



Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas: Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas

Experimental Determination of Normal Restitution
Coefficient of Rocks:

Application To Blocks' Path Length On Slopes

Gilmar Pauli Dias & Emílio Velloso Barroso

*Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia de Rochas (LEMETRO) -
Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Av. Brigadeiro
Trompowsky, s/n.º - Cidade Universitária - Ilha do Fundão - RJ - 21949-900*

gilmarpauli@gmail.com; ebarroso@acd.ufrj.br

Recebido em: 22/11/2006 Aprovado em 22/12/2006

Resumo

Dentre os parâmetros envolvidos nas análises de movimentos de queda de blocos, o coeficiente de restituição, que é a energia cinética dissipada em sucessivos impactos, é um dos mais importantes e difíceis a se obter, pois necessita da execução de lançamentos “in situ” que só podem ser realizados em locais onde não haja risco à população e estruturas urbanas. A motivação desse trabalho é propor a aplicação de um método bastante conhecido na física, para a determinação do coeficiente de restituição normal de rochas, que consiste no registro sonoro dos sucessivos impactos de uma esfera de rocha solta contra uma superfície plana rochosa. Após a determinação do coeficiente de restituição normal pelo método proposto, fizeram-se cálculos de aceleração da gravidade que indicam que o método possui uma precisão adequada para sua aplicação. Neste trabalho também é apresentada uma análise de sensibilidade do parâmetro coeficiente de restituição por meio de simulações de casos de queda de blocos. **Palavras-chave:** Queda de blocos; coeficiente de restituição; método acústico

Abstract

Among the several parameters involved in rock fall analysis, the restitution coefficient, which is related to the kinetic energy wasted after repeated impacts of a rocky body against the ground, is probably the most important and

most difficult to acquire. There is the necessity of in situ tests where blocks of rocks are thrown down on the slopes. However these tests cannot be performed in places where people or urban equipments could be in risk. In this paper an acoustic method is used for the measurement of the normal restitution coefficient of rocks. This method is very well known by physicists but it has not been applied in the geosciences and engineering areas. It consists in the sound recording of successive impacts of a rock sphere against a smooth rocky surface. The gravity acceleration was back calculated from data obtained in order to verify if precision of the method is suitable. A sensibility analysis of the coefficient of restitution was already carried out simulating real rock fall problems.

Keywords: Rock fall; restitution coefficient; acoustic method

1 Conhecimento do Problema

Movimentos de massa correspondem aos mecanismos de transporte de sedimentos, solos e rochas, que são induzidos pela força gravitacional e pela ação conjunta ou isolada de fatores como a presença de águas superficiais e subterrâneas ou ações antrópicas como desmatamentos, cortes e aterros, entre outras.

Um esquema de classificação dos processos de movimentos de massa bastante conhecido é aquele proposto por Varnes (1958, *in* Rahn, 1986) que considera movimentos de quedas, escorregamentos e fluxos em rochas, solos e materiais inconsolidados correlacionando-os com as velocidades de movimentos (Figura 1).

Dentre os tipos de movimentos de massa, os de queda de blocos talvez sejam os menos estudados e os mais difíceis de se prever, tanto o início do movimento como o alcance dos blocos. Além disso, não ocorrem somente em períodos de chuva. Devido a flutuações diárias consideráveis de temperatura em períodos de clima seco é possível criar tensões com magnitude suficiente para provocar a propagação de fraturas já existentes na rocha, levando-a a um colapso (Vargas *et alii*, 2004). Portanto, em análises e estudos de risco, relativos a esse tipo de movimento de massa, é necessário que se faça a previsão do alcance dos blocos para que se possam delimitar eventuais zonas de risco, avaliando a área e os objetos atingidos, de forma a quantificar os danos. Também é de grande importância estimar prováveis trajetórias do corpo rochoso para a alocação e dimensionamento de barreiras de proteção (Figura 2).

**Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas:
Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas**
Gilmar Pauli Dias & Emílio Velloso Barroso

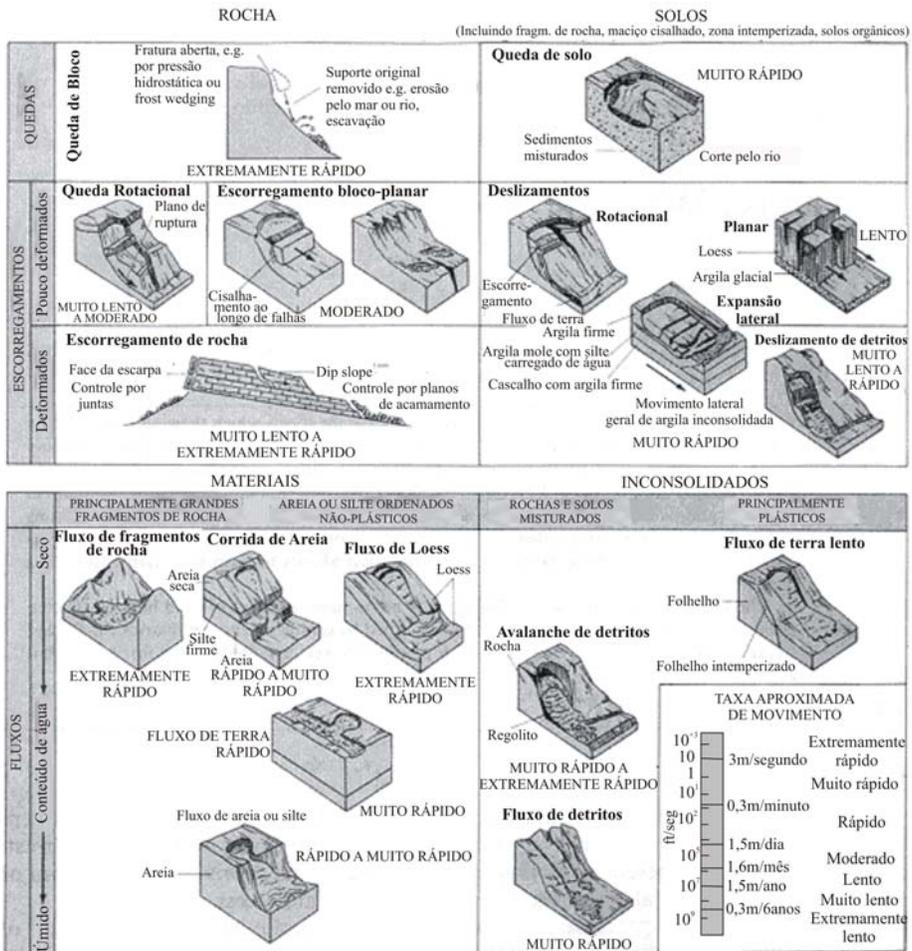


Figura 1 Classificação de movimentos de massa (Varnes, 1958, in Rahn, 1986).



Figura 2 Exemplo de barreira de contenção com tela metálica (Peila et alii, 1998).

A principal causa da compartimentação de maciços rochosos está relacionada com a presença de descontinuidades físicas (fraturas e falhas), as quais podem dar origem a blocos e lascas. Estes, quando localizados em penhascos verticais, taludes ou encostas íngremes, poderão apresentar uma instável condição de equilíbrio e moverem-se por ação da gravidade através de movimentos de queda livre e/ou de rolamento. Assim, uma eventual queda de bloco, quando não retida pela presença de barreiras naturais (vegetação) ou construídas (muros de impacto), pode atingir áreas habitadas ou equipamentos relacionados à infra-estrutura urbana, provocando desastres com perdas econômicas e sociais.

As quedas de blocos podem iniciar-se por movimentos do tipo queda livre onde, se o terreno apresentar uma declividade crítica, o bloco continuará a desenvolver seu movimento através de rolamentos. Pode também iniciar-se por movimentos do tipo rolamento, ocorrendo quando blocos destacados do maciço se instabilizam devido à perda de apoio, podendo combinar-se com movimentos de saltação.

Em problemas de instabilidade onde estão envolvidos a queda ou o rolamento de blocos o poder destrutivo pode ser muito elevado, caso haja choque do bloco com construções e equipamentos urbanos. Isto ocorre porque a força impulsiva do choque (\vec{F}) é igual à variação do momento linear ($d\vec{p}$) da partícula durante o infinitesimal intervalo de tempo do choque (dt), como é mostrado na equação 1:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (1)$$

Como

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad (2)$$

sendo m igual a massa do bloco e \vec{v} a velocidade do movimento, o impulso é grande mesmo que o bloco de rocha tenha massa não muito elevada, pois em geral a velocidade é altíssima. Além disso é muito difícil prever o momento exato do início do movimento, pois não depende apenas de aspectos como a precipitação pluvial (Vargas *et alii*, 2004), mas, muitas vezes, depende de efeitos de longo prazo, como por exemplo, a propagação de fraturas por redução da tenacidade (Santos, 2004).

A análise da trajetória e alcance de um bloco rochoso é dependente de vários fatores, como por exemplo a litologia do bloco e de sua superfície de colisão, a geomorfologia da área, a presença ou não de barreiras na sua trajetória e os aspectos mecânicos do bloco e do terreno em relação aos choques e atritos. A litologia dos blocos e da superfície de percurso ditam a resistência do material durante o movimento, pois essas relações de resistência vão determinar uma maior ou menor capacidade de fragmentação durante o trajeto. A geomorfologia pode indicar possíveis percursos por meio de canais eventualmente existentes e influi diretamente na dispersão lateral das trajetórias onde essas restrições topográficas não estão presentes. A dispersão, por sua vez, é dependente do comprimento da encosta (Azzoni & De Freitas, 1995). A presença de florestas, em locais de possíveis percursos, pode corresponder a eficientes barreiras naturais que reduzem significativamente a energia cinética dos blocos a partir do contato com a vegetação (Hagiwara *et alii*, 2006) e impedem a passagem do material, evitando assim um maior alcance.

2 Parâmetros Envolvidos na Análise

Para a análise das trajetórias e alcances de blocos rochosos em movimentos do tipo queda, os aspectos mais importantes são os que levam em consideração as características mecânicas do bloco e da superfície de trajetória. Esses aspectos podem ser determinados por valores apropriados que satisfaçam sua natureza mecânica como o ângulo de atrito e o coeficiente de restituição, este também chamado de coeficiente de repique (Carnevale, 1991).

Dentre os parâmetros envolvidos, talvez o coeficiente de restituição (e), que é a energia cinética dissipada em sucessivos impactos, seja o mais importante e difícil de se obter (Stevens, 1998), pois é necessário que se façam lançamentos experimentais de blocos “in situ” gerando possíveis riscos materiais e humanos.

Como mencionado anteriormente, o coeficiente de restituição corresponde à energia cinética dissipada em sucessivos impactos e pode ser obtido pela razão entre as velocidades depois (v_{n+1}) e antes (v_n) do impacto.

$$e = \frac{v_{n+1}}{v_n} \quad (3)$$

As colisões podem ser classificadas pela capacidade de conservação de energia cinética no choque. Quando uma esfera é solta a uma determinada altura, colidindo com uma superfície plana e alcança uma altura igual a inicial, tem-se uma Colisão Perfeitamente Elástica, com o valor do coeficiente de restituição equivalente a uma unidade ($e=1$). Nesse caso a energia cinética

envolvida na colisão foi conservada. Caso a esfera, ao colidir com a superfície, mantenha-se em repouso, tem-se uma Colisão Perfeitamente Inelástica e, nesse caso, o coeficiente de restituição é nulo ($e=0$), pois toda a energia cinética foi perdida na colisão.

Normalmente os materiais ao se chocarem perdem parcialmente a sua energia, ou seja, uma esfera ao ser solta a certa altura retorna até uma altura menor que a anterior e assim sucessivamente, até perder completamente a energia (Figura 3). Para este comportamento é dado o nome de Colisão Parcialmente Inelástica, onde o coeficiente de restituição (e) possui valor entre zero e a unidade ($0 < e < 1$).

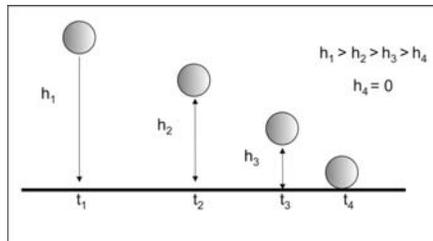


Figura 3 Colisão Parcialmente Inelástica, modificado de Cavalcante *et alii*. (2002).

No trabalho desenvolvido por Cavalcante *et alii*(2002) são apresentadas as relações matemáticas necessárias aos cálculos do coeficiente de restituição. Os valores de velocidade antes e após cada impacto podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$v_n = \frac{g\Delta t_n}{2} \quad (4)$$

$$v_{n+1} = \frac{g\Delta t_{n+1}}{2} \quad (5)$$

onde Δt representa o intervalo de tempo entre os impactos sucessivos e g é a aceleração da gravidade. Substituindo as equações 4 e 5 na equação 3, tem-se o coeficiente de restituição (e) escrito em função da razão da variação de tempo depois (Δt_{n+1}) e antes da colisão (Δt_n):

$$e = \frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n} \quad (6)$$

A velocidade em que uma esfera, solta a uma altura h , atinge a superfície é dada por:

$$v_n = \sqrt{2gh} \quad (7)$$

Substituindo as expresões de velocidade 5 e 7 na equação 3 obtêm-se:

$$e^2 = \frac{g(\Delta t_{n+1})^2}{8h} \quad (8)$$

Substituindo-se o valor de e dado pela equação 6 na equação 8, tem-se:

$$g = \frac{8h(\Delta t_{n+1})^2}{\Delta t_n^4} \quad (9)$$

Assim escreve-se o coeficiente de restituição em função da aceleração da gravidade. O interesse dessa relação, como será visto adiante, é verificar a precisão e confiabilidade da medida experimental do coeficiente de restituição, ao compará-lo com o valor conhecido da aceleração da gravidade.

No caso em que a colisão ocorre com uma superfície com inclinação (i) , devem-se levar em consideração os coeficientes de restituição normal e tangencial, como ilustra a figura 4.

Neste caso temos as seguintes relações para os coeficientes de restituição normal e tangencial à superfície de choque:

$$e_{normal} = \frac{\text{sen}(a+i)}{\text{sen } a \cdot \text{sen } i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad (10)$$

$$e_{tan \text{ gencial}} = \frac{\text{cos}(a+i)}{\text{sen } a \cdot \text{sen } i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad (11)$$

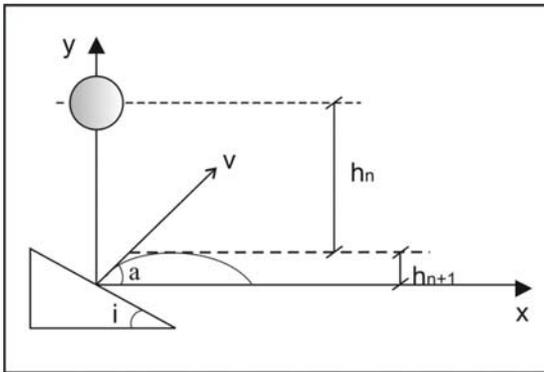


Figura 4 Relações entre colisões de esfera em plano inclinado, com h_n igual a altura antes e h_{n+1} igual à altura depois do impacto, a igual ao ângulo do vetor velocidade, v , com a horizontal (Modificado de Carnevale, 1991).

3 Relevâncias e Objetivos do Estudo

O coeficiente de restituição é um parâmetro bastante relevante em estudos de avaliação de risco, pois influencia diretamente na capacidade do material rochoso atingir regiões habitadas ou estruturas urbanas.

Uma das formas de se obter esse parâmetro é executando lançamentos “in situ” e filmando o movimento, conforme mostra o exemplo da figura 5, obtida do artigo de Giani *et alii* (2004). Essa prática tem a vantagem de se obterem diretamente os coeficientes de restituição normal e tangencial à superfície de choque. No entanto, experimentos deste tipo só podem ser realizados em locais onde não haja risco à população e estruturas urbanas.

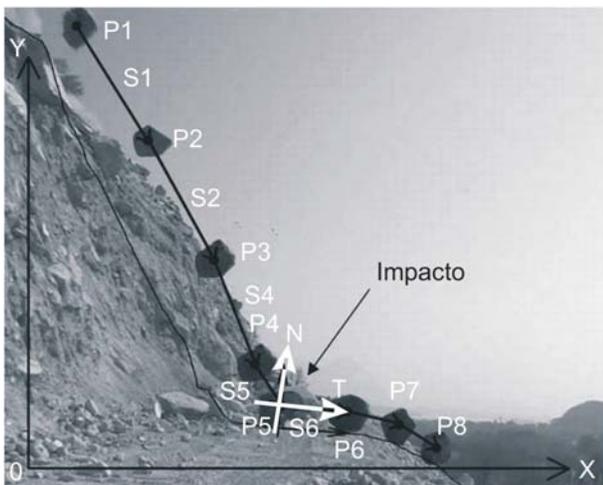


Figura 5 Experimento realizado por Giani *et alii*, (2004). A figura ilustra a posição do bloco (P) em diferentes intervalos de tempo, a distância entre as posições (S) e os vetores normal (N) e tangencial (T) no ponto de impacto.

Em regiões onde não é possível fazer esse tipo de ensaio costumam-se aplicar valores de coeficiente de restituição obtidos da retro-análise de movimentos já ocorridos que, no entanto, podem não guardar semelhança com os materiais geológicos envolvidos e com a geometria da encosta ou talude sob investigação. Portanto, nesses casos, há uma considerável parcela de incerteza associada aos coeficientes de restituição assim determinados.

A motivação desse trabalho é apresentar a aplicação de uma metodologia para a determinação do coeficiente de restituição normal de rochas em laboratório, dispensando a realização de lançamentos “in situ”, e fazer uma análise quanto a acurácia do método através da retro-análise dos dados obtidos para o cálculo experimental da aceleração da gravidade. Também é apresentada uma análise a respeito da sensibilidade deste parâmetro por meio de simulações de caso.

4 Metodologia do Estudo

A abordagem do tema pode ser dividida em duas partes: a primeira, relativa à determinação experimental do coeficiente de restituição normal em laboratório e a segunda relacionada a um estudo de caso, onde procedeu-se à simulação do alcance de blocos usando o coeficiente de restituição determinado experimentalmente.

4.1 Procedimento Experimental

Inicialmente preparou-se uma esfera de rocha, um gnaisse de composição granítica, com diâmetro médio de 30,71 mm (Figura 6).



Figura 6 Esfera utilizada no ensaio.

No experimento, a esfera de rocha é solta a uma certa altura sob a superfície plana, também constituída de rocha, e os sons produzidos pelos sucessivos impactos são captados por um microfone, sendo então registrados pelo computador equipado com uma placa de som e com software para o registro sonoro (Bernstein, 1977). O experimento deve ser realizado em local silencioso, para evitar que ruídos sejam captados pelo microfone causando dificuldades de leitura e possíveis erros de interpretação das medidas.

Existem vários softwares que possibilitam o registro sonoro. Optou-se por testar e utilizar programas *shareware* disponíveis na internet. Para a obtenção dos dados deste trabalho foi utilizado o Spectrogram. Este software registra o som em um gráfico de frequência versus tempo (Figura 7), permitindo a obtenção dos intervalos de tempo de cada som emitido pelos sucessivos quiques da esfera de rocha (Figura 8), sobre a superfície rochosa.

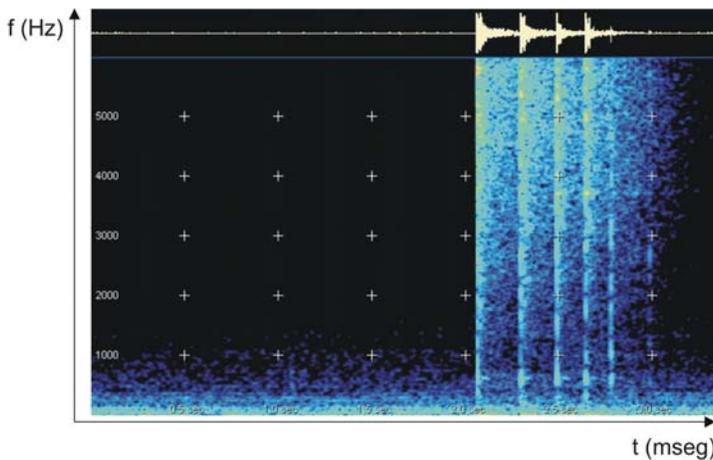


Figura 7 Gráfico frequência X tempo obtido no Spectrogram.

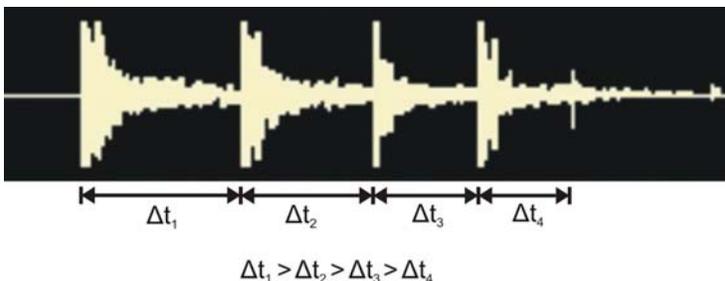


Figura 8 Gráfico do Spectrogram mostrando como podem ser obtidas as variações de tempo.

Para garantir que a rocha utilizada como superfície de colisão mantenha-se em repouso durante o ensaio, deve esta conter uma massa muito maior que a da esfera ($m_{\text{superfície}} \gg m_{\text{esfera}}$). Devem-se escolher alturas que produzam pelo menos cinco quiques, repetindo-se várias vezes o ensaio para diferentes alturas de queda, obtendo assim uma quantidade de valores que permitam representatividade estatística.

Após a realização das medidas, o coeficiente de restituição (e) é calculado pelo método proposto por Cavalcante *et alii* (2002), conforme a relação dada pela equação 6, através do coeficiente angular da reta em um gráfico de tempo antes versus depois do impacto (Δt_{n+1} X Δt_n).

A fase final dos experimentos de laboratório teve o objetivo de se determinar a massa específica da rocha, necessária para o cálculo da massa do bloco no estudo de caso. O método empregado foi o da saturação da rocha em água e uso do paquímetro para mensurar as dimensões dos corpos de prova, conforme proposto pela ISRM (1981).

4.2 Estudo de Caso

Os valores de coeficiente de restituição, podem ser aplicados em simulações numéricas que possibilitem o estudo do alcance e da trajetória dos blocos em determinada região. Para a simulação de caso realizado neste trabalho foi utilizado o software RocFall – RocScience. Este software permite elaborar uma seção topográfica, subdividindo-a em trechos com características geotécnicas distintas, conforme definidas pelo usuário.

Com relação ao bloco rochoso são inseridas características como sua localização no repouso; sua massa e as velocidades, linear (horizontal e vertical) e angular, iniciais do movimento.

Após a elaboração da seção, e a atribuição das características físicas do bloco e dos materiais na superfície do talude, o software realiza cálculos que determinam o tipo de movimento realizado em cada trecho (rolamento, arrastamento, repique, queda, etc) e os seus prováveis alcances. Essa análise é feita por meio de conceitos balísticos que utilizam as relações de força gravitacional, impulso inicial após cada colisão, velocidade e inclinação de seu vetor em relação à horizontal e as suas componentes paralela e ortogonal ao declive no ponto de impacto, verificando assim se o choque ocorre ou não em condições de permitir a continuação do movimento do bloco (Carnevale, 1991). Deve-se mencionar que o software considera o problema a duas dimensões, sendo necessário que se escolham algumas trajetórias possíveis para cada bloco na encosta.

5 Resultados Experimentais do Coeficiente de Restituição

Foram realizados três ensaios para cada altura inicial de queda; estas correspondentes a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm. Os resultados do registro sonoro estão ilustrados na figura 9.

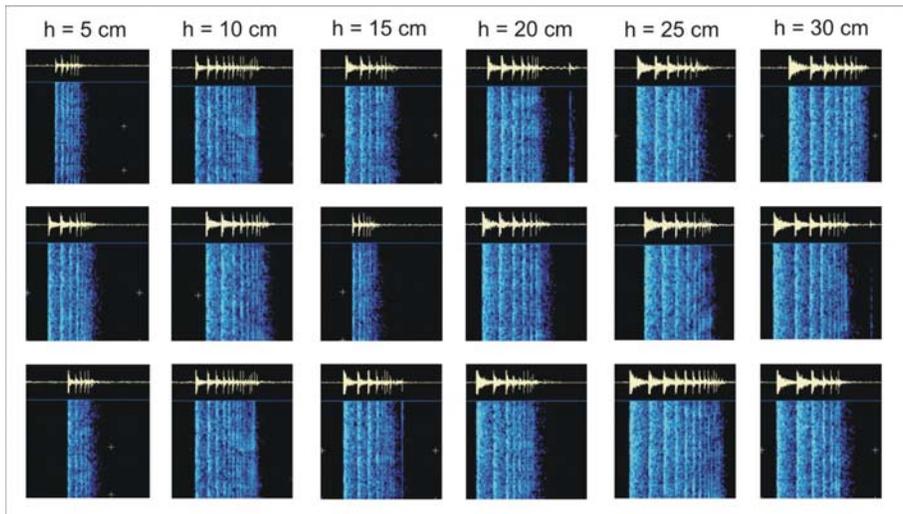


Figura 9 Registros sonoros captados para diferentes alturas de queda da esfera de rocha.

As medidas foram plotadas em um gráfico $\Delta t_{n+1} \times \Delta t_n$, baseado na equação 6, conforme proposto por Cavalcante *et alii*(2002). O coeficiente angular da reta, obtida por regressão linear, corresponde ao valor do coeficiente de restituição (e), sendo igual a $0,702 \pm 0,009$ (Figura 10). O coeficiente de determinação (R^2) obtido para a distribuição dos dados experimentais foi de 0,93.

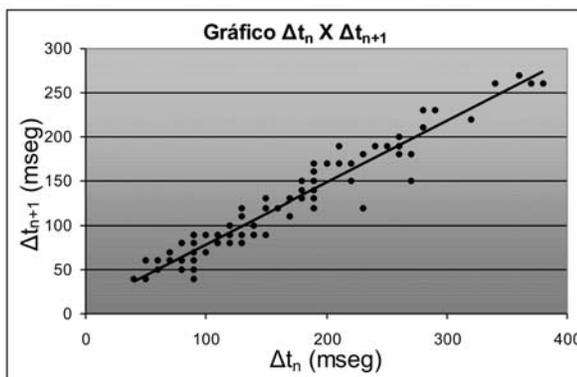


Figura 10 Gráfico utilizado para cálculo do coeficiente de restituição.

Conforme proposto por Cavalcante *et alii*(2002) e de acordo com a equação 9, foi calculada a aceleração da gravidade, baseada em um gráfico $\Delta t_n^4 \times 8h(\Delta t_{n+1})^2$, que corresponde ao coeficiente angular da reta. O valor da gravidade obtido foi de $9,4 \pm 0,5 \text{ m/s}^2$ (Figura 11), indicando que o método proposto possui uma precisão adequada, pois o valor médio da gravidade para a cidade do Rio de Janeiro equivale a $9,788 \text{ m/s}^2$ (Aguiar & Laudares, 2005). O coeficiente de determinação (R^2) obtido para a distribuição dos dados experimentais foi de 0,89.

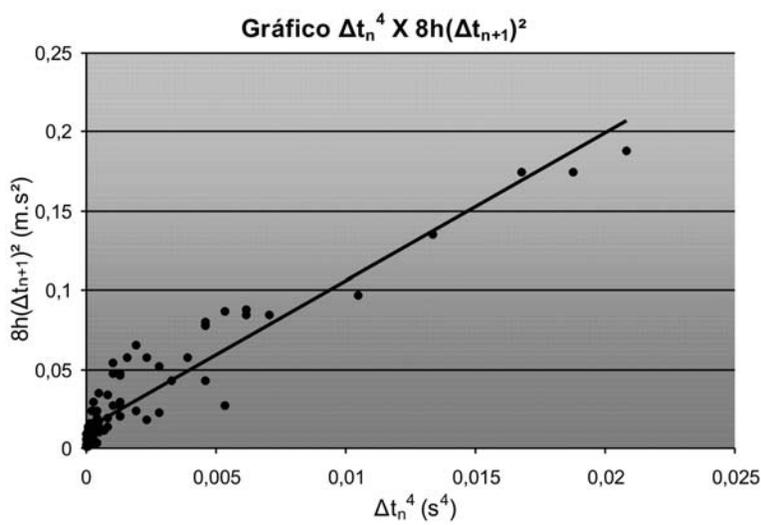


Figura 11 A aceleração da gravidade corresponde ao coeficiente angular da reta.

6 Estudo de Caso: Simulação do Alcance de Blocos

Para ilustrar a sensibilidade do parâmetro coeficiente de restituição, procedeu-se a um estudo de caso na BR-101, cujo mapa geotécnico local é apresentado na Figura 12.

A região fica localizada próxima a uma pedreira, com a geologia correspondente a migmatitos e solos coluviais areno-argilosos assentes em solo residual. A seção AB do mapa foi a utilizada para a análise do alcance, utilizando o software RocFall – RocScience. Esta seção corta duas vias secundárias próximas a BR-101.

Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas:
Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas
Gilmar Pauli Dias & Emilio Velloso Barroso

MAPA GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO
DOS ARREDORES DA BR-101 / RJ

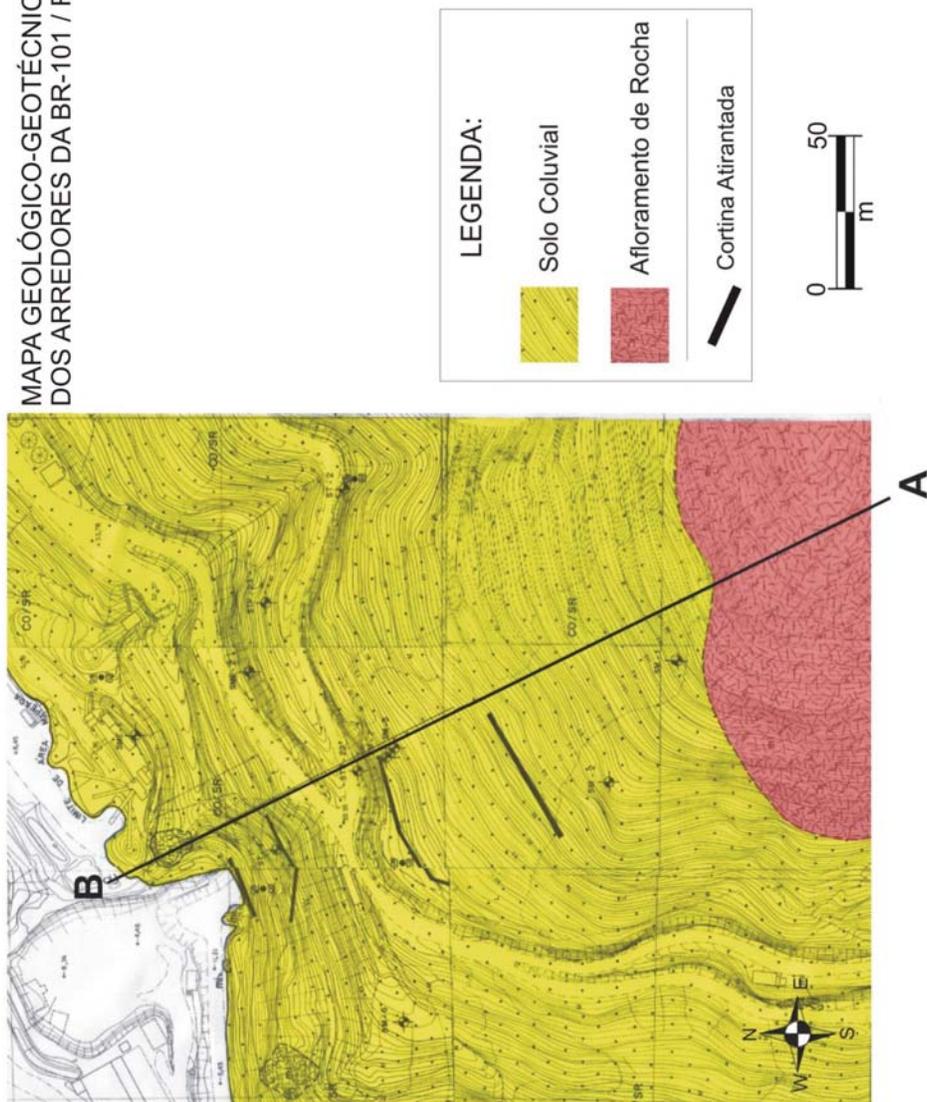


Figura 12 Mapa Geológico-Geotécnico e a direção da seção (AB) escolhida para a simulação de queda de blocos.

Tendo em vista o valor da massa específica da rocha ($2694,4 \text{ Kg/m}^3$), determinada em laboratório, foi atribuído para a simulação um bloco com 11,29 toneladas, considerando-o como esférico e com 2 metros de diâmetro. Foram consideradas velocidades iniciais, horizontal e vertical, de 7 m/s e velocidade angular de 10 rad/s. Estes parâmetros podem ser considerados razoáveis, tendo em vista que na classificação de movimentos de massa, proposta por Varnes, (1958, *in* Rahn, 1986), as quedas de blocos são um tipo de movimento extremamente rápido. Em relação à superfície foi utilizado um ângulo de atrito correspondente a 30° para todas as interações bloco-superfície. No caso da seção geológica geotécnica apresentada, o bloco interage com rocha, solo residual, solo coluvial e asfalto.

Foram realizadas duas simulações, nas quais foram obtidas as trajetórias e os alcances dos blocos. Em cada caso foi construído um gráfico de energia cinética total ao longo da encosta, realizado pelo próprio RocFall, para avaliar os níveis de energia envolvidos em cada trajetória.

A primeira simulação levou em consideração os valores de coeficiente de restituição normal e tangencial disponíveis na literatura, para todas as interações presentes na seção geológico-geotécnica (ver tabela com parâmetros utilizados para o caso, localizada na Figura 13). Neste caso, o bloco realiza movimentos prevalentemente de rolamento/escorregamento, ao longo da superfície geológica analisada, cessando o movimento antes de atingir as vias e alcançando ao longo da encosta um valor de energia cinética total máxima de 4.581.250 J (Figura 14).

A segunda simulação utilizou o valor de coeficiente de restituição normal obtido pelo experimento proposto para os trechos em que ocorrem colisões rocha - rocha. Para os demais trechos foram adotados os mesmos valores do primeiro caso (ver tabela com os parâmetros utilizados para o caso, localizado na Figura 15). Nesta segunda simulação, o bloco realiza movimentos de rolamentos/escorregamentos com bastante saltação, ultrapassando as vias, caracterizando assim uma situação de risco. Ao longo da encosta o valor de energia cinética total máxima alcança 5.698.529 J (Figura 16).

7 Conclusões

O método de medida proposto para o cálculo do coeficiente de restituição normal de rochas é simples, de rápida execução e requer um equipamento de fácil acesso, que pode ser utilizado com softwares de registro sonoro livremente disponíveis na Internet, sendo assim facilmente implementado.

Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas:
 Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas
 Gilmar Pauli Dias & Emílio Velloso Barroso

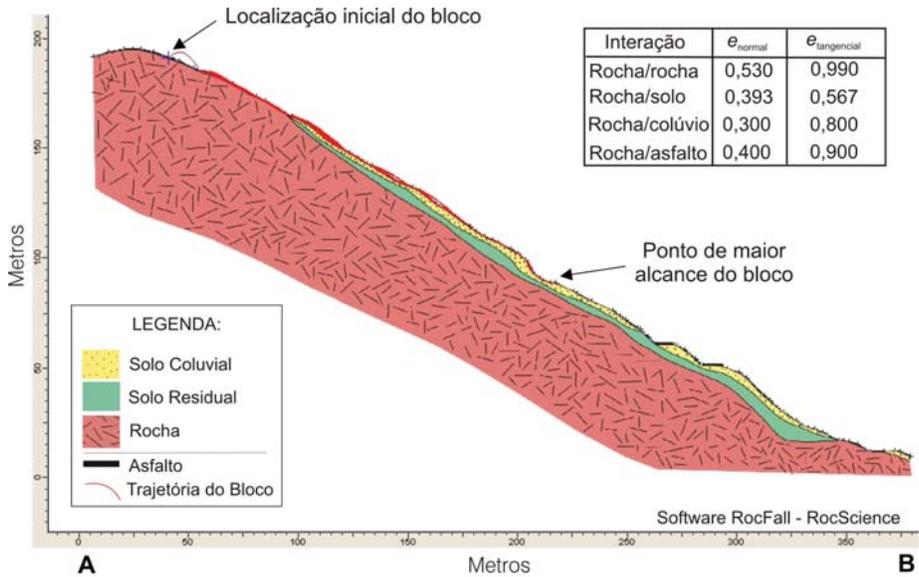


Figura 13 Simulação utilizando dados de coeficiente de restituição da literatura.

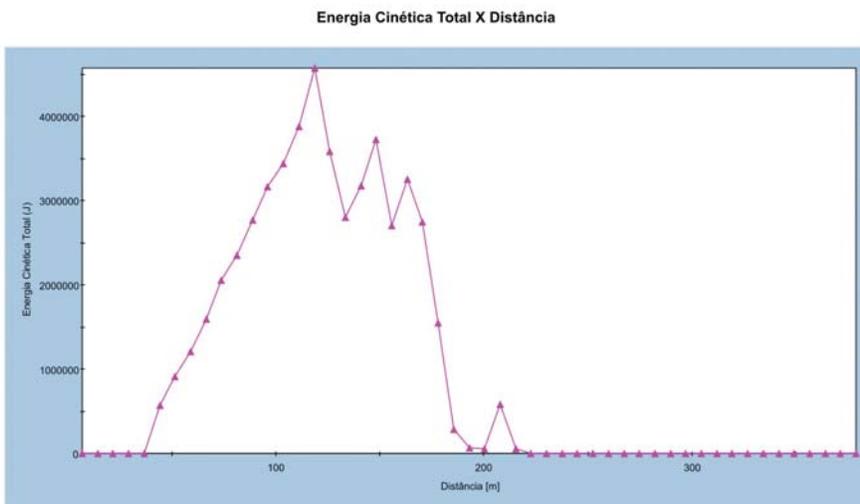


Figura 14 Gráfico de energia cinética total ao longo da encosta utilizando dados de coeficiente de restituição da literatura.

Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas:
 Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas
 Gilmar Pauli Dias & Emilio Velloso Barroso

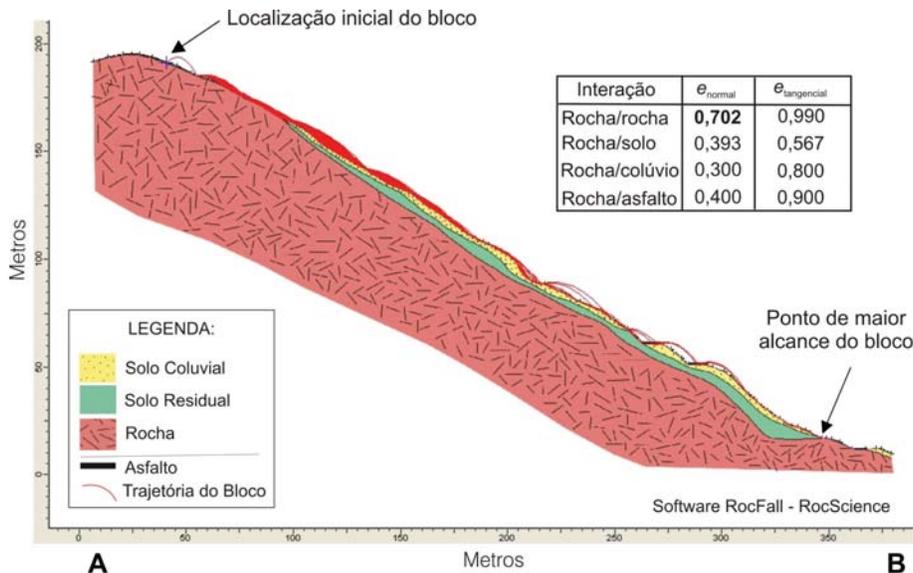


Figura 15 Simulação utilizando dados de e da literatura e para a interação rocha-rocha os valores de e_{normal} obtido pelo experimento proposto.

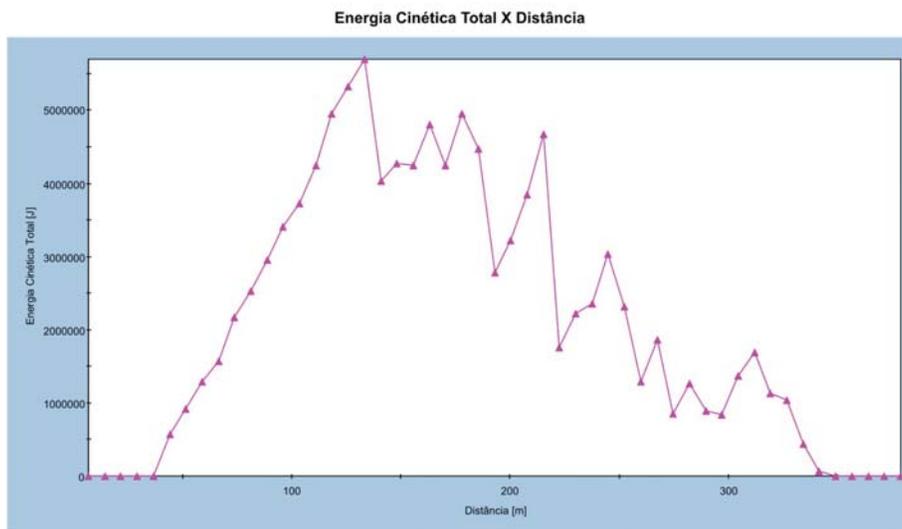


Figura 16 Gráfico de energia cinética total ao longo da encosta utilizando dados de e da literatura e para a interação rocha-rocha os valores de e_{normal} obtido pelo experimento proposto.

O valor obtido para a aceleração da gravidade, por retro-análise dos dados experimentais, faz supor que o método, seguindo as recomendações descritas, é suficientemente acurado para análises geotécnicas, tendo em vista que o valor esperado da aceleração da gravidade encontra-se contemplado no intervalo obtido experimentalmente (medida \pm erro).

Portanto, o método acústico pode ser uma alternativa quando para a estimativa do coeficiente de restituição não é possível empregar experimentos de campo.

Ao analisar a primeira simulação, têm-se movimentos com menor nível de energia e o bloco de rocha cessa seu movimento antes de atingir as vias. Em relação ao 2º caso, o bloco apresentou uma maior energia de movimento, alcançando as vias, o que caracteriza uma clara situação de risco.

Ao comparar as duas simulações realizadas fica claro que a análise de risco (alcance do bloco) apresenta grande sensibilidade do parâmetro coeficiente de restituição. Esse fato leva a uma necessidade do estudo mais detalhado a respeito dos coeficientes de restituição considerando os tipos litológicos envolvidos nos casos reais, pois ainda são escassos na literatura dados que levem em consideração o tipo de rocha e, sobretudo, o seu grau de alteração.

8 Referências

- Aguiar, C.E. & Laudares, F. 2005. Escutando o Coeficiente de Restituição e a Aceleração Gravitacional de uma Bola. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Extraído do site: www.omnis.if.ufrj.br/~carlos/conferencias/som/som.pdf em setembro de 2005.
- Azzoni, A. & De Freitas, M. H. 1995. Experimental gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28(2): 111-124.
- Bernstein, A. D. 1977. Listening to the coefficient of restitution. *American Journal of Physics*, 45(1): 41-43.
- Carnevale, G. 1991. Simulações Teóricas de Casos de Desmoronamento de Taludes Rochosos. *Solos e Rochas*, 14(1): 21-40.
- Cavalcante, M.A.; Silva, E.; Prado, R. & Hagg, R. 2002. O Estudo de Colisões Através do Som. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24(2): 150-157.
- 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 and Rock Engineering*, 37 (5): 369-389.

- Hagiwara, I.; Sasaki, T.; Nishiyama, S. & Ohnishi, Y. 2006. Estimation and Simulation of Vegetation Effect on Rockfall Using Discontinuous Deformation Analysis. Disponível em: http://www.suncoh.co.jp/gijutu/ronbun/200507UP/ARMS-No_258_DDA.pdf. Acesso em abril de 2006.
- ISRM. 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring, suggested methods*. Editor: E. T. Brown. Pergamon Press, London. 211p.
- Peila, D.; Pelizza, S. & Sassudelli, F. 1998. Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31(1): 1-24.
- Rahn, P.H. 1986. *Engineering Geology: An Environmental Approach*. Elsevier, 589 p.
- Santos, A.T.C. 2004. *Redução da Tenacidade por Intemperismo: Mecanismos Pré-Ruptura de Maciços Rochosos*. Curso de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia, Monografia de Graduação, 73p.
- Stevens, W. D. 1998. *Rockfall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls*. Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto/CA, Master Thesis of Applied Science, 193p.
- Vargas Jr, E.A.; Castro, J.T.; Amaral, C. & Figueiredo, R.P. 2004. On Mechanisms for Failures of Some Rock Slopes in Rio de Janeiro, Brasil: Thermal Fatigue? *In: LANDSLIDES: EVALUATION AND STABILIZATION*. Proceedings of 9th International Simposium on Landslides, 2: 1007 – 1012.