.

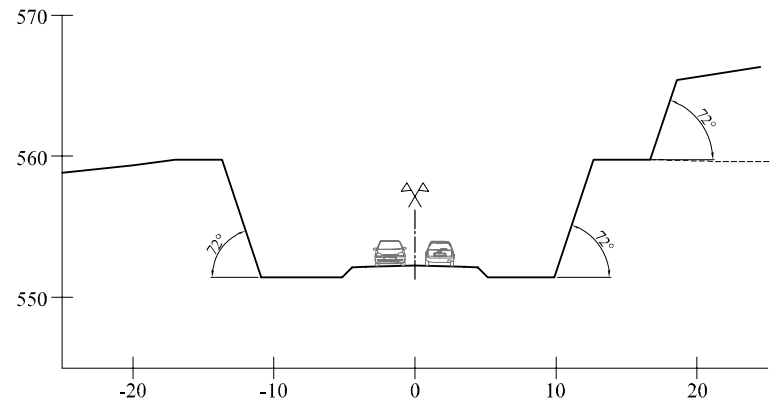


Figura 4.3: Geometria da seção transversal no 50+840 – planalto.

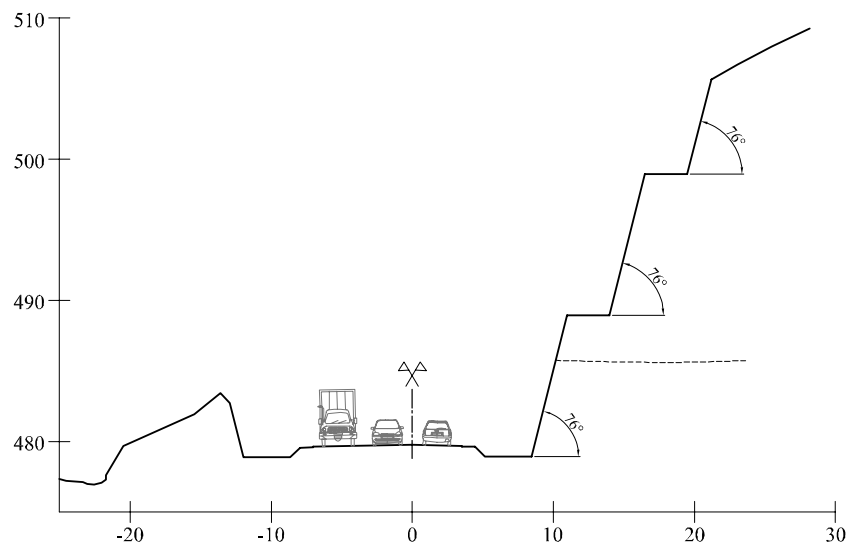


Figura 4.4: Geometria da seção transversal no 55+360 – planalto.

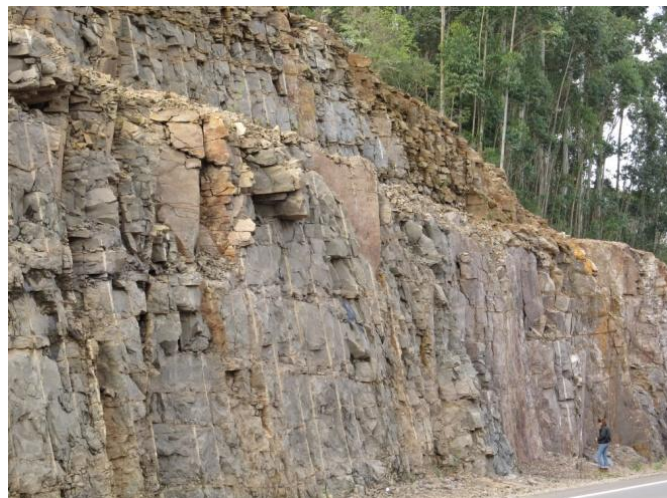


Figura 4.5: Condição visual de uma seção transversal no planalto, próxima das estudadas.

As Figuras 4.6 e 4.7 correspondem às seções transversais dentro do segmento “descida da serra”. A condição superficial encontrada é apresentada na Figura 4.8

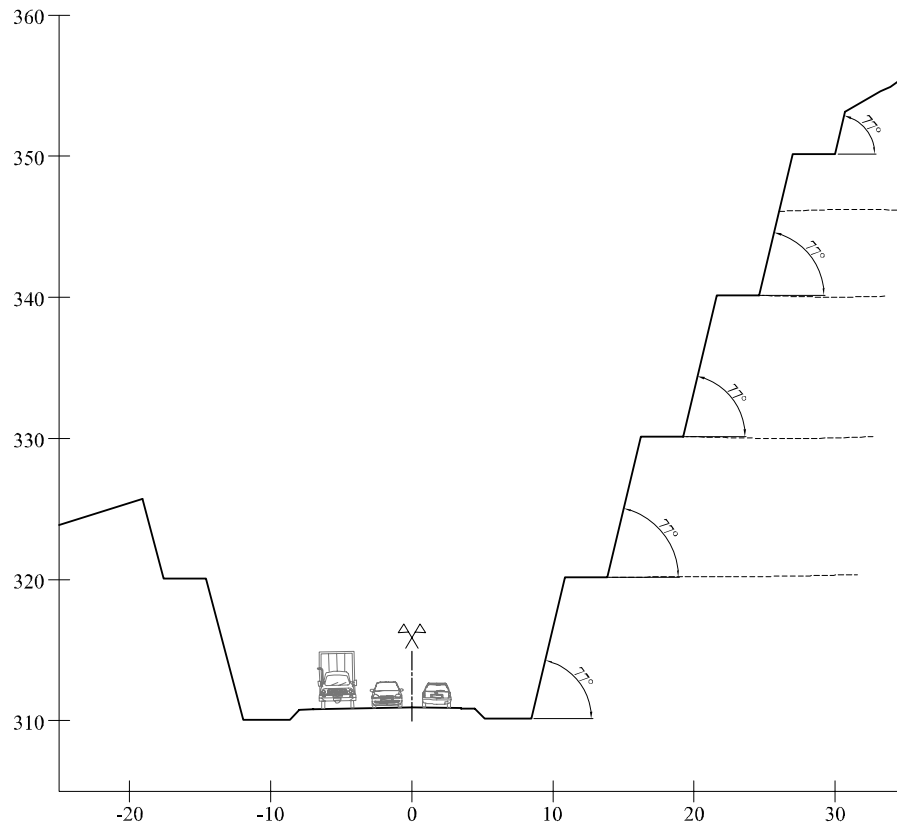


Figura 4.6: Geometria da seção transversal no 57+800 – descida da serra.

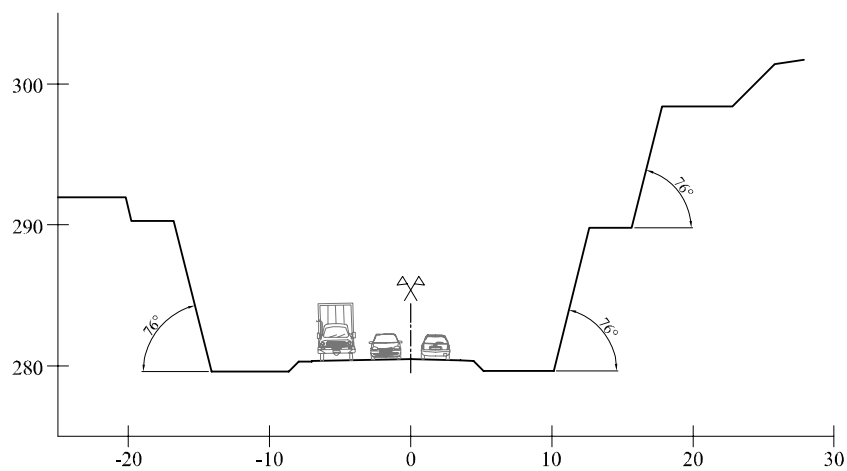


Figura 4.7: Geometria da seção transversal no 58+460 – descida da serra.



Figura 4.8: Condição visual de uma seção transversal na descida da serra, próxima das estudadas.

Para uma completa caracterização de cada uma das seções transversais estudadas era necessária a execução dos ensaios com o martelo em todas as camadas que as compunham. Entretanto, esta tarefa trazia riscos elevados em virtude das elevadas alturas nas quais as medidas teriam que ser executadas. Por esta razão, a determinação do coeficiente de restituição normal (R_N) foi feita na maioria dos casos no nível do greide da rodovia, em posições deslocadas em planta, sob a consideração de que as propriedades mecânicas das rochas avaliadas eram mantidas constantes para a mesma cota. Assim, para a determinação dos valores de materiais presentes nas cotas superiores, foram feitas leituras em seções no sentido ascendente do greide, que foram posteriormente transferidas para a seção estudada. O procedimento utilizado para esta transferência dos resultados é ilustrado na Figura 4.9.

Este procedimento foi executado nas quatro seções transversais analisadas. Para as seções 57+800, 55+360 e 58+460 isto foi feito somente para o talude direito do corte, e na seção 50+840 isto foi feito tanto para o talude esquerdo quando para o direito. Na seção 58+460 foram feitas simulações de queda em ambos os lados considerando os mesmos parâmetros, devido à homogeneidade dos materiais presentes no corte. Os locais de ensaio encontram-se ilustrados na Figura 4.10.

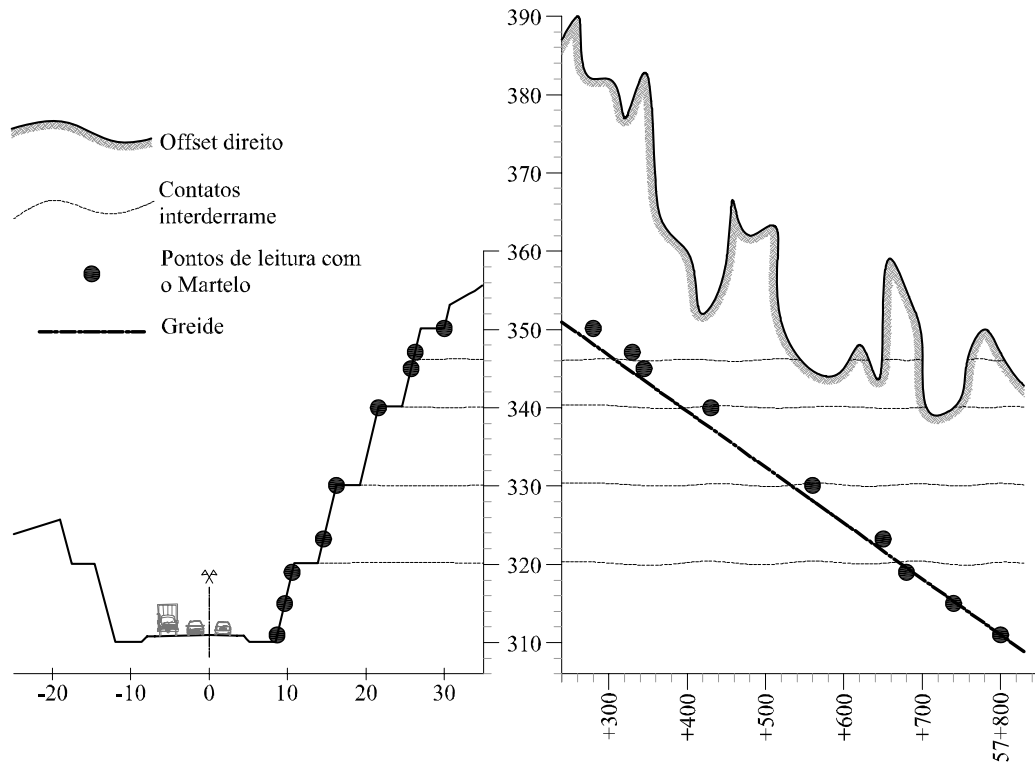


Figura 4.9: Posicionamento da sequência de locais ensaiados ao longo do eixo e transferência (projecção) para a seção transversal 57+800 estudada.

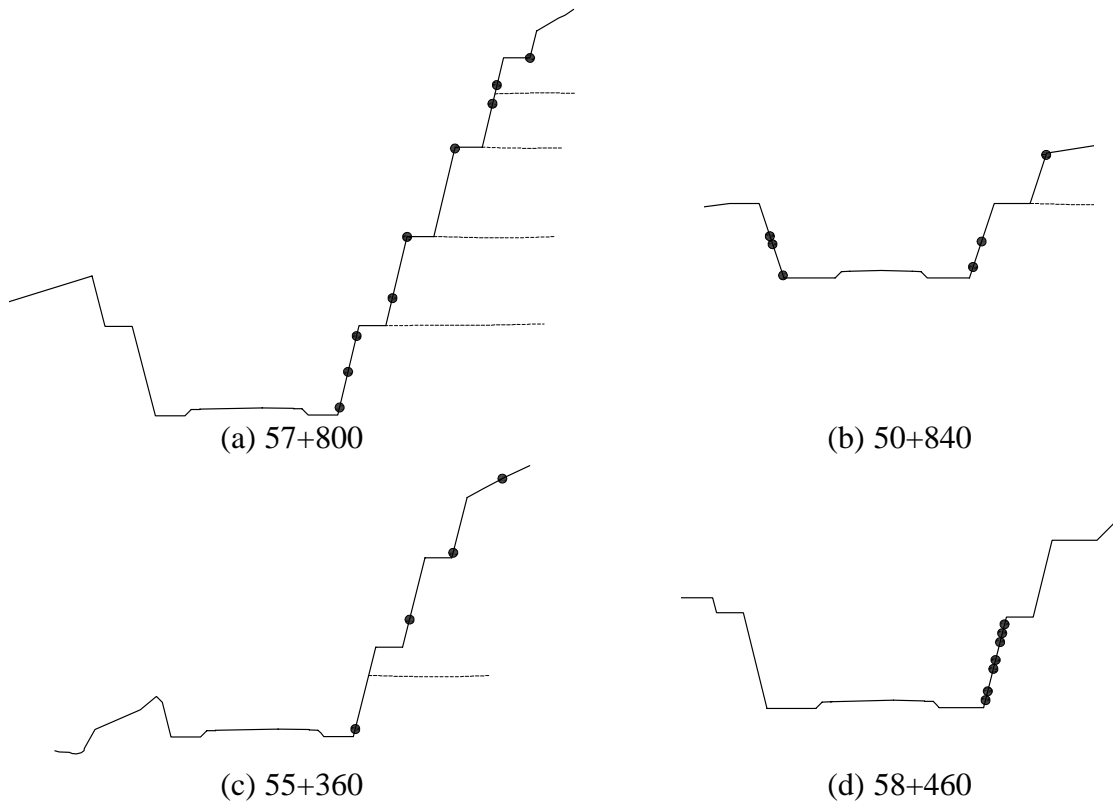


Figura 4.10: Representação dos locais transferidos (projetados) para as quatro seções estudadas.

A determinação do número de locais de ensaio para cada seção transversal foi determinada pelo número de derrames encontrados em cada uma. Assim, devido à estratificação dos taludes estudados, a determinação do valor de H_R foi feita para cada material. Sempre que possível, foram feitas várias determinações, calculados os respectivos coeficientes de restituição normal (R_N), e determinado finalmente um valor médio para ser empregado nas simulações de quedas de blocos. Em todos os casos foi obtido pelo menos um valor de H_R por camada de derrame.

Para cada local de ensaio era selecionada uma área da superfície do talude mediante um retângulo com comprimento da base menor de mínimo 15 cm (ver Figura 4.11a), que estivesse livre de fraturamentos intensos. Entretanto, em vários dos locais previstos isto não foi possível, levando ao reposicionamento do ponto ou, quando efetuados os ensaios, a que houvesse uma inconsistência nos valores obtidos ou mesmo instabilidade da superfície devido a fraturamentos paralelos à face do talude. A área definida para cada ensaio foi delimitada.

Em todos os casos, a superfície de ensaio encontrava-se seca e livre de incrustações de partículas finas, com textura superficial tendendo a lisa e eram obtidas dez (10) leituras para cada local de ensaio, sempre em direção normal ao plano do ponto de ensaio (ver Figura 4.11b).



(a)



(b)

Figura 4.11: Fotos dos procedimentos de campo (a) marcação dos pontos de impacto na face rochosa; (b) posicionamento do equipamento junto da rocha.

4.1.3. Correção por ângulo de aplicação do martelo

Atendendo a exigência da Norma ASTM D5873-05, foi feita a correção das leituras com relação à direção horizontal. Em todas as superfícies de ensaio foi medido o ângulo de mergulho com uma bússola de Brunel. Tendo em conta que as leituras com o martelo foram feitas perpendicularmente à superfície ensaiada, foi considerado o ângulo de aplicação como o valor medido na superfície incrementado em 90° . Para a correção da leitura foi empregado o procedimento proposto por Basu e Aydin (2005).

Este procedimento visa a obtenção de valores corrigidos para diferentes ângulos de aplicação ao incorporar as equações de balance de energia tanto para o momento antes do impacto quanto para o momento pós-impacto, não ficando limitado aos valores fornecidos pelos fabricantes dos martelos (geralmente $\pm 45^\circ$ e $\pm 90^\circ$). A convenção utilizada na definição do sinal do ângulo de aplicação foi a mesma proposta por Basu e Aydin, ilustrado na Figura 4.12.

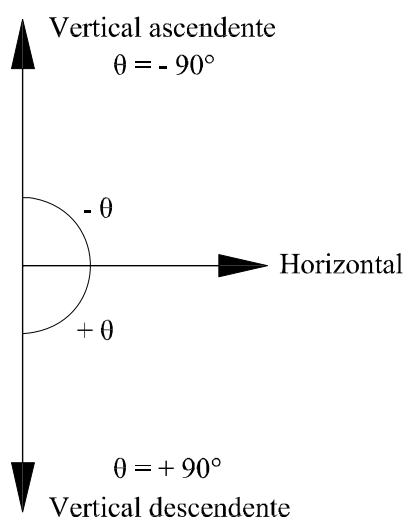


Figura 4.12: Convenção para a definição da direção do martelo Schmidt (modificado de BASU e AYDIN, 2005).

Para a aplicação deste procedimento são necessários os seguintes parâmetros próprios do martelo empregado para as determinações:

- a) k : constante da mola principal;
- b) x_1 : máximo alongamento da mola (equipamento completamente carregado);
- c) M : massa do pistão;
- d) V_1 : velocidade do pistão quando atinge o êmbolo, na direção horizontal;

- e) g : aceleração da gravidade;
 f) E : energia do martelo.

Os elementos aos quais estes parâmetros são referidos encontram-se ilustrados na Figura 4.13. O martelo cumpria com as condições de calibração definidas pela Norma ASTM D5873-05, pelo qual foi adotado o valor de energia de referência para martelos do tipo “N”, igual a 2,207 N*m. A maioria dos parâmetros necessários para a aplicação do método podem ser calculados a partir do valor de E e de x_1 , sendo este último o único a ser medido diretamente.

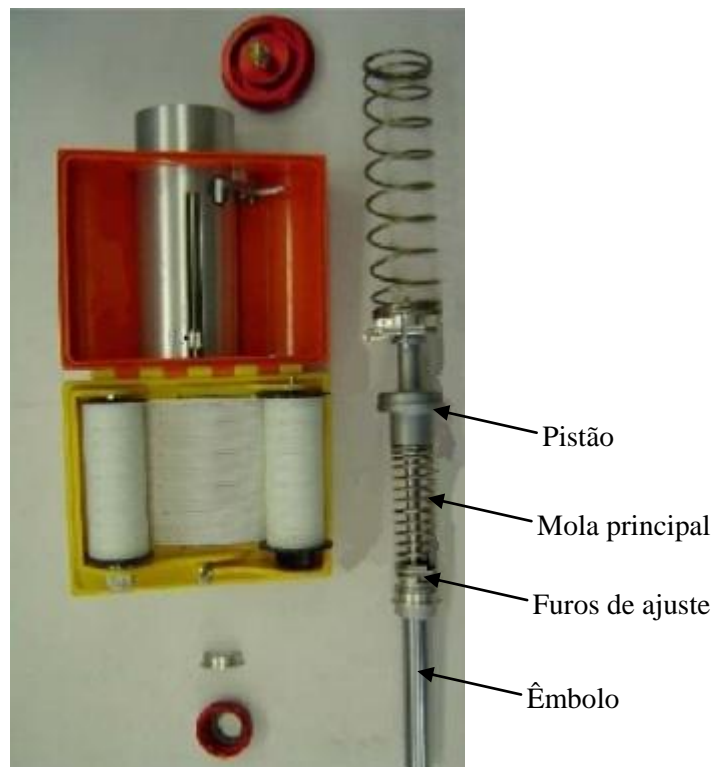


Figura 4.13: Partes do martelo empregado (modificado de BASU e AYDIN, 2005).

Com estes valores determinados, o procedimento começa pela determinação do máximo alongamento da mola após o rebote (x_2), segundo a Equação 34:

$$x_2 = \frac{H_{R(N)(\theta)} * x_1}{100} \quad \text{Equação 34}$$

O valor $H_{R(N)(\theta)}$ corresponde à leitura obtida com o martelo Schmidt à declividade de ensaio (θ).

Em seguida foi determinada a velocidade inicial do pistão após o rebote, levando em conta o

ângulo de aplicação do martelo (θ), para o qual foi seguida a Equação 35:

$$V_{2(\theta)}^2 = \frac{0,5 * k * x_{2(\theta)}^2 + M * g * x_{2(\theta)} * \text{Cos}(90 - \theta)}{0,5 * M} \quad \text{Equação 35}$$

O anterior valor foi corrigido com relação à direção horizontal, empregando para isto a Equação 36:

$$V_2^2 = \frac{V_{2(\theta)}^2 * 0,5 * k * x_1^2}{0,5 * k * x_1^2 + M * g * x_1 * \text{cos}(90 - \theta)} \quad \text{Equação 36}$$

O valor calculado com a Equação 36 se encontra corrigido para a direção de referência do ensaio (horizontal), razão pela qual foi possível calcular o valor da leitura equivalente empregando a Equação 37:

$$H_{R(N)} = \sqrt{\frac{V_2^2}{V_1^2}} * 100 \quad \text{Equação 37}$$

Este procedimento foi repetido para cada uma das leituras obtidas. Segundo este método, é possível obter famílias de curvas para cada martelo. Para o equipamento empregado no presente trabalho, algumas curvas são apresentadas na Figura 4.14.

4.1.4. Correção por tipo de martelo

Devido à limitação imposta pelo ISRM (1978) para que em aplicações em rocha somente fosse empregado o martelo Schmidt tipo “L”, muitos dos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores só incluíam este tipo de equipamento para o estabelecimento de correlações com parâmetros em rochas. Nos últimos anos, tanto na norma ASTM D5873-05 quanto na versão revisada do método para rochas da ISRM (AYDIN, 2009) começaram a aceitar o emprego do martelo tipo “N” para este tipo de aplicações. Existem alguns trabalhos que tentam estabelecer correlações deste último equipamento com algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais rochosos, começando pela definição de curvas que relacionam os dois tipos de martelos.

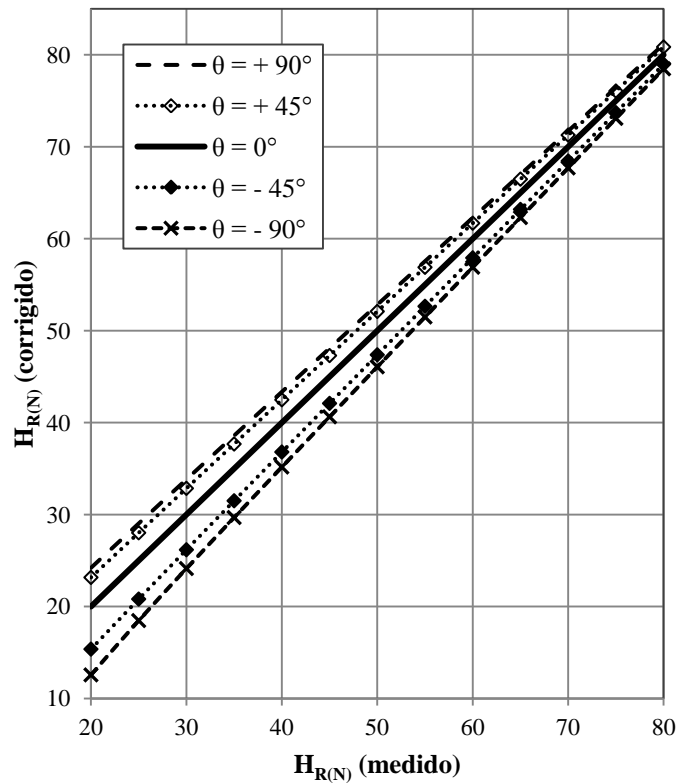


Figura 4.14: Curvas de normalização obtidas com relação à direção horizontal (modificado de BASU e AYDIN, 2005).

Para o presente estudo foi adotada a equação proposta por Aydin e Basu (2005), válida para valores de $H_{R(L)} > 30$ e de $H_{R(N)} > 40$:

$$H_{R(L)} = \frac{H_{R(N)} - 6,3673}{1,0646} \quad (r = 0,99) \quad \text{Equação 38}$$

A correção foi feita para cada leitura individual do martelo após ser corrigida pelo ângulo de aplicação. Os autores da equação advertem que esta foi obtida a partir de ensaios feitos em núcleos de granito com superfícies relativamente suaves, sob condições de laboratório, e que em aplicações de campo a correlação poderia diminuir pelas dificuldades no controle das condições de ensaio.

4.1.5. Cálculo do valor do coeficiente de restituição normal (R_N)

O método adotado para a determinação do coeficiente de restituição normal (R_N) proposto por Peng (2000) emprega os valores obtidos com o martelo Schmidt tipo “L” tanto do material

dos blocos que caem, quanto da superfície do talude que eles impactam. Além disto, o método contempla o efeito do ângulo de declividade da superfície do talude (ver Equação 39). No seu trabalho, Peng propôs duas equações, a primeira para superfícies lisas e blocos esféricos (condições de laboratório), e uma segunda para superfícies rugosas e blocos angulares (ensaios em campo). Para o presente trabalho, ambas as equações foram testadas com os resultados obtidos em campo, e se concluiu que a que melhor se ajusta às condições em campo foi a segunda (ver Equação 39).

$$R_N = \frac{-145 + 4H_{R(L)\text{-superf}} + 2H_{R(L)\text{-bloco}} + 2\alpha}{1000} \quad \text{Equação 39}$$

Onde: R_N : coeficiente de restituição normal para superfícies rugosas e blocos irregulares;

$H_{R(L)\text{-superf}}$: número de dureza de rebote (H_R) para a superfície do talude;

$H_{R(L)\text{-bloco}}$: número de dureza de rebote (H_R) para o bloco que cai;

α : ângulo de declividade do talude.

Devido à forte irregularidade superficial, o ângulo de declividade do talude é diferente do ângulo medido com bússola para cada local ensaiado com o martelo. A declividade do talude corresponde a um parâmetro de projeto, que para o caso da rodovia escolhida foi de 77° com relação à horizontal (aproximadamente 4V:1H).

4.2. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL E CONDIÇÕES PARA AS SIMULAÇÕES

O programa *RocFall* realiza as suas análises por meio de conceitos balísticos, que levam em conta relações de força gravitacional, impulso inicial após cada colisão, velocidade e inclinação de seu vetor em relação à horizontal e suas componentes paralelas e ortogonais ao declive no ponto de impacto. O programa desconsidera a forma e a textura de cada bloco, considerando que sua massa está concentrada em uma esfera pequena.

A seção transversal utilizada nas simulações de queda é definida através de segmentos retos ligados a pontos de coordenadas x e y , obtidos a partir dos levantamentos topográficos. O programa permite que a seção seja dividida em segmentos de comportamentos geotécnicos

distintos. Para o processo de simulação das trajetórias de queda de blocos, o manual lista uma série de variáveis que devem ser definidas, tanto para os blocos envolvidos nas quedas quanto para as superfícies dos taludes impactados (ROCSCIENCE 1998; 2003), as quais são descritas abaixo.

4.2.1. Velocidade angular

O programa permite que seja considerada a velocidade angular para os cálculos e definição das trajetórias de queda dos blocos. Isto não impede de fazer a definição separada das condições de velocidade angular inicial, sendo que neste trabalho em todos os casos ela foi definida com um valor inicial zero. Em geral, a documentação do programa *RocFall* recomenda que a velocidade angular seja considerada, o que foi atendido para o presente estudo. Também neste caso a velocidade angular inicial foi considerada zero.

A consideração da velocidade angular é feita na janela do programa *Project Settings*, ilustrada na Figura 4.15.

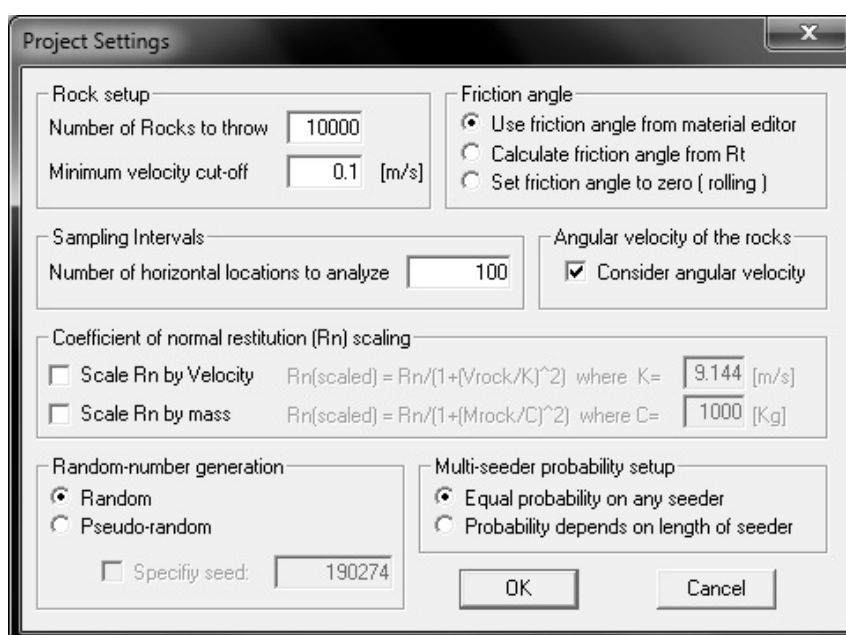


Figura 4.15: Representação de entrada de dados - condições gerais de projeto adotadas.

4.2.2. Fator de ajuste do coeficiente de restituição normal

Segundo Pfeiffer e Bowen (1989), o efeito do impacto do bloco está definido pela velocidade

antes de atingir a superfície sobre a qual vai repicar. Segundo estes autores, para velocidades baixas, o impacto acontece dentro da parcela de comportamento elástico do bloco, sem gerar deformações permanentes importantes nas superfícies de impacto, portanto a quantidade de energia dissipada pelo impacto é relativamente baixa. Para valores elevados de velocidade, o bloco sofrerá deformações permanentes, além das que aconteceram na superfície do material impactado, além da possibilidade de quebra do próprio bloco.

A correção do valor de R_N inicial é feita corrigindo-se este valor por um fator menor do que 1, a ser calculado segundo a Equação 40:

$$R_{N\text{corrigido}} = R_N * \text{Fator de ajuste} \quad \text{Equação 40}$$

O fator de ajuste se calcula segundo a Equação 41, apresentada a seguir:

$$\text{Fator de ajuste} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{\text{bloco}}}{K}\right)^2} \quad \text{Equação 41}$$

Onde: V_{bloco} : velocidade do bloco logo antes de impactar a superfície;

K : constante de ajuste. Por defeito o programa permite adotar um valor de 9,144 m/s, obtido experimentalmente no trabalho de Pfeiffer e Bowen (1989), mas que pode ser alterado pelo usuário.

O comportamento do fator de ajuste em função da velocidade, para um valor de K de 9,144 m/s, encontra-se ilustrado na Figura 4.16.

A existência de um fator que gera diminuição na energia cinética dos blocos tende a ser de grande utilidade principalmente para simulações com níveis altos de velocidade. Para o presente estudo, com base nos valores obtidos para R_N segundo a equação proposta por Peng (2000), ao se aplicar o coeficiente de ajuste ao coeficiente de restituição normal obtido, as trajetórias definidas nas simulações tendem a fornecer resultados nada representativos das condições observadas em campo. Pela anterior razão, decidiu-se desconsiderar o efeito deste coeficiente.

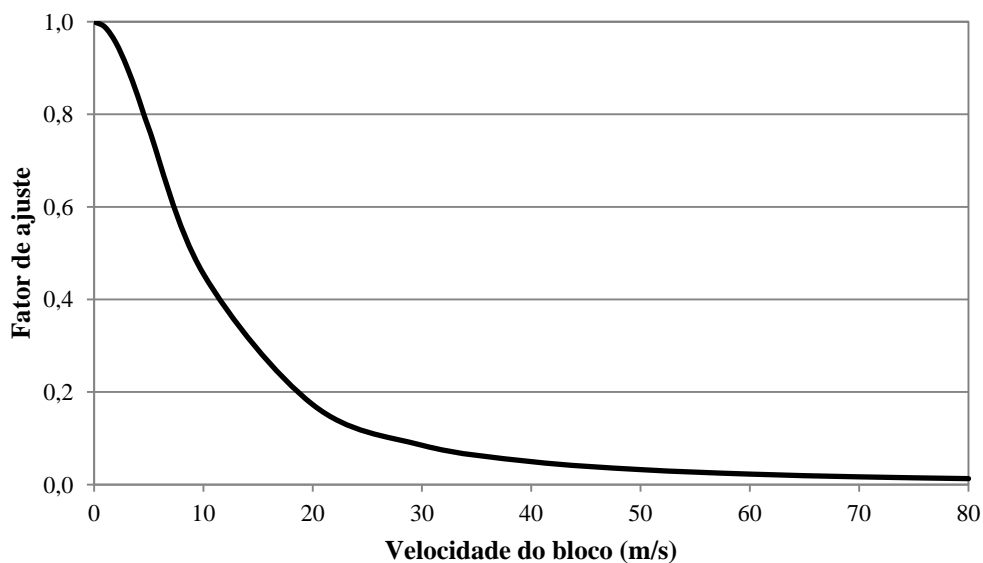


Figura 4.16: Variação do fator de ajuste de R_N com relação à velocidade do bloco ($K = 9,144$ m/s, Equação 41) (PFEIFFER e BOWEN, 1989).

4.2.3. Coeficientes de restituição normal e tangencial

Estes coeficientes determinam a parcela de energia do bloco que é dissipada no impacto com a superfície de contato e variam segundo o material que compõe a superfície do talude simulado. O programa *RocFall* admite valores para estes coeficientes entre 0 e 1, sendo 0 uma colisão inelástica e 1 uma colisão perfeitamente elástica.

Existem diversos procedimentos para a obtenção destes valores, desde retroanálise a partir de lançamentos de blocos in situ, testes em laboratório, ou a partir de correlações com algumas propriedades dos materiais envolvidos, como o proposto por Peng (2000).

O procedimento empregado no presente estudo permite unicamente a determinação do coeficiente de restituição normal (R_N). Os valores para o coeficiente tangencial (R_T) foram adotados da coletânea de valores disponibilizada no programa *RocFall*. A janela do programa para a definição dos diferentes valores de coeficientes de restituição encontra-se ilustrada na Figura 4.17.

Os valores para os coeficientes de restituição são considerados como sendo normalmente distribuídos, portanto é necessária a definição dos respectivos desvios padrões para cada um deles. É possível também considerar valores únicos para estes coeficientes, para isto sendo necessário fixar como zero os desvios. Para o presente estudo foram adotados desvios padrões

da coletânea disponibilizada no programa *RocFall*.

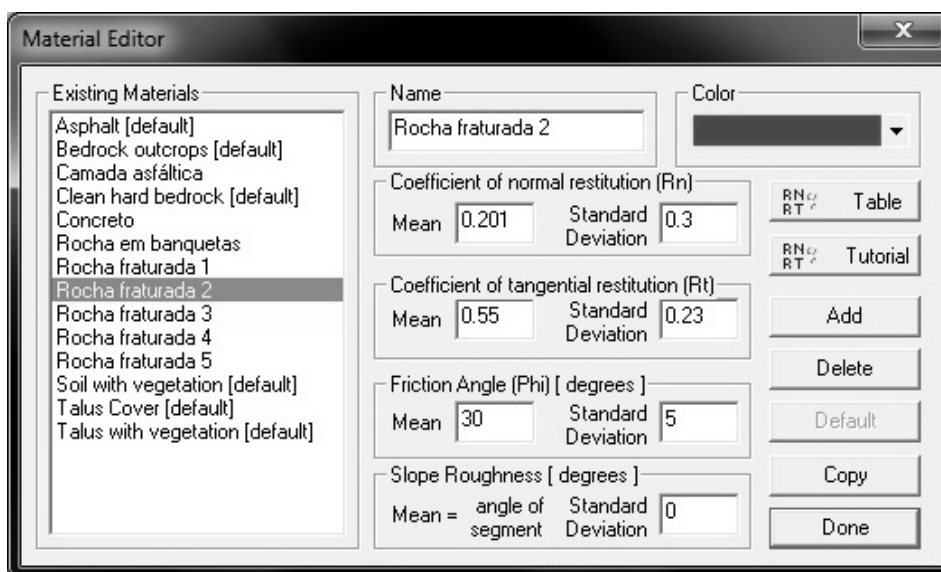


Figura 4.17: Parâmetros para cada superfície do talude impactada.

4.2.4. Rugosidade do talude

Este é um parâmetro utilizado para modelar variações locais na geometria do perfil do talude. Se desconsiderado este parâmetro, a superfície do talude ficaria definida só pelos seus limites topográficos extremos e seria considerada como sendo completamente lisa.

A determinação deste parâmetro da maneira como é aceita pelo programa *RocFall* é feita mediante medições das declividades de diferentes pontos dentro de um mesmo talude para uma mesma seção transversal, e posteriormente é feita uma análise de frequências nos dados. O valor médio obtido corresponderá à declividade do talude, e o desvio padrão à rugosidade geométrica (ver Figura 4.17, parte inferior).

Devido às dificuldades para fazer estas medições em campo, e considerando que nas seções estudadas o processo de desmonte com explosivos deixou superfícies muito rugosas, a rugosidade superficial foi definida com três valores: (a) uma condição sem rugosidade (lisa), (b) uma condição com uma rugosidade geométrica de amplitude 10 cm e (c) mediante a aplicação de uma rugosidade geométrica de 40 cm. A forma como esta rugosidade geométrica foi introduzida foi através do desenho de uma superfície irregular com saliências de magnitudes zero (lisa), 10 cm e 40 cm (ver Figura 4.18). Assim, a rugosidade do programa foi definida com um valor igual a zero para não haver interferências.

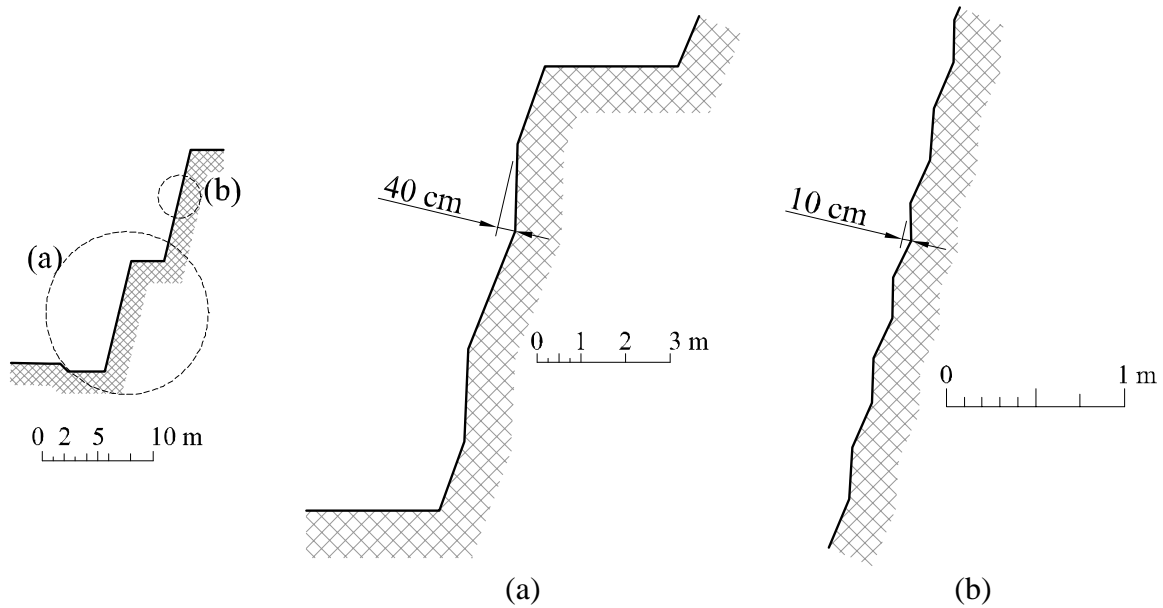


Figura 4.18: Condições de rugosidade geométrica testadas – (a) 40 cm e (b) 10 cm.

4.2.5. Ângulo de atrito da superfície do talude

Este parâmetro determina se, quando um bloco impactar uma superfície em uma determinada posição dentro de um segmento de talude, haverá uma desaceleração ao ponto de fazer com que ele entre em repouso ou, ao contrário, o deslocamento continuará (ROCSCIENCE, 2003).

Já que o programa *RocFall* não leva em conta nem o formato nem o tamanho do bloco, este valor é adotado como sendo representativo dos diferentes tipos de blocos que caem. O valor deste parâmetro encontra-se entre um valor mínimo (zero) e um máximo igual ao coeficiente de atrito do material.

O programa também permite determinar este valor por meio do valor do coeficiente de restituição tangencial (R_T), mas para o caso do presente estudo foram adotados valores recomendados pelo programa, que na totalidade dos casos foram inferiores aos que teriam sido obtidos a partir do valor de R_T (ver Figura 4.17).

No Quadro 4.1 é apresentado o resumo dos parâmetros de restituição, atrito e rugosidade de todos os materiais considerados nas análises computacionais do presente estudo. Aclara-se que alguns dos valores apresentados neste quadro ainda não foram discutidos, o que será feito em itens posteriores.

Quadro 4.1. Resumo dos parâmetros para os materiais empregados nas simulações de quedas de blocos

Material	R_N		R_N		Ângulo de atrito (°)		Rugosidade superficial (°)
	Médio	Desvio Padrão	Médio	Desvio Padrão	Médio	Desvio Padrão	
Rocha dos taludes	(*)	0,04	0,55	0,04	30	5	0
Rocha em banquetas	0,18	0	0,50	0	35	0	5
Areia fofa (**)	0,04	0,03	0,48	0,23	30	5	0
Concreto	0,48	0,19	0,53	0,17	10	5	0
Camada asfáltica	0,40	0,04	0,90	0,04	30	2	0

Fonte: ROCSCIENCE (2003).

(*) Valores obtidos através do procedimento descrito no presente estudo.

(**) Labiouse e Heidenreich (2009).

4.2.6. Massas dos blocos e velocidades de deslocamento iniciais

Em todos os casos, se considerou que os blocos iniciaram suas trajetórias sem nenhuma velocidade de deslocamento tangencial ou angular (ver subitem 4.2.1). Isto fez com que os blocos começassem seu deslocamento com rolamento, até eles atingirem saliências ou reentrâncias geométricas.

Com relação às massas dos blocos, para efeito da construção das trajetórias foram considerados blocos de 10 kg, conforme a situação mais comumente encontrada em campo. Para o caso descrito no item 4.3.1 foram considerados blocos de 10 kg e também de 500 kg, por terem sido encontrados blocos desta magnitude tanto durante a construção quanto na operação. Embora a massa dos blocos não gere trajetórias de queda muito diferentes, claramente há grandes diferenças nas energias cinéticas, as quais definiram em que casos os elementos rígidos poderiam ser danificados pelos impactos.

4.3. IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE PROTEÇÃO

A existência de uma ou mais composições geométricas para as seções transversais estudadas permitiu avaliar os efeitos de cada uma na geração de trajetórias de queda. No entanto, em alguns casos o risco de dano por impacto de blocos faz com que seja necessária a implementação de medidas de proteção adicionais, sejam de tipo ativas ou passivas.

Tendo em conta que o intuito do presente estudo não é a definição de alternativas de solução para quedas de blocos, mas sim a comparação dos efeitos destas dentro um ambiente rodoviário típico de zona montanhosa, foi feito um estudo básico de alguns tipos de medidas de proteção. As medidas aqui estudadas foram analisadas em todas as alternativas geométricas já previamente estudadas, salvo quando não existiam condições para as duas situações serem implantadas de maneira simultânea.

4.3.1. Barreira vertical de baixa altura no bordo da pista

A instalação de barreiras de segurança de baixa altura junto ao bordo do acostamento, como as de concreto tipo *New Jersey*, é uma solução bastante utilizada para evitar a queda de veículos desgovernados para fora da pista. Seu uso neste trecho seria ainda mais justificado em virtude da pequena largura do acostamento e pela presença da área de retenção de blocos contígua, o que faz com que os possíveis danos aos veículos e passageiros sejam elevados. Além disto, este tipo de barreira pode servir também para a retenção de alguns blocos que poderiam invadir a área destinada aos veículos, aumentando a efetividade de qualquer alternativa geométrica. Outra alternativa seria o uso de defensas metálicas tipo “W”, entretanto no presente trabalho elas não foram estudadas por não serem elementos contínuos na altura não sendo possível a sua incorporação exata nas análises de quedas de blocos.

As simulações de queda com a incorporação de barreiras de baixa altura considerou uma barreira em concreto tipo *New Jersey*, conforme com a geometria proposta na *Roadside Design Guide* (ALBERTA, 2007) (ver Figura 4.19).

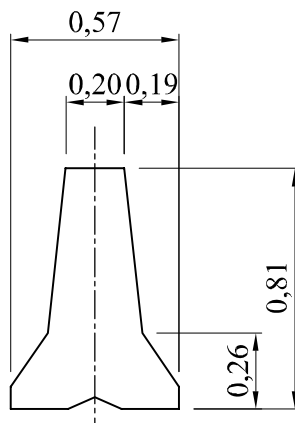


Figura 4.19: Detalhe barreira *New Jersey* (ALBERTA, 2007).

No estudo realizado, os elementos de concreto da barreira não foram ancorados dentro do solo de apoio, sendo sua resistência aos impactos função da:

- a) resistência própria do elemento de concreto;
- b) capacidade de transmissão da energia do impacto através das conexões entre módulos pré-moldados, expressa pelo deslocamento lateral máximo do elemento atingido pelo impacto.

Embora para o dimensionamento deste tipo de elementos de proteção seja necessária a realização de uma série de testes de colisões de veículos (NCHRP, 1993), em alguns casos ainda é utilizado o critério definido pela AASHTO (1996), segundo o qual este tipo de elementos teria que suportar até uma carga de 4536 kg (10.000 Lb) aplicada no seu topo.

Além do critério de resistência do concreto do elemento, mesmo que em alguns casos o elemento não atinja o estado de ruptura, o deslocamento máximo do sistema de barreiras deve ser controlado. A *GSL Prefabricados* (2012) propõe para o seu sistema DB80 um valor máximo de 0,58 m, sendo que seus elementos estão de acordo com os definidos por ALBERTA (2007), e possuem um comprimento de 4 metros.

Sendo assim, a barreira perde sua condição de funcionalidade em situações em que o bloco que a impacta provoca ou uma quebra estrutural ou consegue deslocar o elemento até o valor máximo aceito (~58 cm), precisando para isto de uma energia líquida de 25578 J. Para as simulações feitas com este tipo de barreiras, qualquer bloco que ultrapassasse esta energia foi considerado capaz de provocar danos inaceitáveis na barreira.

Na Figura 4.20 é apresentada uma representação esquemática de uma barreira de baixa altura

instalada no bordo exterior do acostamento direito ($h = 0,81$ m).

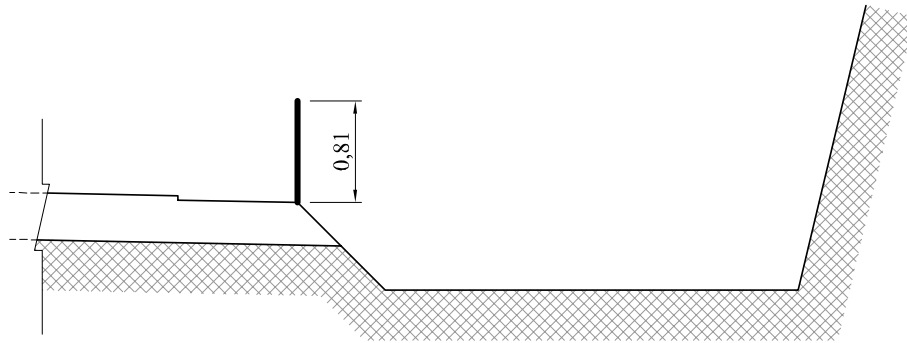


Figura 4.20: Representação esquemática da barreira instalada no bordo do acostamento, junto da área de retenção.

4.3.2. Camada de areia fofa substituindo parcialmente a área de retenção

Da mesma forma que o uso de barreiras de impacto em concreto, este tipo de alternativa pode cumprir duas funções: (a) como mecanismo para diminuição da velocidade de veículos desgovernados e (b) na absorção da energia (contenção) de blocos. Para cumprir estas funções há necessidade de um alargamento do greide, o que neste caso já existe (área de contenção).

No presente estudo, a camada de areia foi considerada como uma alternativa possível de ser aplicada mesmo durante a operação da rodovia, razão pela qual foi estudada com o preenchimento parcial da profundidade deixada pela escavação da área de retenção de blocos (0,40 m). O arranjo desta solução com camada de areia é ilustrado na Figura 4.21.

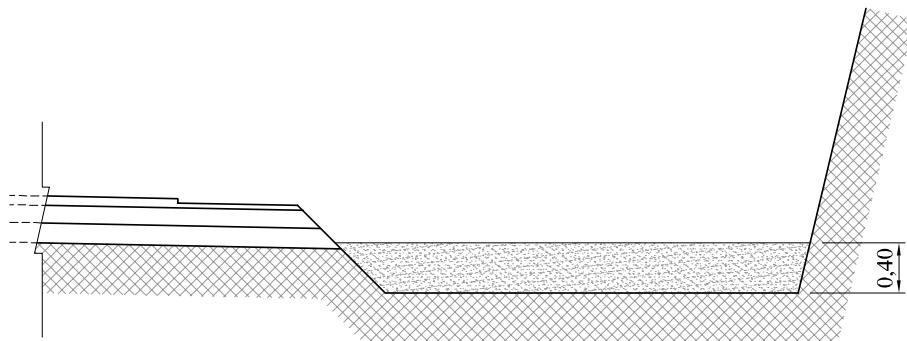


Figura 4.21: Representação da camada de areia fofa preenchendo parcialmente a área de retenção de blocos.

4.3.3. Barreiras compostas por redes metálicas sobre a face do talude

A instalação de barreiras flexíveis compostas por redes ou malhas metálicas se constitui como uma boa medida de proteção, principalmente pela capacidade de transformar a energia cinética dos blocos em trabalhos com grandes deformações, sendo bastante eficientes em termos da exigência de cada um dos seus elementos. Além disto, trazem as seguintes vantagens:

- a) são bastante úteis para locais com limitações na largura da seção transversal;
- b) permitem o controle de blocos de grande porte, que não seriam facilmente contidos por elementos rígidos, seja por suas trajetórias, seja pela energia cinética que desenvolvem durante a sua queda.

Este tipo de solução permite fácil adaptação às mais variadas topografias e alturas de taludes, permitindo inúmeras combinações de elementos. No entanto, para o presente trabalho foi testada uma solução de complexidade mínima, que também permitisse manutenções periódicas, com uma logística mais limitada.

Nas quatro seções estudadas no presente trabalho foi instalada uma barreira de 4,0 m de comprimento, com um ângulo de 75° com relação à superfície do talude (ver Figura 4.22). Para os casos com existência de banquetas, a conexão entre a barreira e a face do talude foi feita a 1 metro acima do nível da primeira banqueta. Para os casos em que estas foram eliminadas, a conexão foi projetada para que ficasse na metade da altura do respectivo talude.

Em todas as análises foi desconsiderada a resistência máxima da barreira pela possibilidade de empregar elementos de resistências variadas, em função das solicitações de cada caso. As faixas de trabalho deste tipo de materiais variam entre 100 e 8.000 kJ, segundo alguns fabricantes (GEOBRUGG, 2012; MACCAFERRI, 2012), permitindo que, mediante uma combinação entre resistências de materiais e projeto de instalação de barreiras, possam ser contidos os blocos sem gerar danos excessivos às barreiras.

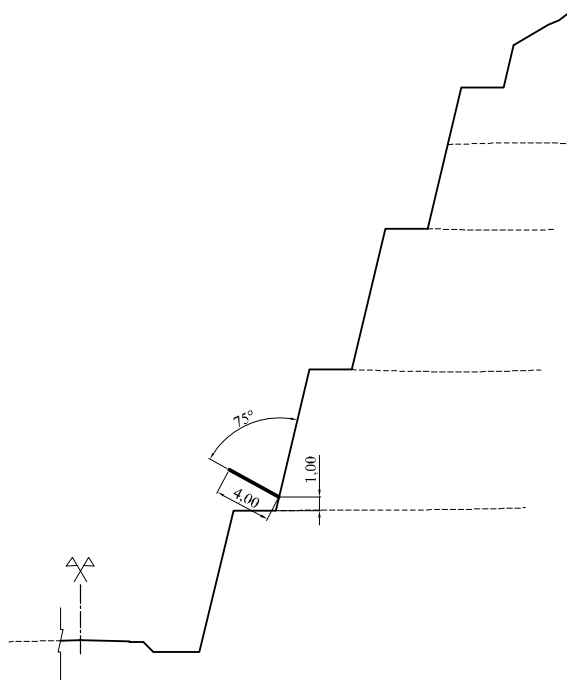


Figura 4.22: Representação esquemática da barreira composta por redes metálicas instalada na superfície do talude.

4.3.4. Instalação de proteção superficial ao longo da face do talude

A implantação de uma medida de proteção superficial, seja por meio de concreto projetado ou por meio de redes metálicas, corresponde à única alternativa ativa considerada para o presente estudo. A proposta de solução não incluiu a totalidade da altura do talude por duas razões:

- a) o elevado custo que este tipo de alternativa geralmente implica;
- b) o fato de que uma contenção na totalidade do talude naturalmente eliminaria as quedas de blocos, se bem construída.

A intenção, neste caso, assim como para a condição com barreiras em redes metálicas, foi a de fornecer uma solução mínima, que além de garantir segurança permitisse conjugar duas soluções, tanto ativa quanto passiva. Para tanto, foi considerado nas análises o uso de tela somente nos cortes superiores deixando o corte abaixo da primeira banquetta desprotegido, sendo esta a única fonte de queda de blocos. Nos taludes protegidos se pode considerar quaisquer dos seguintes mecanismos, dependendo do tipo de medida de proteção adotada:

- a) que não aconteça nenhuma queda caso o sistema impediça as deformações da superfície do talude (esta condição seria cumprida se fosse implantada uma

proteção com concreto projetado ou com redes ancoradas em todas as superfícies dos taludes);

- b) que os blocos que começam a se movimentar só consigam fazer trajetórias de rolamento de baixa velocidade e fiquem depositados sobre as banquetas (esta condição poderia ser cumprida no caso de fazer a instalação de cortinas metálicas ancoradas apenas no topo do seu respectivo talude).

Esquemáticamente, a condição descrita pode ser ilustrada pela Figura 4.23 (linhas de maior intensidade). Para as situações quando não existem banquetas, a proteção foi disposta só na metade superior do talude.

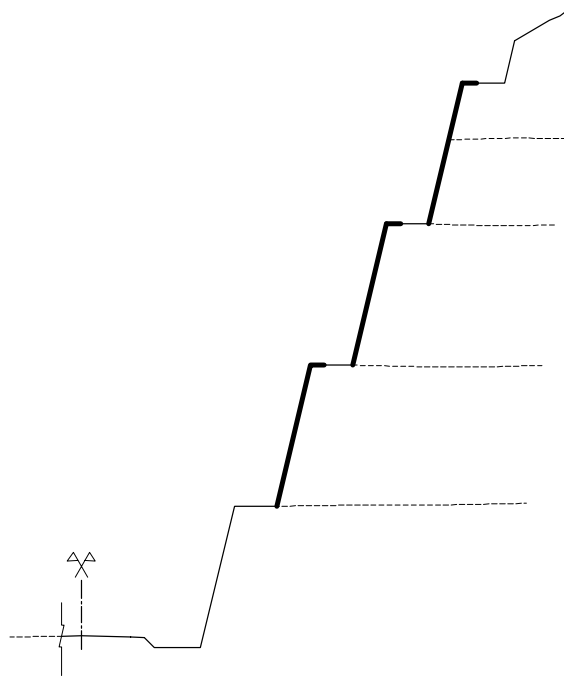


Figura 4.23: Representação esquemática da proteção superficial contra quedas instalada na face dos taludes.

Na Figura 4.23 foram consideradas proteções unicamente para as superfícies inclinadas, as superfícies das banquetas não necessitam nenhuma proteção. Não foram feitas considerações construtivas para os métodos, já que só foi considerada sua resposta funcional. A escolha de um ou de outro método dependerá das condições particulares de cada projeto e o custo relacionado. Da mesma forma, pelo tipo de resposta desta alternativa, não foram considerados parâmetros de resistência máxima para os materiais de proteção superficial.

5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS MOVIMENTOS DE BLOCOS

No capítulo 3 do presente trabalho foram apresentados os diferentes setores que constituem a rodovia RS471/BR153, assim como suas principais condicionantes geotécnicas. No presente capítulo serão apresentados com maior detalhamento algumas das situações típicas para os setores chamados de “planalto” e “descida da serra”, associadas principalmente a problemas de quedas de blocos provenientes dos taludes de corte gerados durante a execução do projeto da rodovia.

Devido às diversas modificações sofridas pelo projeto ao longo tanto da sua concepção como, principalmente, durante sua execução, alguns dos locais analisados têm variações na geometria das seções transversais. Geralmente, estas variações consistem em diferenças nas cotas e larguras das banquetas, as quais muitas vezes não constam em plantas “*as built*” da rodovia. O trabalho tentou reproduzir a situação real da melhor maneira possível a partir das seções de medição, de modo a tornar os modelos empregados nas simulações computacionais o mais representativos possível.

Para a realização das análises de quedas de blocos foram selecionadas quatro seções localizadas nas estacas 50+840, 55+360, 57+800 e 58+460 segundo o estaqueamento do projeto (DAER, 2002a), e foram aplicadas nelas as mudanças descritas no capítulo 3:

- a) alargamento do corte ao nível da plataforma para o estabelecimento de áreas de retenção para eventuais quedas de blocos;
- b) estabelecimento de banquetas a cada 10 metros de altura com relação ao pé dos cortes e com larguras de 3 metros;
- c) quando possível, abatimento dos cortes até atingir uma declividade de 3V:1H (esta foi uma condição inviável de adotar na maioria dos trechos de serra).

Foi feita uma análise completa da seção localizada na estada 57+800, por ser considerada a seção mais crítica dentro das quatro analisadas, devido tanto às instabilidades de blocos visíveis como pela altura do corte.

Em termos de geologia, este ponto estudado encontra-se constituído pela sucessão de derrames basálticos da Formação Serra Geral, com níveis de alteração variáveis, fraturamento

intenso e contatos entre derrames bem definidos, possíveis de serem identificados por inspeção visual. O topo do talude está constituído por uma camada de solo orgânico, com presença de vegetação de baixo e mediano porte (ver Figura 5.1).



Figura 5.1: Vista geral do talude localizado na estaca 57+800.

Embora ao longo da execução da obra tenha se tentado manter a geometria transversal do projeto, com suas modificações, as dificuldades geradas pelo processo de desmonte com explosivos em materiais tão variáveis e com alto grau de fraturamento, fez com que algumas das banquetas não ficassem muito bem definidas. De qualquer modo, seu número foi mantido, assim como a declividade geral do talude.

Na Figura 4.6 é apresentada a geometria definida para a realização das análises de trajetórias de queda. Esta seção, assim como duas das outras três analisadas no presente trabalho, possui a terceira faixa destinada à subida de veículos de carga. Por não terem sido observados processos de instabilidade no talude esquerdo da rodovia (no caso desta estaca), as análises somente foram feitas considerando quedas no talude direito. Na Figura 5.2 é apresentado o detalhe do acostamento e da área de retenção de blocos executada.

Durante as inspeções de campo foram observados os pontos de impacto dos blocos visíveis dentro da pista de rolamento, assim como alguns blocos ainda encontrados no local (antes de serem removidos pelo tráfego ou manutenção). Estas informações de posição final foram comparadas com os alcances máximos obtidos das simulações numéricas dos vários casos.

A inexistência de seções transversais dos cortes “*as built*” como foi dito acima, somada às variações dos cortes ao longo da construção e do início da operação (processos de quedas de

blocos) introduzem uma série de incertezas sobre as condições reais da rugosidade superficial, o que tem grande importância nas análises de quedas.

5.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO NORMAL

O procedimento, baseado no emprego do martelo Schmidt, foi executado seguindo as determinações da Norma ASTM D5873 e os procedimentos propostos por Aydin (2009) e Basu e Aydin (2005). O martelo empregado para o presente trabalho foi do tipo “NR”, fabricado pela empresa Suíça Proceq®, de propriedade do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

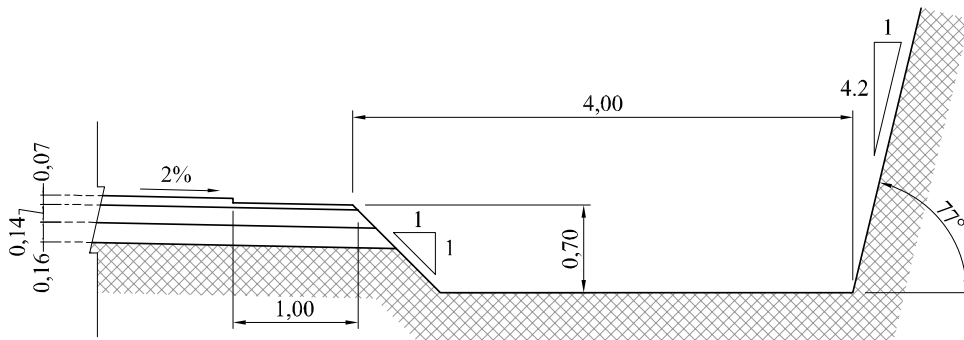


Figura 5.2: Detalhe da estrutura do pavimento e da área de retenção de blocos.

No trabalho proposto por Peng (2000), a determinação do coeficiente de restituição normal (R_N) foi feita empregando durante o processo um martelo Schmidt tipo “L”, atendendo à recomendação feita pelo ISRM (1978), segundo a qual, no caso de aplicações em rocha, só eram aceitos este tipo de martelos, por causa da sua energia menor ($0,735 \text{ N}\cdot\text{m}$). Para que fosse possível a aplicação da equação proposta por Peng (2000), foram necessários os seguintes procedimentos de ajuste:

- a) corrigir as leituras obtidas em campo para que todas fossem referidas a uma condição de aplicação horizontal (BASU e AYDIN, 2005);
- b) transformar as leituras do martelo “NR” em leituras equivalentes “L” (AYDIN e BASU, 2005).

O processo para a determinação das leituras corrigidas segundo o ângulo de aplicação requer

o uso de alguns parâmetros intrínsecos ao martelo empregado para cada caso. Em razão de que o equipamento empregado por Basu e Aydin (2005) teve o mesmo fabricante e as mesmas características do que o empregado para o presente trabalho, foram adotados os parâmetros medidos por estes autores (ver Quadro 5.1).

Quadro 5.1. Constantes para martelo “NR” Proceq©.

k (N/m)	764,2	g (m/s ²)	9,810
x₁ (m)	0,076	E (N*m)	2,207
M (kg)	0,3895	V₁² (m/s) ²	11,3325

Fonte: Basu e Aydin (2005)

Para cada ponto de ensaio foram coletadas informações que permitissem a definição da sua cota aproximada, o que foi feito com o auxílio dos volumes de projeto da rodovia (DAER, 2002b). Devido à forte irregularidade superficial, na maioria dos casos a informação sobre a declividade da superfície não corresponde à do talude, mas sim à do ponto de ensaio, parâmetro necessário para a correção das leituras feitas com o martelo. Note-se que, na informação apresentada a seguir, a direção do martelo expressa pelo ângulo de aplicação é normal à superfície de leitura, atendendo com isto às exigências da Norma ASTM D5873:

- a) estaca: 57+800
- b) nível das leituras com relação ao greide: 0,0
- c) cota: 311,0
- d) declividade superfície: 82°
- e) ângulo de aplicação: 8°
- f) talude (no sentido do estaqueamento): direito.

Para cada um dos locais ensaiados foi obtido um valor médio da leitura do Martelo Schmidt segundo a seguinte técnica: eram obtidas 10 leituras individuais, conforme Norma ASTM D5873, que foram analisadas após a correção por ângulo de aplicação. As leituras individuais só eram aceitas se diferissem em menos de 7 unidades com relação à média. Foi feita a correlação para as leituras equivalentes com o martelo tipo “L”, tal como se pode ver no Quadro 5.2.

Quadro 5.2. Leituras de campo e processamento para local correspondente ao 57+800.

No.	Leitura $H_{R(N)(\theta)}$	x_2 (m)	$V_{2(\theta)}^2$ (m/s) ²	V_2^2 (m/s) ²	Leitura Equivalente $H_{R(N)(\theta = 0^\circ)}$	Leitura Equivalente $H_{R(L)}$	Leitura aceita $H_{R(L)}$
1	49	0,0372	2,823	2,772	49,5	40,5	40
2	47	0,0357	2,601	2,554	47,5	38,6	39
3	58	0,0441	3,933	3,862	58,4	48,9	49
4	50	0,0380	2,937	2,884	50,4	41,4	41
5	58	0,0441	3,933	3,862	58,4	48,9	49
6	54	0,0410	3,417	3,355	54,4	45,1	45
7	51	0,0388	3,053	2,999	51,4	42,3	42
8	49	0,0372	2,823	2,772	49,5	40,5	40
9	50	0,0380	2,937	2,884	50,4	41,4	41
10	48	0,0365	2,711	2,662	48,5	39,5	40

LEITURAS	10
MEDIA	51,40
DESVIO PADRÃO	3,950
COEF. VARIAÇÃO	7,68%

	10	10
51,8	42,7	43
3,915	3,677	3,677
7,55%	8,61%	8,61%

Esse procedimento foi executado em diferentes locais ao longo do traçado, visando obter uma distribuição em toda a altura do talude executado, tomando-se cuidado para que pelo menos existisse um local de determinação por cada derrame basáltico, tal como pode ser observado na Figura 5.3.

O cálculo do valor de R_N segundo a Equação 39 depende de três parâmetros: (a) valor de rebote $H_{R(L)}$ para o material da superfície do talude, (b) valor de rebote $H_{R(L)}$ para o material do bloco que cai e (c) declividade do talude do talude (α). Devido a que cada local de análise dentro do talude será impactado pelos blocos oriundos dos derrames superiores a ele, os quais em muitos casos correspondem a materiais com diferente resposta quando ensaiados com o martelo Schmidt, existiriam dificuldades para escolher um valor representativo de $H_{R(L)}$ para os blocos. Nesse sentido, foi considerado que o valor de $H_{R(L)}$ para os blocos era igual ao do material do talude. O valor de α escolhido foi o mesmo apresentado na Figura 4.6 ($\alpha = 77^\circ$).

A determinação do valor do coeficiente de restituição normal (R_N), utilizando a Equação 39, proposta por Peng (2000) foi feita a partir de cada valor de $H_{R(L)}$ obtido experimentalmente. O resumo dos valor do R_N obtidos para cada local de leitura é apresentado na Figura 5.4.

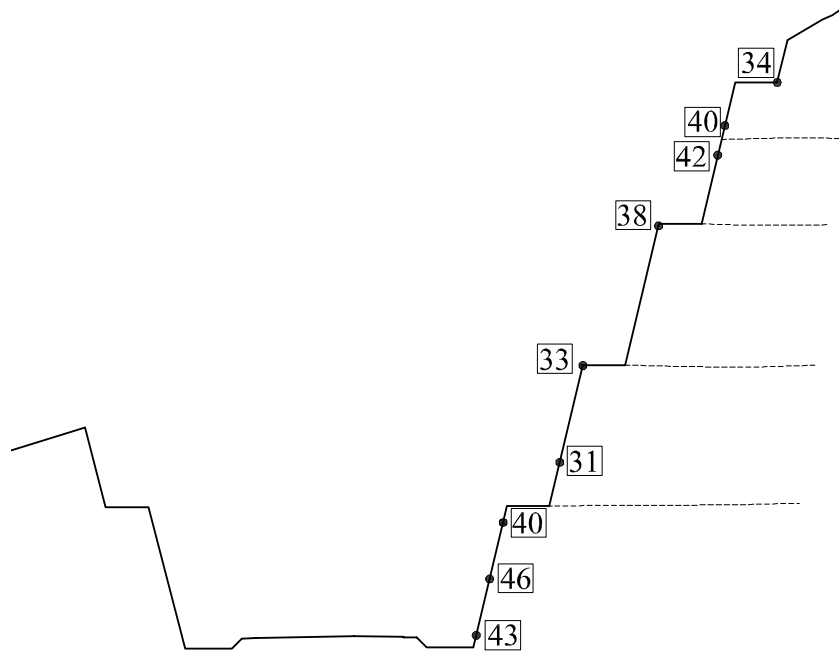


Figura 5.3: Valores de leituras médias de rebote obtidas com martelo Schmidt tipo "L" $H_{R(L)}$ calculadas para a seção 57+800.

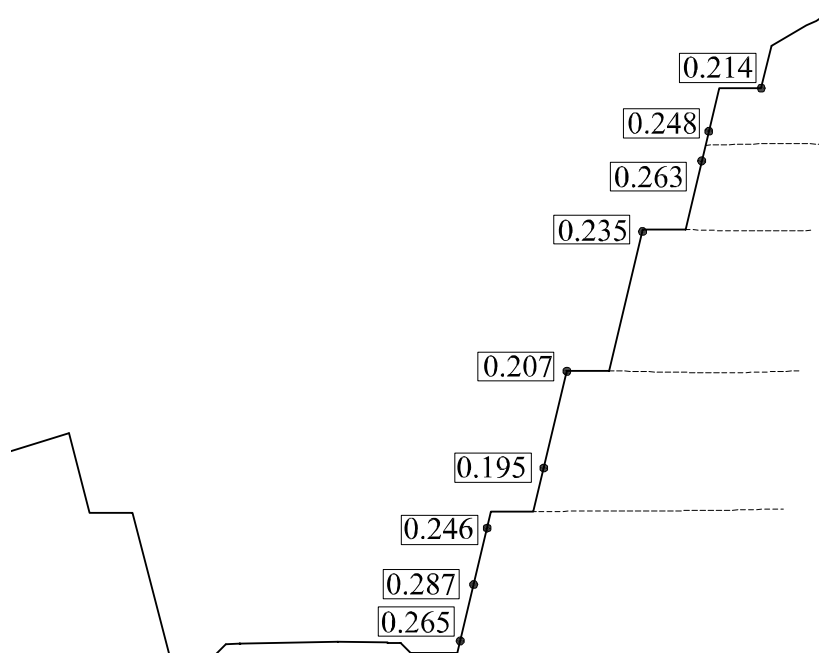


Figura 5.4: Valores do coeficiente de restituição normal (R_N) obtidos para a seção 57+800.

Tanto no trabalho apresentado por Peng (2000) como no de Rayudu (1997) não foi possível determinar nenhum modelo matemático que conseguisse representar de maneira aceitável a variação do coeficiente de restituição tangencial (R_T). No trabalho feito por Wu (1985) estes valores só dependiam da declividade do talude além de serem bastante limitados para um tipo de material. O programa *RocFall* disponibiliza uma coletânea de coeficientes tanto normais quanto transversais obtidos por diferentes autores para diferentes materiais. Neste trabalho foram adotados os seguintes valores para as simulações:

a) rochas dos taludes:	R_T :	0,55
	ângulo de atrito:	30°
	rugosidade superficial:	0°
b) camada Asfáltica:	R_N :	0,4
	R_T :	0,9
	ângulo de atrito:	30°
	rugosidade superficial:	0°

Conforme descrito antes, foram definidos valores de R_N para cada uma das camadas rochosas (derrames), calculando a média aritmética nos casos quando se tinha disponibilidade de vários valores, e do valor único quando existia um valor só (ver Figura 5.5).

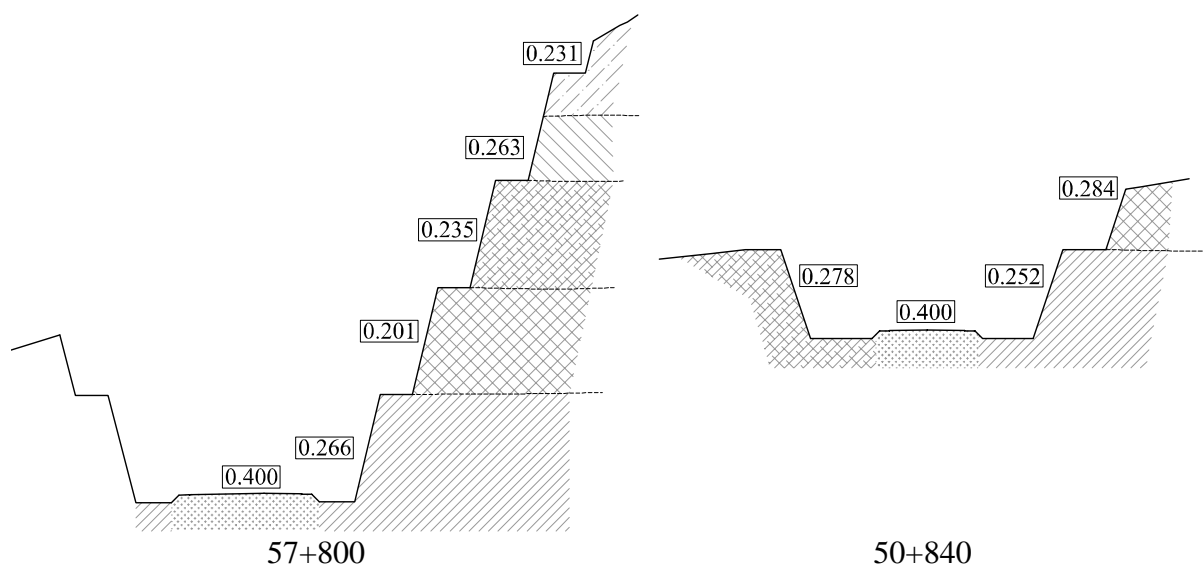


Figura 5.5: Valores médios do coeficiente de restituição normal (R_N) empregados nas simulações.

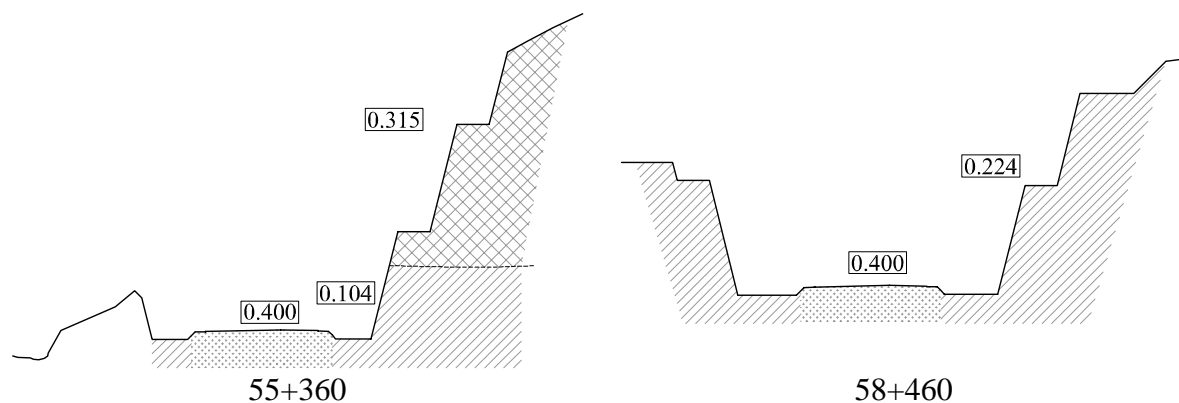


Figura 5.5 (Continuação): Valores médios do coeficiente de restituição normal (R_N) empregados nas simulações.

Ao comparar os resultados obtidos para este estudo com a proposta gráfica feita por Chau (2002) (ver Figura 2.10), os dados variam entre os correspondentes a taludes em rocha e em solo. Seja pelo grau de alteração, seja pelo fraturamento, os materiais não conseguem se ajustar completamente à classificação proposta para taludes em rocha. É importante anotar a dificuldade obtida em alguns pontos para a execução das leituras com o martelo Schmidt por causa do intenso fraturamento que, em alguns casos é paralelo à face do talude, dificultando a sua rápida identificação.

5.2. DEFINIÇÃO DAS FONTES DE QUEDA DE BLOCOS

Para a definição das origens de quedas de blocos, o programa *RocFall* permite definir pontos únicos quando se dispõe desta informação, ou faixas de queda, situação mais próxima do caso estudado.

Para a estaca 57+800, dos cinco taludes interbanquetas existentes no lado direito do corte foram definidos os quatro inferiores como sendo origem de quedas, já que o talude superior está constituído principalmente pela camada de solo orgânico, que além de não ter gerado instabilidades visíveis nesta parte da rodovia, ficaria fora do alcance do programa por precisar de uma análise distinta à de queda. Na Figura 5.6 estão representadas em linhas pretas as faixas de queda correspondentes às áreas de maior intensidade.

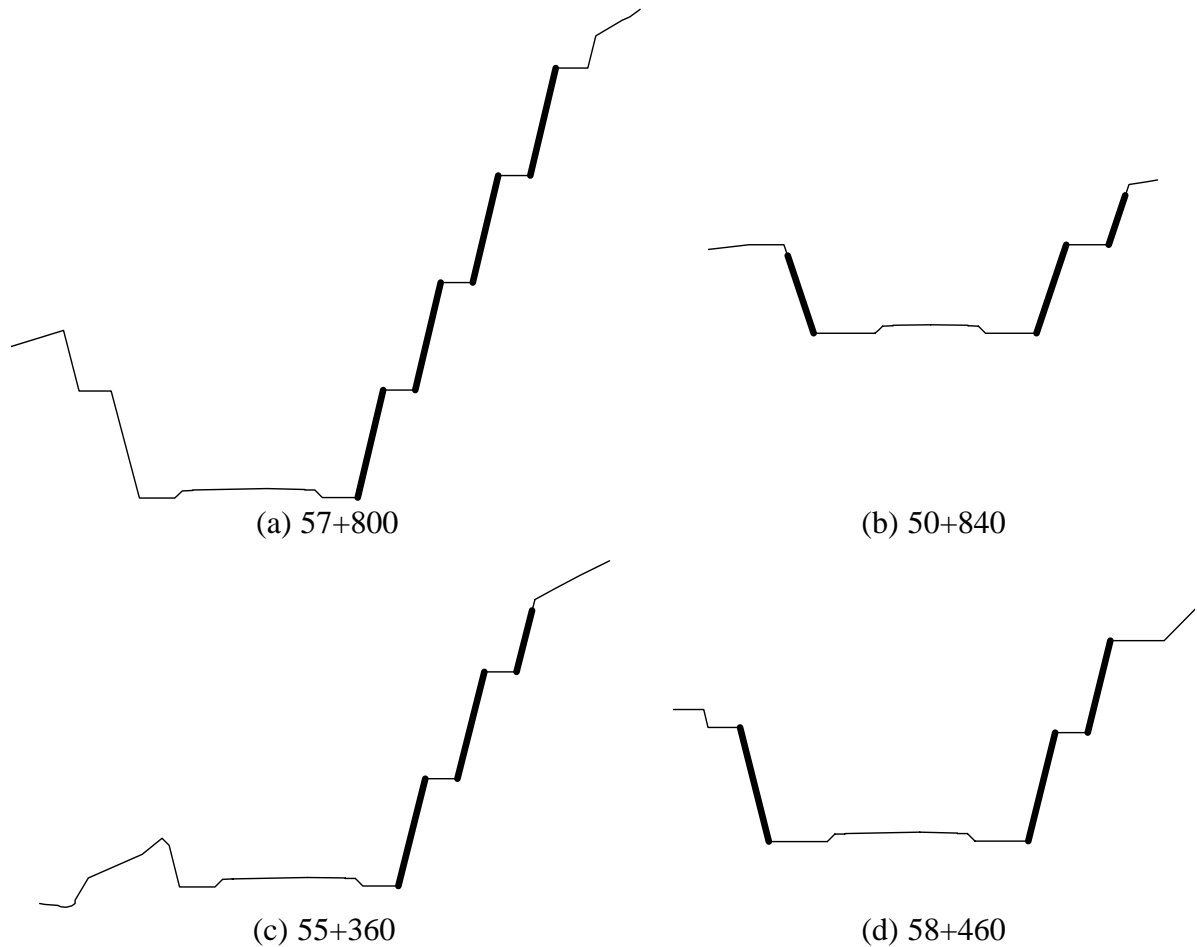


Figura 5.6: Faixas de origem das quedas de blocos.

As análises foram feitas considerando os seguintes dados iniciais (foi assumido que os blocos não possuem nenhuma componente de velocidade inicial):

- a) velocidade horizontal inicial = 0
- b) velocidade vertical inicial = 0
- c) velocidade angular inicial = 0
- d) massa do bloco (kg) = 10

5.3. SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Para o caso das análises de queda, as informações fornecidas pela topografia não conseguiram atingir um grau de detalhe que permitira visualizar a textura superficial dos taludes estudados. Além disto, a altura da maioria dos taludes fez com que a tentativa de fazer este tipo de

medições fosse bastante perigosa, o que levou a analisar diferentes tipos de texturas superficiais visando definir uma que fosse representativa das condições em campo. Foram definidas três texturas:

- a) uma superfície sem irregularidades visíveis, limitada só pelos topos e pés das banquetas;
- b) duas contemplando a existência de rugosidade geométrica, medida com relação à linha que une o pé com o topo de cada talude: a primeira com amplitude de 10 cm e outra com amplitude de 40 cm.

O primeiro caso, sem irregularidades visíveis, encontra-se ilustrado na Figura 5.7. As linhas vermelhas representam as diferentes trajetórias de queda simuladas pelo programa *RocFall*.

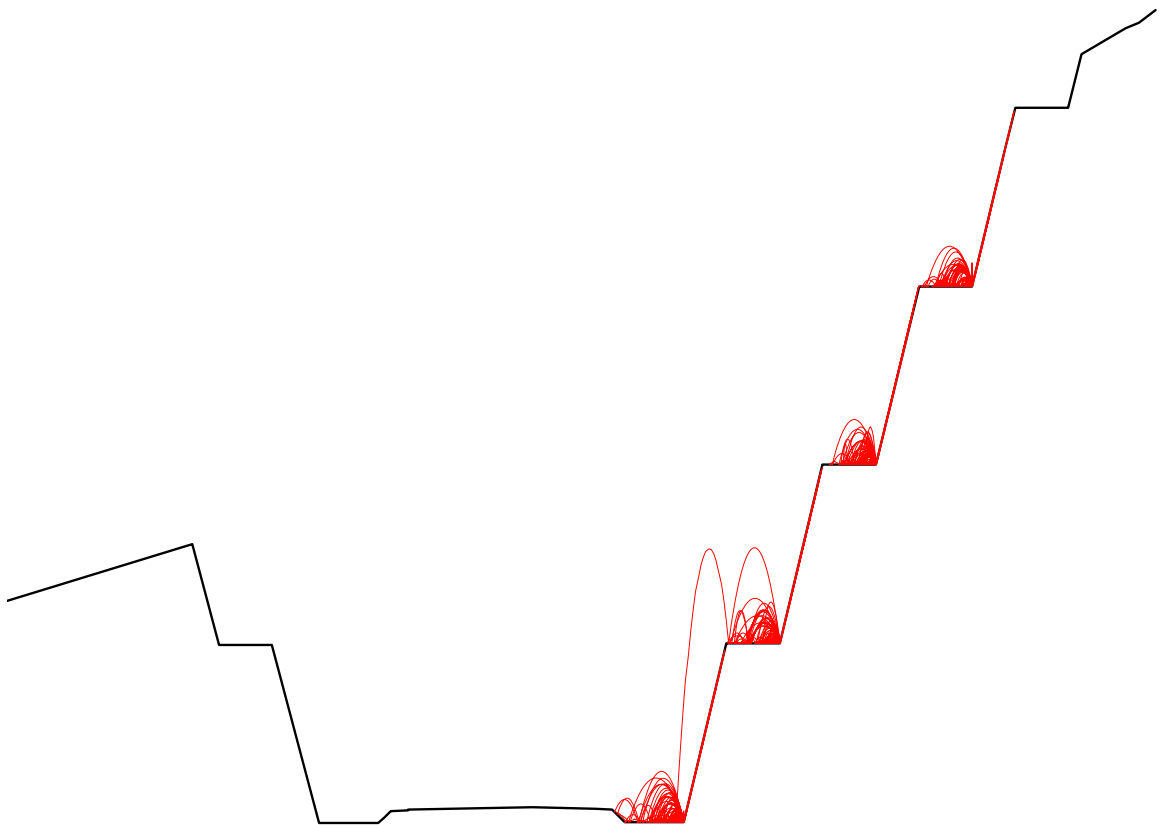


Figura 5.7: Trajetórias de queda de blocos na seção 57+800 (taludes sem rugosidade visível) (500 blocos, 10 kg massa média).

Devido à condição de inexistência de velocidades iniciais para os blocos, todas as trajetórias começam por rolamento, ocorrendo repique só quando os blocos chegam ao pé do talude do qual saíram. São escassos os blocos que conseguem ultrapassar a primeira banquetta em que

chegam, fazendo com que a área de retenção só receba material oriundo do talude inferior do corte. Também não ocorre invasão da pista de rolamento pelos blocos, o que não concorda com as evidências de campo encontradas, como ilustrado na Figura 5.8.

Estes resultados indicam que este tipo de textura superficial não é representativo das condições reais, além de não ter semelhança com o acabamento final dos taludes executados (ver Figura 5.8a).

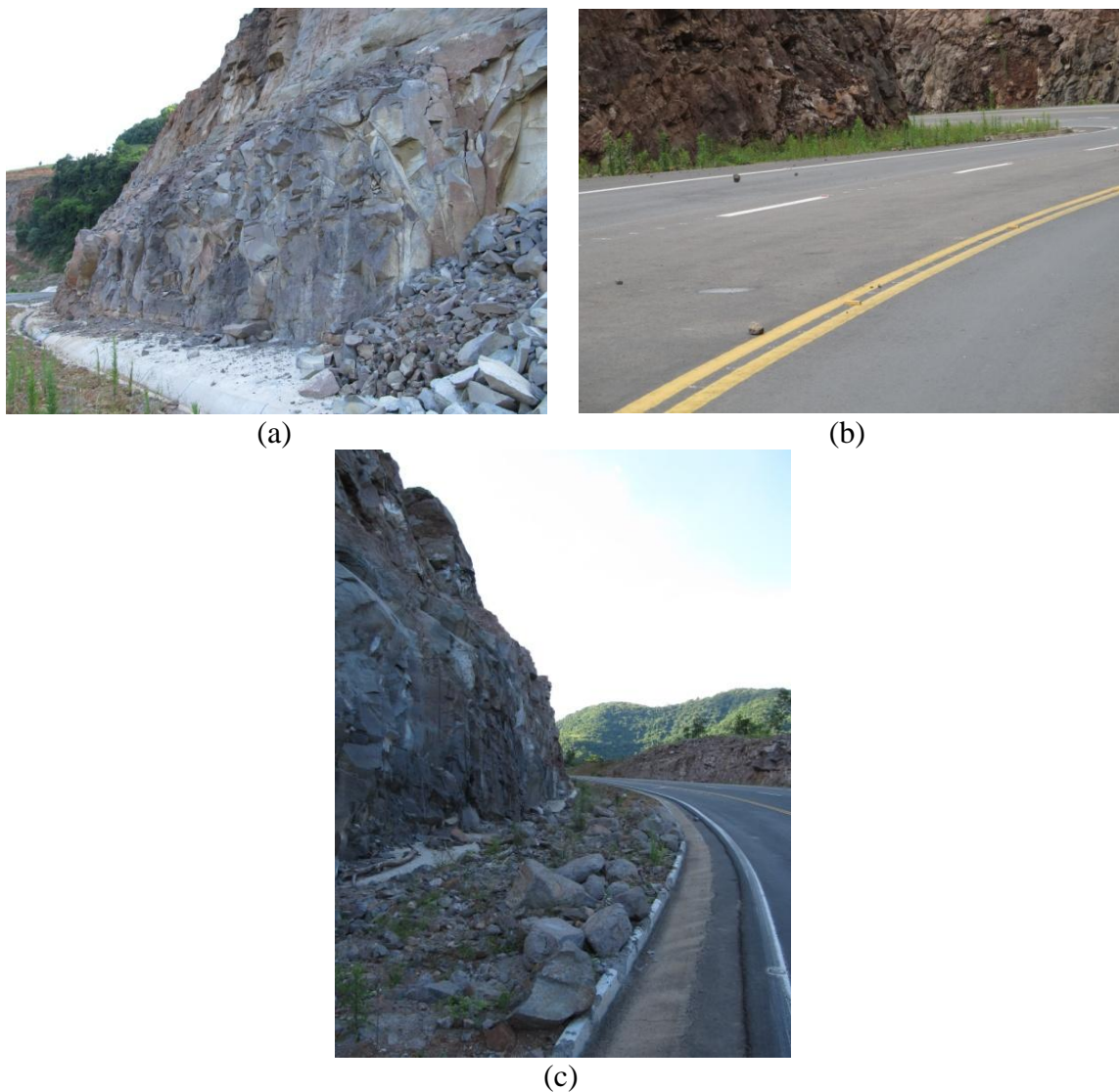


Figura 5.8: Localizações típicas dos blocos após as quedas; (a) depósito junto da área de retenção; (b) blocos na pista de rolamento e (c) blocos maiores que atingiram a valeta lateral (danos na borda da valeta).

O segundo caso trata-se da incorporação de uma rugosidade com amplitude de 10 cm, tal como ilustrado na Figura 5.9. Neste caso, o movimento de rolamento é alterado rapidamente

pela presença de irregularidades superficiais, que fazem com que os blocos mudem sua trajetória e repiquem com afastamento da superfície do talude. Deste modo, seguem rapidamente uma sequência de trajetórias parabólicas, com pouca ocorrência de rolamento. Esta forma de repique e afastamento dos blocos quando atingem as superfícies das banquetas faz com que existam mais casos de blocos que conseguem ultrapassá-las e chegar a níveis inferiores do corte. A área de retenção de blocos recebe uma maior quantidade de material, além de existir alguns blocos que conseguem invadir a pista de rolamento (ver Figura 5.9).

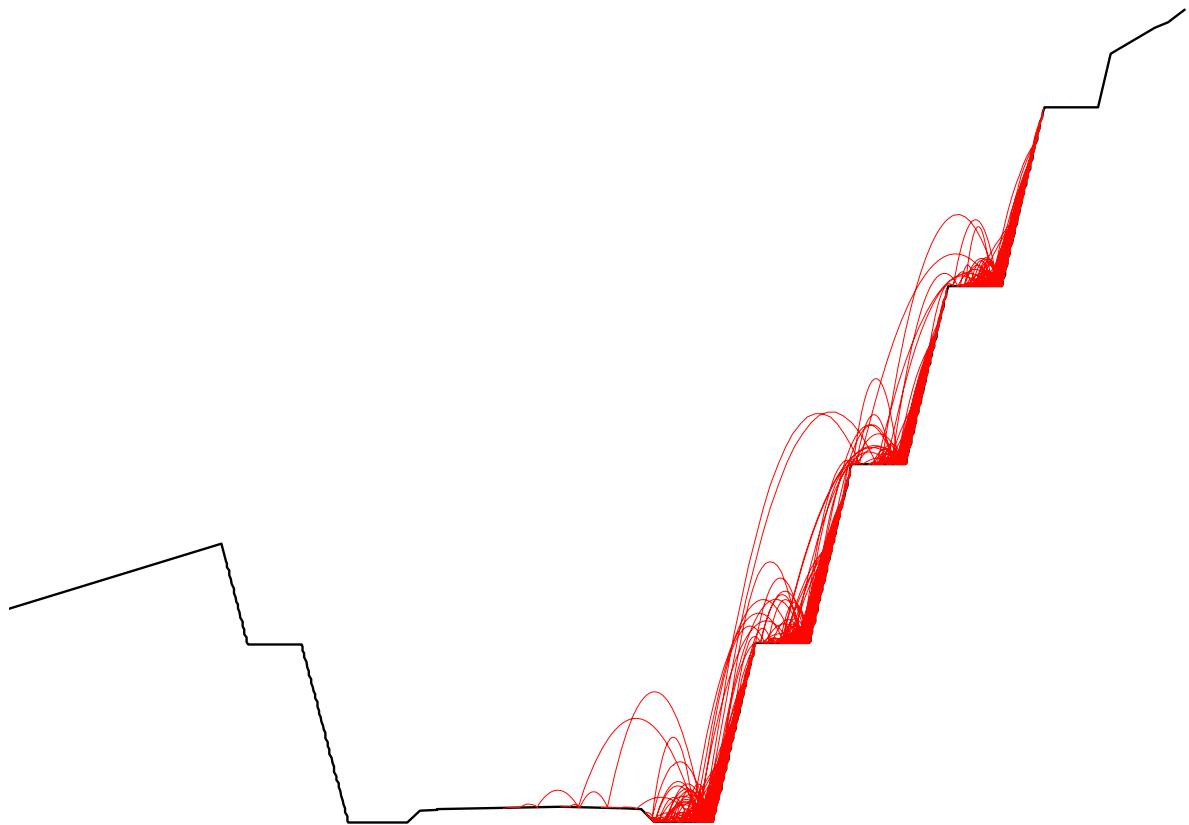


Figura 5.9: Trajetórias de queda de blocos na seção 57+800 (taludes com rugosidade de amplitude 10 cm) (500 blocos, 10 kg massa média).

Entretanto, quando esta textura de análise foi comparada com a textura superficial decorrente do processo de escavação com explosivos, ficou claro que ainda não tinha se atingido uma condição representativa da realidade, ao menos em termos geométricos.

Mesmo nos casos com alturas de repique baixas, sob as condições iniciais definidas para os blocos, não é muito frequente a ocorrência de trajetórias de rolamento ao longo da superfície dos taludes. Isto pode ser explicado pelas fortes irregularidades da superfície e dos blocos que

caem.

Assim, tentando representar da melhor maneira a condição de irregularidade, foi definida uma rugosidade superficial de 40 cm, medida em relação à linha reta de cada um dos taludes entre banquetas, como apresentado na Figura 5.7. Foram respeitadas as larguras das banquetas, tentando diminuir as variações somente para as superfícies inclinadas.

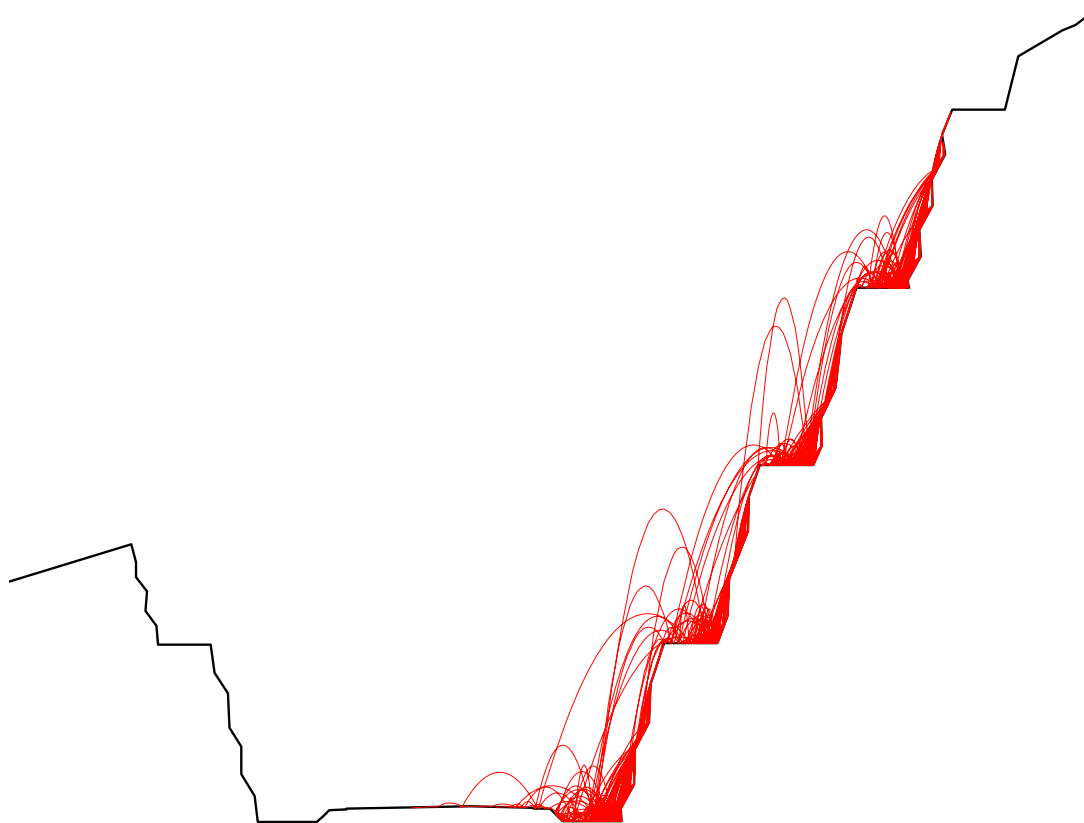


Figura 5.10: Trajetórias de queda de blocos (taludes com rugosidade de amplitude 40 cm) (500 blocos, 10 kg massa média).

Os resultados obtidos com esta simulação de irregularidade estão representados na Figura 5.10. Estes resultados indicam que esta condição é representativa da situação em campo, tanto pela menor quantidade de blocos que apresentam rolamento ao longo da superfície de queda, como pela existência de uma série de trajetórias de repique que fazem com que a distribuição dos blocos no final do seu deslocamento seja também mais próxima da realidade. Nesta condição, a geometria do limite entre a área de retenção e o acostamento da pista tem um papel de maior importância já que sofre o impacto de vários blocos, muitos dos quais repicam ali e vão em direção à pista de rolamento, distribuindo-se ao longo da sua superfície. Nestas condições, a parede da área de retenção cumpre dois papéis principais: detém parte dos blocos pelo esgotamento da sua energia cinética e também faz o de barreira de pequena altura, ao

sofrer o impacto de blocos e refleti-los em direção oposta à pista, consumindo suas energias.

Embora a adoção deste tipo de solução, com área de retenção lateral, tenha gerado uma certa tranquilidade ao proprietário no momento de liberar a obra para o tráfego, a existência do risco de um bloco invadir a pista e atingir um veículo tem que ser levado em conta. Adicionalmente, a possibilidade de que a eficácia das áreas de retenção de blocos diminua com o tempo também tem que ser levado em conta pela operação da rodovia.

5.4. ESTUDO DE ALTERNATIVAS GEOMÉTRICAS PARA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Para dar uma ideia do nível de eficácia alcançado pela implementação das áreas de retenção de blocos dentro do projeto, foram feitas simulações do projeto sem a sua existência. A área de retenção de blocos foi definida pelo alargamento dos cortes no nível da pista de rolamento em 4 metros a cada lado, além do aprofundamento do corte em um valor de 0,70 m. A profundidade da área de retenção foi obtida principalmente pela construção da estrutura do pavimento, diminuindo assim a profundidade de sobre-escavação em 50% (ver Figura 5.2).

5.4.1. Seção sem alargamento - com banquetas

A proposta original para o projeto (DAER, 2002a) contemplava a execução dos cortes configurando taludes únicos a cada lado (sem deixar banquetas). No início da execução do projeto foi necessário rever esta situação, não só pelo risco de queda de blocos, mas também pelas condições de trabalho requeridas pelas perfuratrizes, cuja profundidade máxima estava em torno dos 10 metros.

A declividade dos taludes foi mantida atendendo o critério padrão estabelecido para projetos com corte em rocha (DAER, 1991), por considerar que não existiriam problemas de instabilidade nos materiais encontrados. Durante a execução de alguns cortes dentro do trecho, foi feita a recomendação de abater os taludes de cortes devido às enormes dificuldades para a definição das seções causadas pelo intenso grau de fraturamento das camadas rochosas. É importante esclarecer que em poucos pontos da rodovia foi possível atender esta recomendação, devido ao grau de avanço das obras e às dificuldades impostas pela topografia, tanto nas áreas já executadas quanto nas áreas próximas a intervir.

Na Figura 5.11 é apresentada a seção transversal para a estaca 57+800 sem alargamento. No entanto, a existência de uma sarjeta em concreto com uma largura de 1,50 m, e uma profundidade de 0,30 m (ver Figura 5.12) poderia ter ajudado na retenção de alguns blocos, mas com uma eficácia mais limitada, tendo em conta a sua menor largura.

O desempenho deste tipo de seção foi avaliado segundo a frequência de queda de blocos dentro da superfície de rolamento e no acostamento, aqui denominado frequência de invasão, sem levar em conta as trajetórias dos blocos. As simulações foram feitas com as mesmas condições iniciais de movimento para os blocos, mas com um número de 10.000 quedas, tentando com isto obter uma melhor definição da tendência dos resultados.

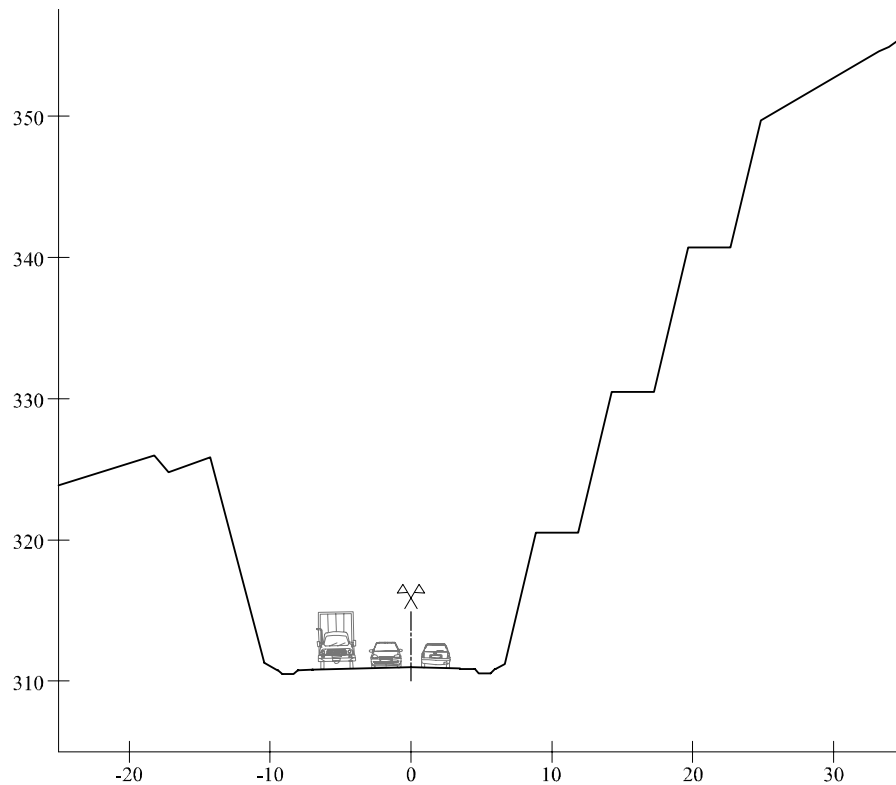


Figura 5.11: Geometria da seção transversal no 57+800 (sem alargamento para áreas de retenção de blocos).

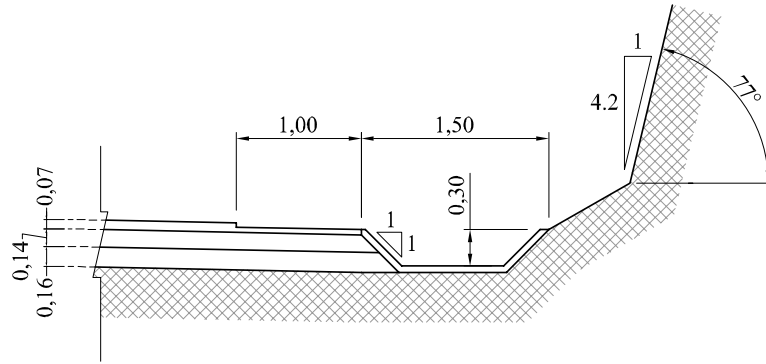


Figura 5.12: Detalhe da estrutura do pavimento e da sarjeta em concreto.

Para o caso descrito, sem existência de sobrealargamento, existe uma frequência grande de acumulação de blocos dentro das banquetas, diminuindo com isto a quantidade de blocos que chegam ao pé do talude de corte, mas causando o seu preenchimento. Isto gera condições topográficas diferentes das iniciais, caso não houver manutenção, o que pode acarretar outros problemas de estabilidade.

Os histogramas que serão apresentados a seguir foram desenhados tendo como referência o acostamento esquerdo, tendo em vista que não ocorreram casos de blocos que atingissem esta posição. O histograma da Figura 5.13 apresenta os resultados das simulações feitas para a condição sem a área de retenção de blocos. A linha pontilhada corresponde ao limite dos acostamentos esquerdo e direito, e a linha tracejada os limites da faixa de rolamento de veículos. Assim, qualquer bloco localizado entre as linhas de um costado da pista, estará invadindo o acostamento, e qualquer bloco localizado entre as duas linhas tracejadas estará invadindo a superfície de rolamento. Nestas condições, a frequência de invasões de blocos dentro da largura asfaltada é de ~7,5%, dos quais ~5,5% correspondem a blocos retidos dentro das faixas de rolamento de veículos, e 2% a blocos retidos no acostamento direito. Os três grupos de acúmulo localizados além dos 10 metros de largura correspondem aos blocos depositados nas três banquetas do talude.

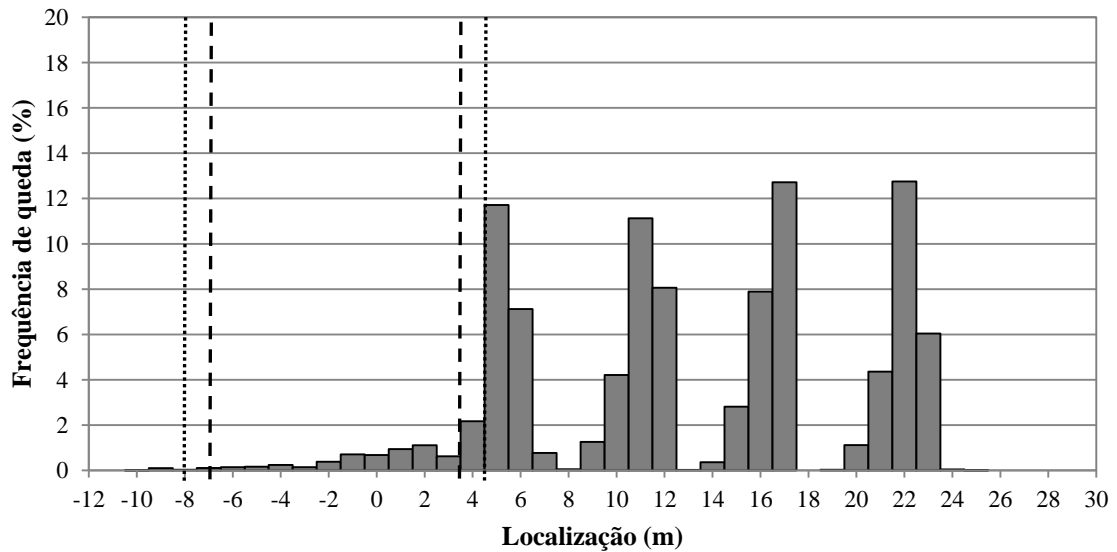


Figura 5.13: Localização final dos blocos na seção 57+800 (projeto sem alargamento e talude com rugosidade de amplitude 40 cm) (10000 blocos, 10 kg massa média).

5.4.2. Seção com alargamento - com banquetas

Para a condição sob a qual foi executado o projeto, com a adição do alargamento para a área de retenção de blocos, a frequência de blocos retidos na área asfaltada é bem menor, sendo esta de 1,1% (Figura 5.14), da qual 0,9% correspondem aos blocos dentro das faixas veiculares e ~0,15% ao acostamento direito, representando uma diminuição da frequência de quase 86% quando comparadas as duas alternativas.

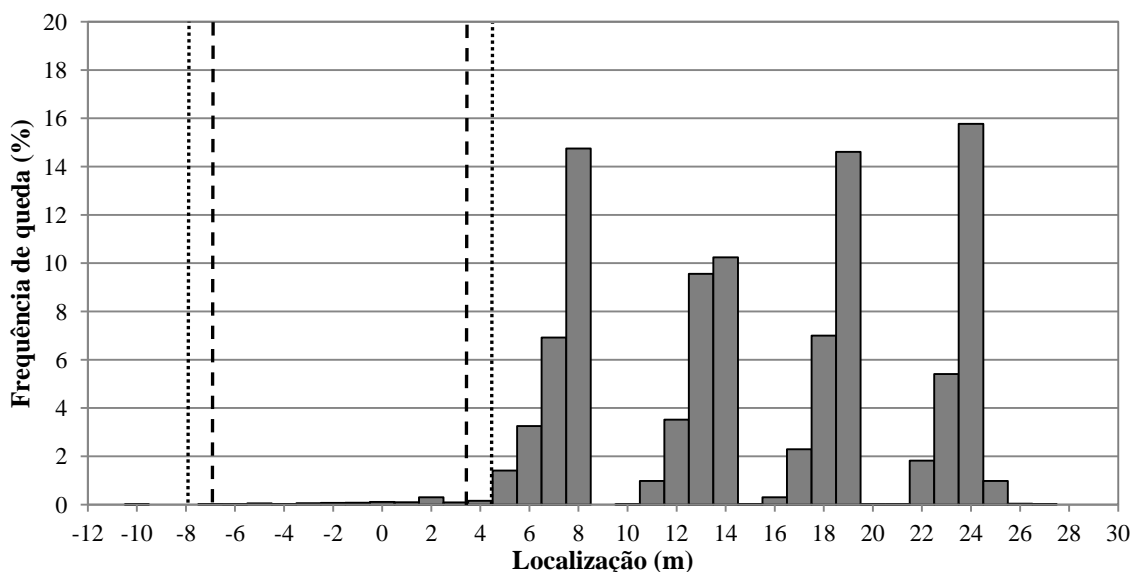


Figura 5.14: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento e talude com rugosidade de amplitude 40 cm) (10.000 blocos, 10 kg massa média).

Uma situação comum para as duas condições da seção transversal é o grande acúmulo de material na superfície das banquetas, o que, após um tempo de operação da rodovia, poderia gerar uma nova condição geométrica para o talude com superfícies não horizontais para estes elementos.

A situação observada em campo mostra que os acúmulos apreciáveis de material acontecem principalmente nas duas banquetas inferiores do corte; na banqueta superior o volume de material que tem se acumulado é muito baixo, razão pela qual não foi levado em conta para as simulações realizadas.

5.4.3. Material acumulado nas banquetas

O material acumulado nas banquetas foi considerado com uma rocha pouco compactada, que mantém um padrão de depósito em cunha, tendo o seu ponto inferior no extremo exterior da banqueta, e uma superfície com declividade de 35° . Os parâmetros empregados para as simulações no programa *RocFall* foram os seguintes (PENG, 2000):

- a) R_N : 0,18
- b) R_T : 0,50
- c) ângulo de atrito: 35°
- d) rugosidade superficial: 5°

Os resultados das simulações feitas com 10.000 blocos são apresentados na Figura 5.15, na qual é possível ver a diferença que ocorre quando existe preenchimento das banquetas, pois neste caso a sua capacidade de acumulação tende até um valor próximo de zero. Grande parte do material que não consegue se acumular nas banquetas chega diretamente à área de retenção de blocos, aumentando consideravelmente a sua importância na tarefa de retenção. No entanto, também acontece um incremento na presença de blocos dentro da área asfaltada com um valor total de 6,5%, dos quais o 5,3% corresponde a invasões dentro das faixas veiculares, e 1,2% para o acostamento direito da rodovia.

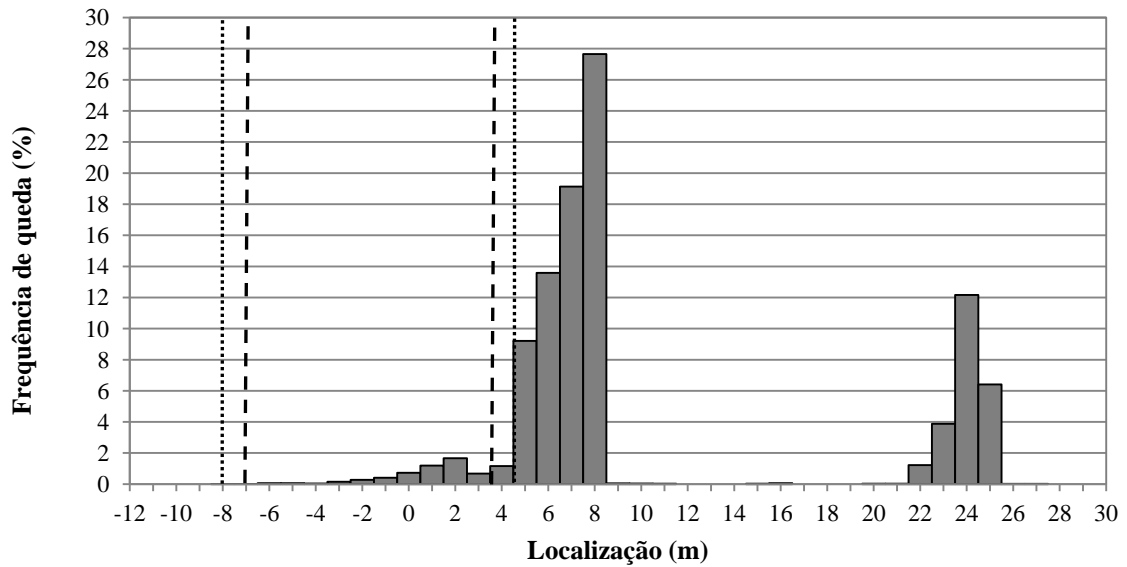


Figura 5.15: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento, talude com rugosidade de amplitude 40 cm e as duas banquetas inferiores preenchidas com material fofo) (10.000 blocos, 10 kg massa média).

Esta condição é especialmente perigosa não só pela capacidade de acumulação quase nula das banquetas, mas também pelo efeito de projeção de blocos a distâncias maiores causado pelo material acumulado nas banquetas. Isto gera um incremento de aproximadamente 6 vezes da frequência de invasões de blocos dentro das áreas destinadas para a operação veicular.

Levando em conta as grandes dificuldades de limpeza das banquetas, tanto pelo perigo para as pessoas quanto para os equipamentos, além das dificuldades de acesso a cada uma delas, foi estudado o efeito da limpeza apenas na banquetta inferior. Uma manutenção periódica somente da banquetta inferior poderia ter condições aceitáveis. O estudo dos efeitos desta limpeza na posição final dos blocos, especialmente na diminuição do risco de presença de blocos dentro da rodovia está apresentado na Figura 5.16.

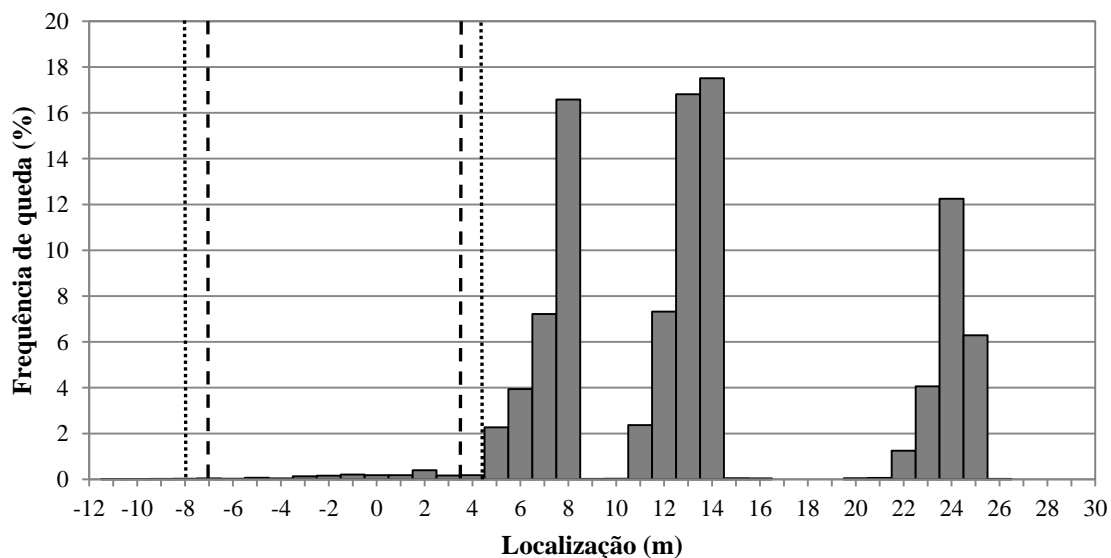


Figura 5.16: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento, talude com rugosidade de amplitude 40 cm, com a banqueteta inferior não-preenchida) (10.000 blocos, 10 kg massa média).

O efeito da limpeza da banqueteta inferior é bem representativo, ficando a frequência de invasões dentro da área asfaltada diminuída a um valor de 1,9% (uma redução de quase 71% em relação à condição com as duas banquetetas preenchidas), da qual, 1,7% corresponde à presença de blocos dentro das faixas de tráfego de veículos, e ~0,2% a blocos dentro do acostamento direito da rodovia. Neste caso, a banqueteta inferior terá a sua capacidade de acumulação de blocos preservada, o que poderá ser garantido pelas tarefas de limpeza periódica.

5.4.4. Seção sem banquetetas e com talude abatido

Durante a execução do projeto foi proposta esta alternativa, visando uma diminuição no risco de invasão de blocos dentro da pista de rolamento ao levar em conta dois fatores importantes, tais como:

- a) diminuição da declividade do talude, passando de um valor de 4V:1H para um de 3V:1H, tentando com isto a diminuição nas velocidades dos blocos e da sua energia cinética;
- b) eliminar a existência de banquetetas e de taludes de menor altura, para chegar a um talude único de corte. A intenção de eliminar as banquetetas se originou ao ver que em alguns casos os blocos que não eram retidos por elas, ao repicar

atingiam distâncias maiores, aproximando-se da pista de rolamento.

A geometria da seção transversal estudada com estas modificações está apresentada na Figura 5.17, tendo sido mantidas as condições de rugosidade como nos casos anteriores.

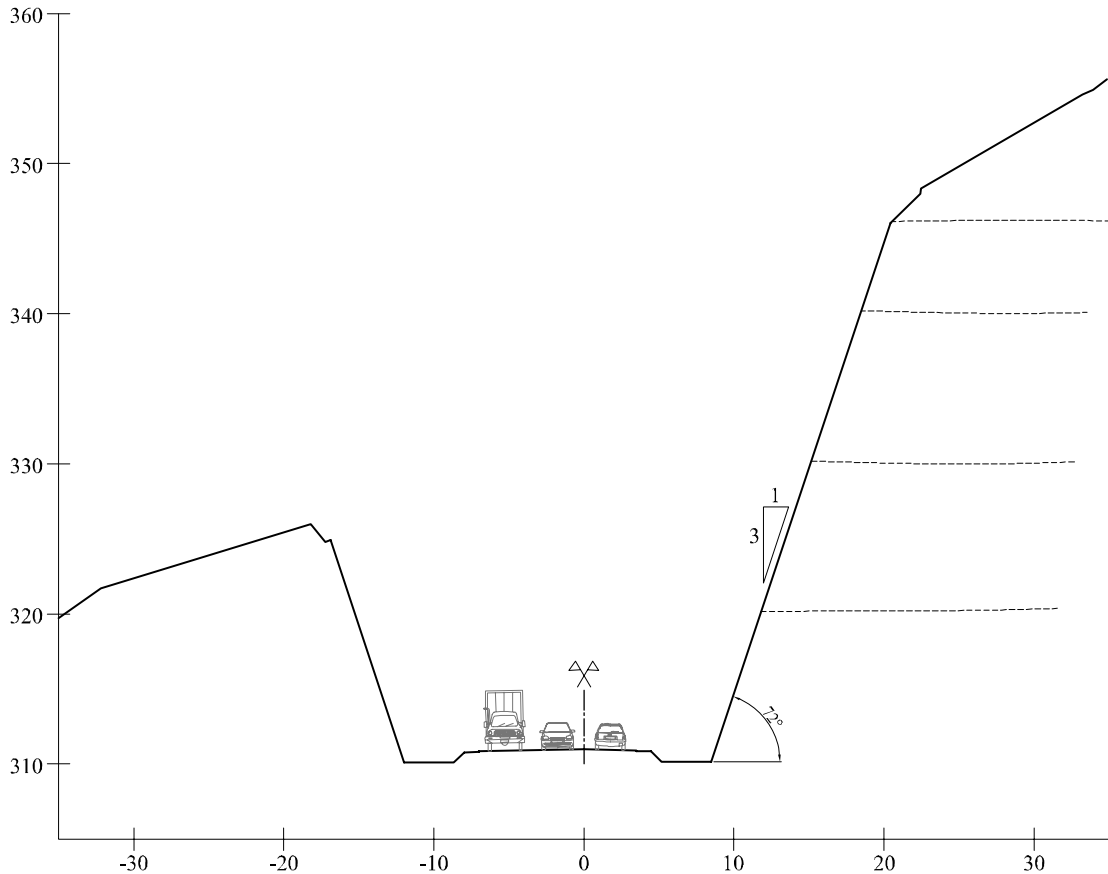


Figura 5.17: Geometria da seção transversal 57+800 (com alargamento, sem banquetas e abatimento do talude para 3V:1H).

Para este tipo de solução geométrica, as simulações indicaram que a maioria dos blocos repicaram uma ou duas vezes na face do talude e depois caíram em queda livre até impactar a área de retenção de blocos e/ou da pista de rolamento. No entanto, as altas velocidades decorrentes do longo trecho de queda livre (alturas de até 25 metros) geraram repiques de até 20 metros em alguns casos, distribuindo blocos ao longo da faixa de operação veicular e até dentro da área de retenção do lado oposto, tal e como ilustrado na Figura 5.18.

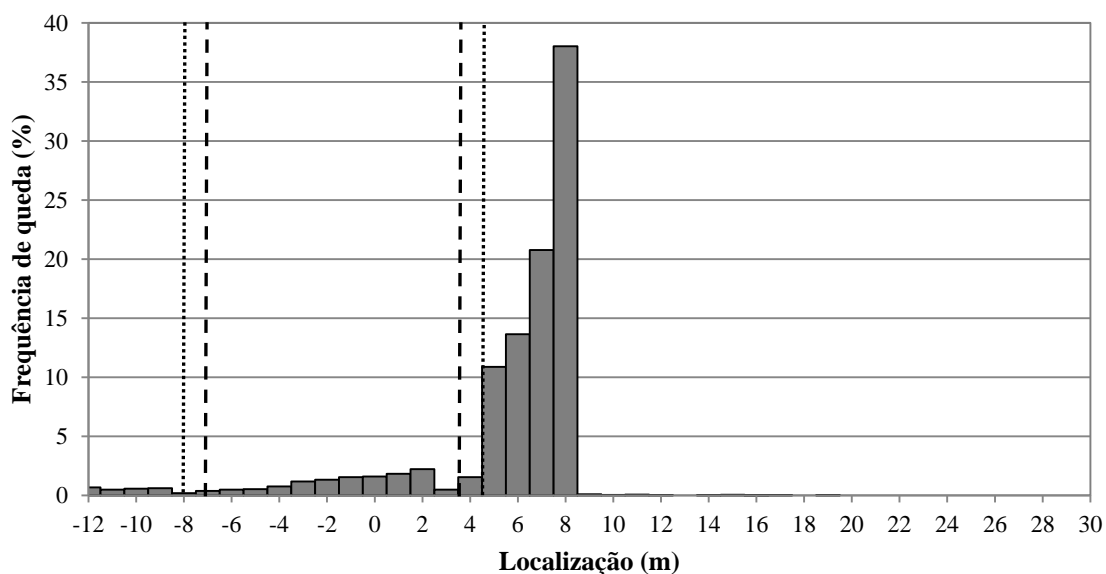


Figura 5.18: Localização final de blocos na seção 57+800 (projeto com alargamento, declividade de 3V:1H, talude com rugosidade de amplitude 40 cm e sem banquetas) (10000 blocos, 10 kg massa média).

Em relação aos demais casos estudados, este tipo de alternativa gerou uma quantidade importante de blocos que conseguiram atravessar a pista e se depositaram na área de retenção do lado oposto, com um total de 2,3%. Além disto, a frequência de blocos depositados dentro da pista foi de 12,6%, o que somado ao número de blocos na área oposta, gerou uma frequência total de invasões de ~16,4%, constituindo-se na alternativa com maior número de blocos dentro das faixas de operação veicular.

As energias desenvolvidas pelos blocos permitiram que alguns deles atingissem o talude oposto, mas nestes casos, a maioria ficava retida na área de retenção daquele lado.

Neste caso, a importância da área de retenção de blocos fica salientada não só pela inexistência de outras áreas com capacidade para acumular blocos, mas também pela resposta pouco efetiva da seção transversal. A eliminação das banquetas para o caso da seção 57+800, com alturas de talude grande, permite aos blocos alcançarem energias que dificilmente poderiam ser amortecidas por algum elemento de proteção localizado próximo à pista.

5.4.5. Resumo do comportamento para os quatro pontos estudados

As várias alternativas de seção transversal descritas acima foram analisadas para cada um dos quatro pontos (km de rodovia) estudados no presente trabalho, sendo os resultados principais

apresentados na Figura 5.19. Note que tanto para a estaca 50+840 como para a 58+460 não existe condição com duas banquetas preenchidas, pelo fato de serem taludes com somente uma banqueta. Os valores descritos na figura para as estacas mencionadas correspondem ao somatório das quedas geradas do lado esquerdo e direito; para as duas estacas restantes somente do lado direito.

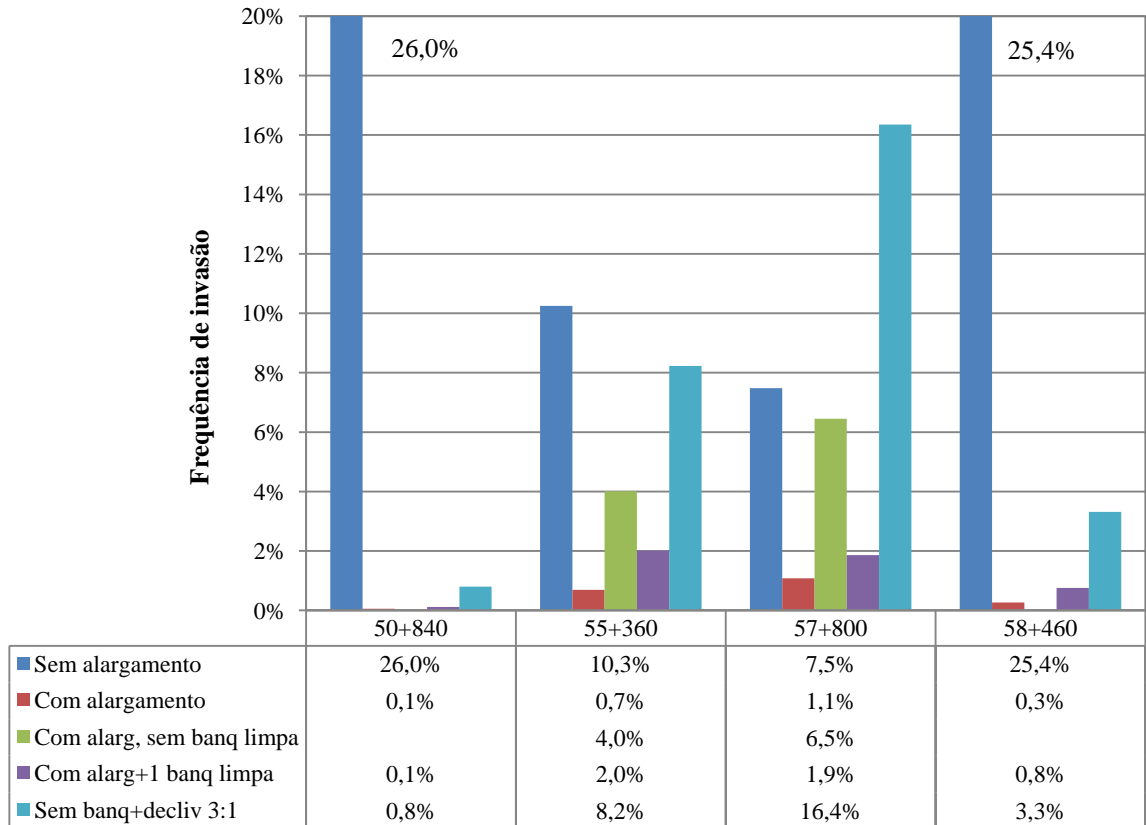


Figura 5.19: Presença de blocos dentro da pista de rolamento para as quatro seções estudadas.

Em todos os casos, a incorporação da área de retenção de blocos foi a que melhor nível de resposta conseguiu gerar, diminuindo as frequências de invasão em valores superiores a 93% (com exceção do 57+800, onde a redução foi de 85%). As seções correspondentes aos km 50+840 e 58+460 foram as mais sensíveis à construção da área de retenção de blocos, já que mesmo alterando as condições de corte e banquetas do talude, não houve incrementos importantes nas frequências de invasão.

O efeito do preenchimento de duas banquetas (57+800) elevou a frequência de invasão até níveis próximos do que os ocorridos sem alargamento da seção transversal. O efeito do

preenchimento de banquetas foi o surgimento de superfícies inclinadas que projetaram os blocos diretamente sobre a pista de rolamento ou em pontos muito próximos dela. Em termos de frequência, mesmo com o alargamento, o preenchimento das banquetas elevou os valores em quase 6 vezes, constituindo-se em uma das piores situações para a operação da rodovia.

A existência somente da banqueteta inferior livre, considerando processos de manutenção periódica (55+360 e 57+800) provocou uma diminuição da frequência de invasões dentro da pista de mais de 50% quando comparada com a situação descrita no anterior parágrafo.

A condição sem banquetas e com abatimento dos taludes fez com que o desempenho da área de retenção fosse diminuído, aumentando as frequências em quase 12 vezes em relação à condição só com alargamento. Na estaca 57+800 esta condição corresponde à de maior risco em termos de invasão da pista por blocos, lembrando que é neste lugar onde foram necessárias as maiores alturas de corte para a conformação do greide. Acredita-se que é a eliminação das banquetas a modificação que gera o maior impacto nos resultados, pelo incremento nas alturas de queda livre dos blocos.

5.5. ESTUDO DE ALTERNATIVAS COM USO DE ELEMENTOS DE PROTEÇÃO

A existência de medidas de proteção, ativas ou passivas, sempre será um item adicional na diminuição do risco de acidentes gerados por quedas de blocos, mas, em muitos casos as dificuldades técnicas podem fazer até que estas sejam economicamente inviáveis. Este item discute algumas alternativas que poderiam ser utilizadas no controle da queda de blocos sobre a pista de rolamento.

5.5.1. Barreiras verticais no bordo da pista

Este item investiga a possibilidade do uso de barreiras verticais para o controle dos blocos considerando duas alternativas: o controle da totalidade dos blocos a partir da definição das envoltórias das trajetórias dos blocos e o uso de barreiras de menor altura junto ao bordo.

As condições de simulação foram idênticas às descritas para os casos estudados no item 5.4. A barreira considerada foi a de concreto conhecida como *New Jersey* (ALBERTA, 2007), considerada como sendo parcialmente elástica (para concreto, $R_N = 0,48$ e $R_T = 0,53$), e foi

atribuída uma energia cinética máxima ao elemento de 25578 J. O resumo das simulações é apresentado na Figura 5.20.

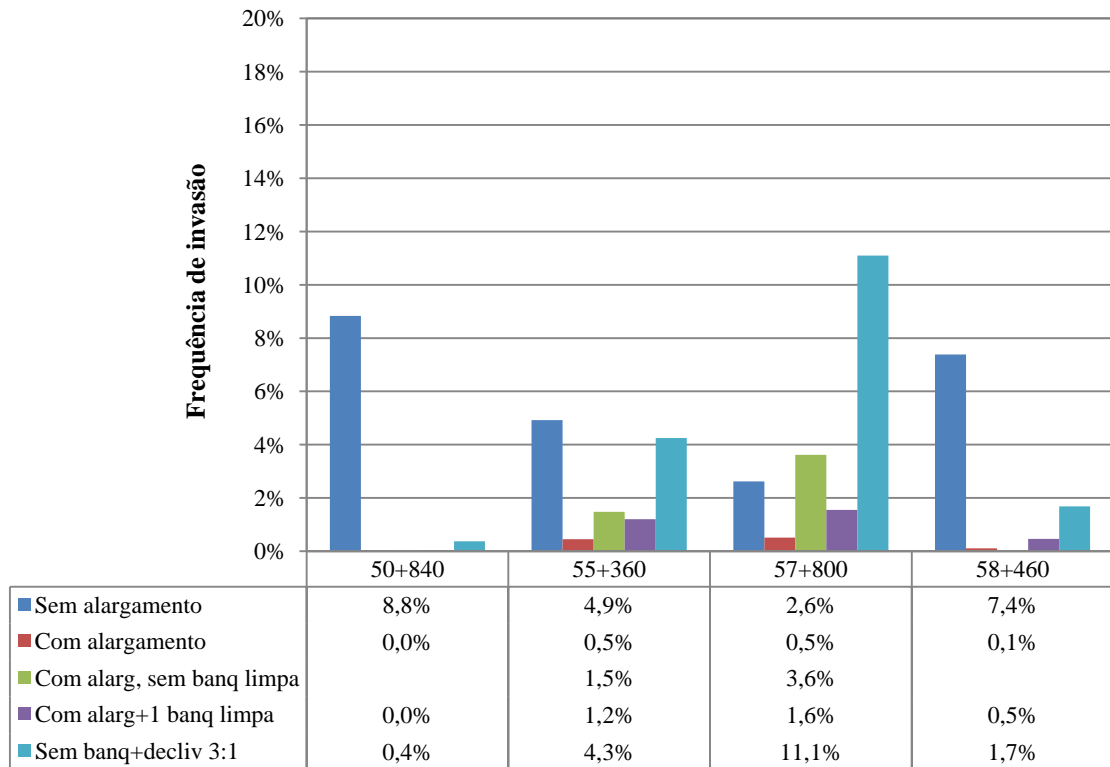


Figura 5.20: Resultados das simulações com barreira de $h=0,81$ m - frequências de invasão da pista para as diferentes geometrias transversais.

Em geral, a instalação deste tipo de barreira conseguiria reter quantidades importantes de material quando comparadas com a condição sem barreira. Para os casos sem alargamento, a instalação da barreira fez com que as frequências fossem diminuídas entre 52% e 70%. No entanto, as duas seções com taludes de menor altura (50+840 e 58+460) ainda apresentam as maiores frequências de invasão quando comparadas com as outras duas. Estas seções também são as que têm maior sensibilidade à criação da área de retenção, apresentando os melhores desempenhos quando comparadas com as outras geometrias estudadas.

Deve-se levar em conta que alguns dos cortes investigados já apresentavam uma frequência bastante baixa, somente pelo efeito do alargamento. Nestes casos pode-se até estudar a não instalação de barreiras ou concentrá-las nos pontos mais críticos (maior frequência de queda de material). Entretanto, este tipo de barreira tem também um aspecto de segurança ao tráfego, evitando que os veículos possam atingir as áreas de retenção, o que justificaria seu

uso em todos os trechos.

As duas seções com taludes de maior altura (55+360 e 57+800), quando foram avaliadas na condição de preenchimento das banquetas, tiveram uma perda de efetividade de retenção expressada pelo aumento das invasões entre 3 e 7 vezes, constituindo-se como uma das condições de maior perigo durante a operação da rodovia. No entanto, o uso da barreira de concreto provocou uma diminuição no número de invasões superior a 44% quando comparada com o caso sem barreira.

Quando se considera a limpeza da banquetta inferior do talude de corte, a adição da barreira de baixa altura causa uma diminuição da frequência de invasões de pelo menos 19% quando comparada à situação com as duas banquetas preenchidas de material, e de mínimo 17% quando comparada à condição sem barreira, sendo a combinação em que a barreira gera o menor efeito.

Para a análise de implantação de barreiras, devem-se levar em consideração duas condições básicas: a primeira, que a barreira consiga se opor à trajetória do bloco que cai do talude, e a segunda que tenha a capacidade suficiente para conter o bloco: a resistência máxima do concreto não é ultrapassada e nem o deslocamento máximo do elemento é excedido.

Para blocos de rocha de 10 kg não foi encontrada nenhuma situação em que a barreira pudesse ser danificada, entretanto, claramente este não é o maior tamanho de bloco possível de cair. Tanto durante as inspeções de obra assim como pela experiência durante a construção do trecho, foi observado que blocos de até 500 kg aproximadamente podem cair neste trecho. Embora a frequência de queda deste tipo de blocos seja bem menor do que para o caso de 10 kg, um evento de queda deste tipo de bloco teria uma maior probabilidade de destruir a barreira instalada como qualquer tipo de veículo fosse atingido.

Nas Figuras 5.21 e 5.23 são apresentadas as frequências de blocos que conseguem impactar as barreiras, tanto do lado direito quanto do esquerdo (unicamente para as seções 50+840 e 58+460). As análises foram feitas com blocos de 500 kg, o que provocou diferenças significativas nas energias, embora com variações mínimas nas trajetórias de queda, permitindo uma análise dos casos em que as barreiras não conseguiriam contê-los. Nas Figuras 5.22 e 5.24 são apresentadas as frequências de blocos que impactam as barreiras e conseguem ultrapassar a energia máxima do elemento (25578 J), tanto do lado direito quanto do esquerdo.

Em todos os casos, o alargamento da seção tem um efeito muito grande e favorável e, se a

operação de limpeza das banquetas é feita com regularidade, nas seções 55+360 e 57+800 as barreiras poderiam ser dispensáveis. Entretanto, recomenda-se seu uso pelo aumento da segurança do tráfego em relação aos blocos retidos como pela própria contenção dos veículos. Note-se que em todos os casos a existência de barreiras fornece uma proteção adicional à invasão da pista de rolamento pelos blocos. Isto é muito salientado quando não é possível a modificação da seção transversal, situação sem alargamento, onde a barreira de concreto é solicitada por impactos com bastante frequência, chegando a níveis, para as seções de menor altura de talude no lado direito, da ordem de 26% e 17% no esquerdo, comparado com 6-7% nas duas seções de maior altura de talude (blocos de 500 kg).

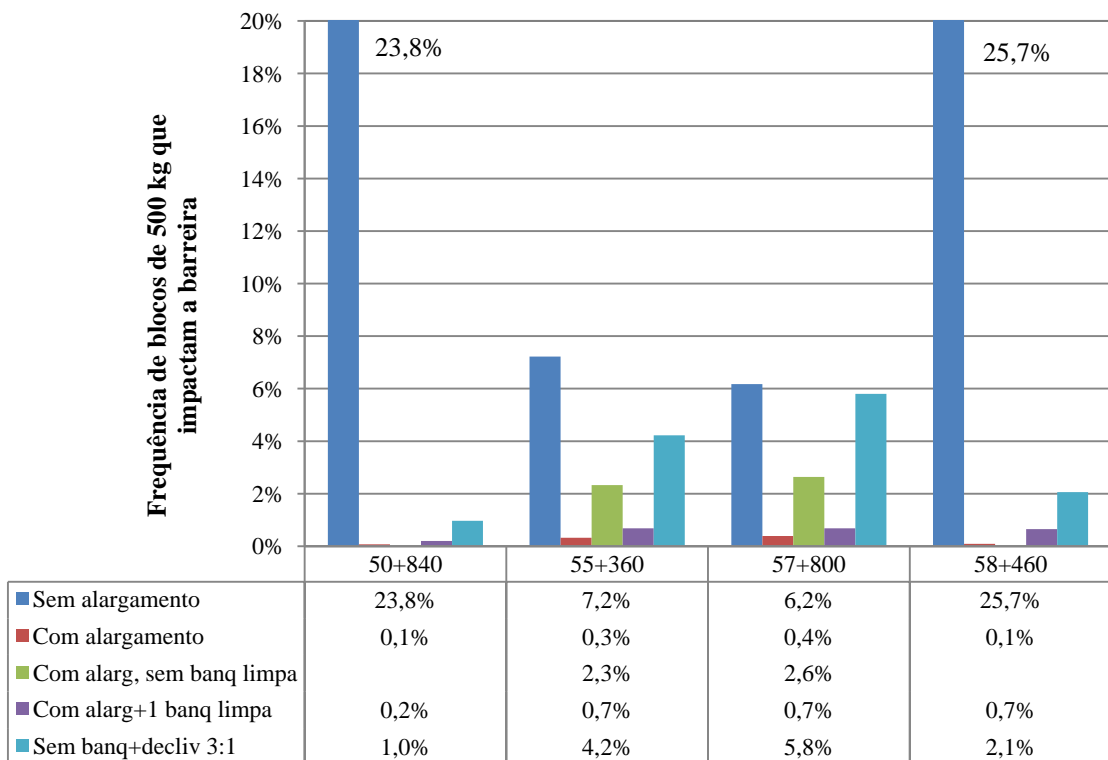


Figura 5.21: Frequência de blocos que impactam as barreiras do lado direito.

A danificação das barreiras é influenciada pela sua frequência de solicitação (número de impactos), mas principalmente pela energia dos blocos. Assim, as características da seção transversal e as trajetórias correspondentes dos blocos interferem em quanto da energia cinética é dissipada durante a queda. Assim, para as seções com alturas de talude baixas (50+840 e 58+460), embora o nível de solicitação das barreiras seja alto (> 20% das quedas), a frequência de impactos com destruição do elemento de proteção tende a ser baixo para a

maioria das situações (Figura 5.22).

Para os pontos 55+360 e 57+800 (Figura 5.22), a altura maior dos taludes fez com que mesmo para frequências de solicitação baixas da barreira, a probabilidade de dano quando impactadas seja alto. Uma interessante para o caso em que as duas banquetas são consideradas preenchidas de material, é que mesmo sendo uma das piores situações em termos de segurança e em efetividade da barreira, os poucos blocos que conseguem impactar a barreira chegam com a energia de tal maneira dissipada que a probabilidade de dano nas barreiras é quase nula.

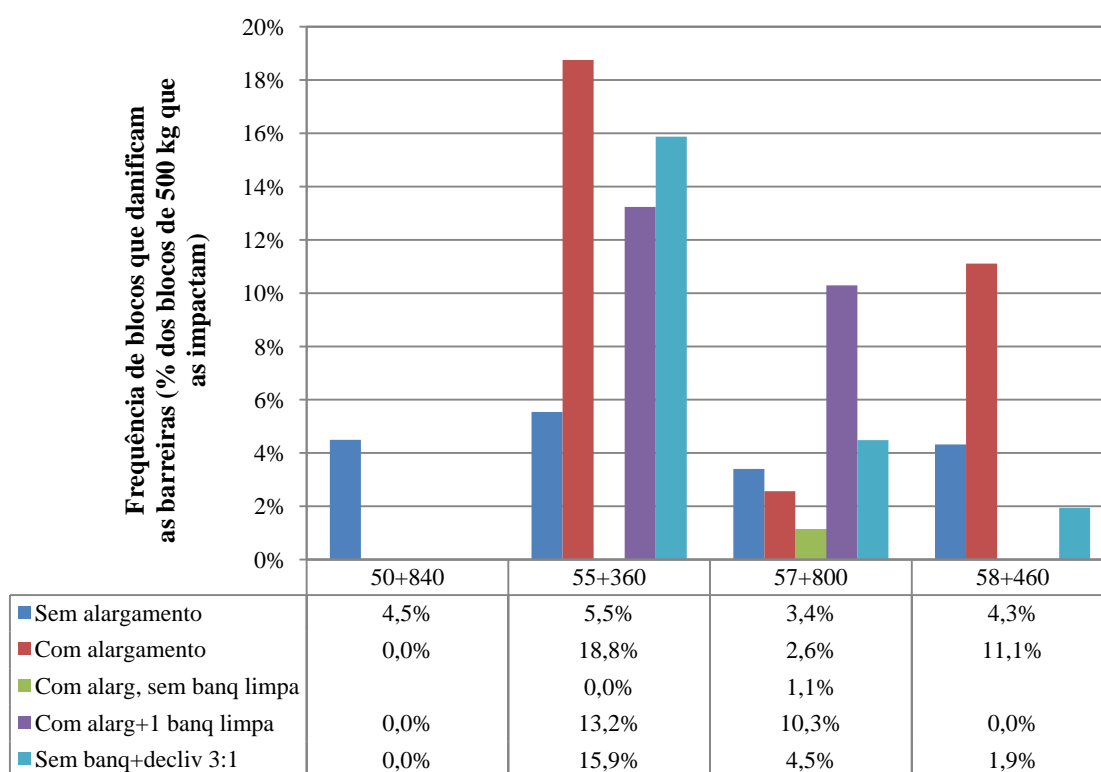


Figura 5.22: Frequência de blocos que danificam as barreiras do lado direito.

A situação no lado esquerdo é coerente com a acontecida para os mesmos pontos no lado direito: os pontos 50+840 e 58+460 apresentam menores graus de solicitação das barreiras, mas também mostram um baixo nível de ocorrência de danos por impactos (Figura 5.23 e Figura 5.24).

A incorporação da área de retenção de blocos fez em ambos os casos que as solicitações das barreiras diminuíssem drasticamente. Na Figura 5.20 é possível ver como a única situação na

que a área de retenção perde um pouco da sua efetividade corresponde com a de eliminação de banquetas e abatimento do talude, situação que fica refletida na Figura 5.24 ao menos para o ponto 58+460.

Além disto, ao se comparar as respostas dos dois lados para as seções 50+840 e 58+460, é mantida a tendência de maiores solicitações e danos em barreiras para o lado direito, consistente com maiores alturas de taludes e as maiores energias cinéticas decorrentes desta diferença.

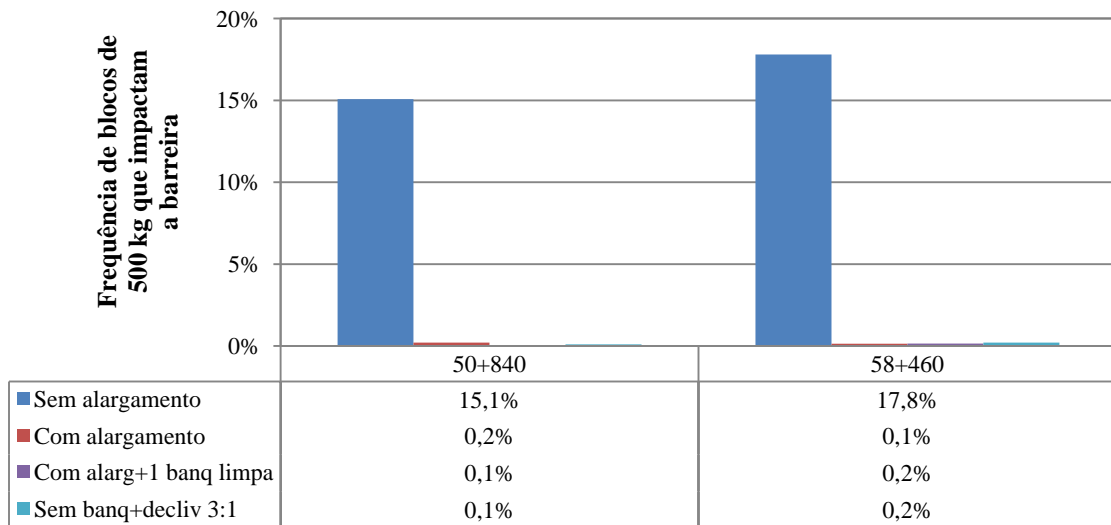


Figura 5.23: Frequência de blocos que impactam as barreiras do lado esquerdo.

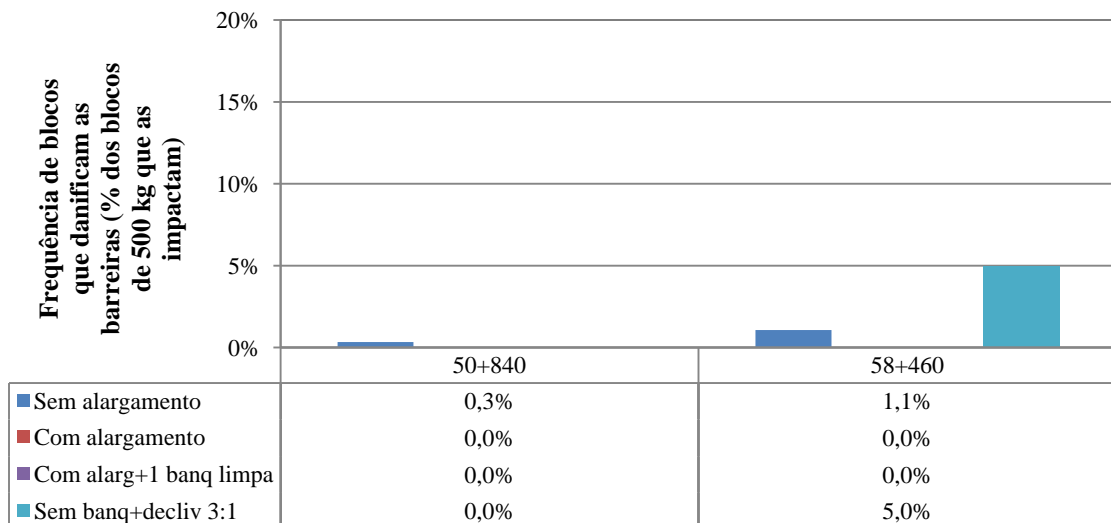


Figura 5.24: Frequência de blocos que danificam as barreiras do lado esquerdo.

As análises usando a barreira *New Jersey* mostraram um bom desempenho deste tipo de elemento de proteção, tanto contra as quedas de blocos quanto para a operação veicular. No entanto, a altura dos elementos (~80 cm) não impede a totalidade dos blocos de invadir a pista. Para o caso da seção localizada no 57+800, as alturas necessárias de barreiras para conseguir a detenção de 100% dos blocos encontram-se na Figura 5.25, a partir da definição das trajetórias máximas dos blocos, para as cinco condições geométricas analisadas no item 5.4.

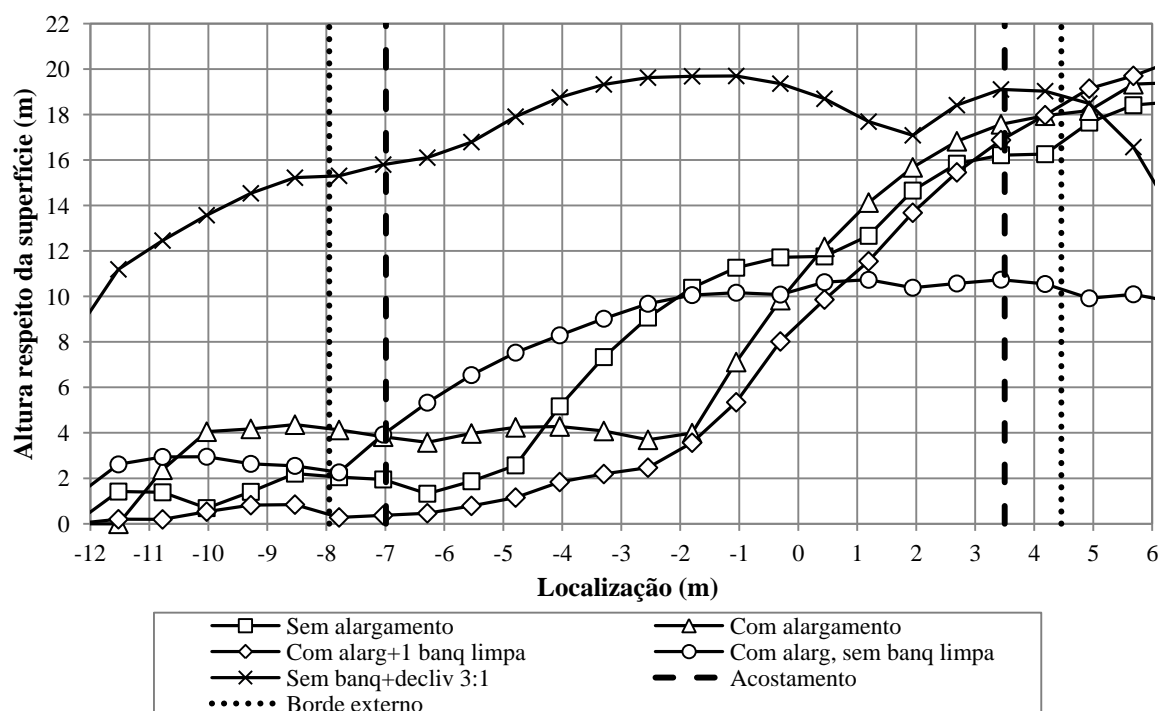


Figura 5.25: Envoltórias de alturas dos blocos para as várias situações, na seção 57+800.

Na Figura 5.25 é interessante ver que, mesmo para condições geométricas consideravelmente distintas, as alturas necessárias dentro da faixa compreendida pelo acostamento direito são praticamente constantes para quatro dos cinco casos estudados. A maior dificuldade que apresenta esta figura é em relação à altura necessária para a retenção da totalidade dos blocos: aproximadamente 19 metros para quatro situações e 11 metros para a condição mais favorável.

A construção de um elemento com tal altura poderia se tornar economicamente inviável, além de se constituir em um fator de risco para a operação veicular em virtude da pequena largura destinada para o acostamento. Com a limitação causada pela existência de tal obstáculo

lateral, haveria um prejuízo e uma diminuição do nível de serviço da estrada pelo desconforto visual decorrente do estreitamento da pista.

Com exceção da seção com abatimento e sem banquetas, os outros casos tiveram envoltórias máximas de altura com comportamento similar, mostrando assim o nível de dissipação da energia cinética dos blocos. No entanto, em todos os casos, a possibilidade de um bloco invadir a pista ao mesmo tempo em que um veículo estiver trafegando pela estrada, pode causar danos a qualquer tipo de categoria de veículo.

5.5.2. Camada de areia fofa substituindo parcialmente a área de retenção de blocos

O uso de uma camada de areia fofa é uma alternativa utilizada em certos locais no preenchimento da área de retenção. Esta camada pode melhorar a eficiência da área de retenção de blocos e a segurança ao tráfego por duas razões:

- a) pela diminuição no coeficiente de restituição normal (R_N), que é menor do que para os materiais usuais contra os quais repicariam os blocos;
- b) o fato de promover uma diminuição no desnível entre a pista de rolamento e a área de retenção de blocos reduziria o risco de tombamento de veículos e auxiliaria na redução da velocidade de veículos descontrolados.

De qualquer maneira, para a implantação de uma camada de areia ou outro material substituto for possível, terá de existir um alargamento da seção transversal, com um formato de caixão fornecido por escavação ou alteamento da pavimentação. Por isto, no presente caso não existem análises para a condição “sem alargamento”.

A necessidade de que a areia esteja em um estado de baixa densidade relativa se justifica pelo menor valor de R_N que esta apresenta, diminuindo ainda mais a frequência de blocos que invadem a pista de rolamento.

Para as simulações, os coeficientes de restituição adotados para a areia foram os determinados por Labiouse e Heidenreich (2009) e para os demais parâmetros foram atendidas as recomendações do programa *RocFall*. Os resultados de frequência de invasão da pista por blocos obtidos pelas simulações para as quatro seções estudadas encontram-se resumidos na Figura 5.26.

- a) R_N : 0,04
 b) R_T : 0,48
 c) ângulo de atrito: 30°
 d) rugosidade superficial: 0°

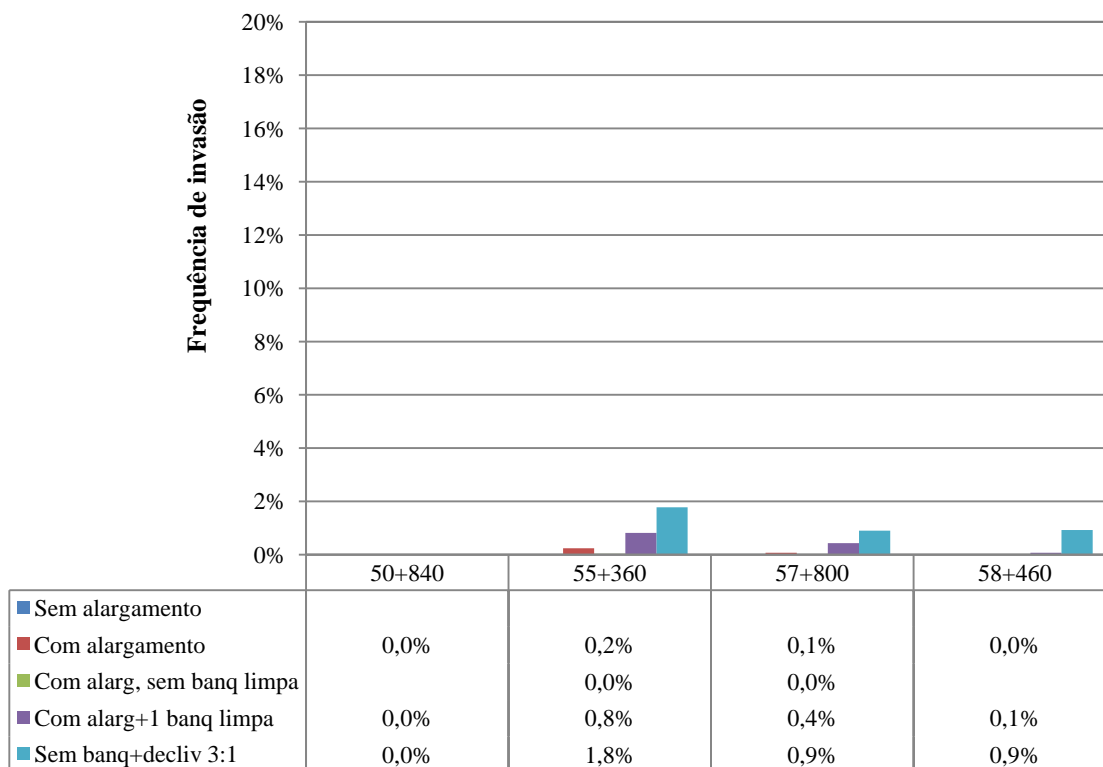


Figura 5.26: Frequências de invasão da pista por blocos, quando se utiliza camada de areia fofa ($e = 0,40$ m) para as diferentes geometrias transversais.

Na Figura 5.26 é possível encontrar um ótimo nível de resposta para todas as condições geométricas estudadas, principalmente para a estaca 50+840, onde a frequência de invasões por blocos foi completamente eliminada. Para os outros três locais a frequência esteve abaixo de 2%.

No entanto, a condição de abatimento dos taludes com a eliminação das banquetas gerou a maior frequência de invasão quando comparada com as demais. O incremento nas alturas de queda e as energias cinéticas decorrentes desta situação fizeram com que, embora a capacidade de absorção de energia cinética da areia fofa seja alta, os blocos ainda conseguissem repicar e gerar trajetórias de invasão da pista de rolamento. Mesmo assim,

quando comparados os valores com a condição só com alargamento, o efeito da camada de areia é refletido nas diminuições em pelo menos 72% nas frequências.

A segunda seção em número de invasões de blocos é a seção com alargamento e com uma banqueteta preenchida de material, mostrando como o material que consegue repicar na banqueteta inferior tem importância nestas invasões à pista de rolamento. Ainda sob essa condição, o efeito da camada de areia trouxe diminuição de mínimo 59%.

A consideração de duas banquetetas cheias de material fez com que a maior parte do consumo de energia cinética fosse realizado pela camada de areia e um pouco pelo material acumulado, o que fez com que a ação da camada de areia ficasse salientada, praticamente eliminando a possibilidade de invasões de blocos dentro da pista.

Para o caso da estaca 50+840, este tipo de solução forneceu a melhor resposta entre todas as soluções estudadas, tendo em conta que sempre a condição “sem alargamento” é a que gera maiores frequências de invasão.

A principal desvantagem deste tipo de solução está na necessidade de manutenção frequente da areia para mantê-la em uma condição de densidade realtiva baixa, e com isto garantir a sua capacidade de amortecimento. A alta permeabilidade deste material faz com que seja também necessário garantir uma drenagem adequada no nível inferior da camada.

O custo associado à implantação deste tipo de medida terá de levar em conta todos os fatores mencionados acima, fazendo com que seja necessária uma priorização de pontos ao invés de uma construção contínua da solução.

5.5.3. Barreiras compostas por redes metálicas sobre a face do talude

Nestes casos, a solução é composta de uma rede metálica colocada sobre a face do talude. Em relação à capacidade de se deformar da barreira, esta foi considerada como sendo perfeitamente inelástica. Devido aos níveis de energia gerados durante as simulações para a seção 57+800 (ver Figura 5.27), e tendo em conta as capacidades das barreiras disponíveis no mercado, não foi considerada uma resistência máxima para a barreira definida.

Na Figura 5.27 foi considerada a seção localizada no km 57+800 devido à sua condição de maiores alturas de cortes, com os decorrentes maiores níveis de energia cinética. Os resultados para cada condição geométrica são apresentados na Figura 5.28.

Devido à altura de instalação da barreira, não é possível conseguir o enchimento da banqueteta

inferior, razão pela qual não foi contemplada essa condição nas análises.

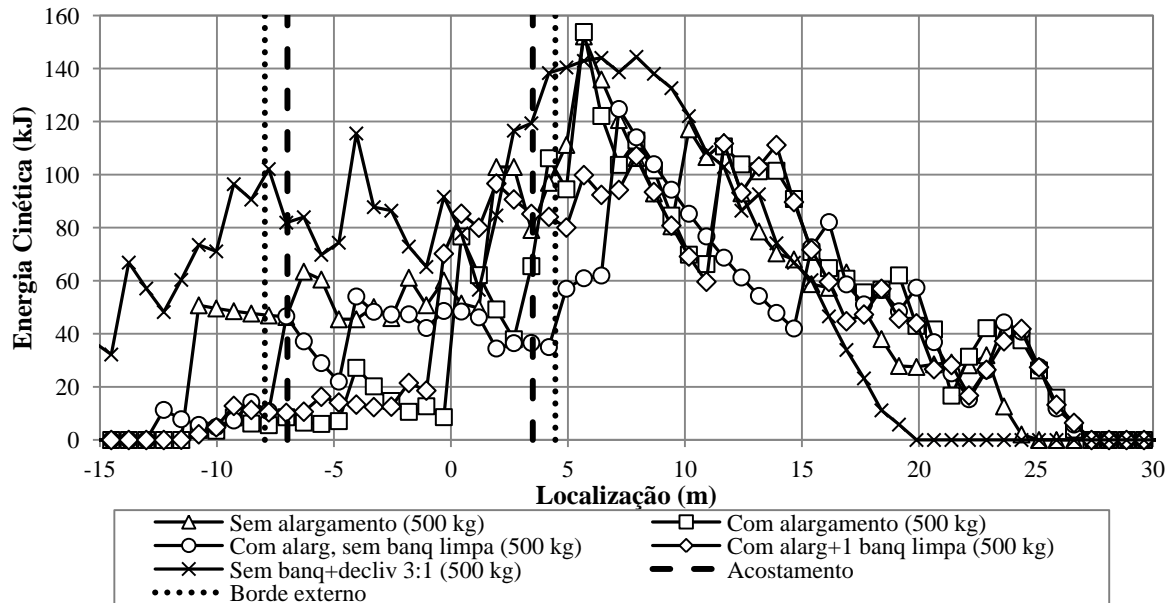


Figura 5.27: Envoltórias de energia cinética para blocos de 500 kg (57+800).

Em todos os casos foi definida uma altura de instalação das barreiras de tal maneira que não fosse possível o ingresso de pessoas nela, mas que fossem possíveis as operações de limpeza e manutenção periódica ou especial ante a queda de algum bloco de grande porte.

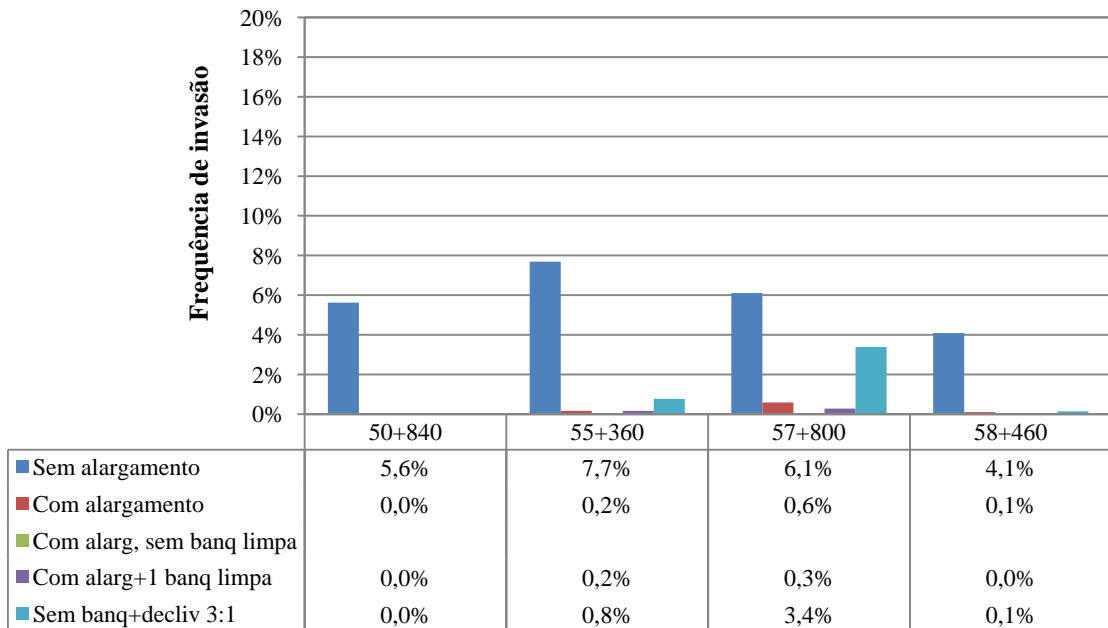


Figura 5.28: Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais (com barreira em rede metálica L = 4,0 m).

Em todos os quatro locais, a condição sem alargamento obteve o menor desempenho quando comparado com as outras opções. A existência de alguns blocos que descrevem trajetórias que evitam a barreira somada ao volume de blocos oriundos da parcela do talude embaixo dela, fez com que uma importante parcela conseguisse atingir a pista. Para um melhor desempenho deste tipo solução nesta condição geométrica, seria necessário o incremento no comprimento das redes, ou o estabelecimento de linhas de redes um pouco mais próximas das áreas superiores dos taludes.

Contudo, fica evidente a importante influência da parte superior dos taludes na presença de blocos dentro da pista ao se comparar esta condição com a inicial (sem barreiras). Para o caso sem alargamento da seção, as diminuições na frequência variam entre 18% e 83%. Para a consideração da existência da área de retenção, as diminuições nas frequências estão acima de 45%. Mas a melhor resposta é a fornecida quando ainda existe uma banqueteta cheia de material, onde o efeito de absorção da energia por parte das redes permite gerar diminuições acima de 85%.

Para as seções 55+360 e 57+800, o critério de implantação da barreira na metade da altura para o caso de talude abatido e sem banquetetas, ainda permite uma altura livre embaixo da rede de aproximadamente 20 m, o que faz com que muitos blocos ainda consigam desenvolver energias que permitem seu ingresso na área de operação veicular. Nestes casos seria conveniente uma redefinição das linhas de redes, ou considerar o uso de redes adicionais.

5.5.4. Com a instalação de proteção superficial ao longo da face do talude

Este é o caso de redes ao longo de todo o talude ou de aplicação de concreto projetado. Para estas simulações de queda de blocos não existe nenhuma consideração de acumulação em banquetetas. Os resultados são apresentados na Figura 5.29.

A tendência geral dos resultados obtidos guarda semelhança com os obtidos para a condição com instalação de barreiras em rede metálica (ver Figura 5.28) levando em conta que os únicos blocos destas análises vieram do talude inferior de cada corte. No caso da seção sem alargamento, o efeito destas rochas fez com que as frequências ficassem com valores entre 5% e 7%.

Esperavam-se frequências muito menores pelo fato da limitação imposta às fontes de queda localizadas nas partes superiores dos taludes, porém a implantação da camada de areia apresenta o melhor desempenho quando comparada com os outros elementos de proteção.

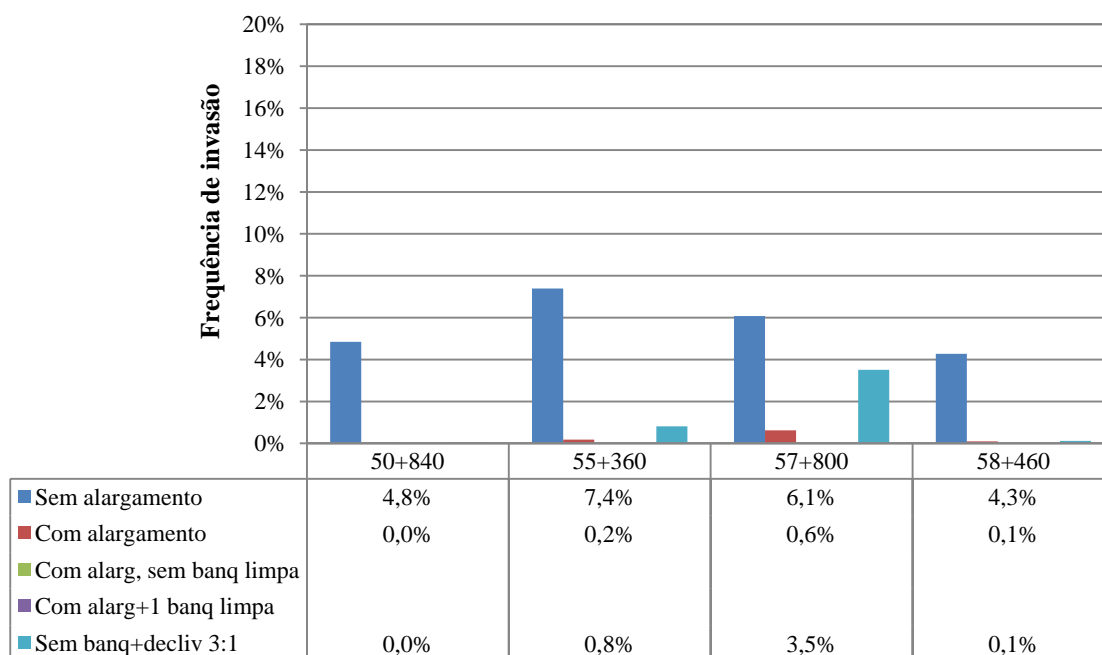


Figura 5.29: Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais considerando proteção superficial ao longo da face do talude.

Para o caso da seção localizada em 57+800 com talude abatido e sem banquetas, a implantação de uma proteção só na metade superior do talude mostrou ser insuficiente para evitar o efeito dos blocos, mesmo que eles caíssem por um talude com declividade menor.

Nos dois casos (55+360 e 57+800), embora o efeito da incorporação da área de retenção de blocos tenha tido uma considerável influência, as seções apresentam as maiores frequências de invasão ao se comparar com as outras duas. No entanto, tem que ser levado em conta que os valores ainda se mantêm abaixo de 1%. Considerando que levar este valor até zero exigiria investimentos muito altos, será necessário contemplar a convivência com algum nível de risco.

Para as seções 50+840 e 58+460, o efeito da área de retenção foi determinante, levando as frequências para valores muito próximos de zero. Neste tipo de seções, se a manutenção das banquetas é feita com regularidade, poderia não se requerer a incorporação de elementos de proteção.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

No presente estudo foi feita uma análise de várias situações que vem acontecendo desde a implantação da Rodovia RS471/BR153, dando ênfase na problemática de queda de blocos rochosos dentro dos subtrechos de planalto e de descida da serra. Foram descritos os principais condicionantes geotécnicos dos subtrechos, com ênfase na definição da geometria final adotada. A descrição geotécnica dos quatro setores da rodovia visa a manutenção de uma memória técnica, a qual pode auxiliar outros projetos em condições similares, e permite um entendimento das alternativas estudadas.

O trabalho teve uma ênfase no estudo da cinemática de blocos de rocha nas várias opções de projeto dos cortes. Para isto foi feita uma campanha de determinação do coeficiente de restituição normal a partir do uso do martelo Schmidt (esclerômetro) com a correlação proposta por Peng (2000).

Foram estudadas quatro seções transversais de corte da rodovia, com alturas e geometrias variáveis, as quais podem ser enquadradas em dois grupos: (a) as seções 50+840 e 58+460, com alturas menores (em torno dos 15 metros); (b) seções 55+360 e 57+800, com alturas de corte de 30 e 50 metros, respectivamente. As análises feitas para as seções do primeiro grupo levaram em conta a queda de blocos tanto na esquerda quanto na direita, enquanto no segundo grupo somente foi estudado o talude direito.

Através do programa *RocFall*, foram estudadas trajetórias de queda de blocos para estas quatro seções principais, utilizando a geometria básica construída, o perfil de materiais geológicos encontrados e os dados experimentais do coeficiente R_N .

O valor do coeficiente de restituição normal (R_N) utilizado nas análises foi calculado a partir de correlações com dados experimentais obtidos com o Martelo Schmidt em locais específicos de campo. Estes locais visavam obter valores o mais representativos dos materiais presentes na seção, tendo sido medidos nas mesmas cotas encontradas nas seções estudadas. O valor deste coeficiente (R_N) obtido foi mais baixo do que o indicado na literatura, o que levou a trajetórias de menor alcance quando desconsiderado o efeito da rugosidade geométrica. Quando incorporada a rugosidade geométrica dos cortes, o alcance dos blocos foi

ampliado. Os valores dos coeficientes de restituição normal obtidos com esta correlação, assim como os adotados da literatura (coeficiente de restituição, atrito superficial, rugosidade e massa) mostraram resultados consistentes com as observações feitas durante as inspeções de campo.

Para os quatro casos geométricos estudados, os resultados das análises demonstraram a necessidade de implantação de algum elemento de proteção para a condição original de projeto, sem o qual o nível de perigo seria inadmissível para a operação da rodovia. Com isto foram realizados vários estudos de alternativas de atenuação ou mitigação dos riscos, com mudanças na geometria e uso de elementos de proteção.

As principais conclusões das simulações com estudo de alternativas foram:

- a) os resultados das simulações não mostraram muita sensibilidade ao coeficiente de restituição tangencial (R_T); a correção do valor de R_N em função da velocidade do bloco foi desconsiderada para permitir maior representatividade com o campo;
- b) os resultados obtidos pela aplicação da correlação proposta por Peng (2000) não se enquadraram na proposta gráfica feita por Chau (2002), sendo que os valores oscilaram entre os correspondentes para taludes em rocha e em solo. Os graus de alteração e fraturamento dos materiais analisados poderiam ter influenciado nos baixos valores obtidos para R_N , sendo que isto não representa necessariamente um erro no modelo aplicado;
- c) em todos os casos estudados, a implantação de áreas de retenção de blocos se mostrou como uma ótima alternativa de solução, com reduções nas frequências de invasão pelo menos de 85%;
- d) esta solução melhora ainda mais seu desempenho com a inclusão de uma camada de material fofo (areia fofa no presente estudo). Para o caso da seção 50+840 houve eliminação das invasões. Com eliminação de banquetas ainda houve diminuições de pelo menos 72%. Quando comparado seu efeito sob condições de preenchimento das banquetas, ainda foi possível obter diminuição nas frequências de invasão de pelo menos 59%;
- e) o primeiro grupo, com alturas menores, apresentou o maior grau de efetividade perante a implantação de elementos de proteção, sejam mudanças geométricas ou implantação de elementos adicionais. Em alguns casos, principalmente no

setor de planalto, abatimentos dos cortes durante a construção conseguiram estabilizar ou diminuir a frequência de quedas de materiais;

- f) o segundo grupo, com maiores alturas, mostrou-se muito sensível ao preenchimento total das banquetas por blocos, atingindo frequências de invasão no caso da seção 57+800 muito próximas das ocorridas sem área de retenção de blocos (6,5%);
- g) nestes casos, o emprego de elementos de proteção em geral reduziu este tipo de ocorrência. Para os taludes do segundo grupo, com maiores alturas de taludes, houve diminuição nas frequências de invasão de aproximadamente 50% quando comparadas com a condição sem elementos de proteção. Para os outros casos os valores são ainda maiores;
- h) o abatimento dos taludes e remoção das banquetas elimina pontos intermediários de repique para os blocos em trajetória de queda. Porém, a queda sem obstáculos diferentes da rugosidade geométrica permite o desenvolvimento de energias cinéticas muito altas até o pé do talude. Esta condição resulta em muitos casos de projeções de blocos dentro da pista e até dentro da área de retenção do talude oposto;
- i) esta alternativa geométrica (abatimento e sem banquetas) poderia funcionar em taludes de baixa altura, como os do primeiro grupo, mas necessitando da construção de uma área de retenção de blocos e do uso de um elemento de dissipação da energia dentro dessa área. Para o caso de taludes de grande altura, como os do segundo grupo, este tipo de alternativa não é recomendada;
- j) o uso de barreiras de baixa altura em concreto (~80 cm), permitiu reduzir as frequências totais em todos os casos quando comparados com a situação sem a sua instalação;
- k) os menores efeitos conseguidos com as barreiras em concreto correspondem a condição com taludes abatidos e sem banquetas, maiores para os taludes do segundo grupo (4% e 11% para as seções 55+360 e 57+800 respectivamente);
- l) o emprego de elementos de baixa altura em concreto mostrou ser eficaz para taludes do primeiro grupo (baixas alturas), para os quais foram obtidos importantes níveis de retenção, com percentagens de dano relativamente baixas (5%). Sua função também como elemento de segurança aos veículos torna-o

atrativo em várias situações;

- m) para os taludes do segundo grupo, além de ter níveis baixos de retenção, houve uma frequência alta de barreiras danificadas devido às altas energias desenvolvidas (entre 15 e 20% dos impactos por blocos geraram dano);
- n) a substituição parcial da área de retenção de blocos por areia fofa foi a solução de melhor desempenho dentre as estudadas, conseguindo manter baixos todos os índices de invasão de pista para as várias situações da seção transversal. A condição chave deste tipo de solução está na garantia de um coeficiente de restituição baixo (para o presente caso $R_N = 0,04$);
- o) os resultados obtidos com a aplicação de elementos de proteção metálicos flexíveis corresponderam, neste caso, a soluções com quantidade mínima. Outras configurações podem ser estudadas para avaliação do custo/benefício. No presente estudo as piores respostas corresponderam à condição sem alargamento, com resultados abaixo de 8%. As condições restantes conseguiram se manter abaixo de 1% (com exceção da condição sem banquetas na seção 57+800, com uma frequência um pouco maior do que 3%);
- p) o uso de proteções superficiais, sejam elas metálicas ou com concreto projetado, são naturalmente consideradas eficientes, mas precisam ser avaliadas a médio e longo prazo. Os resultados desta alternativa foram muito parecidos com os obtidos com o uso de barreiras metálicas flexíveis.

Estes tipos de estudos mostram-se importantes para ser desenvolvidos nas diferentes etapas do projeto, não somente durante a elaboração do projeto de taludes, mas também durante a operação da rodovia. Para esta tarefa sempre será recomendável a combinação de atividades em campo, laboratório e o emprego de ferramentas de análise computacional, visando a determinação de parâmetros e calibração dos modelos para cada local. Um adequado acompanhamento destes fenômenos nas etapas prévias da entrega da obra tem um grande potencial de economia, levando em conta que muitas das alternativas de solução e medidas de proteção podem ser implantadas sem necessidade de recorrer a equipamentos ou práticas especiais.

6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo fez a aplicação do método proposto por Peng (2000) para a determinação do coeficiente de restituição normal (R_N) e buscou estabelecer algumas relações básicas entre aspectos da geometria em algumas seções transversais e a certos tipos de elementos de proteção de uso comum. Porém, ainda restam bastantes aspectos a serem pesquisados em novas pesquisas, tais como:

- a) calibração das equações propostas por Peng (2000) a partir de:
 - ensaios em campo, executando lançamentos de blocos e obtendo registros com câmeras de alta velocidade ou estabelecendo pontos de controle (início e fim da trajetória, e primeiro impacto quando possível);
 - ensaios de laboratório, empregando tanto elementos talhados (esferas e lajes lisas) como elementos irregulares;
 - Leituras com martelo Schmidt (tipo “L” e tipo “N”) em todos os elementos ensaiados;
 - restituição por retro-análise;
- b) estudo de correlações entre o coeficiente de restituição normal (R_N) e alguns parâmetros mecânicos (Módulos de elasticidade, resistência à compressão simples, carga pontual etc.) e físicos das rochas (densidade, textura etc.) a partir de amostras dos materiais rochosos. Estudar também as obter correlações entre alguns destes parâmetros e o coeficiente de restituição tangencial (R_T);
- c) repetir as medidas com Martelo Schmidt no futuro (1 a 5 anos, por exemplo), para verificar a variação dos coeficientes de restituição em função da idade do corte;
- d) executar inventário sistemático de quedas de blocos e características básicas de ocorrência, visando definir um banco de dados e a programação de tarefas de limpeza de banquetas e de áreas de retenção de blocos;
- e) estudar outras alternativas econômicas, tais como uso de pneus, já que uma das principais dificuldades para o emprego da solução com camada de areia fofa é a necessidade de uma manutenção frequente a fim de manter as suas condições de resposta;
- f) estudar quedas de blocos considerando superfícies não rochosas, tais como taludes em solo ou camadas de brita (poucas experiências até agora).

REFERÊNCIAS

ALBERTA - Ministry of transportation (Government of Alberta). **Roadside Design Guide**: 2007. Disponível em: <<http://www.transportation.alberta.ca/3451.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Standard Specifications for Highway Bridges**. 16th. ed. Washington,, D.C, 1996. 423 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer**: D5873-05. Pennsylvania, 2005. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete**: C805/C805M-08. Pennsylvania, 2008. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Norma NBR 11682:2009: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2009. 33 p.

AYDIN, A. **ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version**. International Journal of Rock Mechanincs & Mining Sciences, Oxford, v. 46, n. 3, p.627-634, Apr. 2009. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.

AYDIN, A.; BASU, A. **The Schmidt hammer in rock material characterization**. Engineering Geology, Amsterdam, v. 81, n. 1, p.1-14, Sept. 2005. doi:10.1016/j.enggeo.2005.06.006.

AZZONI, A.; LA BARBERA, G.; ZANINETTI, A. **Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Abstracts, Oxford, v. 32, n. 7, p.709-724, Oct. 1995. doi:10.1016/0148-9062(95)00018-C.

BASU, A; AYDIN, A. **A method for normalization of Schmidt hammer rebound values**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Oxford, v. 41, n. 7, p.1211-1214, Sept. 2005. doi:10.1016/j.ijrmms.2004.05.001

BRESSANI, L. A. **Análise de estabilização dos cortes em materiais rochosos**: Rodovia RS471 – Trecho: Barros Cassal – Vera Cruz. Porto Alegre: Laboratório de Geotecnologia UFRGS, 2010. 22 p. Relatório para Construtora OAS Ltda.

BUZZI, O.; GIACOMINI, A.; SPADARI, M. **Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients**. Rock Mechanics and Rock Engineering, Wien, v. 45, n. 1, p35-43, 2012. doi: 10.1007/s00603-011-0183-0.

CARVALHO, P. A. S. **Manual de geotecnia - taludes de rodovias**: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991. 388 p.

CAVALCANTE, M. A. et al. **O estudo de Colisões através do Som**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 24, n. 2, p.150-157, jun. 2002.

CHAU, K. T. et al. **Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 9., Paris. Proceedings... Paris: Balkema, 1999, v. 2, p.541-544.

CHAU, K. T.; WONG, R. H. C.; WU, J. J. **Coefficient of restitution and rotational motions of rockfalls impacts**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Oxford, v. 39, n. 1, p.69-77, Jan. 2002. doi: 10.1016/S1365-1609(02)00016-3.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Ed). **Landslides: Investigation and Mitigation**: Special Report 247. Washington, D. C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1996. p.36-75.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering Classification and Index properties for intact rock**: Technical Report AFWL-TR-65-116. Urbana: Air Force Weapons Laboratory, 1966. 300 p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER (Rio Grande do Sul). **Projeto de estabilização dos taludes em rocha – Sela topográfica – km 55+840 ao km 56+220 – Corte 21**: Rodovia RS/471 Trecho Barros Cassal – Santa Cruz do Sul. Porto Alegre, 2010. 54 p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER (Rio Grande do Sul). **Projeto final de Engenharia**: Rodovia RS/471 Trecho Barros Cassal – Santa Cruz do Sul. Porto Alegre, 2002a. v. 1, 246 p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER (Rio Grande do Sul). **Projeto final de Engenharia**: Rodovia RS/471 Trecho Barros Cassal – Santa Cruz do Sul. Porto Alegre, 2002b. v. 2, 333 p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER. **Normas de Projetos Rodoviários** (Rio Grande do Sul). Porto Alegre, 1991. v. 2, 139 p.

DESCOEUDRES, F. **Aspects géomécaniques dès instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs**. Publications de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Montreux. V. 135, p.3-11, Nov. 1997.

DIAS, G. P.; BARROSO, E. V. **Determinação experimental do coeficiente de restituição normal em rochas**: Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro: UFRJ, 2006, v. 29, n. 2, 300 p.

DORREN, L. K. A. et al. **Combining field and modeling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps.** *Geomorphology*, Amsterdam, v. 57, n. 3-4, p.151-167, Feb. 2004. doi: 10.1016/S0169-555X(03)00100-4.

FARRAND, S. W. **Rockfall Modelling Parameters and the Control Barrier at Stockton Mine, New Zealand.** 2007, 207 f. Thesis (Master of Science in Engineering Geology) - Department of Geological Sciences. University of Canterbury, Christchurch, 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Analysis and design of Wire mesh/cable net slope protection:** Final Research Report WA-RS 612.1. Washington,, D. C., 2005. 186 p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Rock Slopes: Design, Excavation, Stabilization:**. Publication No. FHWA-TS-89-045. McLean, 1989. 548 p.

FLÓREZ-GÁLVEZ, J. H.; BRESSANI, L. A. **Evolução do projeto do Lote 2 da Rodovia RS471/BR153 com base em condicionantes geológico-geotécnicos.** In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 8., Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 2012. 9 p.

GEOBRUGG. **Catálogos de produtos.** Romanshorn, Suíça. 2012. Disponível em: <<http://www.geobrugg.com>>. Acesso em: 8 fev. 2012.

GERBER, W. **Guideline for the approval of rockfall protection kits. Environment in practice.** Federal Office of the Environment (FOEN), Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (SLF), Research Institute (WSL). Bern, 2001. 39 p. Disponível em: <www.environment-switzerland.ch/publications>. Acesso em: 01 abr. 2012.

GIANI, G. P. **Rock Slope stability analysis.** Rotterdam: Balkema, 1992. 345 p.

GIANI, G. P. et al. **Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design.** *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Wien, v. 37, n. 5, p.369-389, 2004. doi: 10.1007/s00603-004-0027-2.

GOMES, GUILHERME J. C. **Avaliação do perigo relacionado à queda de blocos em rodovias.** 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GRIMOD, A; GIACCHETTI, G. **Protection from high energy impacts using reinforced soil embankments: design and experiences.** In: WORLD LANDSLIDE FORUM, 2., Roma. Proceedings... Roma, 2011. 6 p.

GSL PREFABRICADOS. **Catálogo seguridad vial “Delta Bloc”.** Lleida. Disponível em: <<http://www.gslprefabricados.com>>. Acesso em: 7 fev. 2012.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Blucher, 1984. 194 p.

GUZZETTI, F. et al. **STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls**. Computers & Geosciences, Oxford, v. 28, n. 9, p1079-1093, Nov. 2002. doi: 10.1016/S0098-3004(02)00025-0.

HEIDENREICH, B. **Small –and half- scale Experimental studies of Rockfall impacts on sandy slopes**. 2004. 231 f. Thèse N° 3059 (Doutorat ès Sciences Techniques) - Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2004

HEIDEMANN, M. **Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar – SC**. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HIGHLAND, L. M; BOBROWSKY, H. **The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides**: Circular 1325. Reston: U. S. Geological Survey, 2008. 129 p.

HOEK, E; LONDE, P. **The design of rock slopes and foundations**: General report. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 3., Denver. Proceedings... Denver, 1974. 78 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**: Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro, v. 33, 1986. 794 p.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. **Suggested methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Oxford, v. 15, n. 3, p.89-97, Jun. 1978. doi: 10.1016/0148-9062(78)90002-5.

JIANG, J.; YOKINO, K.; YAMAGAMI, T. **Identification of DEM parameters for rockfall simulation analysis**. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Wuhan, v. 27, n. 12, p.2418-2430, Dec. 2008.

LABIOUSE, V; HEIDENREICH, B. **Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes**. Natural Hazards and Earth System Sciences, [s. L], v. 9, n. 6, p.1981-1993, 2009. doi: 10.5194/nhess-9-1981-2009.

LEMES, M. R. T. **Revisão dos efeitos da vegetação em taludes**. 2001. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

LORENTZ, J. **Etude de la capacite de dissipation sou impact d'une structure sandwich de protection contre les chutes de blocs rocheux**. 2006. 218 f. Thèse (Docteur en terre univers et environnement) - Université Grenoble 1 – Joseph Fourier, Sciences & Géographie, Grenoble. 2006.

MACCAFERRI. **Catálogos de produtos:** Brasil. 2012. Disponível em: <<http://www.maccaferri.com.br>>. Acesso em: 8 de fev. 2012.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R. Geological and Magmatic Aspects of the Paraná Basin – An introduction. In: PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. (Ed.). **The Mosozoic flood volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and geophysical aspects.** São Paulo: USP, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988. p.1-13.

MEZZOMO, S. M.; STRAUSS, M.; AZAMBUJA, E. **Estabilização dos taludes rochosos da RS/471.** In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 5., São Paulo. Anais... São Paulo, 2009. 9 p.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Report 350: Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features.** Washington,, D. C.: National Research Council, 1993. 64 p.

NATIONAL COOPERATIVE HIGH WAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Report 663: Design of Roadside Barrier Systems Placed on MSE Retaining Walls.** Washington,, D. C.: National Research Council, 2010. 184 p.

NORRIS, J. E. et al. **Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions.** Dordrecht: Springer, 2008. 287 p.

NORRISH, N. I.; WYLLIE, D. C. Rock slope stability analysis. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Ed). **Landslides: Investigation and Mitigation: Special Report 247.** Washington, D. C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1996. p.391-425.

OKURA, Y. et al. **The effects of rockfall volume on runout distance.** Engineering Geology, Amsterdam, v. 58, n. 2, p.109-124, Nov. 2000. doi: 10.1016/S0013-7952(00)00049-1,

PANTELIDIS, L. **Rock catchment area design charts.** In: GEOFLORIDA 2010: Advances in Analysis, Modelling & Desing, West Palm Beach. Proceedings... West Palm Beach, 2010, p.224-233.

PANTELIDIS, L.; KOKKALIN, A. **Designing passive rockfall measures based on computer simulation and field experience to enhance highway safety.** International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Oxford, v. 48, n. 8, p.1369-1375, Dec. 2011. doi: 10.1016/j.ijrmms.2011.09.008

PEILA, D. **Rock fall protection using reinforced embankments.** Disponível em: <http://areweb.polito.it/ricerca/tusc/SITO%20PEILA/teaching-1_file/TRB-2010-rilevato-ver%20finale%20.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2012.

PENG. B. **Rockfall Trajectory Analysis: Parameter Determination and Application.** 2000. 199 f. Thesis (Master of Science in Engineering Geology) - Department of Geological Sciences. University of Canterbury, Christchurch, 2000.

PFEIFFER T, J; BOWEN, T. D. **Computer Simulation of Rockfalls**. Bulletin of the Association of Engineering Geologist, Dallas, v. 26, p.136-146. 1989

PIERSON, L. A.; GULLIXSON, C. F.; CHASSIE, R. G. **Rockfall catchment area. Design guide**: Final report SPR-3(032). Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2001. 78 p.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. **Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Oxford, v. 18, n. 3, p.183-197, Jun. 1981. doi: 10.1016/0148-9062(81)90973-6

RAYUDU, D. N. P. **Computer simulation of Rockfalls**: Application to rockfalls at Fox Glacier, West Coast, New Zealand. 1997. 172 f. Thesis (Master in Rock Engineering) - Department of Natural Resources Engineering, Lincoln University, Christchurch, 1997.

RIGO, M. L. **Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de Solos Saprolíticos de rochas vulcânicas da formação Serra Geral**. 2005. 351 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RITCHIE, A. M. **Evaluation of Rockfall and its Control**. Highway Research Record, Washington, D. C., v. 17, p.13-28, 1963.

ROCHA, J. S. A. **Estudos Numéricos sobre trajetórias de queda de blocos**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009

ROSCIENCE. **Advanced Tutorial**: Determining input parameters for a RocFall analysis. 2003. 8 p.

ROSCIENCE. **RocFall**: Risk analysis of falling rocks on steep slopes (User's Guide). 1998. 59 p.

ROISENBERG, A.; VIERO, A. P. O Vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. CIGO/UFRGS, 2000. p.355-374.

SCHELLENBERG, K. **On the design of rockfall protection galleries**. 2008. 177 f. Thesis No. 17924 (Doctor of Sciences) - Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 2008.

SPADARI, M. et al. **In situ rockfall testing in New South Wales, Australia**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Oxford, v. 49, p.84-93, 2012. doi:10.1016/j.ijrmms.2011.11.013.

SPANG, R. M; RAUTENSTRAUCH, R. W. **Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications**. In: BONNARD, C. (Ed.). *Landslides: International Symposium on Landslides*, 5., Rotterdam. Proceedings... Rotterdam: Balkema, 1988, v. 2, p.1237-1243.

STEVENS, W. D. **Rockfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls**. 1998. 28 f. Thesis (Master of Applied Science) – Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1998.

STOFFEL, M. **Spatio-temporal variations of rockfall activity into forests –results from tree – ring and tree analysis**. 2005. 188 f. Dissertation No. 1480 (Doctor *rerum naturalium* der Mathematisch) - Naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Freiburg, Fribourg, 2005.

SWISS FEDERAL INSTITUTE FOR FOREST, SNOW AND LANDSCAPE RESEARCH – WSL. 2012. **Hybrid_concept.jpg**. 2012. Altura: 266 pixels. Largura: 334 pixels. 8 Kb. Formato JPEG. Disponível em: <http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/massenbewegungen/projekte/KTI_Attenuators/index_EN>. Acesso em: 8 abr. 2012.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Ed). **Landslides: Analysis and Control: Special Report 176**. Washington, D. C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1978. p.11-33.

WANG, I-T; LEE, C-Y. **Influence do Slope Shape and Surface Roughness on the Moving Paths of a Single Rockfall..** World Academy of Science, Engineering and Technology, [s. L], v. 65, p.1021-1027. 2010

WU, S. S. **Rockfall Evaluation by Computer Simulation**. Transportation Research Record, Washington, D. C., v. 1031, p.1-5, 1985.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock slope engineering: Civil and Mining**. 4th. ed. New York: Spon Press, 2004. 431 p.