



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO ACÚSTICO PARA A DETERMINAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO NORMAL DE ROCHAS EM LABORATÓRIO

GILMAR PAULI DIAS

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO  
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO IV”

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL  
FEVEREIRO DE 2006

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO ACÚSTICO PARA A DETERMINAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO NORMAL DE ROCHAS EM LABORATÓRIO

GILMAR PAULI DIAS

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO  
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO IV”.

SETOR: GEOLOGIA DE ENGENHARIA

ORIENTADOR: EMÍLIO VELLOSO BARROSO

APROVADA POR:

---

Emílio Velloso Barroso, DSc. - UFRJ

---

Helena Polivanov, DSc. - UFRJ

---

José Agnelo Soares, MSc. - UFRJ

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dias, Gilmar Pauli.

Aplicação de um método acústico para a determinação do coeficiente de restituição normal de rochas em laboratório / Gilmar Pauli Dias – Rio de Janeiro, 2006.

x, 30, f: A4

Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, 2006.

Orientador: Emílio Velloso Barroso

1.Movimento de massa	2.Queda de blocos
3.Coefficiente de restituição	4.Energia Cinética

- Monografia. I. Barroso, E.V. (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Geologia.

Aos meus pais, Juarez e Marilene,  
minha irmã, Ana Paula,  
e meu sobrinho, Gabriel

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE GRÁFICOS	ix
LISTA DE EQUAÇÕES	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do Problema	3
1.1.1 Causas da Compartimentação do Maciço Rochoso	4
1.1.2 Características dos Movimentos de Blocos	7
1.2 Parâmetros Envolvidos na Análise	7
1.2.1 O Coeficiente de Restituição (e)	8
1.3 Relevâncias e Objetivos	11
<b>2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>13</b>
2.1 Preparação da Esfera de Rocha	13
2.2 Procedimento Experimental	15
2.2.1 Obtenção dos dados	16
2.3 Aplicação dos Resultados	17
<b>3 RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>19</b>
3.1 Estudo de Caso	21
<b>4 CONCLUSÕES</b>	<b>26</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
ANEXO I – TABELA COM RESULTADOS DO EXPERIMENTO	29

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, o Prof. Emílio Barroso, e ao engenheiro Cláudio Lessa, mestrando do Departamento de Geologia, por terem me sugerido este projeto e por tudo que me ensinaram durante esse tempo de convívio.

A engenheira Janaína e a todos que estão ou passaram pelo laboratório de Mecânica de Rochas: Melissa, Gilmara, Débora, Alba e Thiago.

Aos professores e funcionários do Departamento de Geologia que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

Aos amigos que fiz durante esses longos e especiais anos de curso: Luciana, Júlio César, Maira, Juliana, Simone, Bruno, Maria Luisa, Fabiana e Theodor.

À “grande” turma de 2001 da qual faço parte: Júlio Kosaka, Felipe, Daniel Conceição, Daniel Cupertino, Leonardo, Jorge, Carlos e Gabriel.

Aos amigos da turma 2000 da UFRRJ: Thiago, Érica, Lilian, Marcelo, Willians, Fábio, Diego, Gilliat, Arnaldo e Katiane.

RESUMO DA MONOGRAFIA APRESENTADA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO  
REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO IV”

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO ACÚSTICO PARA A DETERMINAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO NORMAL DE ROCHAS EM LABORATÓRIO

GILMAR PAULI DIAS

RIO DE JANEIRO, FEVEREIRO DE 2006

ORIENTADOR: EMÍLIO VELLOSO BARROSO

SETOR: GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Meios rochosos são descontínuos devido a presença de aspectos físicos como falhas e fraturas. Essas discontinuidades favorecem a compartimentação do maciço, podendo torná-los disponíveis para o movimento. Assim, a eventual queda de blocos pode atingir áreas habitadas ou equipamentos de infraestrutura urbana, provocando desastres com perdas econômicas e sociais. Nas análises e estudos de risco relativos aos processos de quedas e rolamentos de blocos é necessário que se faça a previsão do alcance dos mesmos para que se possa avaliar a área e os objetos atingidos, de forma a quantificar os danos. Dentre os parâmetros envolvidos na análise de problemas dessa natureza, o coeficiente de restituição ( $e$ ), que é a energia cinética dissipada em sucessivos impactos, é o mais difícil de se obter, pois uma das maneiras de obtê-lo é executando lançamentos "*in situ*" que só podem ser realizados em locais onde não haja risco à população e estruturas urbanas, fazendo necessário a utilização de experimentos em laboratório.

A motivação desse trabalho foi apresentar uma metodologia para determinação do  $e$  normal por meio de uma técnica experimental de laboratório, já bastante conhecida na física, baseada no espectro sonoro emitido por impactos sucessivos de uma esfera de rocha em uma superfície plana também constituída por rocha. Após a determinação do  $e_{normal}$  pelo método proposto, fez-se duas simulações utilizando o *software* Rocfall, a primeira com os valores de  $e$  disponíveis na literatura e a segunda utilizando os mesmos valores trocando somente o  $e_{normal}$  para colisão rocha – rocha da literatura pelo obtido no ensaio, onde se obteve o alcance e a trajetória dos blocos em queda para cada caso. Ao se comparar as duas simulações fica claro que a análise de risco apresenta grande sensibilidade do parâmetro estudado, pois na segunda simulação, ao contrário da primeira, o bloco teve um maior alcance, atingindo as estradas do local, caracterizando uma situação de risco.

Palavras-chave: Movimento de massa, queda de blocos, coeficiente de restituição, energia cinética.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Classificação de movimentos de massa (Varnes, 1958).	2
<b>Figura 1.2</b> – Exemplo de barreira de contenção em tela – Itália (Peila et al., 1998).	3
<b>Figura 1.3</b> – Exemplo de barreira em tela impedindo a passagem de bloco – Itália (Peila et al., 1998).	3
<b>Figura 1.4</b> – Afloramento com três direções de descontinuidades favorecendo a compartimentação do maciço.	4
<b>Figura 1.5</b> – Causas da compartimentação do maciço rochoso: (A) Intemperismo diferencial; (B) Juntas Sub-horizontais; (C) Escavação excessiva ou excesso de fogo; (D) Pressão hidrostática em juntas; (E) Congelamento d'água em juntas; (F) Juntas de baixa resistência.	6
<b>Figura 1.6</b> – Relações entre os tipos de colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica.	9
<b>Figura 1.7</b> – Colisão Parcialmente Inelástica, modificado de Cavalcante et al., 2002.	9
<b>Figura 1.8</b> – Relações entre colisões de esfera em plano inclinado, com $h_n$ igual a altura antes e $h_{n+1}$ igual a altura depois do impacto e $V$ igual ao ângulo do vetor velocidade com a horizontal (Modificado de Carnevale, 1991).	11
<b>Figura 1.9</b> – Experimento “in situ” realizado por Giani et al., (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) ao bloco no ponto de impacto. Com esses dados é possível a obtenção do $e_{normal}$ e do $e_{tangencial}$ .	12
<b>Figura 2.1</b> – Metodologia experimental proposta, onde o som produzido pelo impacto entre a esfera e a superfície plana são captados pelo microfone e registrados pelo programa de registro sonoro.	13
<b>Figura 2.2</b> – Serra diamantada refrigerada a água utilizada na confecção da esfera.	14
<b>Figura 2.3</b> – Politriz utilizada no polimento da esfera de rocha.	14
<b>Figura 2.4</b> – Esfera utilizada no ensaio.	14



- Figura 2.5** – Procedimento experimental. Com uma régua é medido a altura inicial da esfera que é solta, e o som produzido pelos seus impactos são captados pelo microfone e registrado pelo computador por meio de programa que possibilite registros sonoros. 15
- Figura 2.6** – Gráfico frequência X tempo obtido pelo Spectrogram. 16
- Figura 2.7** – Gráfico do Spectrogram mostrando como pode ser obtido as variações de tempo. 16
- Figura 2.8** – Janela do *software* RocFall mostrando seção topográfica e características da superfície. 17
- Figura 2.9** – Janela do *software* RocFall mostrando a simulação de várias trajetórias possíveis para o bloco. 18
- Figura 3.1** – Imagens do Spectrogram para todos os ensaios. 19
- Figura 3.2** – Mapa Geológico-Geotécnico das encostas de Itaórna. A simulação de queda de blocos realizada corresponde a seção AB. 21
- Figura 3.3** – Seção geológica AB aplicada no *software* RocFall. 22
- Figura 3.4** – Imagem de simulação de queda de blocos realizada pelo *software* RocFall com dados de coeficiente de restituição da bibliografia. 24
- Figura 3.5** – Imagem de simulação de queda de blocos realizado pelo *software* RocFall com dados de coeficiente de restituição da bibliografia e para a interação rocha - rocha valor de coeficiente de restituição normal obtido pelo experimento proposto. 25

**LISTA DE GRÁFICOS**

<b>Gráfico 3.1</b>	– Gráfico utilizado para cálculo do coeficiente de restituição.	20
<b>Gráfico 3.2</b>	– Gráfico utilizado para cálculo da aceleração da gravidade.	20
<b>Gráfico 3.3</b>	– Gráfico de energia cinética total ao longo da encosta para dados de coeficiente de restituição da bibliografia.	24
<b>Gráfico 3.4</b>	– Gráfico de energia cinética total ao longo da encosta para dados da bibliografia e para a interação rocha - rocha valor de coeficiente de restituição normal obtido pelo experimento proposto.	25

**LISTA DE EQUAÇÕES**

<b>Equação 1</b> – Força da partícula durante choque.	7
<b>Equação 2</b> – Relação entre o coeficiente de restituição e as velocidades antes e depois do impacto.	8
<b>Equação 3</b> – Velocidade antes do impacto.	10
<b>Equação 4</b> – Velocidade depois do impacto.	10
<b>Equação 5</b> – Relação entre o coeficiente de restituição e as variações de tempo antes e depois do impacto.	10
<b>Equação 6</b> – Velocidade antes do impacto em relação à altura e a variação de tempo depois do impacto.	10
<b>Equação 7</b> – Coeficiente de restituição em relação à gravidade, altura de queda e variação de tempo depois do impacto.	10
<b>Equação 8</b> – Aceleração da gravidade.	10
<b>Equação 9</b> – Coeficiente de restituição normal em plano inclinado.	10
<b>Equação 10</b> – Coeficiente de restituição tangencial em plano inclinado.	11

## 1 INTRODUÇÃO

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.

Existem vários modelos de classificação dos processos de movimentos de massa, no entanto nenhum deles pode ser considerado ideal e utilizado como padrão. Um esquema bastante conhecido é o 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 1.1). Segue abaixo uma breve descrição da classificação desses movimentos:

- Queda de blocos (*Rockfalls*) – É determinado pela ação da gravidade em blocos de rocha em situação de equilíbrio instável, caracterizado por atingir velocidades de movimento muito altas, podendo resultar em depósitos de tálus.
- Escorregamentos (*Slides*) – Ocorre ao longo de uma ou várias superfícies planas ou curvilíneas de descontinuidades físicas parcialmente ou totalmente saturadas iniciadas quando a tensão cisalhante na massa se torna superior à sua resistência ao cisalhamento.
- Fluxos (*Flows*) – Caracterizada pela mobilização de rocha fragmentada e/ou solo por movimento semelhante ao de um líquido viscoso, devido a presença de água, com superfícies de ruptura de difícil identificação e um contato abrupto ou com presença de uma zona de comportamento plástico entre a massa mobilizada e a estacionária.

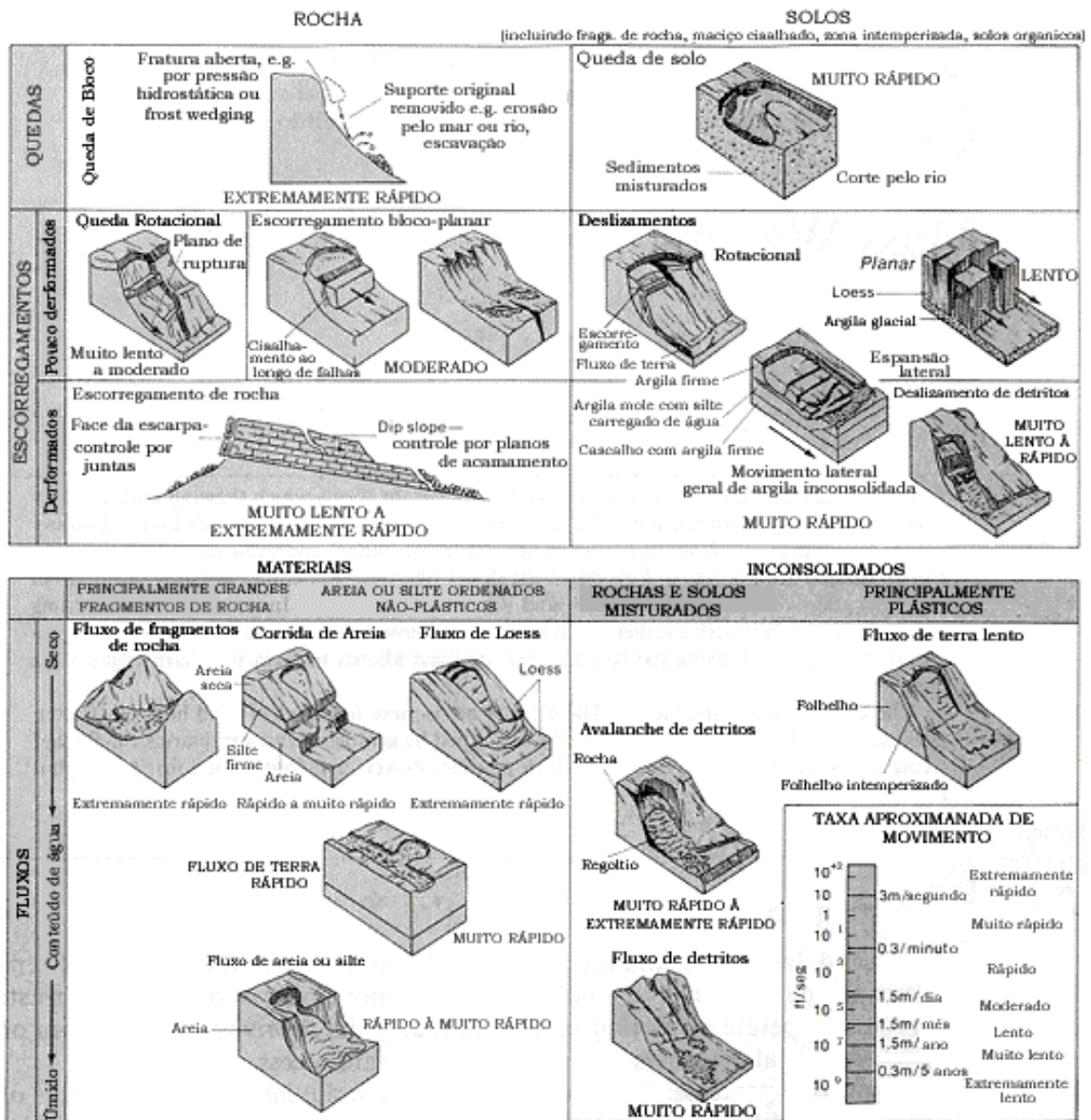


Figura 1.1 – Classificação de movimentos de massa (Varnes, 1958, In: Rahn, 1986).

Dentre os tipos de movimentos de massa, os de queda de blocos talvez sejam os menos estudados e os mais difíceis de 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 al.*, 2004). Portanto, em análises e estudos de risco, relativos a esse tipo de movimento de massa, é necessário que se faça à previsão do alcance dos blocos para que se possa 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 (Figuras 1.2 e 1.3).



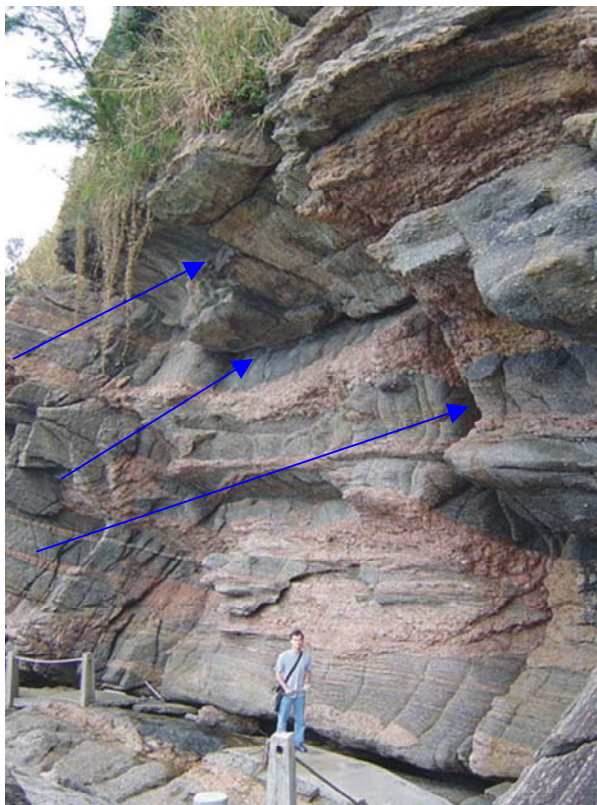
**Figura 1.2** – Exemplo de barreira de contenção com tela metálica – Itália (Peila et al., 1998).



**Figura 1.3** – Barreira em tela impedindo a passagem de bloco – Itália (Peila et al., 1998).

## 1.1 Definição do Problema

O maciço rochoso pode ser compartimentado em lascas e blocos com o auxílio da ação intempérica ao longo de descontinuidades físicas com orientações inadequadas para a estabilidade do meio geológico (Figura 1.4). Este material, quando localizado em penhascos verticais, taludes ou encostas íngremes, terá uma instável condição de equilíbrio podendo mover-se por ação da gravidade através de movimentos de queda e rolamento de blocos.



**Figura 1.4** – Afloramento com três direções de descontinuidades favorecendo a compartimentação do maciço. Clube Costa Brava - RJ. (Santos, 2004).

Assim, uma eventual queda de bloco, quando não retida pela presença de florestas ou barreiras de contenção, pode atingir áreas habitadas ou equipamentos relacionados à infra-estrutura urbana, provocando desastres com perdas econômicas e sociais.

### 1.1.1 Causas da Compartimentação do Maciço Rochoso

A principal causa da compartimentação de maciços rochosos está relacionada com a presença de fraturas, naturais ou induzidas. Além disso, a ação de agentes como a água pode levar à instabilidade se as fraturas estiverem criticamente orientadas no talude. A seguir lista-se alguns exemplos de instabilidade a partir da compartimentação do maciço rochoso:

- Intemperismo diferencial – Ocorre em pacotes rochosos que possuem intercalações de camadas com diferentes susceptibilidades à desagregação (Figura 1.5A). Com o aumento contínuo do empastilhamento do material menos resistente, devido a presença de minerais expansivos expostos a

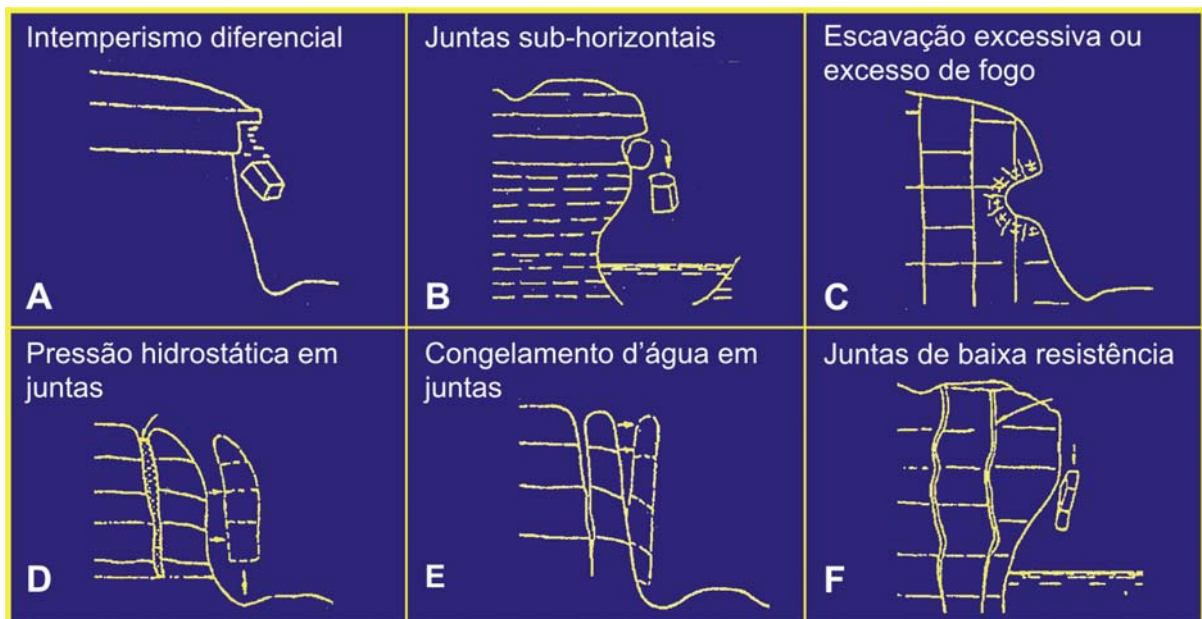
umedecimentos alternados com secagens, ao longo de planos alternados de maior susceptibilidade à desagregação, ocorre a perda de apoio nessas camadas de posição superior, podendo assim haver o colapso de grandes massas rochosas (Fernandes *et al.*, 1974). O intemperismo diferencial ocorre tipicamente em cortes artificiais de áreas de clima tropical e subtropical úmido, devido a elevada umidade associada a altas temperaturas e insolação direta (Infanti Jr. & Fornasari, 1998), com presença de rochas sedimentares como siltitos e folhelhos intercalados com arenitos ou rochas metamórficas de baixo grau como filitos intercalados com quartzito, podendo também ocorrer em rochas particularmente suscetíveis à desagregação, como alguns basaltos, com níveis de derrames ricos em minerais expansivos (Guidicini & Nieble, 1976).

- Juntas sub-horizontais – Favorecem na instabilidade das regiões mais expostas do maciço, onde alguns pedaços de rocha podem tornar-se instáveis, por efeito da gravidade, destacando-se de taludes ou encostas íngremes em movimentos do tipo queda livre (Figura 1.5B).
- Escavação excessiva ou excesso de fogo – Com a ultrapassagem do limite entre o espaçamento do sistema das discontinuidades consideradas seguras para o material, devido a uma escavação excessiva, ou com a utilização excessiva de fogo no maciço, podem ocorrer alterações nos estados de tensões atuantes no meio, gerando trincas de tração no topo (Augusto Filho & Virgili, 1998), tendo como conseqüência um aumento do grau de instabilidade nos maciço (Figura 1.5C).
- Pressão hidrostática em juntas – O aumento da coluna de água, nas discontinuidades de massas rochosas de baixa permeabilidade intrínseca, aumentam a pressão da água no maciço, diminuindo assim sua estabilidade (Figura 1.5D). Essa pressão da água age perpendicularmente aos planos de discontinuidades e, mesmo que estas sejam reduzidas, podem atuar sobre grandes áreas, resultando em forças elevadas (Guidicini & Nieble, 1976).
- Congelamento d'água em juntas – No processo de congelamento da água ocorre um aumento de volume ao transformar-se em gelo, aumentando a pressão ao longo das discontinuidades do maciço, diminuindo a sua



estabilidade. É um caso atípico no Brasil por tratar-se de um país onde a presença de neve é muito restrita, praticamente inexistente (Figura 1.5E).

- Juntas de baixa resistência – Aspectos como a rugosidade, a abertura e o preenchimento, afetam as propriedades de resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade de juntas (Serra Jr. & Ojima, 1998). Uma baixa rugosidade diminui o atrito entre as superfícies das discontinuidades, reduzindo a resistência ao cisalhamento. Juntas fechadas possuem uma boa resistência ao cisalhamento, porém quando aberta a resistência vai depender se estas encontram-se preenchidas ou não e por qual tipo de material de preenchimento. Quando preenchida com material pétreo será mais resistente por ser impermeável e pouco deformável e, quando preenchida com material argiloso será pouco resistente por ser um material poroso e bastante deformável. Juntas abertas não preenchidas possuem baixa resistência e facilmente desagregam o maciço (Figura 1.5F).



**Figura 1.5** – Causas da compartimentação do maciço rochoso: (A) Intemperismo diferencial; (B) Juntas Sub-horizontais; (C) Escavação excessiva ou excesso de fogo; (D) Pressão hidrostática em juntas; (E) Congelamento d'água em juntas; (F) Juntas de baixa resistência.

### 1.1.2 Características dos Movimentos de Blocos

As quedas de blocos podem iniciar-se por movimentos do tipo queda livre onde, se o terreno tiver uma declividade suficiente, o bloco continuará a desenvolver seu movimento através de rolamentos, ou iniciar-se por movimentos tipo rolamento, ocorrendo quando blocos destacados do maciço iniciam seu movimento devido a uma perda de apoio nas encostas, 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 ( $dt$ ) (Nussensveig, 1981), como é mostrado na equação 1:

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

Como  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ , 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 al.*, 2004), mas muitas vezes depende de efeitos de longo prazo, como por exemplo, a propagação de fraturas por redução da tenacidade (Santos, 2004).

## 1.2 Parâmetros Envolvidos na Análise

A análise da trajetória e alcance de um bloco rochoso é influenciada por 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 no possível caminho de

percurso do bloco e os aspectos mecânicos do bloco e do terreno em relação aos choques e atritos.

A litologia do bloco 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 do bloco durante o trajeto.

A geomorfologia da área pode indicar possíveis percursos do bloco por meio dos canais existentes. É difícil fazer uma análise precisa, pois nem sempre os blocos encontram esses canais.

A presença de florestas, em locais de possíveis percursos do bloco, correspondem a eficientes barreiras naturais que impedem a passagem do material, evitando assim um maior alcance.

Para este tipo de análise 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).

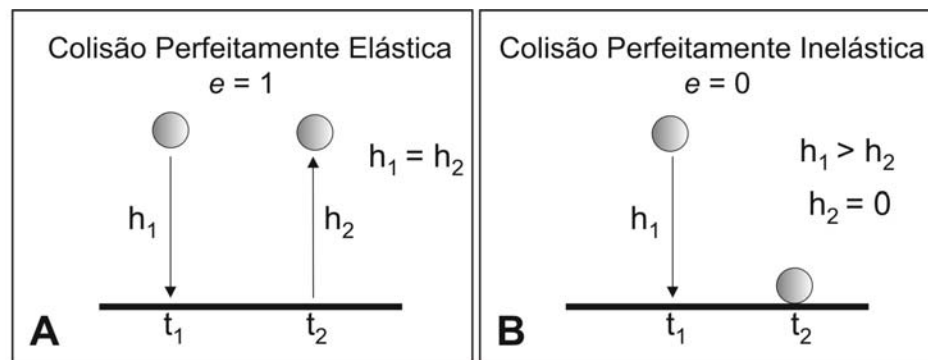
Dentre os parâmetros envolvidos em um estudo de alcance e trajetória de blocos, talvez o coeficiente de restituição ( $e$ ), que é a energia cinética dissipada em sucessivos impactos, seja o mais importante e difícil de se obter (Stevens, 1998), pois é necessário que se faça lançamentos de bloco “*in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

### 1.2.2 O Coeficiente de Restituição ( $e$ )

De acordo com o 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 (Equação 2).

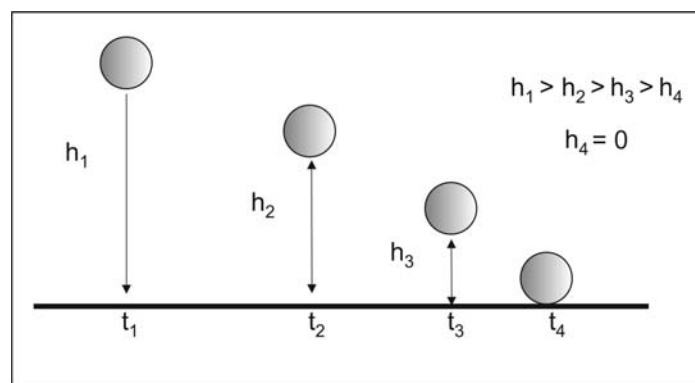
$$e = \frac{v_{n+1}}{v_n} \quad (2)$$

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 volta a uma altura igual a que foi solta, 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 (Figura 1.6A). Caso a esfera, ao colidir com a superfície, mantenha-se em repouso, tem-se uma *Colisão Perfeitamente Inelástica*. Onde, nesse caso, o coeficiente de restituição é nulo ( $e=0$ ), pois toda a energia cinética foi perdida na colisão (Figura 1.6B).



**Figura 1.6** – Relações entre os tipos de colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica.

Normalmente os materiais ao se chocarem perdem parcialmente a sua energia, ou seja, uma esfera ao ser solta a certa altura volta até uma altura menor que a anterior e assim sucessivamente, até perder completamente a energia (Figura 1.7). Para este comportamento é dado o nome de *Colisão Parcialmente Inelástica*, onde o coeficiente de restituição possui valor entre zero e a unidade ( $0 < e < 1$ ).



**Figura 1.7** – Colisão Parcialmente Inelástica, modificado de Cavalcante et al., 2002.

No trabalho desenvolvido por Cavalcante et al. (2002) são apresentadas importantes relações matemáticas envolvidas para o entendimento dos cálculos de coeficiente de restituição:

Os valores de velocidade antes e após o impacto podem ser obtidos pelas equações:

$$v_n = \frac{g\Delta t_n}{2} \quad (3)$$

$$v_{n+1} = \frac{g\Delta t_{n+1}}{2} \quad (4)$$

onde  $\Delta t$  representa o intervalo de tempo entre os impactos e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Substituindo os valores correspondentes da equação 3 e 4 na equação 2 teremos, para o coeficiente de restituição, a razão da variação de tempo depois e antes da colisão:

$$e = \frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n} \quad (5)$$

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

$$v_n = \sqrt{2gh} \quad (6)$$

Substituindo os valores de velocidade das equações 4 e 6 na equação 2 obtêm-se:

$$e^2 = \frac{g(\Delta t_{n+1})^2}{8h} \quad (7)$$

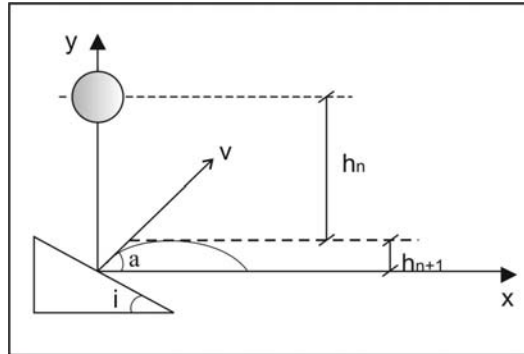
Fazendo uma nova substituição do valor de  $e$  pela relação entre os intervalos de tempo, é possível obter o valor da aceleração da gravidade:

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

Na figura 1.8 é ilustrado o caso de colisões entre uma esfera e uma superfície com inclinação ( $i$ ). Neste caso temos as seguintes relações para os coeficientes de restituição normal e tangencial à superfície de choque:

$$e_{normal} = \frac{\text{sen}(a+i)}{\text{sen } a \cdot \text{sen } i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}} \quad (9)$$

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



**Figura 1.8** – Relações entre colisões de esfera em plano inclinado, com  $h_n$  igual a altura antes e  $h_{n+1}$  igual a altura depois do impacto e  $V$  igual ao ângulo do vetor velocidade com a horizontal (Modificado de Carnevale, 1991).

Das relações acima representadas, a equação 9 é um caso particular da equação 2, correspondente a  $i=0$ .

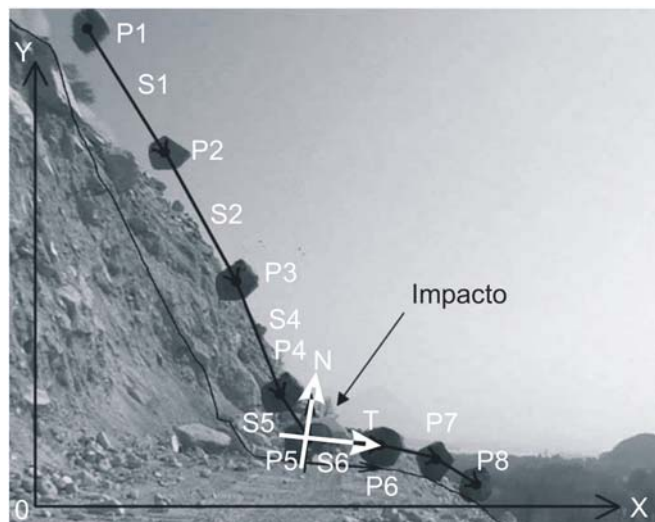
Assim, fica evidente a relação entre o coeficiente de restituição e o alcance do bloco, sendo estes diretamente proporcionais, onde em colisões em que há pequena perda de energia, o bloco terá um maior alcance.

## 1.2 Relevâncias e Objetivos

O coeficiente de restituição é um parâmetro bastante relevante em estudos que visam uma avaliação de risco, pois influencia diretamente na capacidade do material rochoso atingir regiões habitadas ou estruturas urbanas. Em uma avaliação de risco, função probabilidade *versus* dano, o alcance do bloco vai corresponder aos possíveis danos correspondentes.

Uma das formas experimentais de se obter esse parâmetro é executando lançamentos "*in situ*" (Figura 1.9), que a partir de filmagens do movimento é possível determinar os coeficientes de restituição (Giani *et.al*, 2004). Essa prática tem a vantagem de se obter diretamente os coeficientes de restituição normal e tangencial

à superfície de choque. No entanto, experimentos em grande escala só podem ser realizados em locais onde não haja risco à população e estruturas urbanas.



**Figura 1.9** – Experimento “in situ” realizado por Giani et al., (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) ao bloco no ponto de impacto. Com esses dados é possível a obtenção do  $e_{normal}$  e do  $e_{tangencial}$ .

Em regiões onde não é possível fazer esse tipo de ensaio costumam-se aplicar valores de coeficiente de restituição obtidos na literatura, mas estes não fornecem características do material estudado como o tipo rochoso e o grau de alteração da rocha podendo não corresponder ao valor real do parâmetro para o material de estudo.

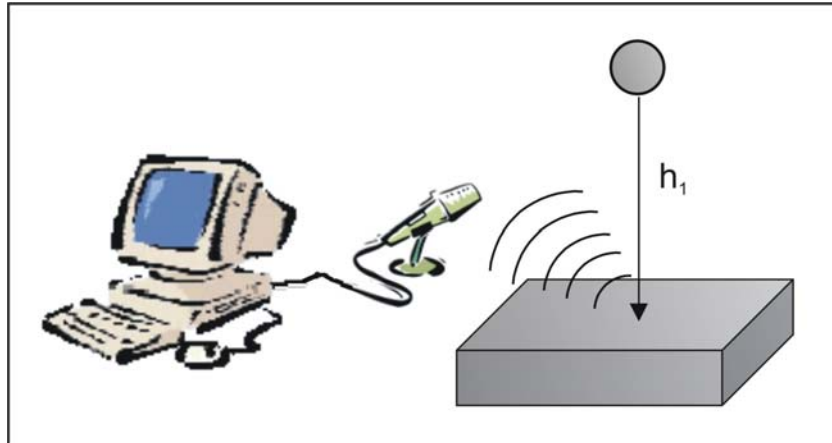
A motivação desse trabalho é apresentar a aplicação de uma metodologia, já bastante empregada na física experimental, para a determinação do coeficiente de restituição de rochas em laboratório, dispensando a realização de lançamentos “in situ”. A vantagem do método está na rapidez de sua realização, seu baixo custo e redução de riscos inerentes aos testes de campo.

Após a determinação do coeficiente de restituição em laboratório fez-se uma simulação de caso usando o *software* RocFall, onde se obteve o alcance e a trajetória dos blocos em queda, o que permite estabelecer barreiras de proteção.

Também foi feita a simulação do alcance e trajetória de blocos a partir dos dados da literatura e disponíveis no próprio RocFall. A intenção foi avaliar a sensibilidade do parâmetro estudado.

## 2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A determinação do coeficiente de restituição em laboratório foi realizada por meio de uma técnica experimental bastante conhecida na física, baseada no espectro sonoro emitido por impactos sucessivos (Berstein, 1977) de uma esfera de rocha solta a uma certa altura ( $h_1$ ) contra uma superfície plana também constituída por rocha (Figura 2.1).



**Figura 2.1** – Metodologia experimental proposta, onde o som produzido pelo impacto entre a esfera e a superfície plana são captados pelo microfone e registrados pelo programa de registro sonoro.

### 2.1 Preparação da Esfera de Rocha

Utilizou-se uma amostra de gnaiss, inicialmente cortada na forma de um cubo e em seguida desgastada em suas arestas por meio de uma serra diamantada refrigerada a água (Figura 2.2). Para conseguir a forma ideal da esfera foi necessário um polimento em politriz com esmeril 220 (Figura 2.3).

A esfera produzida tem diâmetro médio de 30,71 mm com massa de 40,86 g (Figura 2.4).





**Figura 2.2** – Serra diamantada refrigerada a água utilizada na confecção da esfera.



**Figura 2.3** – Politriz utilizada no polimento da esfera de rocha.



**Figura 2.4** – Esfera utilizada no ensaio.

## 2.2 Procedimento Experimental

Para o experimento é necessário um microfone conectado à entrada da placa de som do computador, uma esfera de rocha, uma rocha com superfície plana, régua para medir a altura inicial de queda da esfera e, *software* que possibilite o registro sonoro.

A esfera de rocha é solta a uma certa altura sob a superfície plana, também constituída de rocha, e o som produzido pelos sucessivos impactos são captados por um microfone sendo então registrados pelo computador através do *software* de registro sonoro (Figura 2.5).



**Figura 2.5** – Procedimento experimental. Com um paquímetro é medida a altura inicial de queda da esfera que é solta, e o som produzido pelos seus impactos são captados pelo microfone e registrado pelo computador por meio de programa que possibilite registros sonoros.

Para garantir que a rocha utilizada como superfície de colisão se mantivesse em repouso durante o ensaio, deve esta conter uma massa muito maior que a da esfera ( $m_{\text{superfície}} \gg m_{\text{esfera}}$ ).

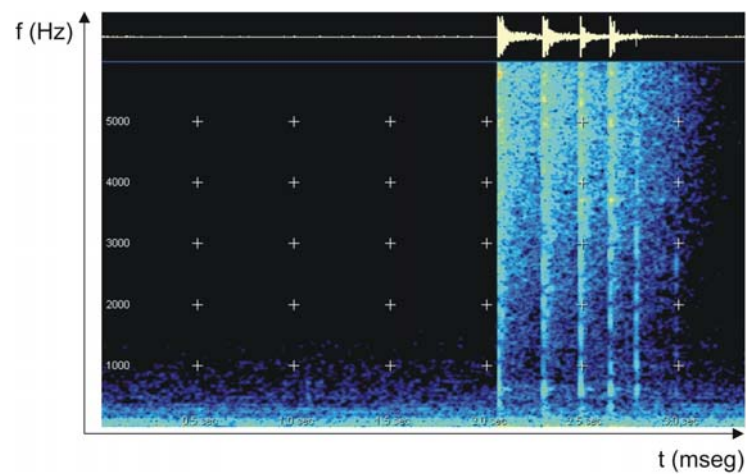
O experimento deve ser realizado em local com um certo grau de silêncio para evitar que ruídos sejam captados pelo microfone causando dificuldades de leitura e possíveis erros de interpretação das medidas.

Deve-se escolher alturas que produzam um número de saltos consideráveis, com pelo menos cinco quiques, repetindo várias vezes o ensaio para cada altura de queda, obtendo assim uma quantidade de valores que permitam uma certa representatividade.

### 2.2.1 Obtenção dos Dados

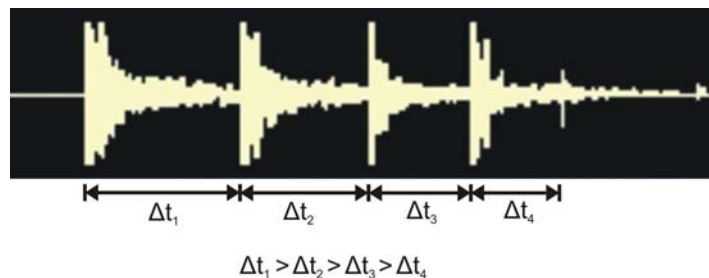
Existem vários *softwares*, que possibilitam o registro sonoro, disponíveis na internet. Para a obtenção dos dados deste trabalho foi utilizado o Spectrogram.

Este programa possibilita o registro do sinal na forma de gráfico frequência *versus* tempo, permitindo a obtenção dos intervalos de tempo de cada som emitido pelos sucessivos quiques da esfera de rocha, sobre a superfície rochosa, sendo possível interpretar os dados dos ensaios aplicando a equação 5, conforme a figura 2.6.



**Figura 2.6** – Gráfico frequência X tempo obtido pelo Spectrogram.

Sabendo que o Spectrogram fornece os dados necessários para o cálculo do coeficiente de restituição por meio da razão entre as variações de tempo depois e antes do impacto, é importante notar que essa variação de tempo diminui progressivamente obtendo assim valores sempre inferiores a unidade (Figura 2.7).



**Figura 2.7** – Gráfico do Spectrogram mostrando como podem ser obtidas as variações de tempo.

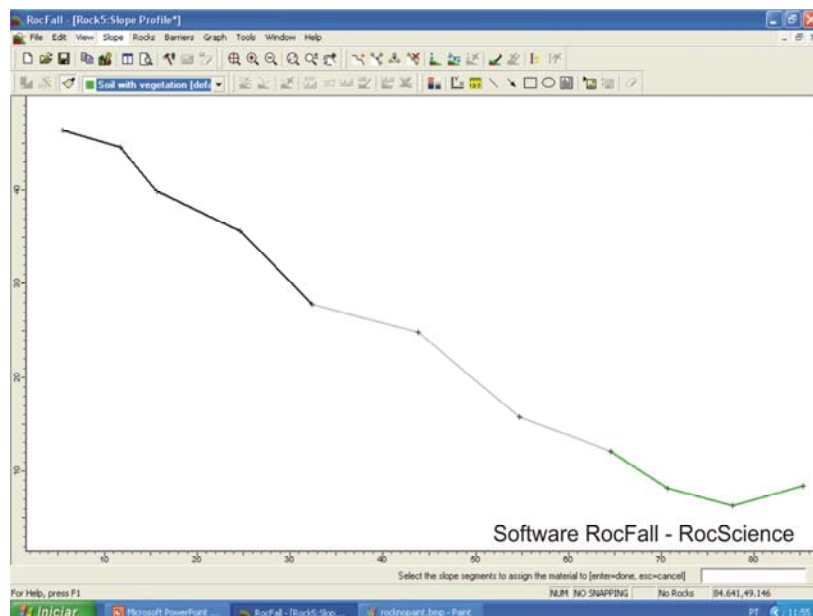
Após medir as variações de tempo resultantes do experimento, o coeficiente de restituição ( $e$ ) é calculado pelo método proposto por Cavalcanti *et al.*(2002), através

do coeficiente angular da reta em um gráfico de tempo antes *versus* depois do impacto ( $\Delta t_{n+1} \times \Delta t_n$ ).

### 2.3 Aplicação dos Resultados

Após a obtenção experimental do coeficiente de restituição normal foi possível fazer uma aplicação do resultado em programas de computador específicos que possibilitem a simulação do alcance e trajetória dos blocos em determinada região. Para a simulação de caso realizado neste trabalho foi utilizado o *software* RocFall – RocScience.

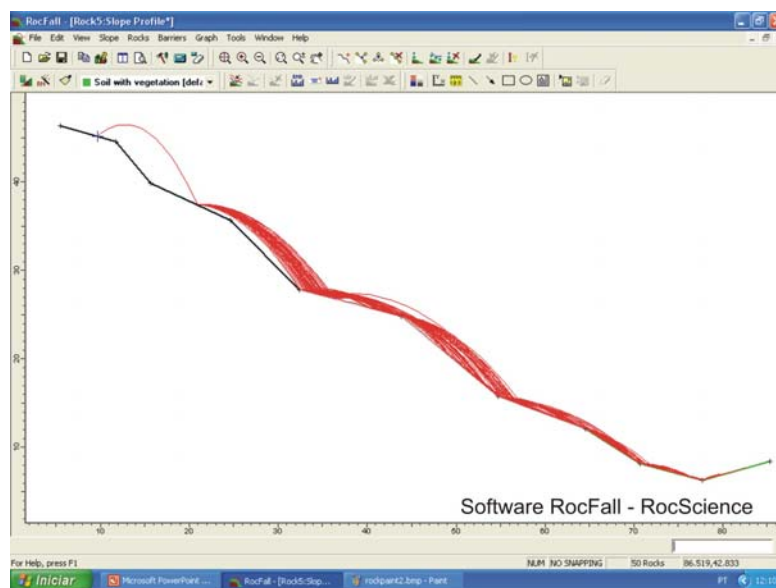
Este *software* permite elaborar uma seção, correspondente ao relevo do local estudado, subdividindo-a em trechos de características geológicas e geotécnicas distintas definidas pelo usuário. Esses trechos são definidos por aspectos físicos relevantes ao processo de movimento como o ângulo de atrito e o coeficiente de restituição normal e tangencial do material ao colidir com a referente superfície (Figura 2.8).



**Figura 2.8** – Janela do “software” RocFall mostrando seção topográfica e características da superfície.

Com relação ao bloco rochoso são inseridas características como o ponto de partida do movimento, ou seja, sua localização inicial; e aspectos como a massa e as velocidades, linear (horizontal e vertical) e angular, iniciais do movimento.

Após a elaboração da seção, que corresponde à escolha da trajetória na encosta e a atribuição das características físicas da superfície e do bloco, o *software* realiza cálculos que determinam os possíveis alcances para os parâmetros de entrada, o tipo de movimento realizado em cada trecho (rolamento, arrastamento, repique, queda, etc) e os seus prováveis alcances (Figura 2.9). 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).



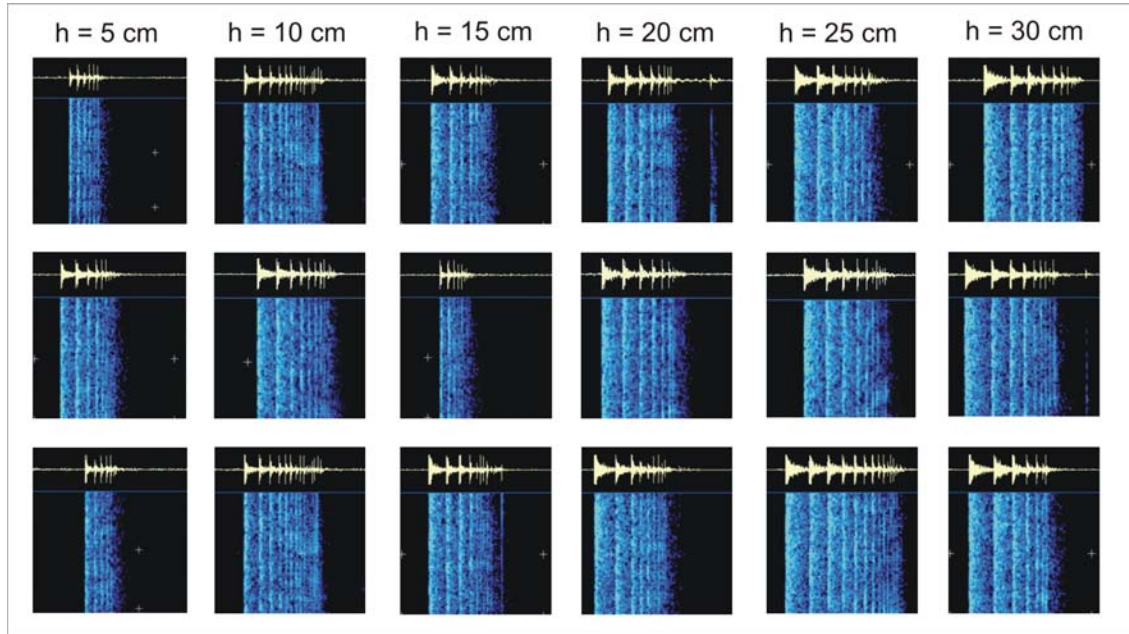
**Figura 2.9** – Janela do “software” RocFall mostrando a simulação de várias trajetórias possíveis para o bloco.

Esse tipo de *software* é de grande utilidade no entendimento de processos de movimentação de blocos, permitindo simular as mais variadas situações e auxiliando na escolha de local para a alocação e no dimensionamento de barreiras.

O *software* só faz análises em duas dimensões, sendo necessário a escolha de uma seção que compreenda um canal de possível passagem do bloco. No entanto, esse tipo de movimento ocorre em várias direções, mesmo quando encontra o canal, gerando assim uma impossibilidade de análise da trajetória real do bloco.

### 3 RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados três ensaios para cada altura inicial de queda; estas correspondentes a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm (Figura 3.1); obedecendo às recomendações descritas no item 2. A tabela com todos os resultados obtidos no experimento encontram-se no anexo I.



**Figura 3.1** – Imagens do Spectrogram para todos os ensaios.

Observando os gráficos do Spectrogram (Figura 3.1), é notado que em alguns ensaios, obteve-se variações de tempo entre os impactos, maiores que em outros ensaios. Isso se deve ao fato de ocorrer o impacto, com a superfície plana, em pontos da esfera de rocha em que ocorrem pequenas imperfeições. Por este motivo devem ser realizados repetidos ensaios, para que essas imperfeições não influenciem nos resultados.

Como mencionado anteriormente os resultados foram apresentados em um gráfico  $\Delta t_{n+1} \times \Delta t_n$ , baseado na equação 5 conforme o proposto por Cavalcante *et al.*(2002). Por meio de uma regressão linear foi obtida a reta (equação da reta equivale a  $y=ax+b$ ), cujo o coeficiente angular ( $a$ ) corresponde ao valor do coeficiente de restituição ( $e$ ), sendo este igual a  $0,702 \pm 0,009$  (Gráfico 3.1).

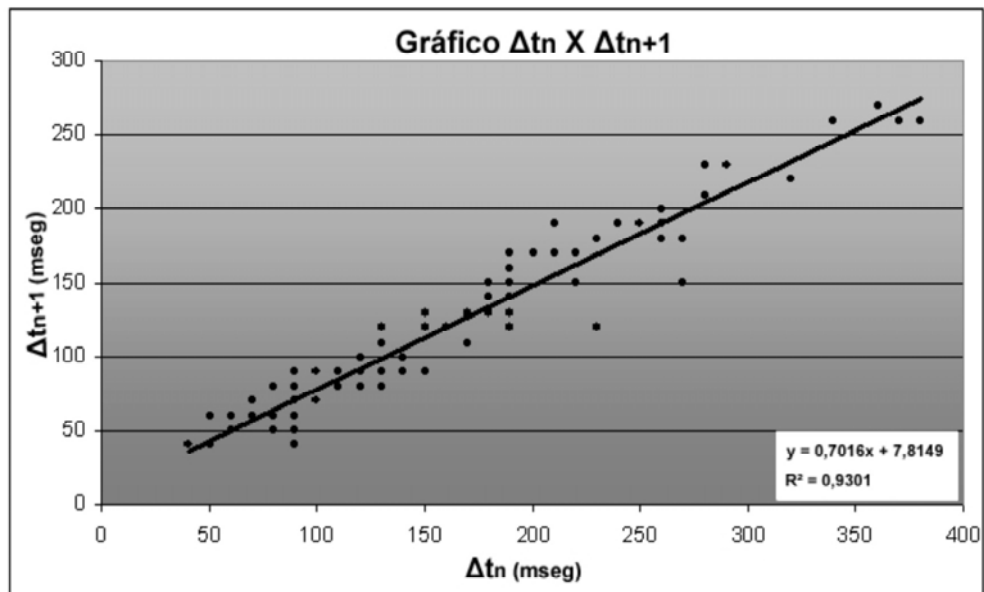


Gráfico 3.1 – Gráfico utilizado para cálculo do coeficiente de restituição.

Para verificar a aplicabilidade do método experimental foi calculado o valor da aceleração da gravidade, como o proposto por Cavalcante *et al.* (2002) através da relação dada pela equação 8 em um gráfico  $\Delta t_n^4 \times 8h(\Delta t_{n+1})^2$ , cujo valor corresponde ao coeficiente angular da reta. O valor da aceleração da gravidade obtido foi de  $9,4 \pm 0,5 \text{ m/s}^2$  (Gráfico 3.2), 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).

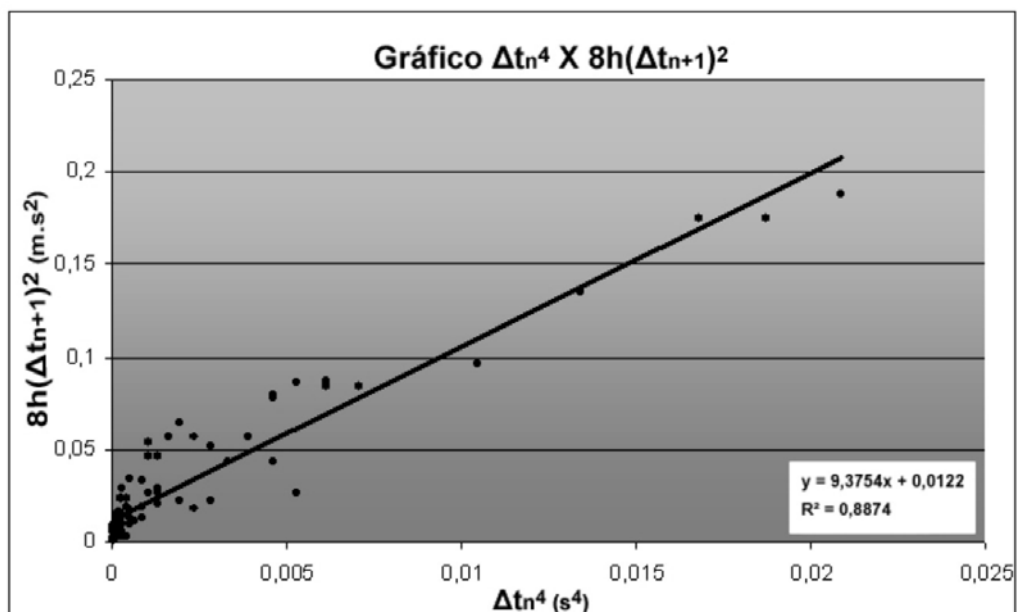
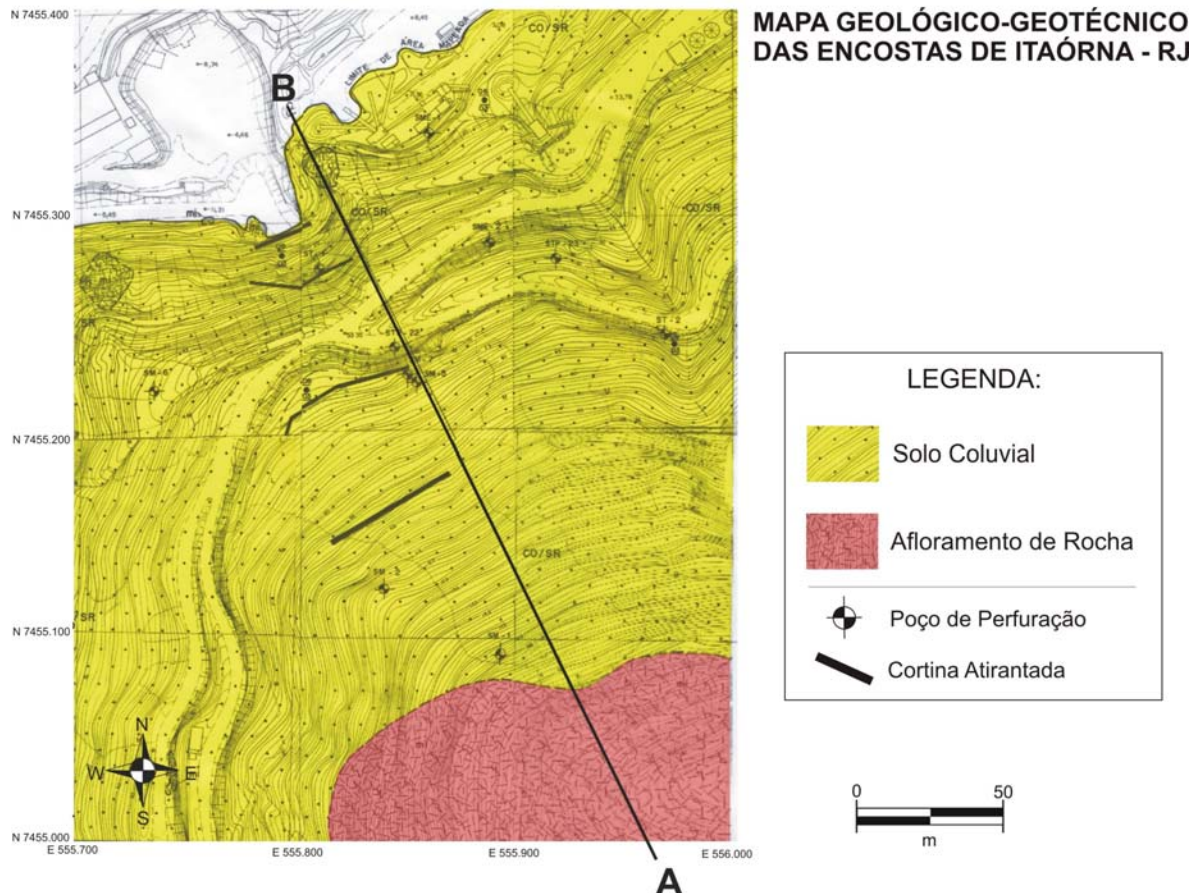


Gráfico 3.2 – Gráfico utilizado para cálculo da aceleração da gravidade.

### 3.1 Estudo de Caso

Para ilustrar a importância do parâmetro coeficiente de restituição, foi elaborado como exemplo um estudo de caso à partir do Mapa Geológico-Geotécnico das Encostas de Itaórna, produzido pelo Departamento de Geologia da UFRJ em 1991 (Figura 3.2).

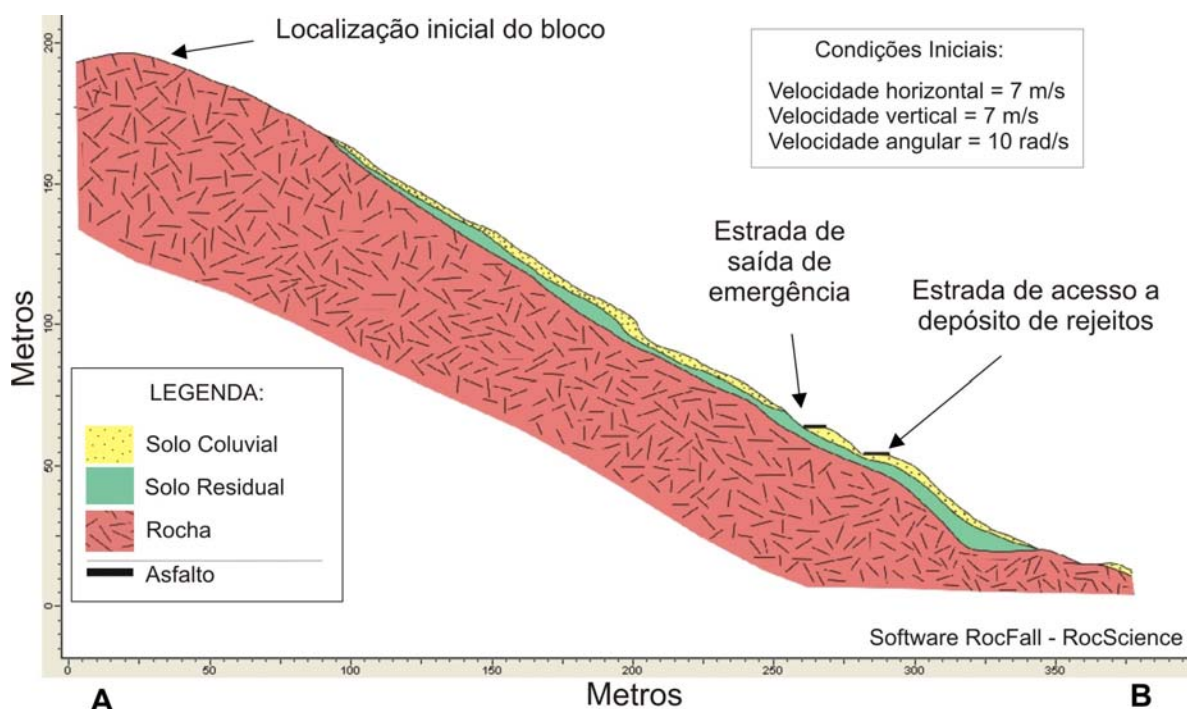


**Figura 3.2** – Mapa Geológico-Geotécnico das encostas de Itaórna – RJ, produzido pelo Departamento de Geologia/UFRJ – 1991. A simulação de queda de blocos realizada corresponde a seção AB.

A região utilizada como exemplo fica localizada próximo a uma pedreira sendo cortada por duas estradas de acesso. A geologia corresponde a migmatitos gnáissicos a graníticos e pegmatóides, em diversos estágios de alteração, e solos coluviais pedologicamente desenvolvidos, areno-argilosos, que podem envolver blocos isolados de rocha. Esses solos são assentes em solo residual.

À seção AB do mapa foi aplicado o *software* RocFall – RocScience. Esta seção corta as estradas de saída de emergência e de acesso ao depósito de rejeito da pedreira (Figura 3.3).





**Figura 3.3** – Seção geológica AB aplicada no “software” RocFall.

Com relação ao bloco rochoso foram determinados para a simulação sua localização inicial, massa e suas velocidades iniciais de movimento.

Levando em conta que a esfera de rocha utilizada no ensaio de determinação do coeficiente de restituição tem diâmetro médio de 30,71 mm com massa de 40,86g, foi calculado o volume do material ( $1,52 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ), considerando-o como esfera perfeita, sendo possível assim a obtenção de sua densidade ( $2694,4 \text{ Kg/m}^3$ ). Com esse dado é possível calcular a massa de um bloco de rocha, admitindo-o esférico e com 2,0 m de diâmetro, tamanho de bloco comum em encostas. O valor da massa de tal bloco 11,29 toneladas.

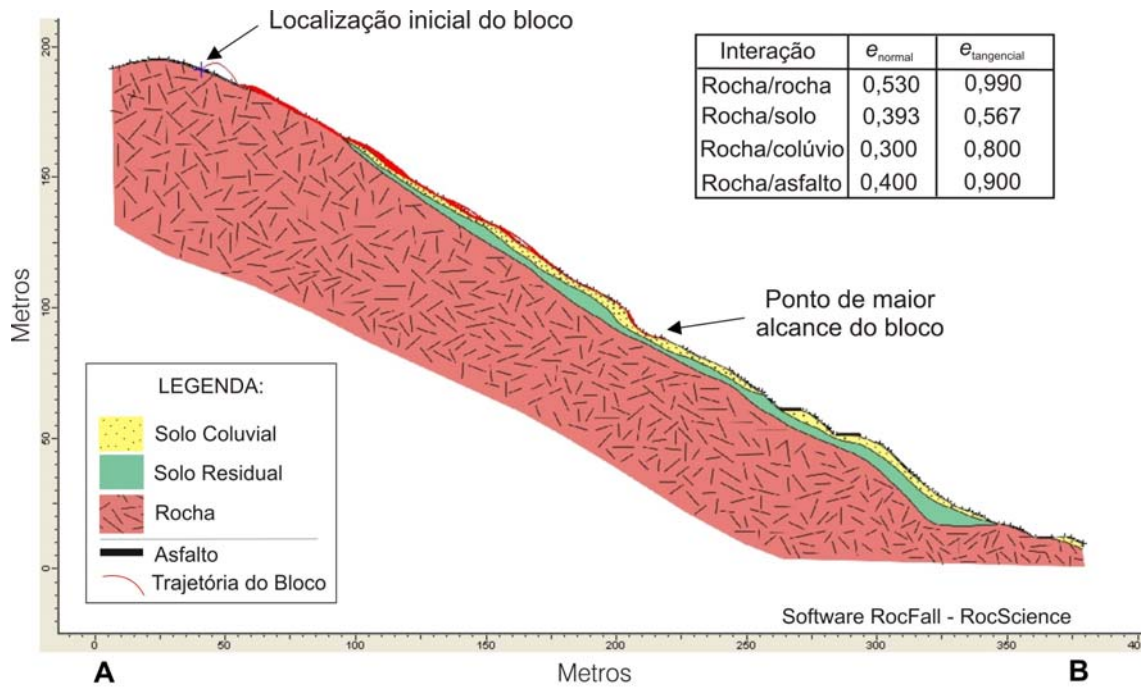
Para a simulação foram consideradas velocidades iniciais, horizontal e vertical, de 7 m/s e velocidade angular de 10 rad/s. Estes parâmetros podem ser considerados razoáveis, tendo em vista que na classificação de movimentos de massa, proposta por Varnes, 1958; *In*: Rahn, 1986 (Figura 1.1), é um movimento extremamente rápido. Não foi considerado o caso de velocidades iniciais nulas para o bloco, considerando a possibilidade de um início de movimento, provocado por um impulso de outro bloco em movimento, gerando uma velocidade inicial igual a velocidade do bloco em movimento no momento da colisão.

Em relação à superfície foi utilizado um ângulo de atrito correspondente a  $30^\circ$  para todas as interações.

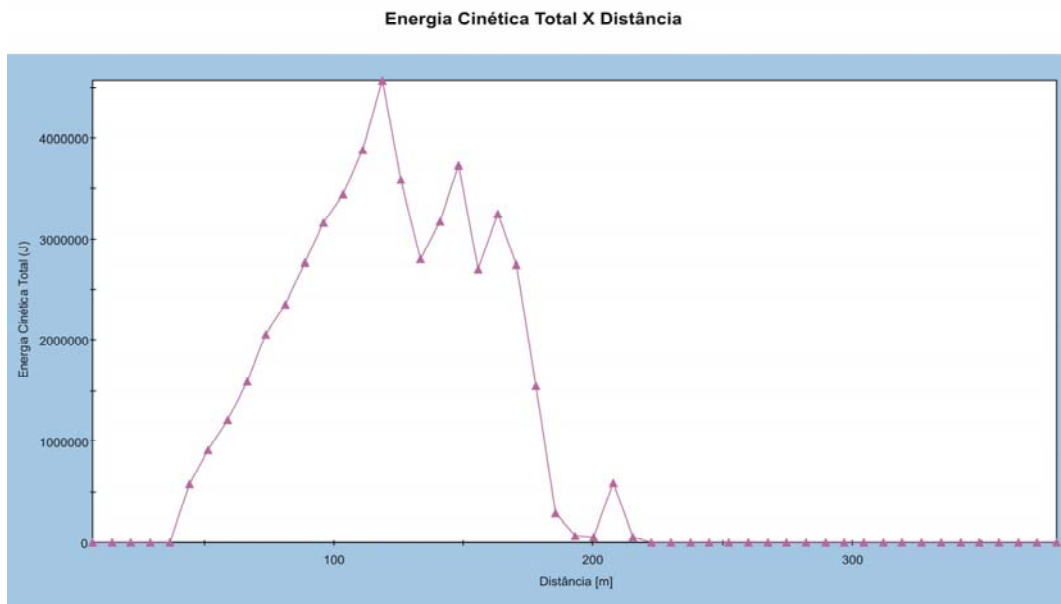
Sabendo que o valor do coeficiente de restituição depende tanto do material do bloco quanto do material da superfície com a qual se choca, vários valores de coeficiente de restituição devem ser determinados ao colidir com superfícies diferentes, sendo necessário utilizar o parâmetro apropriado a cada material de superfície. Essas superfícies de possível interação com o bloco rochoso, para o caso da seção geológica-geotécnica apresentada, correspondem à rocha, ao solo residual, ao solo coluvial e ao asfalto.

Foram realizadas duas simulações com duas diferenças básicas em relação aos valores dos coeficientes de restituição adotados para as colisões rocha-rocha. A primeira levou em consideração os valores de coeficiente de restituição normal e tangencial disponíveis na literatura, tanto para as interações rocha-rocha, quanto para as colisões da rocha com os outros materiais presentes na seção geológico-geotécnica (ver tabela com parâmetros utilizados para o caso, localizado na Figura 3.4). A segunda simulação utilizou o valor de coeficiente de restituição normal obtido pelo experimento proposto para os trechos que ocorrem colisões rocha - rocha. Para os demais trechos foram adotados os valores da literatura e exatamente iguais ao primeiro caso (ver tabela com os parâmetros utilizados para o caso, localizado na Figura 3.5). A intenção é avaliar o quão sensível é este parâmetro para as análises de trajetórias e alcance de blocos e, por conseguinte, a real necessidade de ensaios para a obtenção do coeficiente de restituição. Em cada caso foi realizado um gráfico de energia cinética total ao longo da encosta, realizado pelo próprio RocFall, para avaliar qual destes envolve uma maior energia.

Na primeira simulação é observado que, utilizando os valores de coeficiente de restituição da bibliografia, o bloco realiza movimentos prevalentemente de rolamento/escorregamento, ao longo da superfície geológica analisada, cessando o movimento antes de atingir as estradas (Figura 3.4), alcançando ao longo da encosta um valor de energia cinética total máxima de 4581250 J (Gráfico 3.3).



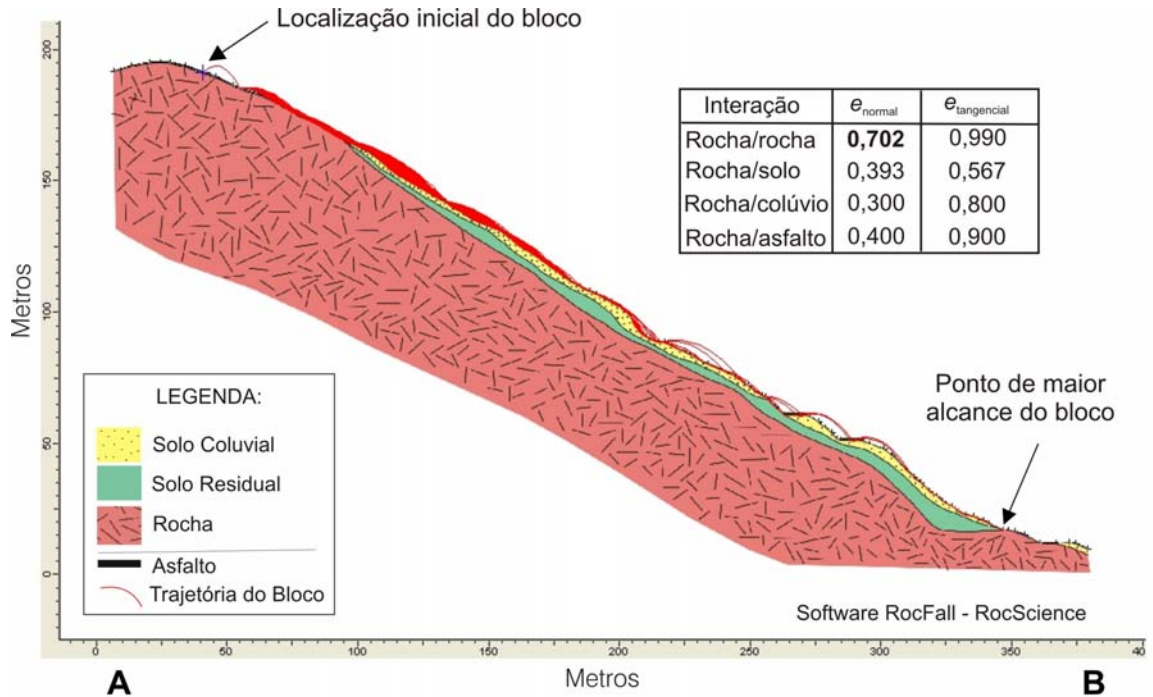
**Figura 3.4** – Imagem de simulação de queda de blocos realizada pelo “software” RocFall com dados de coeficiente de restituição da bibliografia.



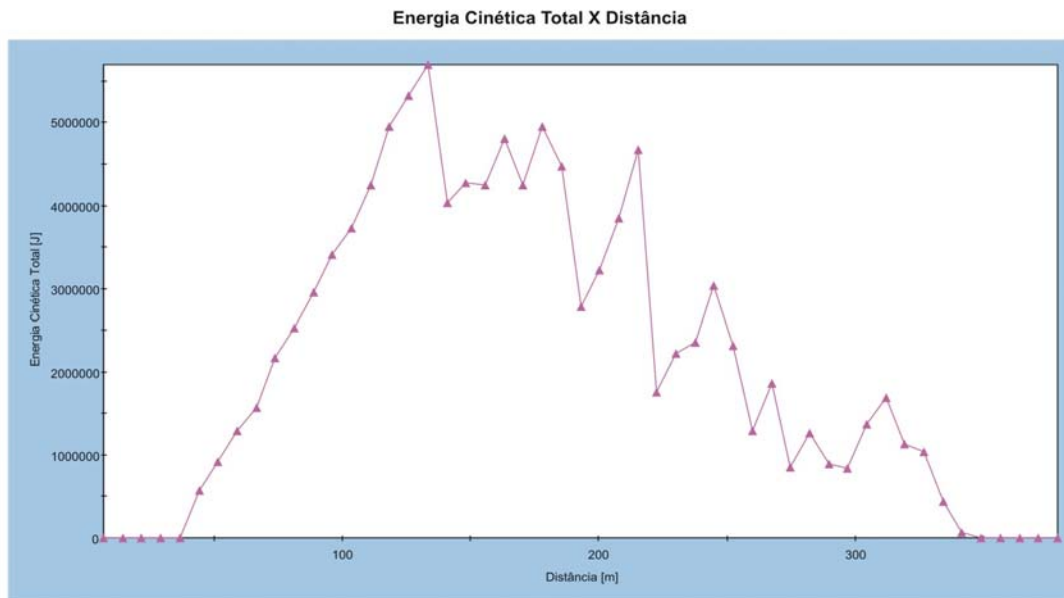
**Gráfico 3.3** – Gráfico de energia cinética total ao longo da encosta para dados de coeficiente de restituição da bibliografia.

Na segunda simulação ao trocar somente o valor de coeficiente de restituição normal disponível na bibliografia pelo obtido no experimento proposto, tem-se movimento com nível mais elevado de energia, como visto no Gráfico 3.4, onde se verificam rolamentos/escorregamentos e bastante saltação. Como consequência obteve-se um maior alcance do bloco, ultrapassando as estradas de saída de emergência e de acesso ao depósito de rejeito localizado na antiga pedreira, caracterizando assim uma situação de risco (Figura 3.5).

Comparando os gráficos de Energia Cinética Total ao longo da encosta, realizado pelo *software* RocFall, para as duas simulações (Gráficos 3.3 e 3.4) é possível provar que é maior a energia envolvida no 2º caso, onde atinge um valor de energia cinética total de 5698529 J enquanto que no 1º caso esse valor máximo corresponde a 4581250 J.



**Figura 3.5** – Imagem de simulação de queda de blocos realizado pelo “software” RocFall com dados de coeficiente de restituição da bibliografia e para a interação rocha - rocha valor de coeficiente de restituição normal obtido pelo experimento proposto.



**Gráfico 3.4** – Gráfico de energia cinética total ao longo da encosta para dados da bibliografia e para a interação rocha - rocha valor de coeficiente de restituição normal obtido pelo experimento proposto.

## 4 CONCLUSÕES

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

Seguindo a metodologia e as recomendações experimentais descritas no item 2 foi obtido um valor de coeficiente de restituição normal equivalente a  $0,702 \pm 0,009$  para a interação rocha – rocha no material estudado.

O valor da gravidade obtido ( $9,4 \pm 0,5 \text{ m/s}^2$ ) a partir dos resultados do experimento permite assegurar, com um certo grau de segurança, a aplicabilidade deste método, já que o valor esperado está contemplado no intervalo obtido.

Ao analisar a simulação em que são utilizados, para as interações envolvidas, os coeficientes de restituição da literatura, tem-se movimentos com menor nível de energia e o bloco de rocha cessa seu movimento antes de atingir as estradas, não caracterizando uma situação de risco.

Em relação ao caso em que é adotado o valor do coeficiente de restituição normal obtido no experimento ( $0,702 \pm 0,009$ ), o bloco apresentou uma maior energia de movimento, alcançando as estradas de saída de emergência e de acesso ao depósito de rejeito da pedreira, 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 são escassos na literatura dados de coeficientes de restituição que levem em consideração o tipo de rocha e, sobretudo, o seu grau de alteração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, C.E. & Laudares, F. 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](http://www.omnis.if.ufrj.br/~carlos/conferencias/som/som.pdf) em setembro de 2005.

Augusto Filho, O. & Virgili, J.C. 1998. Estabilidade de Taludes. *In*: Oliveira & Brito (eds.). Geologia de Engenharia. ABGE, p.243-269.

Bernstein, A. D. 1977. Listening to the coefficient of restitution. *Am. J. Phys.*, V.45, n.:1, p. 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.

Fernandes, C.E.M.; Teixeira, H.A.S.; Cadman, J.D. & Barroso, J.A. 1974. Rockfall Problems in Sedimentary Rocks Along the BR 116 Highway at the Serra do Espigão, Santa Catarina, Brasil. *Proceedings of the Second International Congress of the International association of Engineering Geology*. V.2, p.v-5.1 – v-5.8.

Giani, G. P.; Giacomini, A.; Migliazza, M. & Segalini, A. 2004. Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. *In*: *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 37 (5): 369-389.

Guidicini, G. & Nieble, C.M. 1976. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA. 170p.

Infanti Jr., N. & Fornasari, N. 1998. Processos de Dinâmica Superficial. *In*: Oliveira & Brito (eds.). Geologia de Engenharia. ABGE, p.131-152.

Nussenzveig, H.M. 1981. Os Princípios da Dinâmica. *In*: Nussenzveig, H.M. (ed.). *Curso de Física Básica, 1-Mecânica*. Editora Edgard Blücher LTDA, p.65 – 82.

Peila, D.; Pelizza, S. & Sassudelli, F. 1998. Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests. *In*: *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 31 (1): 1 - 24.

Rahn, P.H. 1986. Mass Wasting. *In*: Rahn (ed.). *Engineering Geology: An Environmental Approach*. Elsevier, p.147-187.

Santos, A.T.C. 2004. Redução da Tenacidade por Intemperismo: Mecanismos Pré-Ruptura de Maciços Rochosos. Monografia de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Geologia.

Serra Jr, E. & Ojima. L.M. 1998. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. *In*: Oliveira & Brito (eds.). Geologia de Engenharia. ABGE, p.211-226.

Stevens, W. D. 1998. Rocfall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. MSc. of Applied Science, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto/CA.

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. Proceedines of 9<sup>th</sup> International\_Simposium on Landslides. V.2, p.1007 – 1012.

Whalley, W.B. 1984. Rockfalls. *In*: Brunsdon & Prior (eds.). Slope Instability. John Wiley & Sons Ltd, p. 217-256.

## **ANEXO I**

### **TABELA COM RESULTADOS DO EXPERIMENTO**



Altura (cm)	n	$\Delta t$ (mseg)	n	$\Delta t$ (mseg)	n	$\Delta t$ (mseg)
5	1	130	1	110	1	140
	2	90	2	90	2	90
	3	90	3	60	3	80
	4	70	4	50	4	60
	5	70				
10	1	220	1	210	1	190
	2	150	2	170	2	160
	3	130	3	130	3	120
	4	80	4	80	4	90
	5	80	5	50	5	90
					6	50
					7	40
15	1	270	1	260	1	240
	2	150	2	190	2	190
	3	120	3	130	3	150
	4	90	4	110	4	90
	5	90	5	80	5	60
	6	40	6	80		
	7	40				
20	1	250	1	290	1	280
	2	190	2	230	2	230
	3	170	3	120	3	180
	4	110	4	100	4	130
	5	80	5	90	5	80
	6	50	6	60	6	60
	7	50	7	60		
25	1	340	1	280	1	320
	2	260	2	210	2	220
	3	200	3	190	3	170
	4	170	4	120	4	130
	5	130	5	80	5	110
	6	120	6	60	6	90
	7	90				
	8	70				
30	1	380	1	370	1	360
	2	260	2	260	2	270
	3	190	3	180	3	180
	4	140	4	150	4	140
	5	100	5	120	5	90
	6	70	6	100	6	50
	7	60				

erro  $\Delta t = \pm 7,07$  mseg

$\Delta t$  (mseg) = Variação de tempo em milisegundos

n = número de intervalos de tempo