

VARIAÇÃO DOS EFEITOS DAS QUEDAS DE ROCHAS EM SEÇÕES RODOVIÁRIAS POR MODIFICAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL E NOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO

Variation of rockfall effects on road sections by changes in cross section and elements of protection

Jorge Hernán Flórez Gálvez*

Luiz Antônio Bressani**

RESUMO – São apresentados alguns resultados de simulações de quedas de blocos em quatro seções rodoviárias, obtidas através das informações coletadas durante o projeto e execução do Lote 2 da rodovia RS471/BR153, localizada no Estado do Rio Grande do Sul (sul do Brasil). Definiram-se quatro condições de seção transversal para cada local, além de cinco elementos de proteção, e foram feitas combinações entre eles visando obter o melhor nível de desempenho sob cada condição, estabelecendo como parâmetro de comparação a frequência de invasão de blocos dentro da área de operação veicular. As simulações foram feitas com o programa *RocFall*, definindo o coeficiente de restituição normal (R_N) para os materiais dos taludes mediante uma correlação entre este parâmetro e as leituras obtidas com o martelo Schmidt. A forte rugosidade superficial dos taludes motivou uma análise de sensibilidade considerando três condições e diferentes valores de R_N visando obter a condição que melhor representasse a realidade.

SYNOPSIS – Some results are presented of simulations of rockfalls in four road sections, obtained through the information gathered during the design and construction of the Section 2 of RS471/BR153 highway, located in Rio Grande do Sul State (southern Brazil). Four conditions of cross section for each location were defined, as well as five elements of protection, and combinations between them were made to obtain the best level of performance under each condition, establishing as control parameter the rate of invasion of blocks within the vehicle operating area. The simulations were done with the software *RocFall* by setting the coefficient of normal restitution (R_N) for the material of the slopes by means of a correlation between this parameter and the reading obtained with the Schmidt hammer. The strong surface roughness of slopes motivated a sensitivity analysis considering three conditions and different R_N values to obtain the condition that could represent the reality in the best manner.

PALAVRAS CHAVE – Quedas de rochas, martelo Schmidt, coeficientes de restituição, elementos de proteção contra quedas de rochas.

1 – INTRODUÇÃO

A existência de maciços rochosos intactos, completamente contínuos, corresponde a um evento pouco comum, principalmente para os encontrados em superfície, afetados por agentes naturais e/ou antrópicos, que fazem com que a suas propriedades tendam a apresentar mudanças com o

* Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: jhflorezg@gmail.com

** Professor Associado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: bressani@ufrgs.br

passo do tempo. Às vezes, dependendo do material e do tipo de agente de alteração, a taxa de variação de propriedades pode levar de meses até muitos anos.

Na maioria dos casos, os maciços rochosos devem ser considerados como sendo conjuntos de blocos limitados nas três dimensões por um sistema de descontinuidades (Norrish e Wyllie, 1996). Em alguns casos, as descontinuidades podem guardar ou não padrões de ocorrência, o que permitirá definir o tipo de mecanismo de falha presente para o caso estudado.

Um dos tipos de mecanismos que envolvem estes tipos de materiais corresponde às quedas, que como resultado da ação da natureza ou do homem podem originar que em algumas superfícies muito íngremes aconteça o destaque de alguns blocos dentre os existentes (Giani, 1992). Este tipo de mecanismos não necessariamente se encontra associado com outros maiores. Os principais problemas deste tipo de mecanismo têm a ver com a sua própria velocidade, classificada entre rápida e muito rápida segundo a proposta de Cruden e Varnes (1996), e com os níveis de energia desenvolvidos pelos blocos em trajetória de queda, principalmente em taludes de grande altura.

O objetivo do presente estudo é estabelecer a variação nos efeitos das quedas de blocos, tanto pela aplicação de modificações na seção transversal, quanto pela implantação de elementos de proteção de uso comum em seções rodoviárias, seja em topografias homogêneas em corte (comumente conhecidas como corte caixa), seja em meia encosta. Os resultados obtidos pela aplicação de uma determinada alternativa serão analisados segundo a frequência de queda de rochas dentro da área de operação veicular (incluindo os acostamentos). O presente estudo foi aplicado ao subtrecho 2 da rodovia RS471/BR153, localizado entre os municípios de Herveiras e Vera Cruz (centro de Estado de Rio Grande do Sul, sul do Brasil). Os resultados aqui apresentados podem ser consultados em maior detalhe no trabalho desenvolvido por Flórez-Gálvez (2012).

2 – ESTUDO DAS QUEDAS DE ROCHAS

Em boa parte das situações, as oscilações térmicas diárias ou sazonais provocam variações volumétricas em massas rochosas que podem conduzir ao destaque de blocos (Guidicini e Nieble, 1984) ao levar as descontinuidades a condições de pressão neutra ou com resultante desfavorável (Gomes, 2009). Além disto, existem alguns outros fatores que podem desencadear os processos de quedas de rochas, tais como:

- Intemperismo físico e químico;
- Terremotos;
- Explosões;
- Tráfego pesado.

Neste sentido, vários trabalhos têm sido desenvolvidos visando uma melhor compreensão das principais variáveis deste tipo de mecanismos, empregando para isto uma ou até várias metodologias: registros de quedas e/ou lançamentos controlados *in situ* (Ritchie, 1963; Wu, 1985; Pierson *et al.*, 2001; Lorentz, 2006; Spadari *et al.*, 2011; Buzzi *et al.*, 2011); ensaios em laboratório a escala reduzida até real (Rayudu, 1997; Peng, 2000; Chau *et al.*, 1999, 2002; Giani *et al.*, 2004; Heidenreich, 2004; Wang e Lee, 2010); e aplicação dos anteriores resultados em programas de análise de quedas como Colorado Rock-Fall Simulation Program - CRSP (Pfeiffer e Bowen, 1989), Rockfall (Spang e Sönsner, 1995), RocFall (Stevens, 1998), entre outros. Embora os estudos mencionados tenham sido desenvolvidos tanto para encostas como para taludes, a modelagem de quedas de rochas é empregada com maior frequência para o primeiro caso.

2.1 – Tipos de mecanismos e trajetórias de queda

Inicialmente, os estudos de quedas de rochas estavam focados na determinação do alcance máximo dos blocos em função unicamente da altura de queda, considerando que o bloco crítico era

aquele que saia da crista do talude (Ritchie, 1963). No entanto, a existência de diferentes tipos de mecanismos de deslocamento obrigou a aprofundar os estudos visando definir modelos matemáticos que pudessem considerar os parâmetros próprios de cada um deles. Vários são os trabalhos focados na definição dos modelos que possam descrever as trajetórias (Giani, 1992; Azzoni *et al.*, 1995; Stevens, 1998), sendo que o último autor descreve quais foram as equações empregadas dentro do programa *RocFall*.

São quatro os mecanismos de deslocamento possíveis para um bloco, sendo que a trajetória total será a combinação de vários deles:

- Deslizamento: quando a resultante das forças atuantes e das resistentes é mantida dentro do plano em contato com a superfície do talude, e se as forças normais são o suficientemente baixas com relação às tangenciais, o bloco se deslocará deslizando ao longo do plano crítico da superfície do talude;
- Rolamento: para blocos com formatos arredondados não é comum o desenvolvimento de trajetórias de deslizamento pela forte tendência ao rolamento. A existência de um plano de contacto pequeno e forças normais pequenas em relação às tangenciais permite este tipo de mecanismo;
- Queda livre: quando o bloco consegue se afastar da superfície de contato, principalmente por declividades muito íngremes e por variações abruptas na geometria do talude, descreverá uma trajetória parabólica até atingir de novo alguma superfície;
- Repique: este mecanismo não pode ocorrer de maneira independente dos anteriores. Exatamente, o repique se associa à ocorrência inicial de uma queda livre, sendo seguida por outra queda livre, um deslizamento ou um rolamento.

2.2 – Parâmetros envolvidos no cálculo de trajetórias de queda

Uma das principais dificuldades do processo de definição das trajetórias de quedas de rochas está na grande quantidade de parâmetros que podem afetar os resultados obtidos, mesmo que alguns deles possam ter um baixo nível de impacto nos resultados. Os principais parâmetros encontram-se resumidos no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros que determinam o comportamento das quedas de rochas (Pfeiffer e Bowen, 1989).

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

Além destes parâmetros, para o caso de análises computacionais podem existir incertezas decorrentes de simplificações na geometria do modelo (dependendo se este é em 2D ou em 3D). Para o caso de modelos 2D, a definição da linha crítica de trajetória terá que ser definida por investigações em campo e pelo bom senso das pessoas encarregadas do processo, sendo que a variabilidade lateral é desconsiderada.

Existem algumas simplificações que com frequência são feitas para a execução das análises:

- Quando existe uma grande variabilidade litológica, se assume que as propriedades definidas para a superfície do talude nesse ponto são iguais às do bloco que o impacta;
- Em alguns modelos não é possível considerar a possibilidade de quebra do bloco decorrente dos impactos. Esta situação pode ser considerada como um fator de grande dissipação de energia, ou também pode se considerar a condição do bloco intacto como sendo a situação mais crítica pela energia cinética atingida no final da trajetória;
- Alguns modelos consideram blocos rochosos com formato esférico, facilitando assim a determinação da inércia do elemento, e permitindo considerar os efeitos rotacionais durante a queda.

2.3 – Coeficientes de restituição

A capacidade de restituição de um corpo é determinada mediante a definição do quociente entre o comportamento logo após um impacto e o existente logo antes, tendo como referência as direções normal e tangencial do plano da superfície de impacto. São múltiplas as abordagens que sobre este valor existem, sendo a mais comum a relação entre as velocidades em cada uma das direções (Wu, 1985; Spang e Rautenstrauch, 1988).

$$R_N = \frac{V_{N_2}}{V_{N_1}} \quad R_T = \frac{V_{T_2}}{V_{T_1}} \quad (1)$$

R_N – Coeficiente de restituição normal;

R_T – Coeficiente de restituição tangencial;

V_{N_1} – Velocidade normal à superfície, logo antes do impacto;

V_{N_2} – Velocidade normal à superfície, logo após o impacto;

V_{T_1} – Velocidade tangencial à superfície, logo antes do impacto;

V_{T_2} – Velocidade tangencial à superfície, logo após o impacto.

Chau *et al.* (1999) os define pela relação entre impulsos. Se a partícula não sofrer variações na sua massa, a relação ficaria expressa como em (1).

$$R_I = \frac{I_2^+}{I_1^-} = \frac{V_r}{V_i} \quad (2)$$

I_1^- – Impulso do bloco antes do impacto;

I_2^+ – Impulso do bloco após o impacto;

V_i – Velocidade do bloco antes do impacto;

V_r – Velocidade do bloco após o impacto.

Em outros trabalhos desenvolvidos por Chau *et al.* (1999; 2002), os coeficientes são expressos em função da dissipação de energia cinética. Também, se a partícula não sofrer alterações de massa, as equações poderão se expressar de igual maneira que em (1).

$$R_E = \frac{\frac{1}{2} * m * V_r^2}{\frac{1}{2} * m * V_i^2} = \frac{V_r^2}{V_i^2} \quad (3)$$

R_E – Coeficiente de restituição em função da energia cinética;

m – Massa do bloco.

Quando considerada a energia rotacional do bloco, os coeficientes de restituição se expressam assim:

$$R_E = \frac{\frac{1}{2} * m * V_r^2 + \frac{1}{2} * I * w_2^2}{\frac{1}{2} * m * V_i^2 + \frac{1}{2} * I * w_1^2} \quad (4)$$

I – Momento de inércia do bloco rochoso;

w_1 – Velocidade angular antes do impacto;

w_2 – Velocidade angular após o impacto.

2.4 – Elementos de proteção

Quando por questões de tipo técnicas, econômicas ou sociais, é desconsiderada a relocação do projeto, será necessária a adoção de medidas que permitam conter os elementos perigosos a fim de evitar seus efeitos negativos.

A oferta destes tipos de elementos vem sendo ampliada em função dos avanços tecnológicos e necessidades de cada local, sendo bons exemplos destes os fornecidos por empresas como Geobruigg e Maccaferri, assim como as soluções apresentadas por diversos autores (Gerber, 2001; FHWA, 2005; Lorentz, 2006; Farrand, 2007; Schellenberg, 2008). Estes tipos de elementos podem ser agrupados da seguinte maneira:

- Proteções ativas: seu objetivo é eliminar qualquer sinal de deslocamento dos blocos, sejam eles gerados pelo desconfinamento do maciço ou pelos processos de intemperismo nas faces expostas.
- Proteções passivas: quando não existem condições para impedir o mecanismo de queda, serão necessários elementos que desviem ou retenham os elementos que caem, permitindo assim uma convivência segura com o fenômeno.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Determinação do valor de R_N de cada seção ensaiada

O uso do martelo Schmidt como ferramenta para a determinação indireta de algumas das propriedades das rochas tem sido estudado em vários trabalhos, visando principalmente a obtenção de correlações com parâmetros mecânicos (Deere e Miller, 1966; Aydin e Basu, 2005). No trabalho desenvolvido por Peng (2000), baseado na proposta de Rayudu (1997), foram obtidas algumas

correlações entre os valores obtidos com o martelo Schmidt tipo “L” e os valores de R_N para alguns materiais existentes na Nova Zelândia. Para o presente estudo foi aplicada a equação proposta por Peng para superfícies rugosas de talude e blocos angulares (5).

$$R_N = \frac{-145 + 4H_{R(L)\text{-superf}} + 2H_{R(L)\text{-bloco}} + 2\alpha}{1000} \quad (5)$$

$H_{R(L)\text{-superf}}$ – Número de dureza de rebote para a superfície do talude.

$H_{R(L)\text{-bloco}}$ – Número de dureza de rebote para o bloco que cai.

α – Ângulo de declividade do talude, medido em relação ao plano horizontal.

Originalmente, para aplicações em rocha eram permitidos unicamente martelos do tipo “L” (ISRM, 1978), limitando assim o uso da versão de maior capacidade (tipo “N”). Atualmente, o uso de ambos os martelos é aceite (ASTM D5873-05; Aydin, 2009).

Para o presente estudo o martelo usado correspondeu ao tipo “NR”, fabricado por Proceq, e fornecido pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O procedimento de ensaio seguiu a Norma ASTM D5873-05. Para cada ponto de ensaio foi selecionada uma área da superfície do talude que estivesse livre de fraturamentos intensos, situação que obrigou a descartar alguns pontos de ensaio, bem pela inconsistência nos valores obtidos ou também pela própria instabilidade da superfície devido a fraturamentos paralelos à face do talude. A área definida para cada ensaio foi definida mediante um retângulo com comprimento da base menor de mínimo 15 cm (ver Fig. 1).

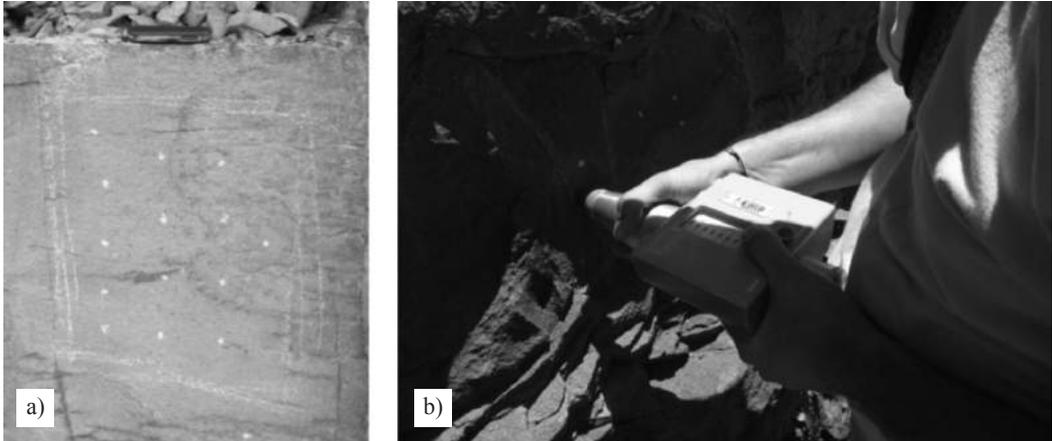


Fig. 1 – Procedimento de toma das leituras.

Foram definidas quatro seções transversais dentro do Lote 2 da rodovia RS471/BR153, localizada no Estado do Rio Grande do Sul (sul do Brasil), para a execução das leituras com o martelo e posteriores simulações de quedas de blocos (ver Fig. 2).

Em todos os casos, a superfície de ensaio encontrava-se seca e livre de incrustações de partículas finas, com textura superficial tendendo a lisa. Foram obtidas dez leituras para cada ponto de ensaio, sempre na direção normal ao plano do ponto de ensaio. Para cada superfície de ensaio foi medida a inclinação.

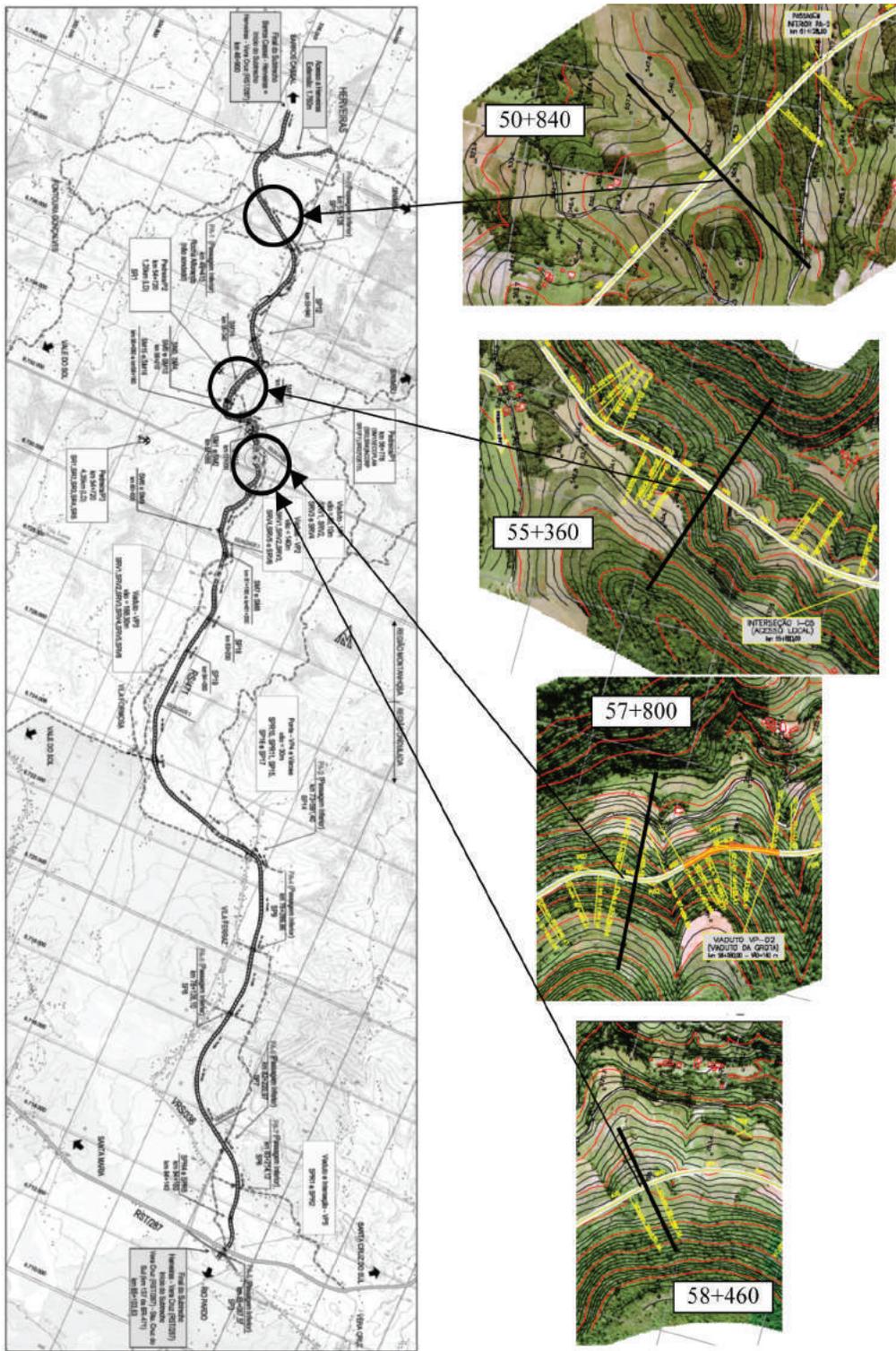


Fig. 2 – Geometria horizontal e localização das seções analisadas.

O processo de correção das leituras obtidas em campo para que ficassem referidas à direção horizontal foi feito empregando o procedimento proposto por Basu e Aydin (2004). A determinação do ângulo de leitura foi feita mediante uma bússola, ao determinar a declividade da face ensaiada do talude e somar ou restar 90° segundo fosse o caso. Para a aplicação deste método de correção, é necessária a determinação de algumas constantes próprias do tipo de martelo empregado (ver Quadro 2). O martelo encontrava-se calibrado, razão pela qual foi adotada a energia de referência de 2,207 N*m.

Quadro 2 – Constantes para martelo empregado.

CONSTANTES DO MARTELO “NR” PROCEQ		
k	N/m	764,2
x_1	M	0,076
M	kg	0,3895
g	m/s ²	9,810
E	N*m	2,207
V_1^2	(m/s) ²	11,3325

Fonte: Basu e Aydin (2004).

k – Constante da mola do martelo Schmidt;

x_1 – Extensão máxima da mola do martelo Schmidt (quando completamente carregada);

M – Massa do pistão;

g – Aceleração da gravidade;

E – Energia do impacto;

V_1 – Velocidade do pistão quando toca o êmbolo (durante o disparo), medida na direção horizontal.

Uma vez aplicado o método, também é possível gerar famílias de curvas próprias para o equipamento empregado (Fig. 3, onde θ é o ângulo de disparo do martelo, medido em relação ao plano horizontal).

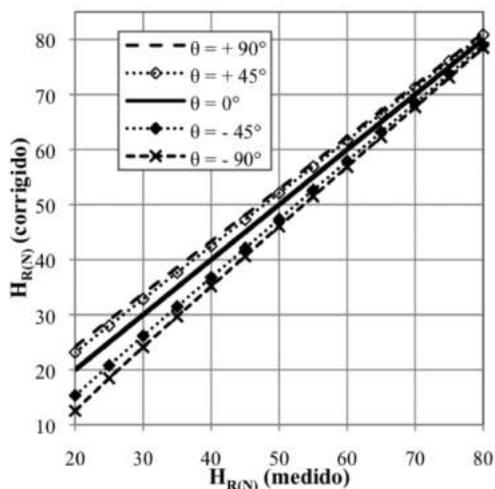


Fig. 3 – Curva de normalização em relação à horizontal (modificado de Basu e Aydin, 2004).

Tendo que a equação empregada para o cálculo de R_N é válida para martelos do tipo “L”, foi necessário converter as leituras obtidas com o martelo “N” para o primeiro. Dentre as equações propostas em diversos trabalhos, foi adotada a proposta por Aydin e Basu (2005), válida para valores de $H_{R(L)} > 30$ e $H_{R(N)} > 40$:

$$H_{R(L)} = \frac{H_{R(N)} - 6,3673}{1,0646} \quad (6)$$

$H_{R(L)}$ – Número de dureza de rebote, medido com o martelo Schmidt tipo “L”.

$H_{R(N)}$ – Número de dureza de rebote, medido com o martelo Schmidt tipo “N”.

A equação (5) foi aplicada para cada leitura individual do martelo, o tratamento que requer a Norma ASTM D5873-05 foi feito para as leituras equivalentes com o martelo “L”.

Para a determinação do valor de R_N segundo a equação (5) foram feitas as seguintes considerações:

- Considerou-se que tanto a superfície do talude e o bloco eram constituídos pelo mesmo material, devido à grande quantidade de combinações possíveis de materiais;
- Foi usada a declividade do talude existente nos locais estudados (4V:1H e 3V:1H).

Pelos riscos e dificuldades de execução das leituras nas partas altas dos taludes estudados, foi necessária a consideração de que as propriedades mecânicas das rochas avaliadas eram constantes para a mesma cota. Assim, quase todas as leituras foram feitas no mesmo nível do greide, para serem projetadas depois dentro de cada seção analisada, tal como se ilustra na Fig. 4.

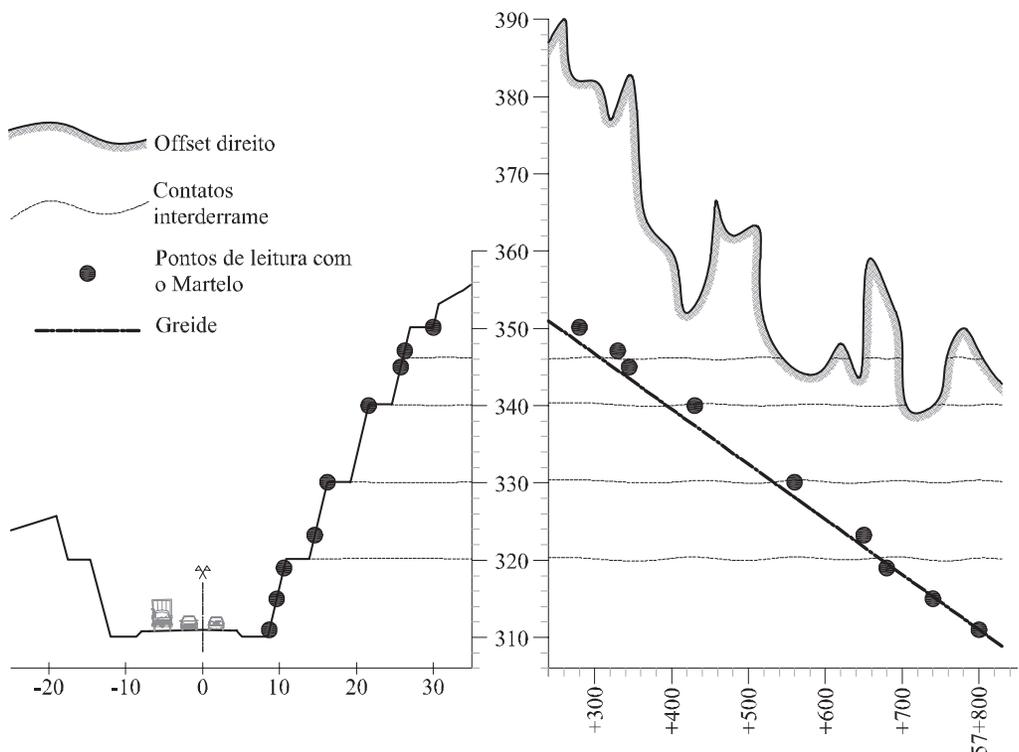


Fig. 4 – Sequência de pontos ensaiados e projeção dentro da seção 57+800.

3.2 – Condições ensaiadas

Para cada seção rodoviária foram ensaiadas quatro alternativas de condição geométrica, sendo que duas se derivavam de uma das primeiras, e representavam condições possíveis a acontecer durante a operação do projeto, assim:

- Seção sem alargamento – com banquetas: Cada talude de corte está definido por banquetas com altura de 10 m e largura de 3 m, com uma declividade de 4,2V:1H (77°). Logo do lado dos acostamentos foi definida uma sarjeta com largura total de 1,50 m e profundidade de 0,30 m. Do lado da sarjeta encontra-se o pé do talude (ver Fig. 5a);
- Com alargamento – com banquetas: A declividade dos taludes, a localização e as dimensões das banquetas são mantidas, mas foram adicionadas áreas de retenção de blocos no lado do pé do talude de corte, com uma largura de 4 m e largura de 0,70 m (ver Fig. 5b);
- Material acumulado em duas banquetas: A geometria básica é igual à do caso anterior, mas simulando o enchimento das duas banquetas inferiores com blocos que caíram do talude, até que a capacidade desta seja eliminada;
- Material acumulado em uma banqueta: Neste caso, foi considerada a limpeza frequente da banqueta inferior, mas com a segunda inferior cheia, sem capacidade de acumulação de material;
- Abatimento do talude e eliminação das banquetas: Neste último caso foi considerado o abatimento dos taludes de corte, de uma declividade de 4,2V:1H (77°) para 3V:1H (72°), além da eliminação das banquetas intermediárias.

Os resultados apresentados nas Figuras 9 a 17 correspondem às geometrias definidas acima.

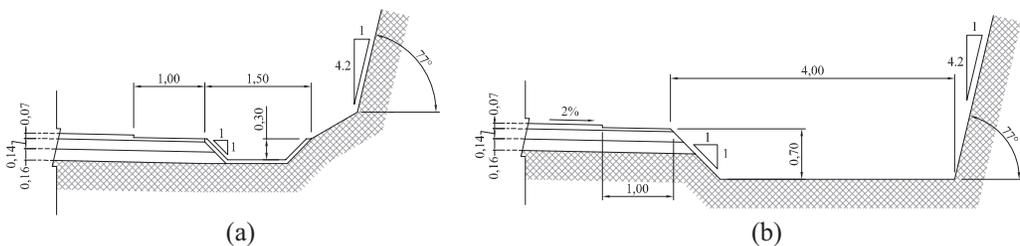


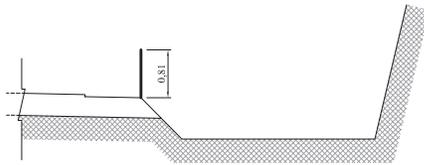
Fig. 5 – Detalhe da estrutura do pavimento: (a) sem alargamento; (b) alargamento para área de retenção de blocos.

3.3 – Elementos de proteção contemplados

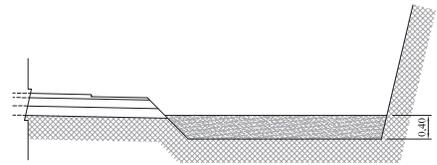
No presente estudo foram ensaiados elementos de proteção do tipo passivos permitindo assim a ocorrência do fenômeno de queda, visando que estes foram de uso comum e de baixo custo de instalação e de manutenção. Os elementos contemplados foram:

- Barreira vertical rígida de baixa altura: Neste caso foi testada uma barreira do tipo *New Jersey* sem ancoragens ao solo, para a qual foi atribuída uma energia máxima resistente de 25578 J (Fig. 6a);
- Substituição parcial da área de retenção de blocos por uma camada de areia fofa com espessura de 0,40 m (ver Fig. 6b);
- Construção de uma linha de barreiras constituídas por redes metálicas, instaladas logo acima da banqueta inferior ou na metade da altura do talude, para o caso de ausência de banquetas (ver Fig. 6c);

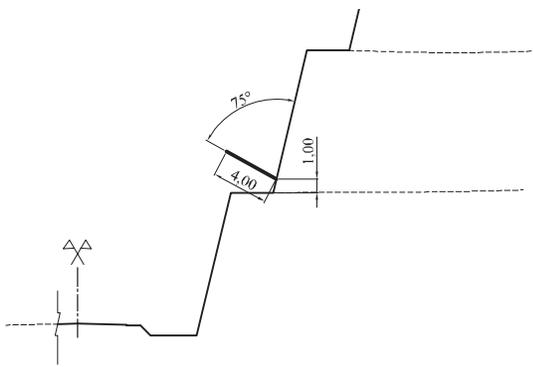
- Recobrimento da superfície dos taludes com redes metálicas ou com concreto projetado, deixando desprotegida a primeira banqueta ou a metade inferior do talude para o caso de ausência de banquetas (ver Fig. 6d).



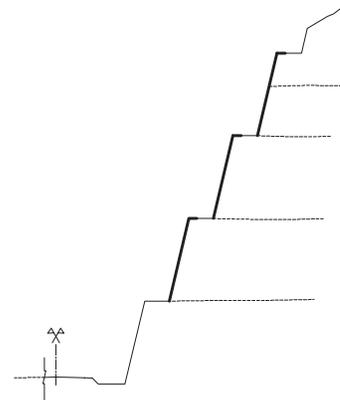
(a) Barreira no fim do acostamento



(b) Camada de areia fofa



(c) Barreira em redes metálicas instaladas na superfície do talude



(d) Proteção superficial

Fig. 6 – Elementos de proteção ensaiados.

3.4 – Propriedades dos materiais e condições de simulação

Para a execução das simulações no programa *RocFall*, as propriedades adotadas para os materiais encontram-se sumarizadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades dos materiais usados nas simulações.

MATERIAL	R_N		R_T		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	5	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

(*) Valores obtidos através do procedimento com o martelo Schmidt.

(**) Fonte: Labiouse e Heidenreich (2009).

Os valores restantes foram adotados da base de dados do programa *RocFall*. Cabe aclarar que o programa desconsidera o formato dos blocos, considerando-os como sendo esféricos com um diâmetro muito pequeno.

Foram definidas faixas de origem de quedas correspondentes à totalidade do talude, considerando velocidades iniciais nulas para todas as componentes (horizontal, vertical e angular), e uma massa do bloco de 10 kg.

Para as simulações feitas em barreiras de concreto foram usados tanto blocos de 10 kg quanto de 500 kg visando determinar a frequência de ruptura dos elementos.

Devido às fortes irregularidades superficiais nos taludes decorrentes do processo de desmonte com explosivos e do intenso fraturamento nos maciços, foram ensaiadas três rugosidades visando encontrar a mais apropriada para este caso. Por esta razão, dentro das propriedades do material do talude deixou-se este valor em zero. As condições ensaiadas foram:

- Sem irregularidades: os taludes foram definidos por alinhamentos topográficos definidos entre as bordas das banquetas, definido assim os diferentes taludes entre as banquetas;
- Existência de irregularidades: foram considerados dois níveis de irregularidade, medida pela largura em relação à linha de irregularidade zero. A primeira com um valor de 10 cm, e a segunda com 40 cm.

Foi feita uma análise de sensibilidade com cada uma das rugosidades, abrangendo uma faixa de valores de R_N entre 0,237 e 0,47.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada ponto ensaiado com o martelo Schmidt foi feita a determinação do valor de $H_{R(L)}$ médio, tal como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Processamento para ponto ensaiado em 57+800 (leituras feitas com o martelo em posição ascendente de 8° em relação ao plano horizontal).

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	10
						Média	42,7	43

x_2 – Máximo alongamento da mola do martelo Schmidt, após o rebote;

$V_{2(\theta)}$ – Velocidade inicial do pistão após o rebote, medida para o ângulo de leitura do martelo;

V_2 – Velocidade inicial do pistão após o rebote, medida na direção horizontal;

$H_{R(N)\theta}$ – Número de dureza de rebote, medido com o martelo Schmidt tipo “N” na direção normal à superfície da rocha.

Com estes valores foi determinado o valor de R_N usando a equação (5). Para cada camada de derrame foi obtida a média aritmética quando disponível, ou adotado o valor único tal como apresentado na Fig. 7. O valor para a camada asfáltica foi adotado do banco de dados do programa *RocFall* e não obtido a partir do procedimento descrito.

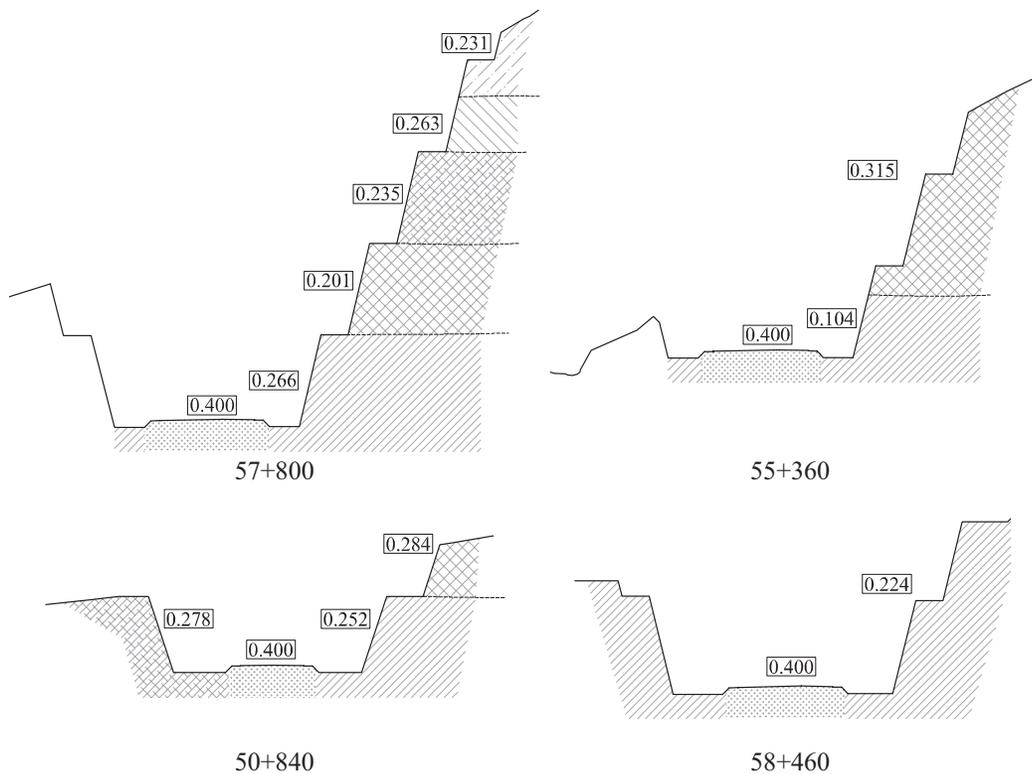


Fig. 7 – Valores médios do coeficiente de restituição normal empregados nas simulações.

Comparando os resultados das simulações para cada rugosidade com a faixa de valores de R_N , observou-se que a condição que melhor conseguiu representar a maneira como acontece o mecanismo em campo foi a de 40 cm. As outras rugosidades geraram principalmente rolamento de partículas, entanto que em campo as quedas começavam com poucos rolamentos, mas principalmente por repiques, como apresentado na Fig. 8.

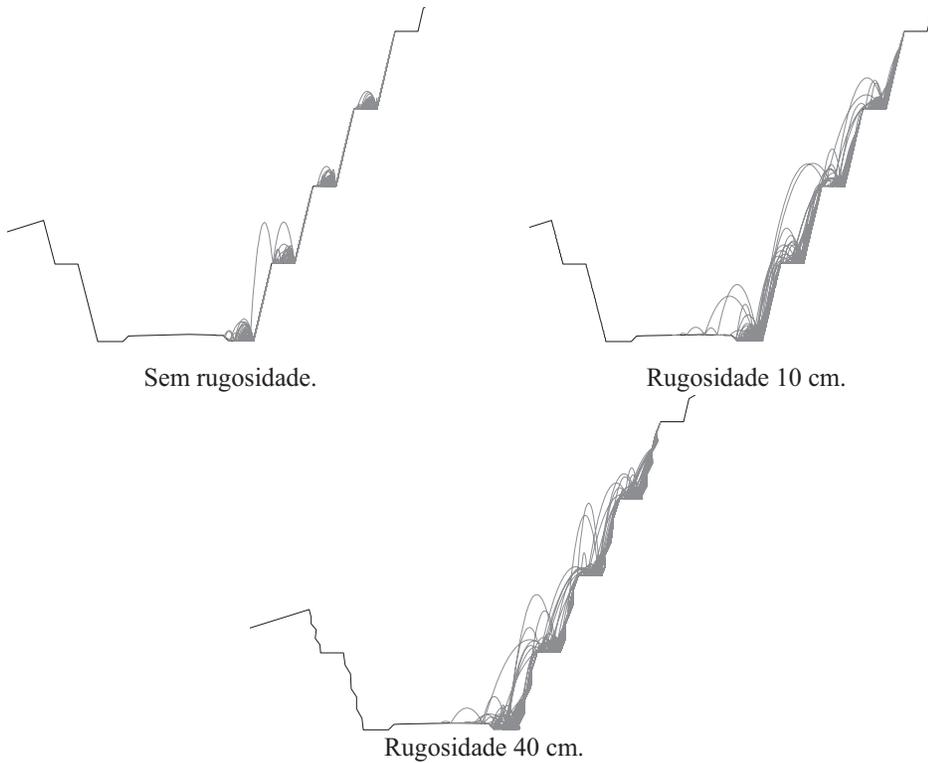


Fig. 8 – Condições de rugosidade geométrica ensaiadas.

Na Fig. 9 são apresentados os resultados obtidos unicamente com as condições geométricas adotadas. A frequência de invasão se refere à quantidade (percentual) de blocos que entram na pista de rolamento (incluindo os acostamentos). A descrição completa das condições geométricas foi elencada no item 3.2, e é válida para as Figuras 9 a 17.

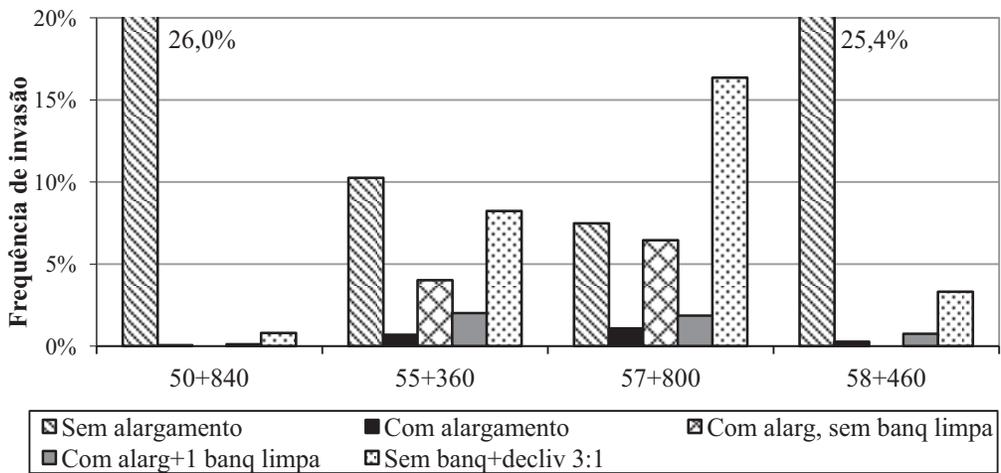


Fig. 9 – Presença de blocos dentro da pista de rolamento para as quatro seções estudadas.

Em todos os cinco 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 de 93% (como exceção de 57+800, onde a redução foi de 85%). As seções 50+840 e 58+460 foram as de maior sensibilidade à construção da área de retenção de blocos, já que mesmo ao se alterar as condições do talude, não aconteceram incrementos importantes nas frequências de invasão.

O efeito do preenchimento das duas banquetas inferiores (57+800) elevou a frequência de invasão até níveis próximos do que os ocorridos sem alargamento da seção transversal. Em termos de frequência, mesmo com alargamento, o preenchimento elevou os valores em quase 6 vezes, constituindo-se em uma das piores situações possíveis de acontecer durante a operação da rodovia. A limpeza da banquetta inferior (55+360 e 57+800) trouxe a diminuição da frequência de invasões dentro da pista em mais de 50% quando comparadas com a anterior situação.

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 Fig. 10 são apresentados os resultados obtidos com a implantação de uma barreira tipo *New Jersey*.

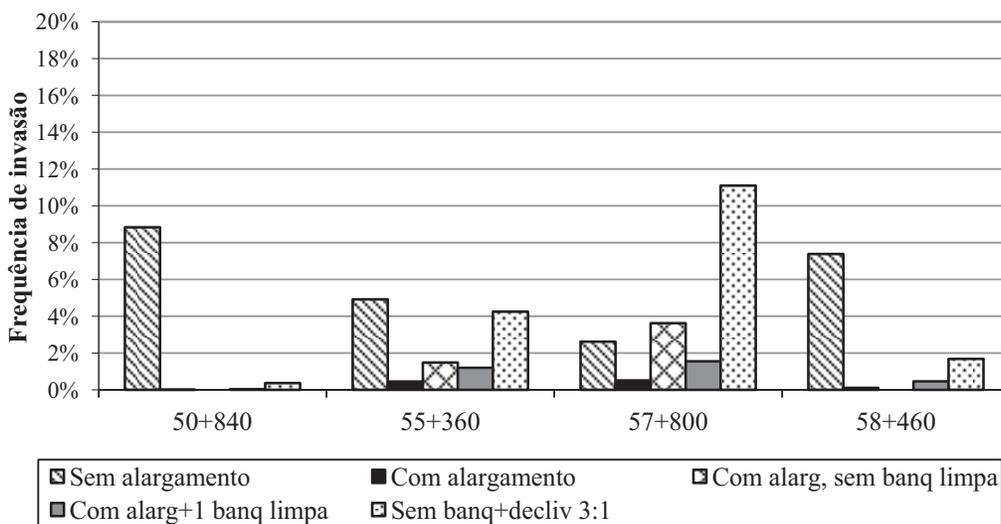


Fig. 10 – Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais (com barreira h=0,81 m).

Em geral, a instalação das barreiras conseguiria reter quantidades importantes de material quando comparadas com a condição sem barreira. Para os casos sem alargamento, o fato da 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 apresentaram as maiores frequências quando comparadas com as outras duas.

As duas seções com taludes de maior altura (55+360 e 57+800) tiveram uma perda de efetividade de retenção de blocos fora da pista decorrente do preenchimento das banquetas entre 3 e 7 vezes, constituindo-se como a condição de maior perigo durante a operação do projeto. No entanto, o efeito da barreira trouxe uma diminuição superior a 44% quando comparada com o caso sem barreira.

Quando feita a limpeza da banquetta inferior, e com a incorporação da barreira, origina-se uma diminuição da frequência de pelo menos 19% quando comparada à situação com as duas banquetas cheias de material, e de pelo menos 17% quando comparada com a condição sem barreira.

Em nenhuma das simulações com blocos de 10 kg foi encontrado dano de barreiras. O uso de blocos de 500 kg responde aos maiores tamanhos encontrados em campo durante a execução do projeto. Nas Figuras 11 a 14 são apresentados os resultados obtidos, tanto do lado direito quanto do esquerdo (para as seções 50+840 e 58+460), em função da frequência em que são atingidas por blocos de 500 kg, e a frequência em que estes ultrapassam a energia máxima resistente de 25578 J.

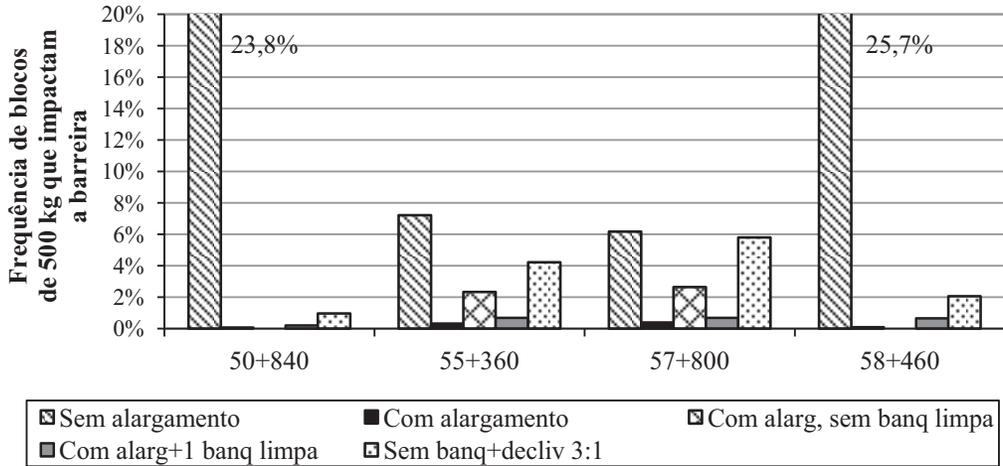


Fig. 11 – Frequência de blocos que impactam as barreiras do lado direito.

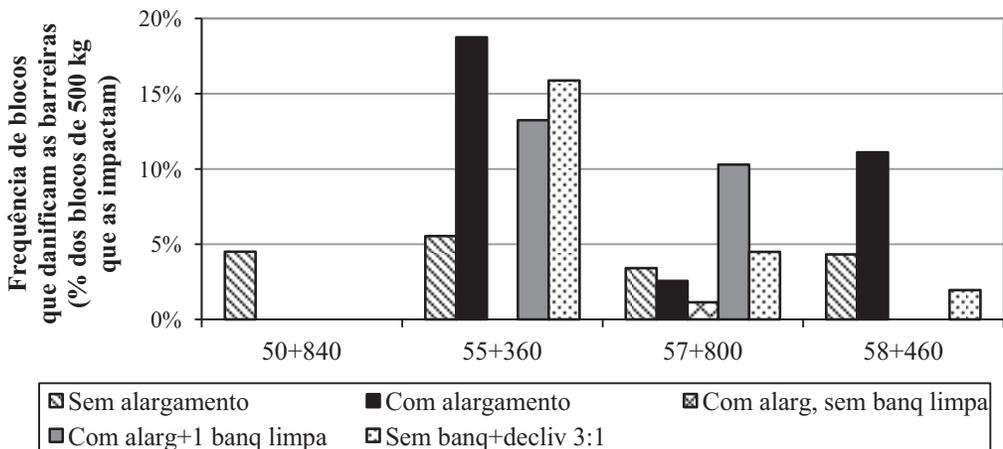


Fig. 12 – Frequência de blocos que danificam as barreiras do lado direito.

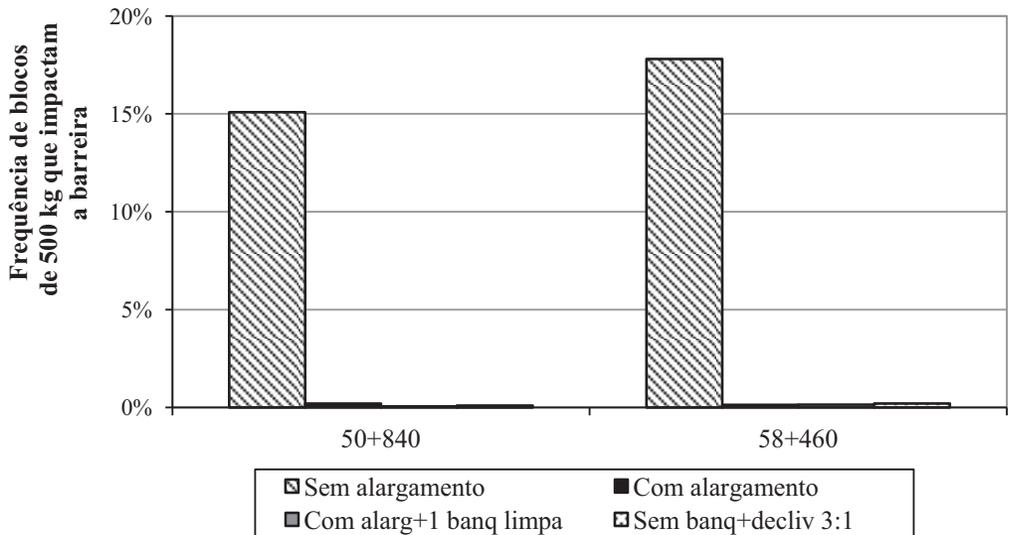


Fig. 13 – Frequência de blocos que impactam as barreiras do lado esquerdo.

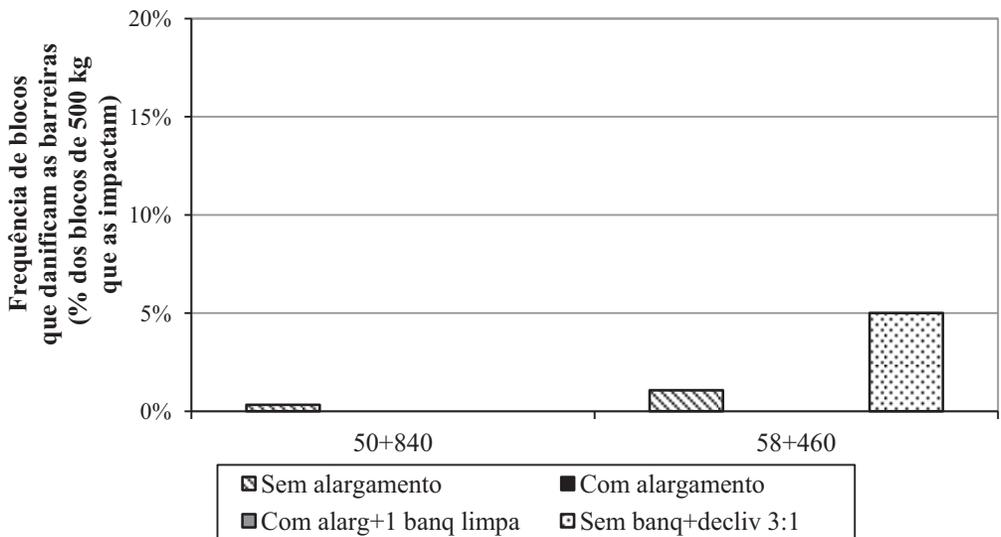


Fig. 14 – Frequência de blocos que danificam as barreiras do lado esquerdo.

Em todos os casos, o alargamento da seção somado à existência de barreiras faz com que mesmo esta última forneça proteção à pista de rolamento, seu papel possa ser dispensável se a operação de limpeza for feita com regularidade (55+360 e 57+800). Unicamente quando não é possível a modificação da seção transversal (condição sem alargamento), a barreira será solicitada para impactos com bastante frequência.

Para o lado direito, embora o nível de solicitação das barreiras seja alto nos taludes de baixa altura (50+840 e 58+460, com >20% das quedas), a frequência de impactos com destruição do elemento de proteção tende a ser baixo na maioria das situações. Ocorre uma inversão desta

situação para os taludes de maior altura (55+360 e 57+800), para os quais se tem baixos níveis de sollicitação das barreiras, mas com altas frequências de dano dos elementos.

Para o lado esquerdo, é mantida a tendência de alto nível de sollicitações das barreiras, mas com baixa frequência de dano dos elementos.

Na Fig. 15 são apresentados os resultados obtidos com substituição parcial da área de retenção de blocos por uma camada de areia fofa. Em geral, o nível de resposta é muito melhor do que para os anteriores casos, principalmente para a seção 50+840 onde a frequência de invasões foi eliminada completamente. Para os outros três locais, a frequência ainda conseguiu se manter abaixo de 2%.

A condição com os efeitos mais negativos para os três casos restantes foi o abatimento dos taludes e eliminação das banquetas. No entanto, quando comparada esta condição com sua correspondente só com alargamento (ver Fig. 9), houve diminuições de pelo menos 72% nas frequências. Sob essa mesma lógica de comparação, para o caso da banquetta inferior cheia de material, houve diminuições com mínimo de 59%.

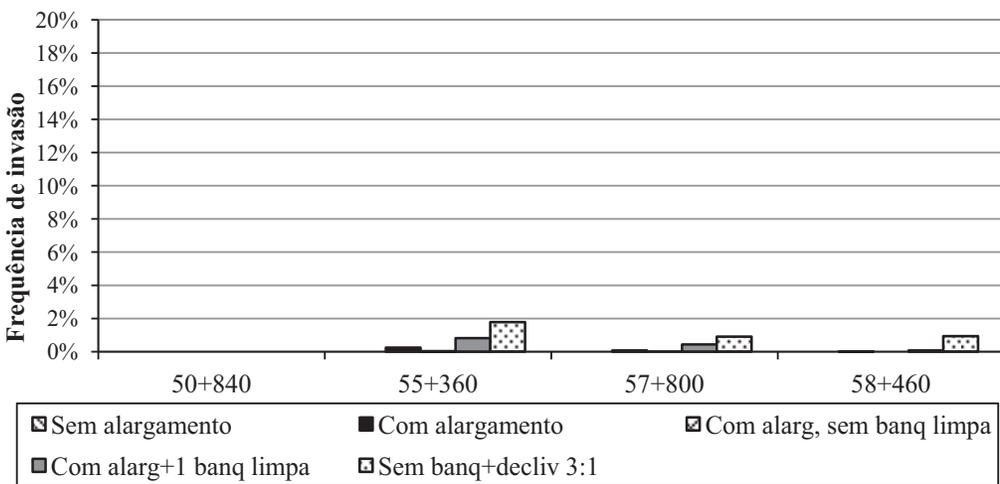


Fig. 15 – Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais (com camada de areia fofa e = 0,40 m).

Para o caso da construção de uma linha de barreiras em redes metálicas, os resultados são apresentados na Fig. 16.

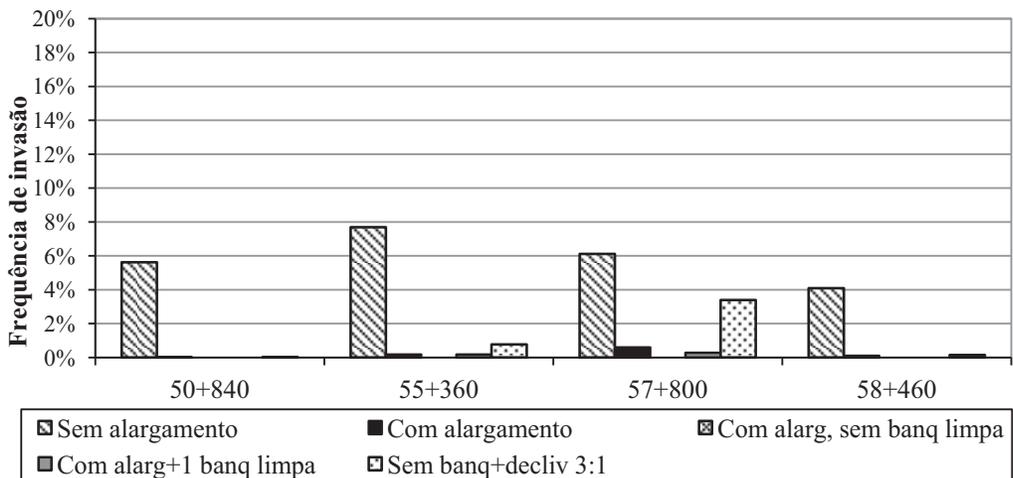


Fig. 16 – Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais (com barreira em rede metálica L = 4,0 m).

Em todas as quatro seções, a condição sem alargamento teve o pior desempenho quando comparado com as outras condições. Nesta condição, além dos blocos oriundos da parcela do talude abaixo da barreira, muitos dos blocos procedentes da parte superior conseguem descrever trajetórias sem ser retidos pela rede.

Embora o anterior, ao se comparar estes resultados com os obtidos para os correspondentes sem elementos de proteção (ver Fig. 6), aparecem diminuições importantes nas frequências. Para a condição sem alargamento, as diminuições vão de 18% até 83%; para o caso área de retenção de blocos, as diminuições estão acima de 45%; para o caso de só uma banqueteta cheia de material, as diminuições ficaram acima de 85%.

Os resultados para a implantação de alguma proteção superficial, com exceção da porção inferior do talude, são apresentados na Fig. 17. Aclara-se que esta condição não admite nenhuma camada cheia de material, já que em teoria não existiria queda de rochas das partes protegidas do talude.

A tendência geral dos resultados é muito similar com a obtida para a condição anterior (ver Fig. 16). Para o caso das seções sem alargamento, o efeito das rochas (da parte inferior do talude) levou as frequências até valores entre 4% e 7%.

Contudo, esta condição não conseguiu fornecer o melhor desempenho para as maneiras como foi considerada ao ser comparada com a camada de areia fofa.

Para a seção 57+800, quando eliminadas as banquetetas, a existência da metade da altura do talude sem proteção fez com que alguns blocos atingissem energias muito elevadas, resultando em uma alternativa insuficiente para este caso em particular.

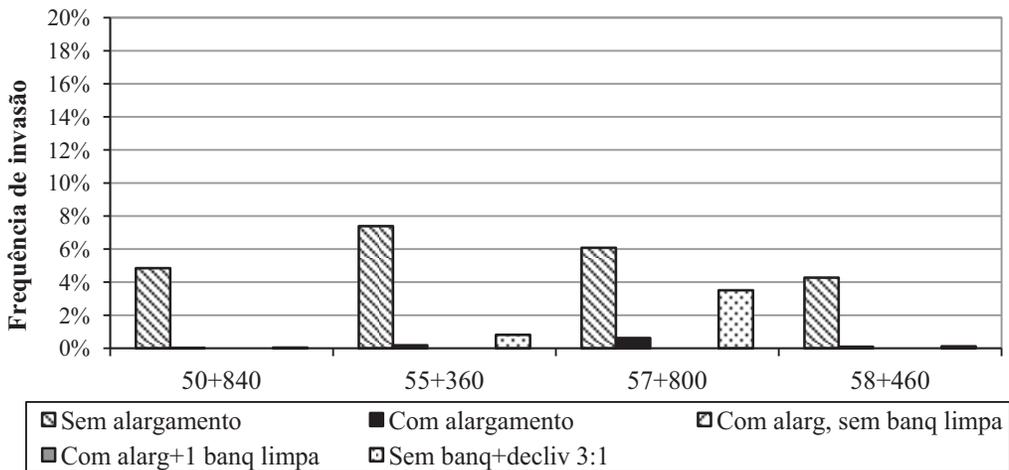


Fig. 17 – Frequências de invasão para as diferentes geometrias transversais (com proteção superficial ao longo da face do talude).

5 – CONCLUSÕES

O conjunto de parâmetros empregados, tanto o obtido pelo procedimento de campo quanto os adotados da literatura, mostraram um comportamento consistente com as condições encontradas em campo. O valor de R_N mostrou-se baixo quando comparado com os valores encontrados na literatura, situação compensada pela incorporação da geometria e rugosidade do talude.

Das quatro seções analisadas, conseguiu-se obter duas tendências de comportamento associadas com as alturas dos cortes e com a geometria resultante para cada um deles. A primeira tendência observada correspondeu à das seções 50+840 e 58+460, com geometrias comparativamente mais baixas (alturas de corte em torno dos 15 metros); a segunda tendência logicamente foi a apresentada pelas seções 55+360 e 57+800, como alturas de corte maiores (30 e 50 metros, respectivamente). Lembra-se que as análises feitas para as seções de menor altura levaram em conta a ação de queda de blocos tanto na esquerda quanto na direita. Já para as seções de maior altura apenas foi levado em conta o talude direito.

O efeito do preenchimento de banquetas foi o surgimento de superfícies inclinadas que fizeram com que os blocos saíssem projetados diretamente à pista de rolamento ou em pontos muito próximos dela.

De todas as medidas de proteção contempladas no presente estudo, a substituição parcial da área de retenção de blocos por areia fofa foi a que conseguiu manter baixos todos os valores de invasão na pista, mesmo com variações nas condições da seção transversal. A condição chave deste tipo de solução está na possibilidade de garantir um valor de R_N baixo (para o presente caso, $R_N = 0,04$).

Para os taludes de menor altura (50+840 e 58+460), o efeito da área de retenção de blocos foi determinante, levando as frequências até valores muito próximos de zero. Neste tipo de soluções, se a manutenção das banquetas for feita com regularidade, poderia não se precisar a incorporação de elementos de proteção.

Em ambos os taludes de maior altura (55+360 e 57+800), embora o efeito da incorporação da área de retenção de blocos foi de grande ajuda, as seções ainda apresentaram as maiores frequências de invasão ao se comparar com as outras duas. No entanto, deve-se considerar que ainda os valores são mantidos abaixo de 1%, e que levar este valor até zero poderia significar investimentos muito altos.

O emprego de elementos de concreto de baixa altura mostrou ser eficaz para taludes de baixa altura, para os quais foram obtidos importantes níveis de retenção atribuída a estes elementos, como percentagens de dano relativamente baixo (5%). Já para os taludes maiores, além dos baixos níveis de retenção conseguidos por estes elementos, as energias desenvolvidas pelos blocos nas suas trajetórias fizeram com que resultassem valores importantes de barreiras danificadas por ultrapassar a sua energia resistente (entre 15 e 20% do total de blocos que as impactam).

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro para a elaboração do trabalho e a bolsa de pesquisa, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, às empresas envolvidas no projeto e execução do Trecho 2 da rodovia RS471/BR153 pelo fornecimento das informações do projeto, e ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS pelo empréstimo do equipamento usado para a execução das determinações em campo.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 5873-05 (2005). *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer*. Annual Book of American Society for Testing and Materials 2005, 4p.
- Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46, pp.627-634.
- Aydin, A.; Basu, A. (2005). *The Schmidt hammer in rock material characterization*. Engineering Geology, 81, pp.1-14.
- Azzoni, A.; La Barbera, G.; Zaninetti, A. (1995). *Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 32, pp.709-724.
- Basu, A; Aydin, A. (2004). *A method for normalization of Schmidt hammer rebound values*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, pp.1211-1214.
- Buzzi, O.; Giacomini, A.; Spadari, M. (2011). *Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, pp.35-43.
- Chau, K.T.; Wong, R.H.C.; Liu, J.; Wu, J.J. (1999). *Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts*. Ninth International Congress on Rock Mechanics, ISRM Congress, Paris, pp.541-544.
- Chau, K.T.; Wong, R.H.C.; Wu, J.J. (2002). *Coefficient of restitution and rotational motions of rockfalls impacts*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39, pp.69-77.
- Cruden, D.M.; Varnes, D.J. (1996). *Landslide types and processes*. pp. 36-75. Em: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (Eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Washington, D.C. Transportation Research Board, National Research Council, 673 p.
- Deere, D.U.; Miller, R.P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Technical Report AFWL-TR-65-116. Albuquerque, N. M. Air Force Weapons Laboratory, 300 p.

- Farrand, S.W. (2007). *Rockfall Modelling Parameters and the Control Barrier at Stockton Mine, New Zealand*. Christchurch, New Zealand. Master Thesis. Department of Geological Sciences. University of Canterbury, 207 p.
- Federal Highway Administration – FHWA (2005). *Analysis and design of wire mesh/cable net slope protection*. Final Research Report WA-RS 612.1. Washington, 186 p.
- Flórez-Gálvez, J.H. (2012). *Condicionantes geotécnicos e análise de quedas de blocos rochosos da rodovia RS471/BR152, lote 2*. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gerber, W. (2001). *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, 39 p. Disponível em: <www.environment-switzerland.ch/publications>, Acesso em: 01 abr. 2012.
- Giani, G.P. (1992). *Rock Slope stability analysis*. The Netherlands. Balkema Publishers, 345 p.
- Giani, G.P.; Giacomini, A.; Migliazza, M.; Segalini, A. (2004). *Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design*. Rock Mechanics, 37, pp.369-389.
- Gomes, Guilherme J.C. (2009). *Avaliação do perigo relacionado à queda de blocos em rodovias*. Ouro Preto. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, 136 p.
- Guidicini, G; Nieble, C.M. (1984). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo. Editora Blucher. 194 p.
- International Society for Rock Mechanics – ISRM (1978). *Suggested methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 15, pp. 89-97.
- Heidenreich, B. (2004). *Small and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes*. Thèse N° 3059 (Doctorat ès Sciences Techniques) – Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 231 p.
- Labieuse, V.; Heidenreich, B. (2009). *Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, pp.1981-1993.
- Lorentz, J. (2006). *Étude de la capacité de dissipation sous impact d'une structure sandwich de protection contre les chutes de blocs rocheux*. Ph.D. Thèse. Université Grenoble 1 – Joseph Fourier, Grenoble, France, 218 p.
- Norrish, N.I.; Wyllie, D.C. (1996). *Rock slope stability analysis*, pp. 391-425. Em: Turner, A.K; Schuster, R.L. (Eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Washington, D. C. Transportation Research Board, National Research Council, 673 p.
- Peng. B. (2000). *Rockfall Trajectory Analysis: Parameter Determination and Application*. Christchurch, New Zealand. Master Thesis. Department of Geological Sciences. University of Canterbury. 199 p.
- Pfeiffer T.J.; Bowen, T.D. (1989). *Computer Simulation of Rockfalls*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 26, pp.136-146.

- Pierson, L.A.; Gullixson, C.F. Chassie, R.G. (2001). *Rockfall catchment area. Design guide*. Final report SPR-3(032). Washington. Federal Highway Administration, 78 p.
- Rayudu, D.N.P. (1997). *Computer simulation of Rockfalls – Application to rockfalls at Fox Glacier, West Coast, New Zealand. Christchurch, New Zealand*. Master Thesis. Department of Natural Resources Engineering. Lincoln University, 172 p.
- Ritchie, A.M. (1963). *Evaluation of Rockfall and its Control*. Highway Research Record, 17, pp.13-28.
- Spadari, M.; Giacomini, A.; Buzzi, O.; Fityus, S.; Giani, G.P. (2011). *In situ rockfall testing in New South Wales, Australia*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 49, pp. 84-93.
- Spang, R.M.; Sönsner, T. (1995). *Optimized Rockfall Protection by ROCKFALL*. Proceedings of 8th International Congress of Rock Mechanics, Tokyo.
- Spang, R.M.; Rautenstrauch, R.W. (1988). Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications. pp. 1237-1243. Em: Bonnard, C. (Ed.). Landslides: International Symposium on Landslides, 5. Rotterdam. Proceedings.
- Schellenberg, K. (2008). *On the design of rockfall protection galleries*. D.Sc. Thesis. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, Suiça, 177 p.
- Stevens, W.D. (1998). *Rockfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*. Toronto. 28 p. Thesis (Master of Applied Science) – Graduate Department of Civil Engineering. University of Toronto.
- Wang, I-T.; Lee, C-Y. (2010). *Influence of Slope Shape and Surface Roughness on the Moving Paths of a Single Rockfall*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 65, pp. 1021-1027.
- Wu, S-S. (1985). *Rockfall Evaluation by Computer Simulation*. Transportation Research Record, 1031, pp.1-5.