



UFRJ

Francis Pimentel Lima

**RETROANÁLISE PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE
RESTITUIÇÃO DE GNAISSE E DEPÓSITO DE TÁLUS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2011



Francis Pimentel Lima

**RETROANÁLISE PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE
RESTITUIÇÃO DE GNAISSE E DEPÓSITO DE TÁLUS**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Emílio Velloso Barroso

Rafael Silva Ribeiro

Rio de Janeiro

Maio de 2011

LIMA, Francis Pimentel

Retroanálise para determinação dos coeficientes de restituição de gnaisse e depósito de tálus/ Francis Pimentel Lima - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2011.

xii, 47 p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2011.

Orientadores: Emílio Velloso Barroso, Rafael Silva Ribeiro.

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Emílio Velloso Barroso; Rafael Silva Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Retroanálise para determinação dos coeficientes de restituição de gnaisse e depósito de tálus.

Francis Pimentel Lima

**RETROANÁLISE PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE
RESTITUIÇÃO DE GNAISSE E DEPÓSITO DE TÁLUS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:
Emílio Velloso Barroso
Rafael Silva Ribeiro

Aprovada em: 26 de maio de 2011

Por:

Orientador: Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

Orientador: Rafael Silva Ribeiro (UFRJ)

Helena Polivanov (UFRJ)

Andrea Ferreira Borges (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2011

Aos meus pais, Eunice e Adair.

Primeiramente a Deus que me concedeu toda a sabedoria necessária para a confecção deste trabalho e que iluminou minha mente durante estes vários anos de aprendizagem na graduação.

Aos meus pais que me deram apoio, incentivo e suporte para que eu pudesse chegar até aqui, e certamente continuarão dando, para que eu vá adiante.

Ao meu orientador Emílio, pelos ensinamentos e ajuda na confecção deste trabalho, e meu orientador Rafael, pela atenção, pela transmissão de conhecimentos e pelas conversas que proporcionaram momentos de descontração.

A Fátima que me orientou nos ensaios de solo.

Aos meus amigos e colegas da geologia, todos aqueles que compartilharam de um trabalho em grupo, de reuniões de estudo, de momentos de felicidade e tensão, e dos momentos de vida acadêmica que ficarão na memória e serão sentidos com gosto de saudade.

LIMA, Francis Pimentel. **Retroanálise para determinação dos coeficientes de restituição de gnaiss e depósito de tálus**. 2011. xii, 47p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O movimento de massa do tipo queda e rolamento de blocos é aquele que envolve blocos rochosos, com volume e litologia variados, sob condições de alta velocidade. É o tipo de movimento de massa menos estudado e o de mais difícil previsão, tanto no que diz respeito ao início do processo, como à trajetória e ao alcance dos blocos. A dificuldade da determinação dos possíveis alcances dos blocos, informação importante para mapeamentos de áreas de risco, se deve principalmente a falta de conhecimento sobre métodos de obtenção do coeficiente de restituição, um dos parâmetros essenciais para este tipo de análise. Para a determinação deste parâmetro foi selecionada a localidade do Bairro da Glória, no Município de Petrópolis (RJ), que tem por característica um relevo escarpado com afloramentos de gnaiss fraturado e a presença de depósito de tálus. Trata-se de um local particularmente suscetível a instabilidades dessa natureza, marcado por episódios anteriores de queda de blocos. O objetivo deste estudo foi fazer uma retroanálise dos coeficientes de restituição com o auxílio do software RocFall, que leva em consideração as equações de balística para análise das trajetórias e alcances dos blocos rochosos em uma dada superfície topográfica e para uma certa distribuição de materiais geológicos no local, a fim de estimar a faixa de valores mais prováveis dos coeficientes para os tipos litológicos existentes na área. A abordagem empregada foi a paramétrica, na qual são variados os parâmetros de coeficiente de restituição normal e tangencial até que se encontre uma combinação adequada que descreva os alcances observados no campo. Os diversos resultados obtidos foram combinados para formação de uma superfície de isovalores que representa a faixa de coeficientes de restituição mais prováveis. Os intervalos de coeficientes de restituição normais (R_n) e tangenciais (R_t) mais prováveis são, respectivamente, para o depósito de tálus: $0,27 \leq R_n \leq 0,34$ e $0,815 \leq R_t \leq 0,83$; e para o afloramento rochoso de gnaiss: $0,91 \leq R_n \leq 0,93$ e $0,88 \leq R_t \leq 0,95$.

Palavras-chave: Queda de Blocos; Coeficientes de Restituição; Simulação Computacional; Mapeamento de Risco.

LIMA, Francis Pimentel. **Retroanálise para determinação dos coeficientes de restituição de gnaiss e depósito de talus**. 2011. xii, 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The mass movement rockfall and rolling types involve rock blocks with bulk and lithology variables under high velocity conditions. It is the type of mass movement less studied that presents difficult forecast as much to concern the beginning of process, as the trajectory and the reach of the blocks. The difficulty of the determination of the possible block reaches –important information for mapping risk areas – is mainly due the lack of knowledge about obtention methods of coefficient of restitution, a essential parameter for this kind of analysis. With the purpose of determining it parameter, the locality of Quarter of Glória in Petrópolis City (RJ) was chosen because this one has an escarpment relief with a fractured gneiss outcrop and a talus deposit. This place is privately susceptible to instabilities of this nature. In the past, several episodes of rockfall happened and left traces. The aim of this study was to make a retroanalysis of the coefficient of restitution with the support of the software RocFall, which take ballistic equation into consideration for the trajectories analysis and reaches of rock blocks on a topography surface ordered and for certain distributions of geological materials in the place, intending discover the better track of coefficient of restitution values for the lithologic types there are in the area. The approach used was the parametric, in which the parameters are varied until find a right combination to describe the reaches noticed in the field. The various results obtained were arranged to form a isovalue surfaces, that represents the track of coefficients of restitution most probable. The most probable interval of coefficient of restitution are, respectively, for talus deposit: $0,27 \leq R_n \leq 0,34$ e $0,815 \leq R_t \leq 0,83$; and for the gneiss outcrop: $0,91 \leq R_n \leq 0,93$ e $0,88 \leq R_t \leq 0,95$.

Key-Words: Rockfall; coefficient of restitution; computational simulation; risk mapping

Figura 1 - Classificação de movimentos de massa (Varnes, 1958 <i>apud</i> Rahn, 1986).	2
Figura 2a – Queda de blocos condicionada pela combinação do mergulho de uma descontinuidade e do corte do talude; 2b – Tombamento de blocos condicionados pelo mergulho de duas descontinuidades; e 2c – Rolamento de matacões provenientes do intemperismo diferenciado e erosão de um maciço rochoso (Modificado de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998).....	3
Figura 3a - Queda de blocos em bairro de Santa Rita de Cássia, Mariana (MG), uma localidade com alta susceptibilidade de novas quedas (Sobreira, 2001).....	4
Figura 3b - Rolamento de blocos próximo a estrada de terra em Adrianópolis (PR) em 2003. Fonte: CPRM.....	5
Figura 4 - Trajetória dos movimentos de queda (<i>fall</i>) saltação (<i>bounce</i>) e rolamento (<i>roll</i>) em diferentes tipos de taludes (Schweigl <i>et al.</i> , 2002).....	5
Figura 5 - A - Colisão Perfeitamente Inelástica, com $e=0$ e B – Colisão Perfeitamente Elástica, com $e=1$ (Dias & Barroso, 2006)..	9
Figura 6 - Experimento realizado por Chau <i>et al.</i> (2002). Fotografia mostrando uma sequência de posições da queda de uma esfera sobre uma superfície inclinada. As figuras da esfera em vários tempos são superpostas em uma só fotografia com o objetivo de compreender a trajetória da mesma..	10
Figura 7 - Ilustração demonstrando as componentes da queda e impacto de uma esfera com uma superfície inclinada (Modificado de Carnevale, 1991).....	11
Figura 8 - Gráfico demonstrando a relação entre os movimentos de massa e a densidade de habitantes de cada distrito da cidade de Petrópolis entre 1960 e 1999 (Oliveira <i>et al.</i> , 2003 <i>apud</i> Fernandes, 2010).....	13
Figura 9 - Localização e limites políticos do município de Petrópolis.....	15
Figura 10 - Mapa rodoviário mostrando as principais vias de acesso a região estudada; a BR-040 e a RJ-134 (Fonte: Google Maps).....	16

Figura 11 - Visão panorâmica da encosta onde foi feito o estudo de queda de blocos	17
Figura 12 - Vista aérea do Bairro da Glória através de imagens de satélite convertidas a imagens do tipo “sobrevôo” pelo software Google Earth, fornecendo uma idéia da dimensão do morro e da inclinação onde as moradias se encontram.	18
Figura 13 - Algumas moradias bem próximas ao afloramento rochoso e blocos rolados.	18
Figura 14 - Demonstração do <i>Tilt Test</i>	22
Figura 15 - Determinação da massa submersa através de dispositivo acoplado no fundo da balança.....	22
Figura 16 - Traçado das trajetórias de cada bloco. Cada traçado apresenta uma cor diferente apenas para fins de diferenciação.....	23
Figura 17 - Seção da trajetória do bloco 15, onde é possível notar que o caminho que o bloco percorreu passa pelo afloramento rochoso (linha vermelha) e pelo depósito de tálus (linha amarela). As características físicas destas unidades geotécnicas, isto é, os coeficientes de restituição normal e tangencial e o ângulo de atrito também são definidas antes do processamento da análise.....	24
Figura 18 - Valores relacionados às condições iniciais em que se encontrava o bloco requeridos pelo RocFall para a análise de movimento e alcance do mesmo.....	25
Figura 19 - Mapa geotécnico da área com curvas de nível sobre a fotografia área georreferenciada.....	28
Figura 20 - Carta de Plasticidade e representação em vermelho das características do solo da área estudada. Trata-se de um solo Argiloso de Alta Compressibilidade (CH)..	29
Figura 21 - Curva granulométrica e composição granulométrica (%) resultantes do ensaio realizado com o solo residual	30
Figura 22 - Gráfico de alcances para <i>bedrock</i> fixado em $R_n=0,27$ e $R_t=0,55$	33
Figura 23 - Gráfico de alcances para <i>bedrock</i> fixado em $R_n=0,48$ e $R_t=0,70$	34
Figura 24 - Gráfico de alcances para <i>bedrock</i> fixado em $R_n=0,69$ e $R_t=0,85$	34

Figura 25 - Gráfico de alcances para <i>bedrock</i> fixado em $R_n=0,90$ e $R_t=0,99$	35
Figura 26 - Gráfico de alcances para depósito de tálus fixado em $R_n=0,28$ e $R_t=0,76$	36
Figura 27 - Gráfico Gráfico de alcances para depósito de tálus fixado em $R_n=0,32$ e $R_t=0,82$	37
Figura 28 - Gráfico de alcances para depósito de tálus fixado em $R_n=0,36$ e $R_t=0,88$	37
Figura 29 - Sobreposição das curvas geradas anteriormente (em vermelho) com as novas curvas, geradas a partir dos valores corretos de massa e alcance (em azul).....	45

Tabela 1 - Valores de coeficientes de restituição normal e tangencial de acordo com a bibliografia utilizada.....	26
Tabela 2 - Tabela da seção 2, com valores de R_n e R_t do afloramento rochoso fixados e do depósito de tálus variando com intervalos de 0,05.....	27
Tabela 3 - Valores obtidos através da técnica de saturação das três amostras de rocha.....	31
Tabela 4 – Valores do raio de cada bloco (considerando uma média de suas dimensões), o volume, a massa específica genérica e a massa de cada bloco, dado necessário para a simulação no RocFall.....	31
Tabela 5 - Alcances apresentados pelos blocos no campo....	32
Tabela 6 - Comparação dos resultados encontrados no presente trabalho com Fernandes (2010).....	38
Tabela 7 - Massa específica ($\rho=2,55$) e massa dos blocos corrigidos.....	44
Tabela 8 - Alcance encontrado anteriormente (com $\rho= 1,63$), o novo alcance (com $\rho=2,55$) e a diferença entre eles. Em vermelho está a máxima diferença encontrada Alcances apresentados pelos blocos no campo.....	45

Agradecimentos	VI
Resumo	IV
Abstract	VIII
Lista de figuras	IX
Lista de tabelas	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 O movimento da queda de blocos	3
1.2 Parâmetros envolvidos na análise	8
2. RELEVÂNCIA E OBJETIVO DO ESTUDO	12
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
4. METODOLOGIA	20
5. RESULTADOS	27
5.1 Análise das seções no Surfer	33
6. CONCLUSÕES	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
8. APÊNDICE	44

1. INTRODUÇÃO

Muitos casos de movimentos de massa têm afetado o estado do Rio de Janeiro nos últimos anos, como os ocorridos em Angra dos Reis em janeiro de 2010, Niterói em abril de 2010 e na região serrana, nos municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo em janeiro de 2011, que receberam destaque nacional devido a magnitude e ao número de vítimas. Esses movimentos foram desencadeados principalmente pela intensidade e prolongamento das chuvas que saturaram a camada de solo das encostas, provocando escorregamentos, fluxo de detritos e transporte de blocos. Habitações e pessoas que se encontravam em regiões que deveriam ser consideradas áreas de risco foram levadas e soterradas. A importância de estudos dos diversos movimentos de massa é exatamente prevenir e evitar perdas humanas e materiais, delimitando áreas de risco a partir de análises das áreas geomorfologicamente suscetíveis a este fenômeno.

Movimentos de massa são mecanismos que transportam sedimentos, solos e rochas, e são induzidos pela força gravitacional e pela ação conjunta ou isolada de fatores naturais (presença de águas superficiais ou subterrâneas) e ação antrópica (desmatamentos, cortes e aterros, entre outras) (Dias & Barroso, 2006). São considerados os principais processos geomorfológicos responsáveis pela evolução do relevo, pois remobilizam materiais ao longo das encostas em direção às planícies e promovem, juntamente com os processos erosivos, o recuo das encostas e a formação de rampas coluviais (Dias & Herrman, 2002) sendo, portanto, processos naturais que não podem ser evitados em áreas com ocupação inadequada, mas mitigados por meio de obras de engenharia e prevenidos.

A classificação mais conhecida e utilizada para a definição e análise deste fenômeno é a que foi proposta por Varnes (1958 *apud* Rahn, 1986), que divide os movimentos em quedas, escorregamentos e fluxos em rochas, solos e detritos, tendo como base as velocidades de ocorrência destes tipos de movimentos (figura 1). Porém, outras classificações internacionais apresentam destaque para este tipo de análise, como as de Hutchinson (1988 *apud* Ribeiro, 2008) e Sassa (1989 *apud* Ribeiro, 2008), onde, além da velocidade do movimento, também são

levados em consideração outros fatores como material envolvido, mecanismos de ruptura, entre outros.

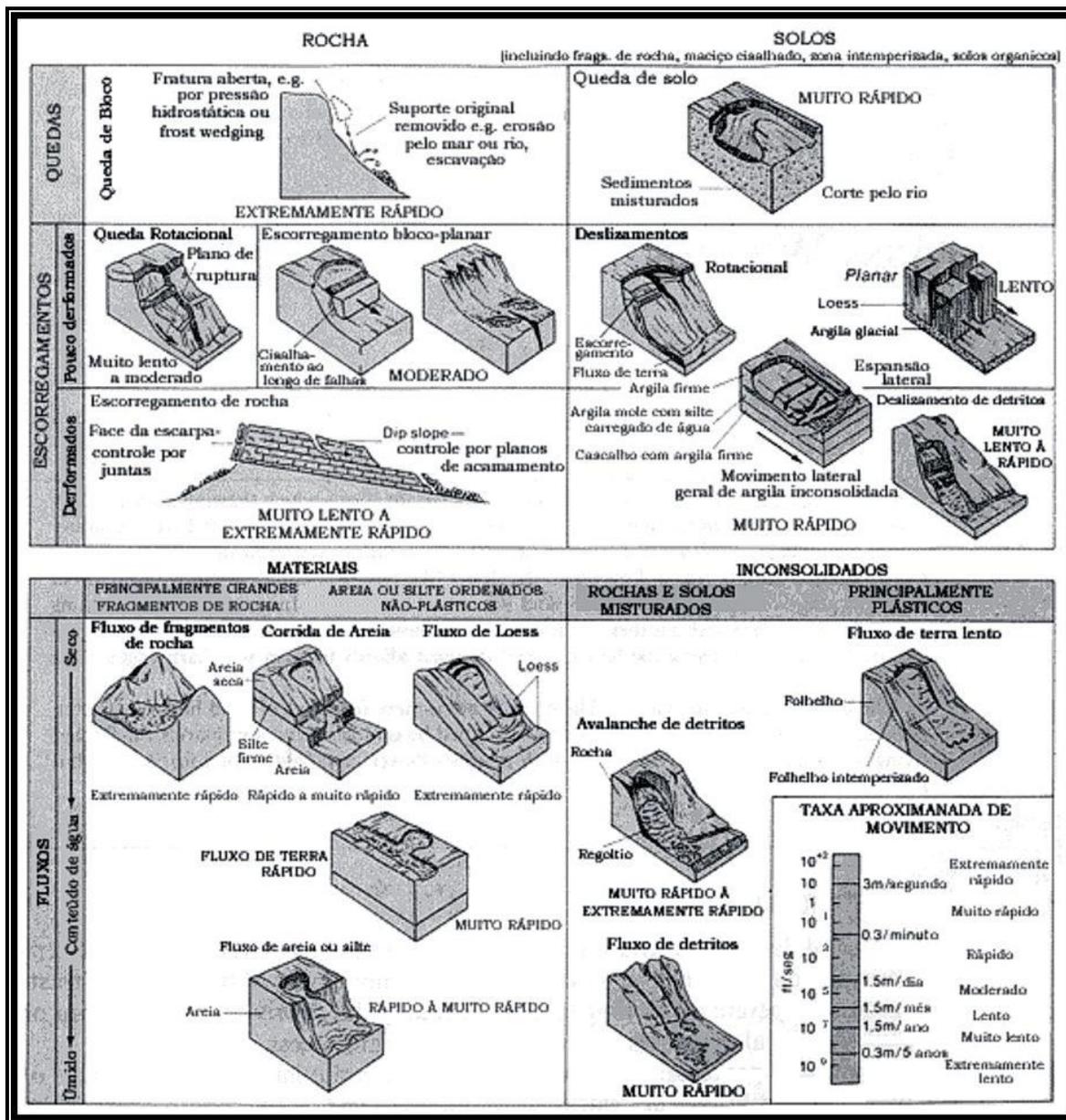


Figura 1: Classificação de movimentos de massa (Modificado de Varnes, 1958 *apud* Rahn, 1986).

Augusto Filho & Virgili (1998) listam os fatores condicionantes de movimentos de massas mais importantes na dinâmica ambiental brasileira: características climáticas (destaque para o regime pluviométrico); características e distribuição de materiais que compõem o substrato das encostas; características

geomorfológicas (inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas); regime de águas de superfície e subsuperfície; e características de uso e ocupação territorial, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção humana nas encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial, entre outros.

1.1. O MOVIMENTO DE QUEDA DE BLOCOS

O movimento de queda de blocos é descrito por Jiming *et al.* (2006) como mais frequente do que os escorregamentos, porém, de menor magnitude que estes. Também são referidos como movimentos considerados extremamente rápidos por Varnes (1958 *apud* Rahn, 1986). Segundo Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998), queda, rolamento, e ainda, tombamento e deslocamento de blocos rochosos fazem parte do que chamam de movimentos de blocos rochosos (figuras 2a, 2b e 2c).

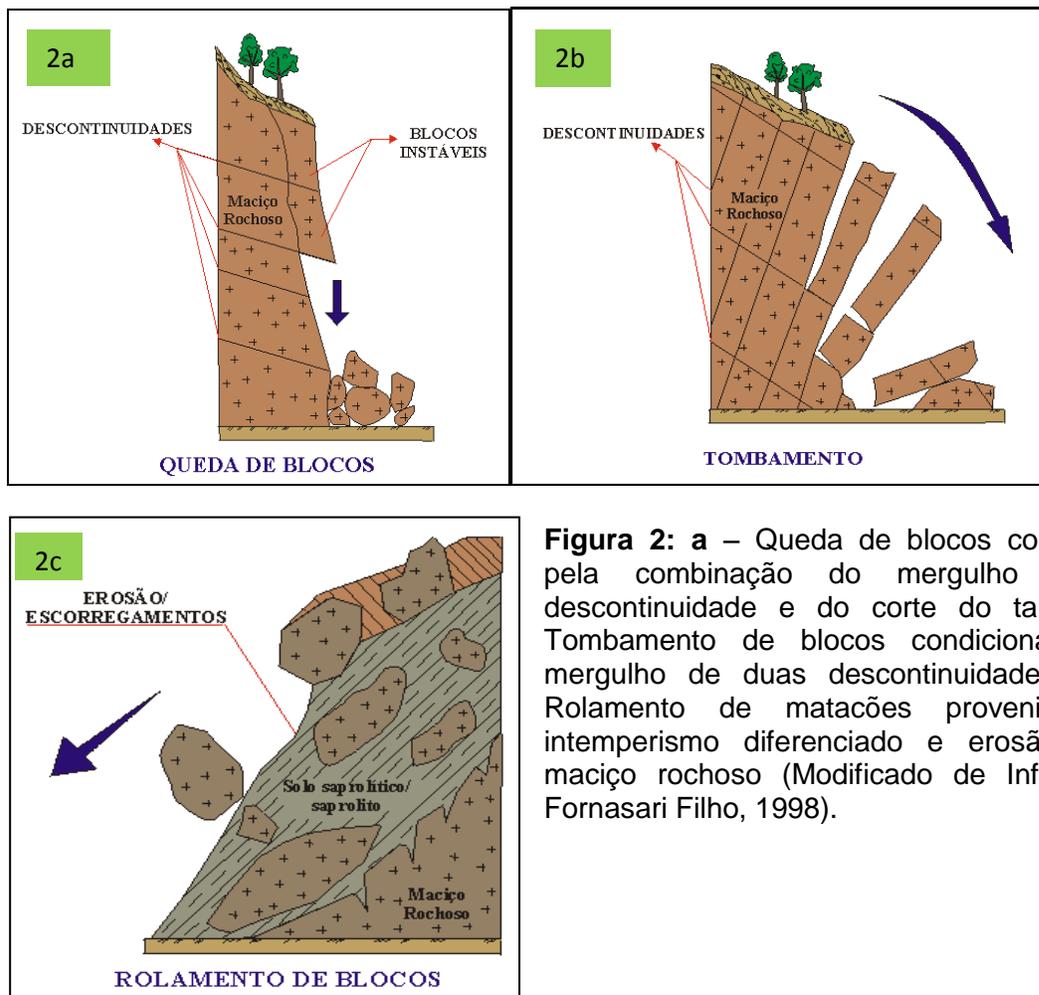


Figura 2: a – Queda de blocos condicionada pela combinação do mergulho de uma descontinuidade e do corte do talude; b – Tombamento de blocos condicionados pelo mergulho de duas descontinuidades; e c – Rolamento de matacões provenientes do intemperismo diferenciado e erosão de um maciço rochoso (Modificado de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998).

Quedas de blocos envolvem materiais rochosos de volume e litologias diversas, que se destacam dos taludes e encostas íngremes e se deslocam por queda livre (figura 3a).

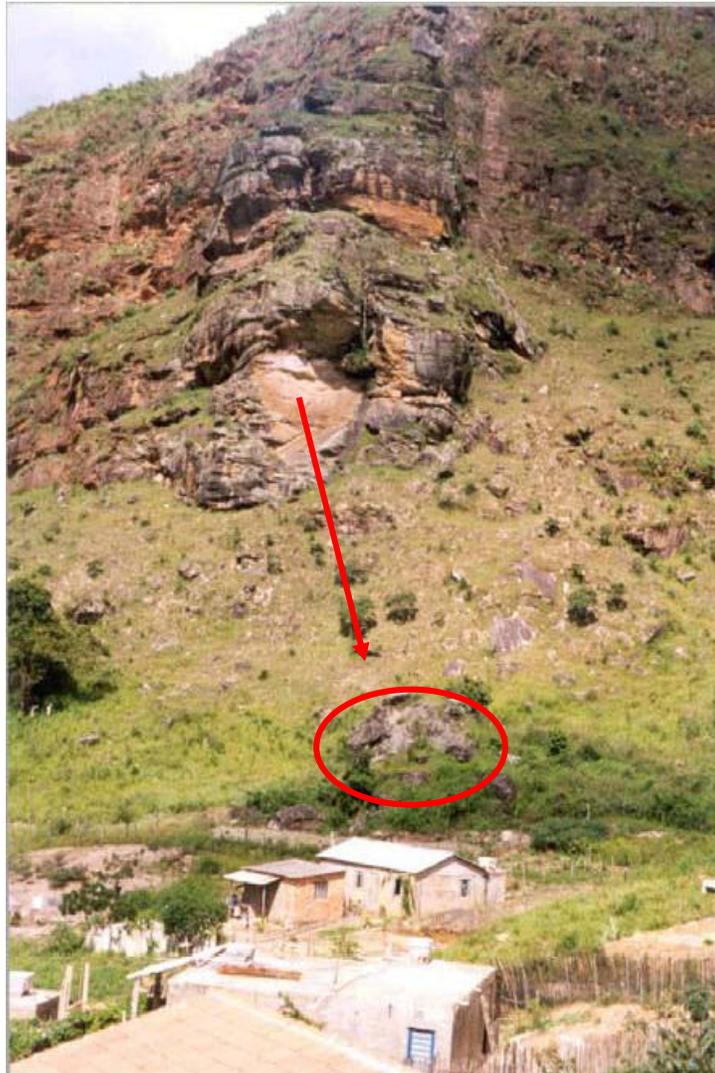


Figura 3a: Queda de blocos no bairro de Santa Rita de Cássia, Mariana (MG), uma localidade com alta suscetibilidade de novas quedas (Sobreira, 2001).

Já o rolamento dos blocos (figura 3b) nada mais é do que o movimento ao longo de superfícies inclinadas, podendo os blocos inicialmente estar imersos em matriz em solo, destacando-se dos taludes e encostas de apoio por algum processo de magnitude tal que os faça mover-se novamente (Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998). Tombamento e deslocamento estão relacionadas a

estruturas geológicas das rochas tais como acamamento, xistosidade, mas caso se dêem em queda livre, também podem ser tratadas como casos particulares de queda de blocos.



Figura 3b: Rolamento de blocos próximo a estrada de terra em Adrianópolis (PR) em 2005. Fonte: CPRM.

Muitos autores, para fins de simplificação, englobam todas as espécies de movimentos de blocos rochosos na nomenclatura de "queda de blocos", ou seja, "*rockfall*". Até porque dificilmente ocorre apenas a queda livre ou apenas o rolamento. A depender do perfil topográfico no qual se encontram, da massa dos blocos e das características do substrato, o movimento de queda se dá pela combinação de queda livre, saltação e rolamento de blocos (figura 4).

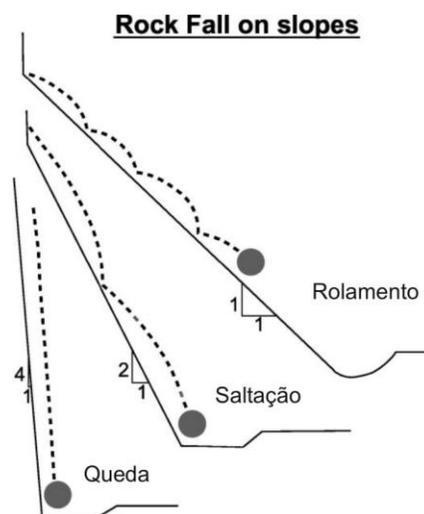


Figura 4: Trajetória dos movimentos de queda, saltação e rolamento em diferentes tipos de taludes (Schweigl *et al.*, 2002).

O destacamento do bloco do afloramento e sua queda se dão pela evolução dos intemperismos físico, químico e biológico nas discontinuidades existentes nas rochas, tais como falhas, fraturas, acamamento, bandamento e xistosidade (Fernandes, 2010). As características destas estruturas (atitude, persistência, rugosidade, abertura, preenchimento, entre outras) podem contribuir de maneira decisiva para a ocorrência de quedas ou até fornecer o atrito e coesão necessários para retardá-las ou impedi-las. De acordo com Vargas *et al.* (2004) *apud* Fernandes (2010) a propagação dessas discontinuidades através do maciço está relacionada com alguns fatores, como por exemplo, a pressão exercida pela água entre as paredes de juntas ou consideráveis flutuações térmicas que, eventualmente, podem provocar a propagação das fraturas pré-existentes e a deflagração dos movimentos do tipo queda. Fernandes (2010) cita ainda vários outros exemplos de causas de queda, como o intemperismo diferencial, juntas sub-horizontais, escavação excessiva ou excesso de desmonte a fogo de um maciço, congelamento de água nas juntas, e juntas de baixa resistência.

Regiões montanhosas de clima temperado, onde predomina o intemperismo físico de dilatação e contração de discontinuidades, estão bastante suscetíveis a teste tipo de movimento, como a região dos Alpes que abrange vários países da Europa e também em Hong Kong (Chau *et al.* 2003) onde o clima é subtropical com elevadas precipitações, devido aos ciclones tropicais, tendendo à temperado na metade do ano. No Brasil muito se fala sobre a suscetibilidade de certas regiões aos diversos movimentos de massa, até por já terem ocorrido no passado ou sido noticiadas, mas muito pouco sobre os parâmetros que controlam estes movimentos de massa, como se pode observar nos trabalhos de Dias & Herrmann (2002) e Sobreira (2001).

Apesar de se ter certo conhecimento sobre a suscetibilidade ao problema, talvez o movimento de queda de blocos seja o menos estudado e o mais difícil de prever, tanto o momento inicial de queda quanto o alcance dos blocos (Dias & Barroso, 2006). Uma das dificuldades que se apresentam na análise deste tipo de movimento de massa é o perigo da observação da queda enquanto a mesma ocorre e a mensuração do tamanho e volume exato dos blocos (Whalley, 1984).

Devido a esta dificuldade, estudos foram feitos por meio de simulações em laboratório e simulações em modelos computacionais (Chau *et al.*, 2002) e baseados em observações de curtos espaço de tempo no campo (Luckman, 1976; Douglas, 1980; Gardner, 1983 *apud* Fernandes, 2010).

De acordo com Dias & Barroso (2006), em regiões habitadas ou rodovias suscetíveis à queda de blocos, este movimento de massa pode ser altamente destrutivo se houver choque dos blocos com construções ou equipamentos urbanos. A força impulsiva do choque (\vec{F}) é igual à variação do momento linear (\vec{dp}) da partícula durante o infinitesimal intervalo de tempo do choque (dt), como é mostrado na equação 1:

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

Sendo \vec{p} o impulso do bloco, que é função da sua massa (m) e velocidade (\vec{v}) (equação 2), mesmo que o bloco não tenha massa muito grande, seu impulso apresenta valor elevado, pois em geral, a velocidade é altíssima. Em linhas gerais, isto quer dizer que se o bloco atingir uma moradia num primeiro momento pode tomar impulso e atingir outras moradias consecutivas, causando muitas perdas materiais e humanas.

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

Para evitar perdas sócio-econômicas nas áreas de risco de queda de blocos, a medida mais segura seria a realocação dos moradores que nela habitam para áreas sem risco, o que ocasiona tanto transtornos para os moradores, como ônus para os cofres públicos. Quando há espaço suficiente entre as residências e o talude, podem ser feitas a remoção de blocos através de desmonte ou construídas estruturas de contenção, como telas metálicas (Filho & Virgili, 1998), muros de impacto, banquetas, valas, diques e túnel falso (Spang, 1987 *apud* Hoek, 2006). Apesar de que, mesmo para estas medidas mitigadoras serão

necessários estudos e simulações do alcance dos blocos, a fim de definir qual seria a mais cabível e suficiente. Outro modo seria uma barreira natural de árvores entre os blocos/afloramento e as moradias, como foi feito em *Saint Martin le Vinoux*, França (Corominas, 2005 *apud* Fernandes, 2010).

1.2. PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE

Para uma análise dos efeitos de queda de blocos, devem ser consideradas principalmente as características mecânicas do bloco e da superfície do terreno por onde o bloco se desloca (Dias & Barroso, 2006). As características do bloco estão intrinsecamente relacionadas ao tipo de rocha intacta e ao seu grau de alteração, as quais são expressas pelo valor da massa específica, além da eventual presença de descontinuidades nos blocos. Quanto à superfície por onde o mesmo se desloca deve-se conhecer morfologia dada pelo mapeamento topográfico da região, a existência de barreiras ou não em sua trajetória e as características mecânicas das unidades geotécnicas por onde o bloco passar, que no caso de queda e rolamento de blocos, serão dadas pelo coeficiente de atrito ou pelo valor correspondente à tangente do ângulo de atrito e pelo coeficiente de restituição (ou repique) segundo Carnevale (1991) e Dias & Barroso (2006).

1.2.1 Coeficiente de restituição (e)

Este parâmetro é considerado o de mais difícil obtenção dentre os utilizados para a análise do alcance de blocos (Stevens, 1998). Sabe-se que a colisão entre o bloco e cada unidade geotécnica (solo, solo com vegetação, depósito de tálus, afloramento rochoso, rochas calcáreas, entre outras) apresenta valores de coeficientes de restituição diferentes, dentro de uma faixa de valores. Além disso, é uma variável adimensional, o que faz com que sua pesquisa seja de caráter experimental, mas que tenha ao mesmo tempo, a tarefa de ser plausível para todas e quaisquer situações reais.

O coeficiente de restituição (e) corresponde à energia cinética dissipada em sucessivos choques entre corpos sólidos e é obtido pela razão entre as velocidades depois (V_{n+1}) e antes (V_n) do impacto, como mostra a equação 3:

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

O valor do coeficiente de restituição pode variar de 0 a 1. Numa *Colisão Perfeitamente Inelástica*, isto é, quando $e=0$, uma partícula solta a uma altura h_1 da superfície, ao se chocar com ela, permanece na superfície, como mostra a figura 5A. Isto quer dizer que toda a energia cinética da partícula é dissipada durante o choque, não tendo energia para voltar a sua altura inicial nem sequer a uma altura menor do que a inicial. Já numa *Colisão Perfeitamente Elástica*, quando $e=1$, a partícula solta a uma altura h_1 se choca com a superfície e volta a sua altura inicial (h_2), indicando que não houve nenhuma perda de energia cinética (figura 5B) (Dias & Barroso, 2006; Fernandes, 2010).

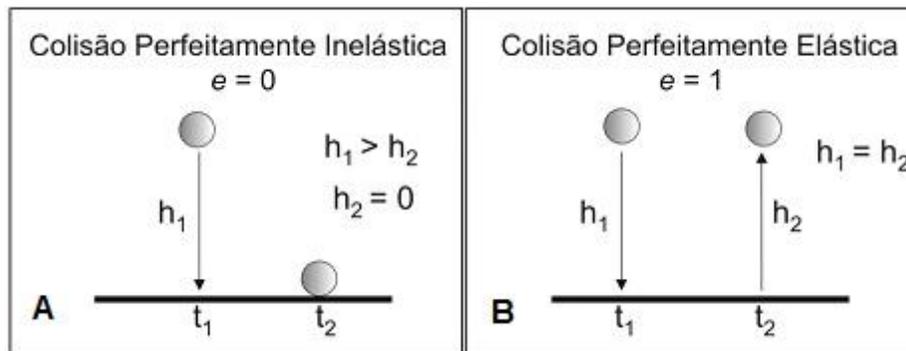


Figura 5: A) Colisão Perfeitamente Inelástica, com $e=0$ e B) Colisão Perfeitamente Elástica, com $e=1$ (Dias & Barroso, 2006).

Os casos em que $e=0$ e $e=1$ ocorrem sob condições muito especiais. Segundo Imre *et al.* (2008), toda a energia absorvida numa deformação elástica, não poderá ser totalmente recuperada em seguida, quando ocorre a descarga de energia. Estes pesquisadores (*ibid.*) sugerem inclusive uma definição para

coeficiente de restituição baseada na própria deformação elástica, na qual este parâmetro seria a razão entre a energia elástica investida durante uma carga (absorção de energia) e recuperada durante uma descarga (liberação de energia).

Logo, no caso do fenômeno natural de quedas de blocos, o coeficiente de restituição assume valores intermediários ($0 < e < 1$), dita *Colisão Parcialmente Inelástica*, pois há perda gradual de energia à medida que ocorrem as colisões contra a superfície, sendo que a cada choque a altura alcançada será menor do que a anterior e chegará um momento onde a altura será zero, o bloco não terá mais energia e, portanto, não se moverá mais.

Quando a colisão ocorre numa superfície inclinada (figura 6), o coeficiente de restituição, assim como qualquer vetor, se divide em duas componentes: o coeficiente de restituição normal (e_n) e o tangencial (e_t).

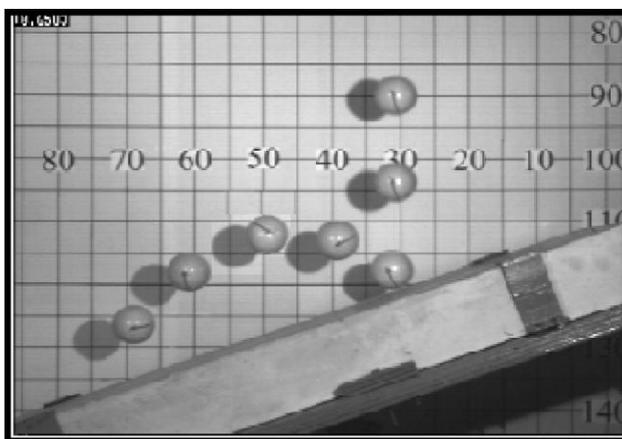


Figura 6: Experimento realizado por Chau *et al.* (2002). Fotografia mostrando uma sequência de posições da queda de uma esfera sobre uma superfície inclinada. As figuras da esfera em vários tempos são superpostas em uma só fotografia com o objetivo de compreender a trajetória da mesma.

Assim, em função da inclinação do talude com a horizontal (i), do ângulo que o vetor de velocidade (v) faz com a horizontal (α), da altura de queda do bloco (h_n) e da altura máxima alcançada pelo bloco após o impacto com a superfície (h_{n+1}) como mostra o esquema da figura 7, pode-se estabelecer relações matemáticas que expressam os coeficientes de restituição normal e tangencial. Tais relações são dadas pelas equações 4 e 5 (Carnevale, 1991).

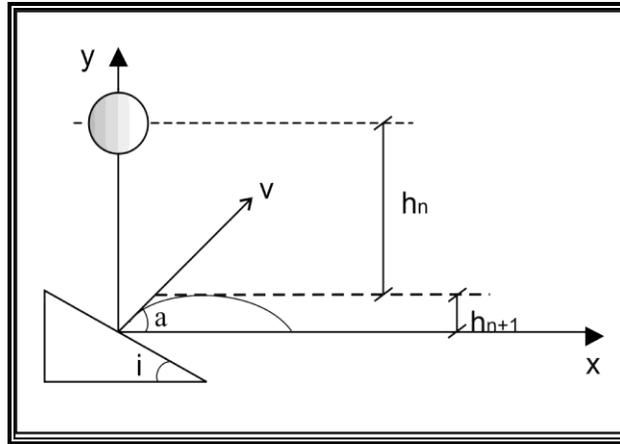


Figura 7: Ilustração demonstrando as componentes da queda e impacto de uma esfera com uma superfície inclinada (Modificado de Carnevale, 1991).

$$(4) \quad e_{normal} = \frac{\text{sen}(a+i)}{\text{sen } a \cdot \text{sen } i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}}$$

$$(5) \quad e_{tan\ gencial} = \frac{\text{cos}(a+i)}{\text{sen } a \cdot \text{sen } i} \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}}$$

Entretanto, para cada impacto que o bloco sofrer numa situação real, se dará em diferentes ângulos de inclinação do talude, bem como em diferentes ângulos do vetor velocidade – que poderão ser menores, se progressivamente perderem energia, ou maiores, se sofrem um impulso dado por outro impacto – assim como diferentes alturas, as quais diminuem com a perda de energia do bloco.

Para a realização de uma retrossimulação de uma situação real, fazendo com que os parâmetros envolvidos sofram variação conforme a necessidade requerida é imprescindível a utilização de *softwares* específicos para este fim. Além disso, em regiões habitadas, onde se faz necessário este tipo de estudo, seria impossível a realização de simulações *in situ* sem causar riscos à população, de modo que, mais uma vez, justifica-se a necessidade de um modelo computacional que simule tal situação real.

2. RELEVÂNCIA E OBJETIVO DO ESTUDO

Nos últimos anos têm sido reportadas catástrofes devidas a movimentos de massa, principalmente na região sudeste onde a morfologia das Serras do Mar e da Mantiqueira configuram *trends* de encostas WSW-ENE, com substrato rochoso recoberto por finas camadas de solo facilmente erodíveis quando submetidas a determinados processos naturais, tais como chuvas intensas, e antrópicos, como cortes, aterros e remoção da vegetação nativa.

O principal fator que torna os movimentos de massa mais do que simples agentes modeladores do relevo, isto é, um agente causador de perdas humanas e materiais, é a ocupação desordenada de encostas, a crescente favelização (Fernandes, 2010) e a falta de iniciativa governamental para evitar que pessoas ocupem áreas de risco por meio de fiscalização responsável e periódica, ou mesmo remobilizá-las para um local geomorfologicamente seguro, quando a ocupação já existir nas referidas áreas de risco (Baptista, 2005).

O município de Petrópolis, localizado no Estado do Rio de Janeiro sobre as Serras do Mar e Serra dos Órgãos é uma área extremamente suscetível a estes movimentos (Baptista *et al.*, 2005), principalmente a escorregamentos e quedas de blocos (Baptista, 2005). A partir da década de 80 a urbanização na cidade de Petrópolis tem se dado de forma acelerada e desordenada (Guerra *et al.*, 2007). A ocupação tomou conta até de parte da Área de Preservação Ambiental – que recobre cerca de 90% do município (Reimer, 2006), que foi a primeira APA criada no Brasil – e tem sido a responsável por sua degradação. Segundo a lei 6.766/79, que discorre sobre o parcelamento do solo urbano, em locais com declividades maiores de 45% não deve haver nenhum tipo de ocupação, sendo que loteamentos e desmembramentos urbanos só serão autorizados em declividades até 30%. Entretanto, mais de 70% da APA, de acordo com Baptista *et al.* (2005), apresenta declividade acima de 30%, e parte das ocupações, de fato, se localizam nesta região.

No distrito de Cascatinha (2º distrito), há uma tendência para a ocupação desordenada, sem qualquer tipo de estudo geotécnico e ambiental. A construção de moradias está se espalhando cada vez mais sobre encostas e topos de morro, reforçada pela cornurbação com o distrito-sede Petrópolis (Guerra *et al.*, 2007). Desde a década de 60 foram relatados mais de 1000 eventos catastróficos, onde a quantidade de movimentos de massa é maior quanto maior é a quantidade de habitantes no distrito (figura 8) (Oliveira *et al.*, 2003 *apud* Fernandes, 2010).

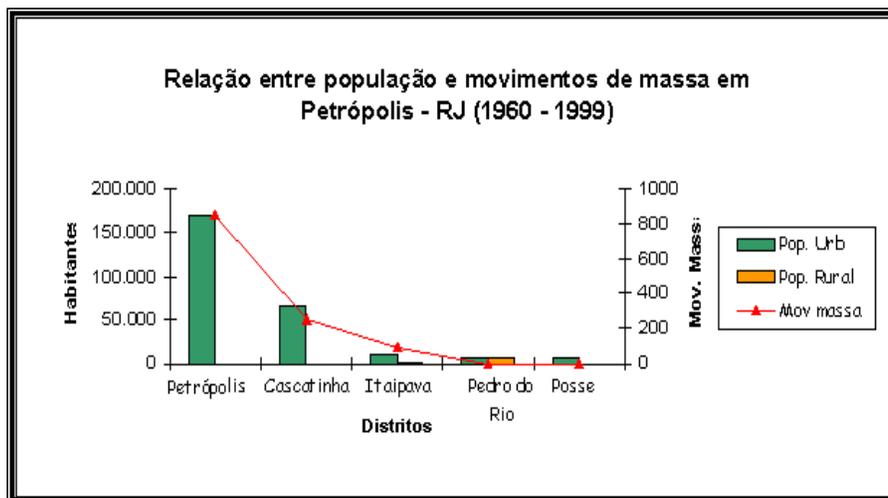


Figura 8: Gráfico demonstrando a relação entre os movimentos de massa e a densidade de habitantes de cada distrito da cidade de Petrópolis entre 1960 e 1999 (Oliveira *et al.*, 2003 *apud* Fernandes, 2010).

Além da ocupação, sabe-se que chuvas intensas são grandes deflagradoras da maior parte dos movimentos de massa. Gonçalves (1998) observa em seu estudo que o registro dos movimentos de massa possui nítida relação com a pluviosidade média. A maior parte das ocorrências de movimentos de massa se sucedeu numa análise feita de 1960 a 1997, entre os meses de novembro e março, justamente aqueles onde a pluviosidade média ao mês foi alta, isto é, maior que 60mm de chuva.

De acordo com o Ministério das Cidades *apud* Reimer (2006), no período de 1988 e 2003, Petrópolis apresentou 258 óbitos devido a catástrofes decorrentes de movimentos de massa, enquanto no mesmo período, outras cidades com características ambientais semelhantes, tais como Teresópolis (RJ) e

Campos do Jordão (SP), apresentaram respectivamente 29 e 10 mortes. Na catástrofe ocorrida em janeiro de 2011, na Região Serrana do Rio de Janeiro, que abrange os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo, entre outros menores, foram contabilizados mais de 60 mortos apenas na cidade de Petrópolis. Nos outros municípios citados, este número ainda foi maior.

No período entre 1960 a 1999 ocorreram 1.244 notificações de movimentos de massas no município. Dentre estes, 43 registros corresponderam à queda de blocos. Estes números mostram que houve um súbito aumento de notificações de quedas de blocos, pois nas décadas de 60, 70 e 80 a porcentagem de sua ocorrência deste tipo de movimentos de massa era de 3%, já na de 90 subiu para 14%, segundo Oliveira (2003 *apud* Ribeiro, 2008). Visto que o movimento de queda não está intrinsecamente relacionado a intensidades das chuvas, pode-se supor que este aumento, está relacionado, na verdade, com o aumento da ocupação de regiões suscetíveis a este movimento, o que é ainda mais preocupante já que poderia ser evitado.

Diante da situação em que se encontra o município de Petrópolis, principalmente no distrito de Cascatinha, o bairro da Glória, caracterizado por falta de planejamento urbano e ocupação em área de risco, e ao crescente número de registros de queda de blocos, é necessário conhecer as características da região, a fim de se elaborar um plano para solucionar ou mitigar os problemas. É indispensável a delimitação da área de risco, a qual é suscetível ao alcance dos blocos rochosos. Para tanto, também é necessário estudar os parâmetros que os influenciam em sua trajetória ao longo da encosta. Como consequência, o objetivo do trabalho é obter o intervalo de valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial relacionados às rochas e solos da localidade estudada, composta por afloramento rochoso e depósito de tálus, pois este é o parâmetro menos conhecido na literatura e de difícil obtenção como já foi anteriormente observado.

A obtenção destes valores poderá ainda ser aproveitada para estudos em outras áreas que contenham superfície formada por depósitos de tálus e afloramentos rochosos, constituindo, portanto um padrão para análises.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área onde o estudo foi realizado localiza-se no 2º distrito da cidade de Petrópolis (figura 9), Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, no bairro da Glória. A área também está situada dentro da APA Petrópolis, a primeira Área de Proteção Ambiental criada no Brasil. Foi criada em 1982 pelo Decreto Federal 87.561 e oficializada em 1992 com a finalidade de preservar a Mata Atlântica remanescente. A APA Petrópolis apresenta 592,25 Km² e além de Petrópolis, inclui terras dos municípios de Duque de Caxias, Guapimirim e Magé (Guerra *et al.*, 2007).

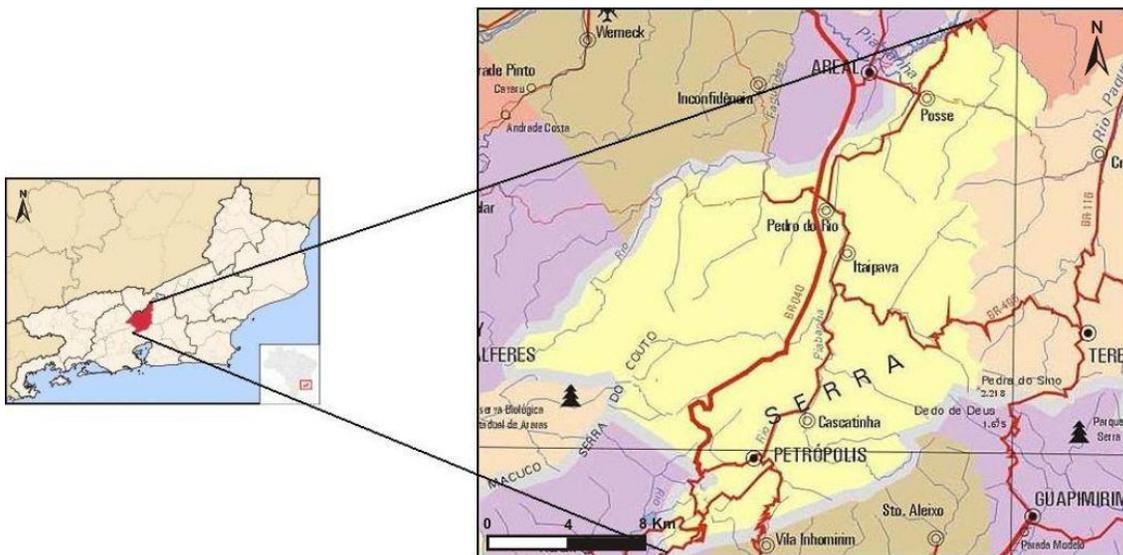


Figura 9: Localização e limites políticos do município de Petrópolis.

A APA constitui uma modalidade de Unidade de Conservação e sua delimitação prevê o uso do solo e das águas de maneira sustentável, podendo ser construídas residências e desenvolvidas atividades comerciais, desde que as mesmas não degradem a área. Porém, não é isso que vem ocorrendo: a ocupação desordenada devido à falta de planejamento urbano e ainda atividades industriais e agrícolas poluidoras têm se proliferado na região e estão sendo o principal motivo de sua contaminação e destruição (Ibama, 2002).

A principal via de acesso para a região é a BR-040, a rodovia Washington Luís (figura 10). A partir do centro de Petrópolis, para se chegar à região estudada deve-se seguir pela Rodovia RJ-134, entrar na Estrada Mineira e posteriormente na Rua Nossa Senhora da Glória.

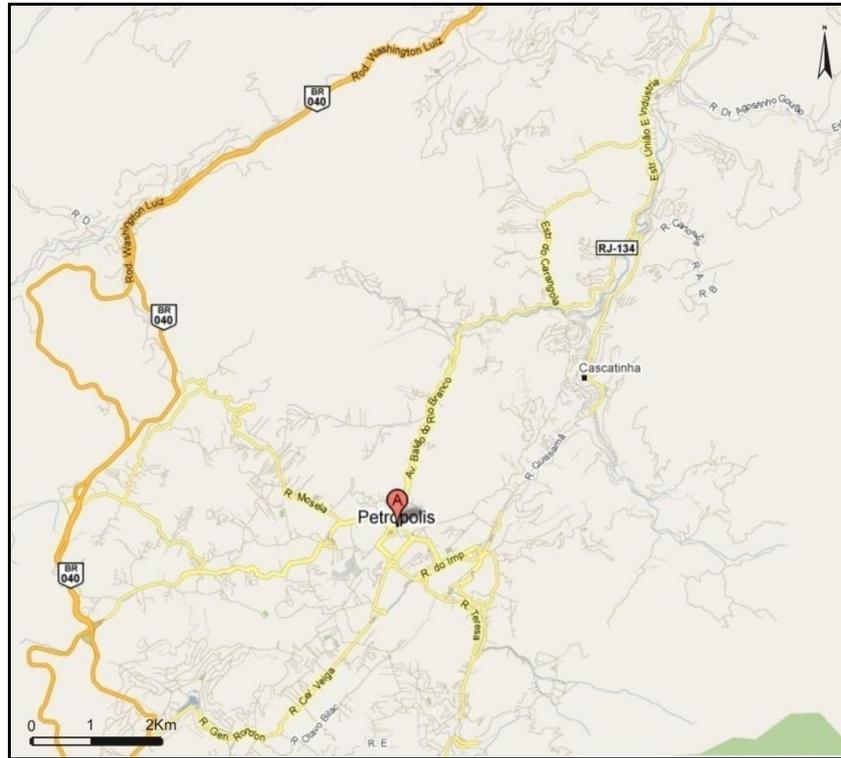


Figura 10: Mapa rodoviário mostrando as principais vias de acesso a região estudada; a BR-040 e a RJ-134 (Fonte: Google Maps).

A geologia de Petrópolis é constituída por migmatitos e granitóides pré-Cambrianos, que fazem parte do Complexo Rio Negro (Tupinambá, 1999). A área estudada está inserida na unidade Batólito Serra dos Órgãos, de idade Neoproterozóica, que é formada por granitos e granodioritos gnaisses (DRM, 1981 *apud* Reimer, 2006). De fato, afloram na área hornblenda-biotita gnaisses intensamente fraturados e migmatizados, encobertos em muitos locais por solo residual e depósitos de tálus, este último representado por blocos centimétricos a métricos. As rochas que em toda a região de Petrópolis se encontram intensamente falhadas e fraturadas conferem um aspecto que oferece controle para a bacia hidrográfica local – a bacia do Rio Piabanha, que apresenta padrão de drenagem retangular dendrítico (Gonçalves, 1998) – e também é um dos

responsáveis pela incidência de quedas de blocos e outros movimentos de massa, de acordo com Guerra *et al.* (2007).

Petrópolis está situada na Serra do Mar, onde é localmente chamada de Serra da Estrela e Serra dos Órgãos. A área de estudo se encontra neste último domínio cuja geomorfologia é caracterizada por relevo acidentado (figura 11), com desníveis altimétricos que variam de 770 a 1190m (RADAM, 1983), morros alongados e vales em V retilíneos encaixados em descontinuidades NE e NW (DRM, 1981 *apud* Reimer, 2006). Parte da ocupação da APA está situada indubitavelmente em declividades que a lei proíbe (figura 12 e 13), representando um risco. Porém, a população que ocupa estas áreas nem sequer tem conhecimento desta proibição.



Figura 11: Visão panorâmica da encosta onde foi feito o estudo de queda de blocos.

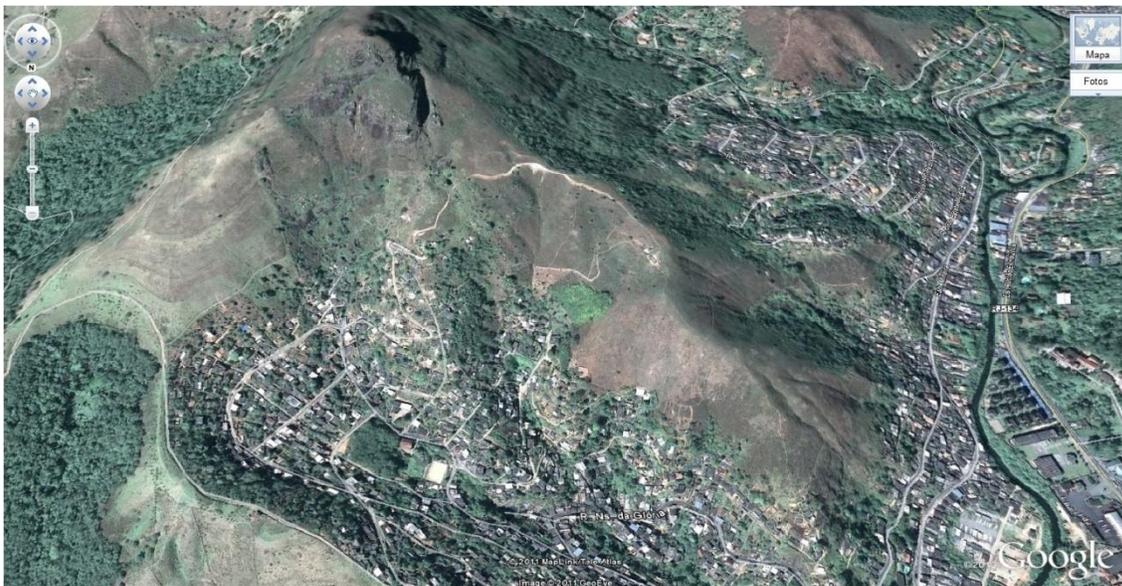


Figura 12: Vista aérea do Bairro da Glória através de imagens de satélite convertidas a imagens do tipo “sobrevôo” pelo *software Google Earth*, fornecendo uma ideia da dimensão do morro e da inclinação onde as moradias se encontram.



Figura 13: Algumas moradias bem próximas ao afloramento rochoso e blocos rolados.

De acordo com classificação de Nimer (1989 *apud* Gonçalves, 1998), Petrópolis apresenta clima mesotérmico brando superúmido. A precipitação média

anual é de 2200mm, com temperaturas inferiores a 18°C no inverno (julho) e de 21°C no verão (fevereiro) e a umidade atmosférica média anual é de 83%. A vegetação existente na área de Petrópolis é de Mata Atlântica, isto é, Floresta Ombrófila Densa (Gonçalves, 1998). Entretanto, na área estudada, este tipo de vegetação não ocorre visto que a região foi desmatada por causa da ocupação desordenada. Ocorrem esparsos arbustos de médio porte e vegetação rasteira.

4. METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho consistiu numa pesquisa bibliográfica sobre a área de estudo e sobre o coeficiente de restituição, parâmetro que é o principal objeto desse estudo. Foram coletadas informações em livros, artigos científicos, teses e dissertações, dentre outras publicações, de modo a se munir e se atualizar sobre o tema do estudo.

A partir da foto aérea na escala de 1:8.000, confeccionada pela CERJ/MONTREAL em 1999, e georreferenciamento da área de estudo feita por Ribeiro (2008), foi confeccionado o mapa geotécnico da área a ser analisada, seguindo recomendações da UNESCO-IAEG (1976), tendo por base também o mapa geotécnico produzido por Ribeiro (2008).

Numa visita de campo, foi utilizado o DGPS para a confecção do mapa topográfico da região. Os dados foram processados no *software* ArcGis 9.3 e acoplados ao mapa geotécnico já confeccionado. Também no campo foram coletadas amostras de solo e rocha para a realização de análises.

A partir da amostra de solo coletada no campo foram realizados ensaios para a determinação dos Limites de Atterberg e ensaios granulométricos. A determinação do Limite de Liquidez (LL) foi executada de acordo com a norma NBR 6459 da ABNT (1984). O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado de acordo com os procedimentos listados na norma NBR 7180 da ABNT (1984). Posteriormente, com os dados obtidos a partir destes ensaios foi calculado o Índice de Plasticidade (IP) pela equação 6. Deste modo, posteriormente, foram plotados os valores de IP e LL, na Carta de Plasticidade (ou Carta de Casagrande) para determinar a classificação do solo, como define o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

$$(6) \quad IP(\%) = LL - LP$$

Os resultados da análise granulométrica, feita através de peneiramento conjunto com sedimentação, também foram plotadas num gráfico de Curva

Granulométrica, de modo a se obter as composições granulométricas percentuais do solo.

Mediante análise petrográfica megascópica e microscópica das amostras de rocha coletadas e representativas da área de estudo feita por Ribeiro (2008) foi determinada a litologia do afloramento rochoso.

As amostras de rocha também foram utilizadas para a determinação do ângulo de atrito pelo o *Tilt Test* – um ensaio que utiliza um dispositivo que possibilita a inclinação dos corpos de prova até um determinado ângulo em que o corpo de cima, sem amparo, desliza sobre os outros, fornecendo o ângulo-limite de atrito (figura 14) – e para a determinação da massa específica (figura 15), com base na técnica de saturação das referidas rochas, seguindo os procedimentos definidos pela norma NBR 12766 da ABNT (1992). Os procedimentos desta técnica consistem, resumidamente, na lavagem dos corpos de prova e secagem dos mesmos em estufa por um período de 24h. Depois, as amostras são pesadas numa balança, momento em que se nota a massa seca (M_s) de cada um. Posteriormente, os corpos de prova são colocados num recipiente com água destilada até ficarem submersos, onde são deixadas por um novo período de 24h, para ficarem saturadas. Após este tempo, deve-se pesar novamente e anotar suas respectivas massas saturadas (M_{sat}). Por fim, pendura-se o corpo de prova na balança, de modo que o mesmo fique submerso com água destilada porém, sem qualquer contato com o fundo do recipiente (figura 15), anotando-se assim, a massa submersa (M_{sub}) de cada amostra. Através da equação 7 é possível determinar a massa específica (ρ) dos corpos de prova e fazer uma média aritmética.

$$(7) \quad \rho = M_s / (M_{sat} - M_{sub})$$



Figura 14: Medida do ângulo de atrito básico através do ensaio de *Tilt Test*.



Figura 15: Determinação da massa submersa através de dispositivo acoplado no fundo da balança.

Em seguida, a partir da foto aérea, foram escolhidos 15 blocos e deduzidas suas prováveis trajetórias desde onde se destacaram do afloramento rochoso até onde se encontram estagnados conforme mostra a foto. Estes caminhos prováveis, onde se deram os rolamentos dos blocos foram deduzidos a partir da forma das curvas de nível, traçando-se sempre um caminho ortogonal às mesmas (figura 16).

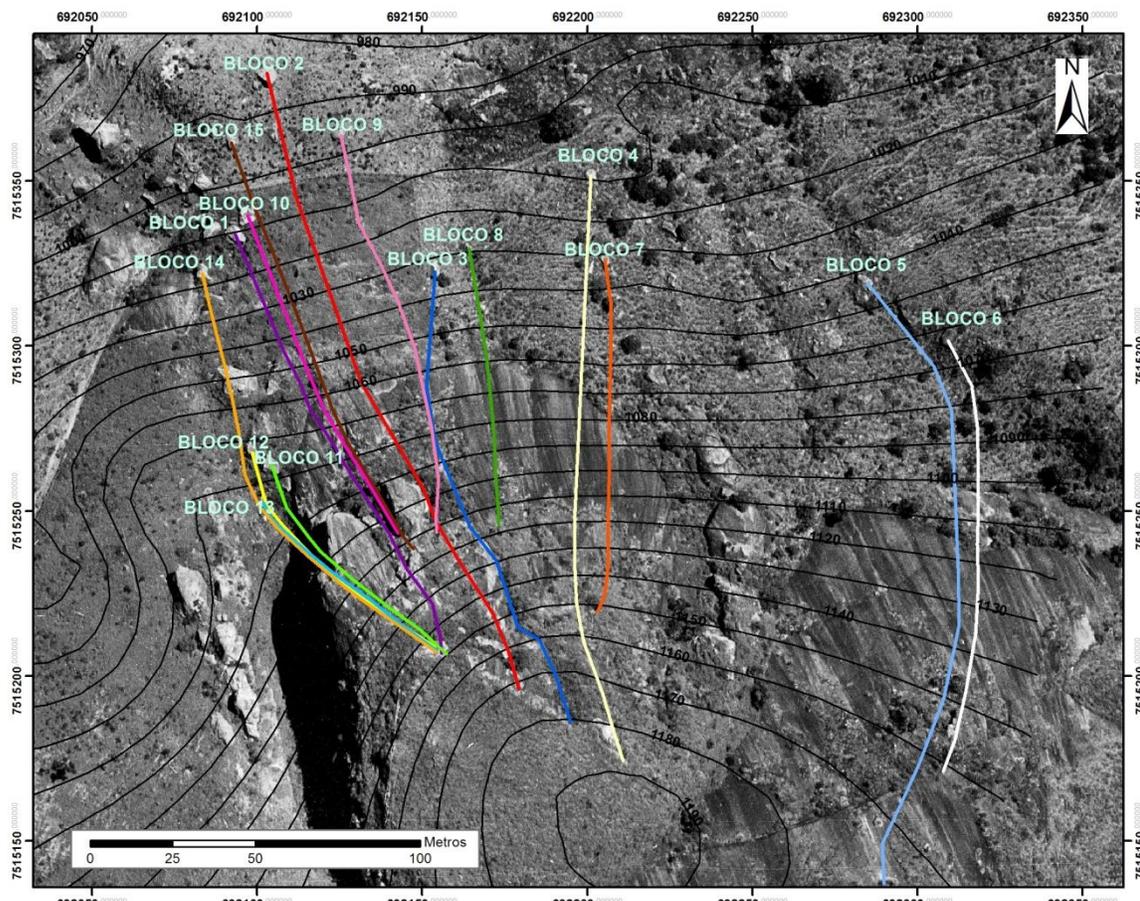


Figura 16: Traçado das trajetórias de cada bloco. Cada traçado apresenta uma cor diferente apenas para fins de diferenciação.

Baseando-se nas curvas de nível foram feitas seções das trajetórias de cada bloco, com os trechos correspondentes de cada unidade geotécnica identificada, que posteriormente foram inseridas no *software* RocFall (figura 17) para o cálculo do alcance dos blocos.

Além as seções e dos coeficientes de restituição normal e tangencial que variam conforme a unidade geotécnica, os dados que devem ser inseridos no RocFall são: as velocidades horizontal e vertical do bloco no instante inicial da queda, a massa do bloco e a velocidade angular (figura 18). Para realizar a simulação virtual também deve-se estabelecer o local, na seção, de onde o bloco supostamente partiu, e o local onde ele parou, que é um dado real, observado através da foto aérea.

Para fazer o cálculo da massa, foram medidas duas dimensões do bloco sobre a foto aérea – a maior possível e a menor possível utilizando a ferramenta régua do *software* ArcGis 9.3. Depois, foi feita a média aritmética das dimensões, que representam o diâmetro (d), e assim, foi estabelecido o raio ($r=d/2$) do bloco. É preciso determinar o raio porque o programa só faz os cálculos considerando os blocos como esféricos. O volume de cada bloco foi calculado com o auxílio da fórmula $V=4/3\pi r^3$ e a massa, através da fórmula $\rho = m/V$, visto que ρ , a massa específica já foi determinada na etapa anterior. Quanto às velocidades horizontal e vertical foi atribuído o valor de 0 m/s para todas as análises a fim de representar que o bloco partiu de um estado de repouso, e quanto à velocidade angular, foi fixado o valor de 0 rad/s para todas as análises com o objetivo de indicar que em todos os casos o movimento inicial foi o da queda do bloco (considerando que poderia também ter ocorrido o movimento de rolamento do mesmo ao longo da trajetória, circunstância que o próprio programa se encarrega de analisar por meio de cálculos matemáticos).

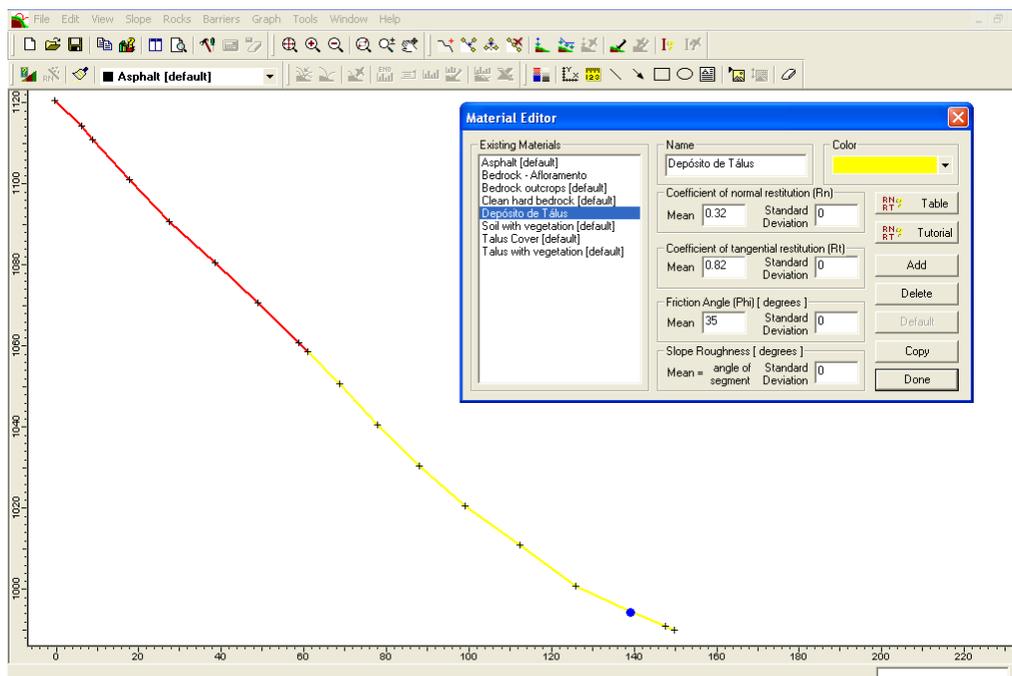


Figura 17: Seção da trajetória do bloco 15, onde é possível notar que o caminho que o bloco percorreu passa pelo afloramento rochoso (linha vermelha) e pelo depósito de tálus (linha amarela). As características físicas destas unidades geotécnicas, isto é, os coeficientes de restituição normal e tangencial e o ângulo de atrito também são definidas antes do processamento da análise.

	Mean	Std Dev.
Horizontal velocity [m/s]	0	0
Vertical velocity [m/s]	0	0
Mass [Kg]	104143	0
Angular Velocity [rad/s]	0	0

Figura 18: Valores relacionados às condições iniciais em que se encontrava o bloco requeridos pelo RocFall para a análise de movimento e alcance do mesmo.

Como foi dito, deve-se inserir valores de coeficientes de restituição, além das demais informações, para que o RocFall calcule o alcance dos blocos. A faixa de valores utilizada foi retirada da revisão bibliográfica que constituiu a primeira etapa do trabalho. A idéia do estudo é descobrir os valores de coeficiente de restituição através do método de aproximação. Isto significa que em alguns casos, nas simulações feitas pelo RocFall, o bloco vai saltar e rolar além da sua posição alcançada no campo e em outros casos o bloco irá parar antes do alcance visto em campo. O alcance que cada bloco teve para cada variação de valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial foi tabelado.

Com base nos valores de coeficientes de restituição relatados na literatura, foi feita a tabela 1, na qual se baseou os valores máximos e mínimos a serem inseridos no RocFall. Assim, foram feitas análises onde os coeficientes de restituição normal e tangencial, R_n e R_t , das unidades geotécnicas foram fixados em valores mínimos, intermediário(s) e máximos encontrados na literatura. Como se poderá observar adiante, o afloramento rochoso possui dois valores intermediários entre os mínimos e máximos de R_n e R_t , enquanto o depósito de tálus só apresenta um. Isso se deve ao fato desta primeira unidade possuir um intervalo muito grande entre os extremos, de modo que preferiu-se fazer duas interpolações para cobrir o máximo possível os valores de coeficientes de restituição, e conseqüentemente, os valores de alcances que seriam gerados.

TABELA DOS COEFICIENTES DE RESTITUIÇÃO NORMAL E TANGENCIAL DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS						
Depósito de Tálus						
Normal (R_N)		Tangencial (R_T)		Tipo/Autor		
0,30		0,33	0,83		0,87	Dep. de Talus e pouca vegetação/RocFall
0,30		0,33	0,80		0,83	Dep. de Talus e alguma vegetação/RocFall
0,28		0,36	0,78		0,86	Dep. de Talus / RocFall
0,28		0,36	0,76		0,84	Dep. de Talus com vegetação / RocFall
	0,32				0,82	Dep. de Talus /Hock (1987 <i>apud</i> Richards et al. , 2001)
	0,32				0,83	Dep. de Talus / Pfeiffer <i>et al.</i> (1993 <i>apud</i> Richards et al., 2001)
Afloramento Rochoso (<i>Bedrock</i>)						
Normal (R_N)		Tangencial (R_T)		Tipo/Autor		
0,33		0,37	0,83		0,87	Bedrock com pouco solo ou vegetação/RocFall
	0,50				0,95	Bedrock / RocFall
	0,35				0,85	Bedrocks coberto por grandes blocos / RocFall
	0,35				0,85	Bedrocks com superfície dura / RocFall
0,31		0,39	0,81		0,89	Bedrock / RocFall
	0,35				0,85	Bedrock / Hock (1987 <i>apud</i> Richards et al. , 2001)
	0,35				0,85	Bedrock com alguns Blocos/Pfeiffer <i>et al.</i> (1993 <i>apud</i> Richards et al., 2001)
	0,51				0,92	Bedrock/Azzoni & de Freitas (1995, <i>apud</i> Richards et al.,2001)
0,27		0,90	0,55		0,99	Bedrock/ Chau <i>et al.</i> (2002)

Tabela 1: Valores de coeficientes de restituição normal e tangencial de acordo com a bibliografia utilizada.

Logo, no afloramento rochoso os coeficientes foram fixados respectivamente em 0,27 e 0,55; 0,48 e 0,70; 0,69 e 0,85; e por fim, 0,90 e 0,99 e os do depósito de tálus foram variados em intervalos de 0,05. Da mesma forma, foi feito o inverso: os coeficientes normal e tangencial do depósito de tálus foram fixados, respectivamente em 0,28 e 0,76; 0,32 e 0,82; e ainda, 0,36 e 0,88; e os do afloramento, variados no mesmo intervalo de 0,05. Além disso, um exemplo de uma das tabelas confeccionadas pode ser observado na tabela 2.

Posteriormente, ao término da análise no RocFall e confecção das tabelas, aquelas que continham valores de alcance maiores ou menores que o alcance real dentro da seção confeccionada foram importadas para o *software* Surfer 8, onde foram obtidas curvas de isovalores para os alcances reais de cada bloco, em gráficos de coeficiente de restituição normal *versus* tangencial. A superposição dos gráficos que descrevem os alcances de dois ou mais blocos possibilitou a descoberta da faixa de coeficientes de restituição normais e tangenciais que se aplicam as unidades geotécnicas analisadas.

Seção 2.1 Rocha fixo											
Rocha	Rn = 0,27	Rt = 0,55	Rocha	Rn = 0,48	Rt = 0,70	Rocha	Rn = 0,69	Rt = 0,85	Rocha	Rn = 0,90	Rt = 0,99
Dep. De Talus			Dep. De Talus			Dep. De Talus			Dep. De Talus		
Rn	Rt	Alcance(m)	Rn	Rt	Alcance(m)	Rn	Rt	Alcance(m)	Rn	Rt	Alcance(m)
0,25	0,75	186,81	0,25	0,75	183,49	0,25	0,75	186,15	0,25	0,75	192,54
0,25	0,8	187,67	0,25	0,8	188,68	0,25	0,8	190,81	0,25	0,8	204,65
0,25	0,85	190,72	0,25	0,85	192,94	0,25	0,85	196,93	0,25	0,85	216,37
0,25	0,9	197,63	0,25	0,9	204,79	0,25	0,9	208,91	0,25	0,9	234,47
0,3	0,75	183,21	0,3	0,75	185,62	0,3	0,75	186,01	0,3	0,75	204,12
0,3	0,8	187,88	0,3	0,8	189,21	0,3	0,8	189,08	0,3	0,8	210,91
0,3	0,85	191,13	0,3	0,85	193,47	0,3	0,85	196,53	0,3	0,85	216,76
0,3	0,9	198,24	0,3	0,9	205,45	0,3	0,9	207,31	0,3	0,9	233,67
0,35	0,75	185,24	0,35	0,75	185,49	0,35	0,75	186,28	0,35	0,75	203,72
0,35	0,8	187,27	0,35	0,8	188,01	0,35	0,8	188,01	0,35	0,8	207,58
0,35	0,85	191,74	0,35	0,85	191,74	0,35	0,85	195,07	0,35	0,85	220,09
0,35	0,9	199,05	0,35	0,9	204,39	0,35	0,9	206,65	0,35	0,9	242,59
0,4	0,75	185,44	0,4	0,75	185,75	0,4	0,75	182,56	0,4	0,75	206,78
0,4	0,8	187,06	0,4	0,8	186,95	0,4	0,8	186,68	0,4	0,8	214,37
0,4	0,85	188,69	0,4	0,85	190,41	0,4	0,85	191,08	0,4	0,85	223,95
0,4	0,9	196,13	0,4	0,9	199,32	0,4	0,9	204,65	0,4	0,9	240,48

Alcance real: 212,08m

Tabela 2: Tabela da seção 2, com valores de Rn e Rt do afloramento rochoso fixados e do depósito de tálus variando com intervalos de 0,05.

5. RESULTADOS

Foram encontradas e delimitadas as unidades geotécnicas: afloramento rochoso (*bedrock*), depósito de tálus e solo residual. A figura 19 fornece tanto o mapa geotécnico quanto as curvas de nível da área estudada.

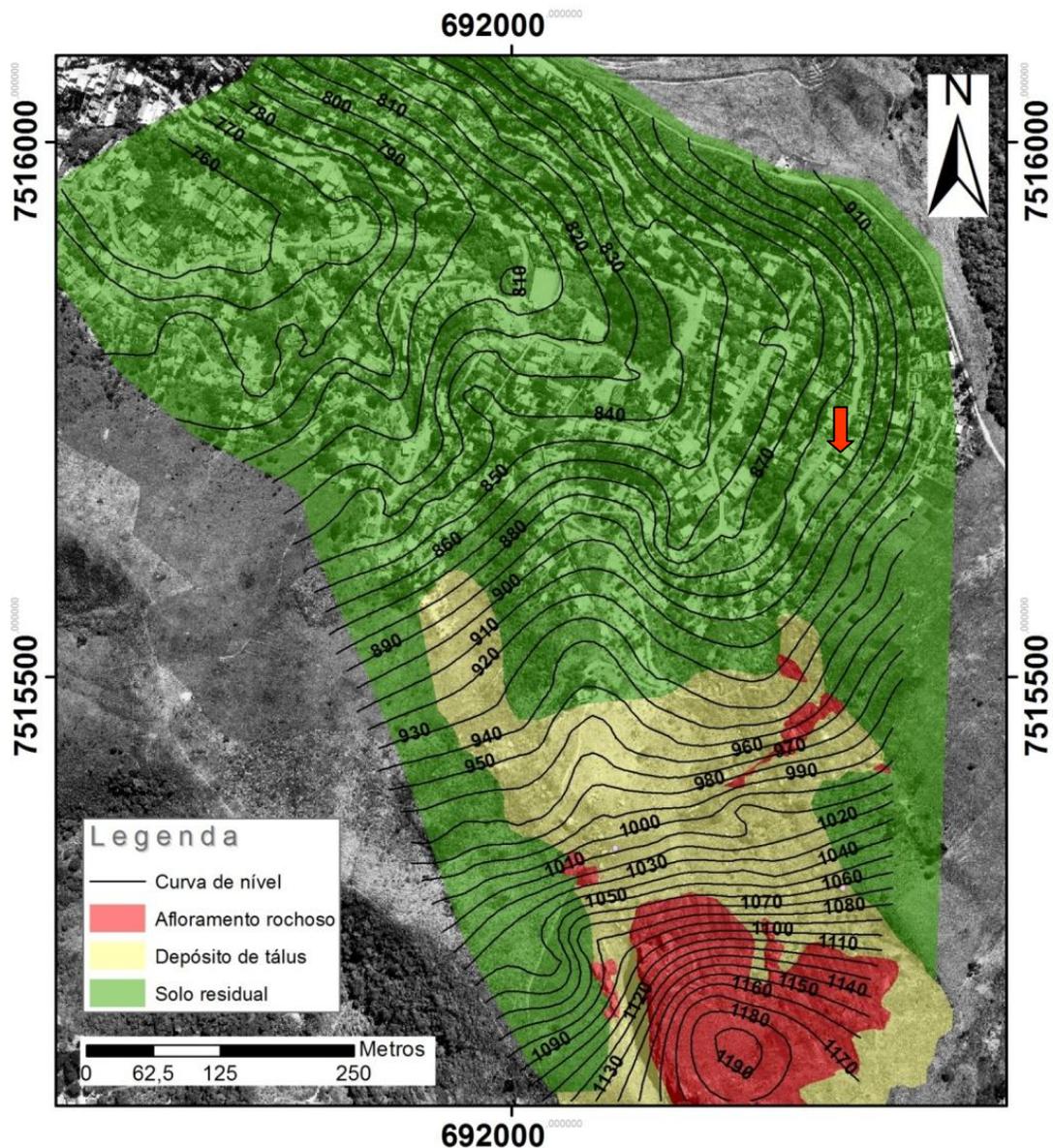


Figura 19: Mapa geotécnico da área com curvas de nível sobre a fotografia área georreferenciada (Modificado de Fernandes, 2010).

Como resultado da pesquisa bibliográfica sobre a faixa de valores de coeficientes de restituição atualmente adotados por pesquisadores, dados que foram encontrados principalmente Pfeiffer *et al.* (1993), Hock (1987), Azzoni & de Freitas (1995) *apud* (Richards *et al.* 2001), Chau *et al.* (2002) e RocFall (tabela 1). A partir da coletânea de valores feitas por meio destes autores, encontraram-se as seguintes valores máximos e mínimos de coeficientes de restituição normal (R_n) e tangencial (R_t):

- 1) Para o afloramento rochoso: R_n mínimo de 0,27 e máximo de 0,90; R_t mínimo de 0,55 e máximo de 0,99.
- 2) Para o depósito de tálus: R_n mínimo de 0,28 e máximo de 0,36; R_t mínimo de 0,76 e máximo de 0,87.

A localização da amostra de solo coletada está indicada pela seta laranja na figura 19. O solo apresenta Limite de Liquidez (LL) de 71%, Limite de Plasticidade (LP) de 29% e Índice de Plasticidade (IP) de 42%. Segundo a Classificação do SUCS (Sistema de Unificado de Classificação de Solos), plotando os valores do LL e IP na Carta de Plasticidade, encontramos que o solo é Argiloso de Alta Compressibilidade (CH) (figura 20). Ribeiro (2008) fez o mesmo tipo de análises para este solo e encontrou um solo Siltoso de Alta Compressibilidade (MH), também bem próximo ao limite o campo CH. Portanto, o solo é classificado como Argiloso de Alta Compressibilidade ou Siltoso de Alta Compressibilidade.

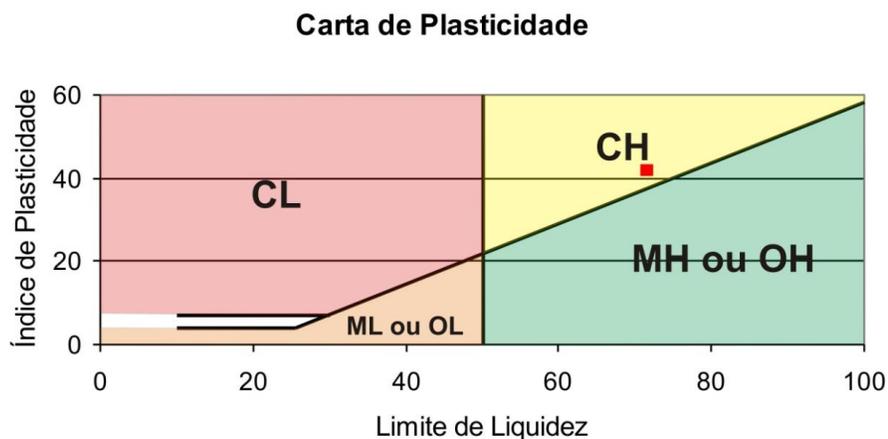


Figura 20: Carta de Plasticidade e representação em vermelho das características do solo da área estudada. Trata-se de um solo Argiloso de Alta Compressibilidade (CH).

A Curva Granulométrica (figura 21) também demonstra que o solo é predominantemente argiloso (43% de argila), apresentando também bastante areia média (29%), sua segunda composição granulométrica predominante.

O afloramento rochoso e os blocos são de gnaiss. Uma análise microscópica feita por Ribeiro (2008) na qual foi determinada sua composição modal, indica que trata-se de um Hornblenda-biotita gnaiss de granulação média e coloração acinzentada.

Por meio do *Tilt Test* foram feitas várias medidas do ângulo de atrito (quinze medidas ao todo), e então utilizou-se o software Excel para fazer uma média aritmética destes valores e o desvio padrão. A média foi de $35,20^\circ$, que foi arredondado para 35° visto que o RocFall trabalha com números inteiros, e o desvio padrão foi de apenas $1,26^\circ$, considerado pequeno, de modo que valores como 34° ou 36° para o ângulo de atrito não possibilitariam diferenças significativas na análise feita através do RocFall.

Curva Granulométrica

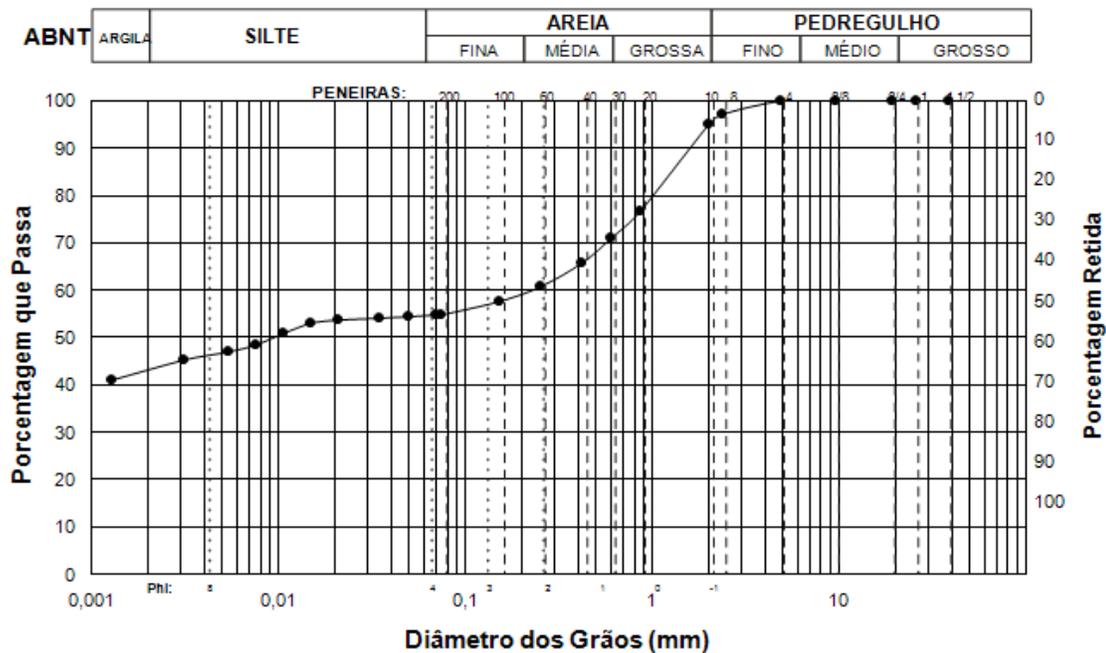


Figura 21: Curva granulométrica e composição granulométrica (%) resultantes do ensaio realizado com o solo residual.

O ensaio para a determinação da massa específica (ρ) e porosidade (n) foi feito com três amostras de rocha, como mostra a tabela 3. Feita a média aritmética foram obtidos os valores de $\rho=1,63 \text{ g/cm}^3$ e $n= 1,15\%$ (vide apêndice).

Amostra	Massa Seca (g)	Massa Saturada(g)	Massa Submersa(g)	n (%)	$\rho d(\text{g/cm}^3)$
1	394,55	397,51	156,35	1,23	1,64
2	343,68	345,3	146,39	0,81	1,73
3	427,41	430,25	167,58	1,08	1,63

Tabela 3: Valores obtidos através da técnica de saturação das três amostras de rocha (vide apêndice, pois o valor da massa específica encontrada não está de acordo com valores aceitáveis, conferindo erro experimental. Portanto, uma nova análise foi feita a fim de saber a dimensão deste erro e como afeta os valores de coeficientes de restituição encontrados).

A tabela 4 mostra os raios médios definidos a partir dos diâmetros medidos por meio da foto área, o volume, a massa específica obtida através do ensaio e a massa dos 15 blocos cujas trajetórias foram analisadas.

Nº do Bloco	Raio(m)	Volume(m^3)	Massa Específica(g/cm^3)	Massa(Kg)
1	2,66	78,84	1,63	128505,32
2	2,56	70,28	1,63	114550,27
3	1,74	22,07	1,63	35968,64
4	1,80	24,43	1,63	39819,31
5	2,42	59,37	1,63	96765,89
6	2,45	61,60	1,63	100409,42
7	1,54	15,30	1,63	24936,67
8	1,28	8,78	1,63	14318,78
9	1,96	31,54	1,63	51409,62
10	2,56	70,28	1,63	114550,27
11	2,96	108,63	1,63	177072,59
12	2,80	91,95	1,63	149882,29
13	1,62	17,81	1,63	29028,28
14	2,56	70,28	1,63	114550,27
15	2,48	63,89	1,63	104143,28

Tabela 4: Valores do raio de cada bloco (considerando uma média de suas dimensões), o volume, a massa específica genérica e a massa de cada bloco, dado necessário para a simulação no RocFall (vide apêndice).

Dos blocos e respectivas seções analisada no RocFall apenas 5 dos 15 tiveram alcances que puderam ser inseridos no Surfer (tabela 5), foram os de números 2, 9, 12, 13 e 15. Isto se deve ao fato de que nas outras seções, para

todas as variações de coeficientes de restituição feitas, os blocos rolaram para além do alcance real que eles obtiveram em campo e mais ainda: para além da seção construída, não permitindo contabilizar qualquer valor de alcance. Já estava previsto que pudesse acontecer este tipo de inexatidão, visto que a trajetória é inferida e o local de onde o bloco saiu também é hipotético, mesmo tendo sido buscados a trajetória e o ponto de partida inicial mais apropriados, tomando por base a morfologia da região. Já os blocos e trajetórias anteriormente enumerados apresentaram alcances menores e maiores que os de campo.

Bloco	Alcance (m)	Bloco	Alcance (m)
1	169,09	9	143,61
2	212,08	10	130,90
3	164,61	11	88,05
4	189,98	12	87,51
5	183,58	13	78,27
6	141,14	14	150,53
7	122,52	15	139,07
8	97,07	-	-

Tabela 5: Alcances apresentados pelos blocos no campo.

Deste modo, no Surfer se fez uma interpolação com os valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial e alcance simulado do bloco, confeccionando a curva do alcance real do bloco (arredondados para se trabalhar com números inteiros) para os valores exatos dos coeficientes de restituição normal *versus* tangencial que possibilitaram o referido alcance.

Os gráficos de da trajetória são então superpostos, e quando ocorre o cruzamento das curvas, isto indica que os valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial são coerentes visto que foram estes valores que possibilitaram o alcance real representado pelas curvas. Analisando-se as interseções de várias curvas será possível obter uma faixa mais restrita de coeficientes de restituição do que entre 0 e 1 (uma faixa muito ampla), ou do que a

ampla faixa divulgada na literatura para a superfície com a qual a rocha colidiu e rolou.

5.1 ANÁLISE DAS SEÇÕES NO SURFER

5.1.1 Para valores de coeficientes de restituição do afloramento rochoso (*bedrock*) fixados e variação dos coeficientes de restituição do depósito de tálus

GRÁFICO 1: Rocha fixada em $R_n=0,27$ e $R_t=0,55$ (figura 22); depósito de tálus variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,40$ e $0,75 \leq R_t \leq 0,90$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 9 (144m de alcance) e 15 (139m de alcance). Desta vez não foram analisados os blocos 2, 12 e 13 porque para estes valores de coeficientes fixados, eles não apresentaram alcances simulados menores e maiores que o alcance real, não permitindo que se fizesse a interpolação.

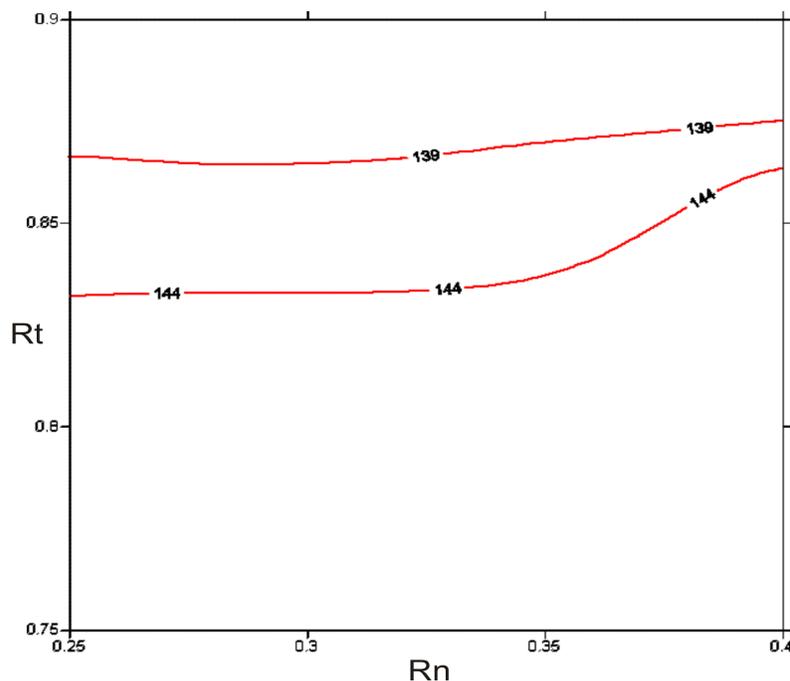


Figura 22: Gráfico de alcances para *bedrock* fixado em $R_n=0,27$ e $R_t=0,55$.

GRÁFICO 2: Rocha fixada em $R_n=0,48$ e $R_t=0,70$ (figura 23); depósito de tálus variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,40$ e $0,75 \leq R_t \leq 0,90$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 9 (144m de alcance) e 15 (139m de alcance).

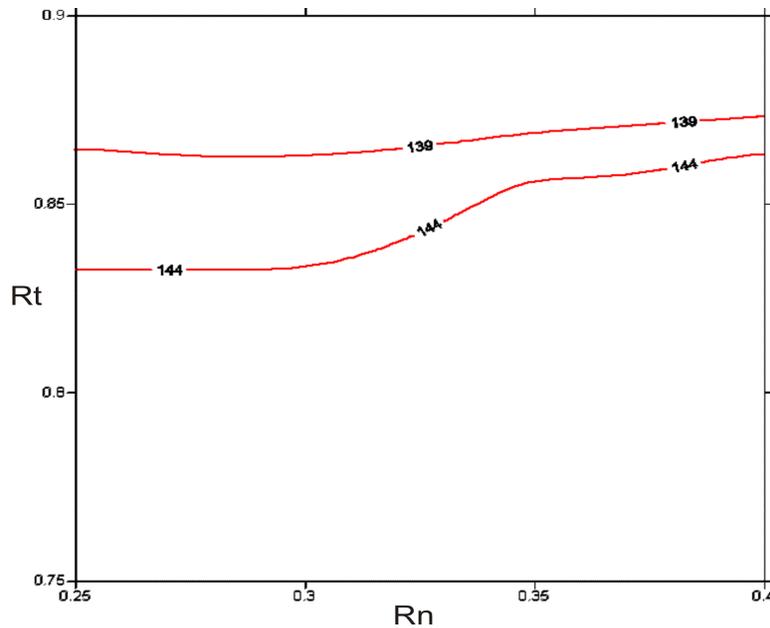


Figura 23: Gráfico de alcances para *bedrock* fixado em $R_n=0,48$ e $R_t=0,70$.

GRÁFICO 3: Rocha fixada em $R_n=0,69$ e $R_t=0,85$ (figura 24); depósito de tálus variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,40$ e $0,75 \leq R_t \leq 0,90$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 9 (144m de alcance) e 15 (139m de alcance).

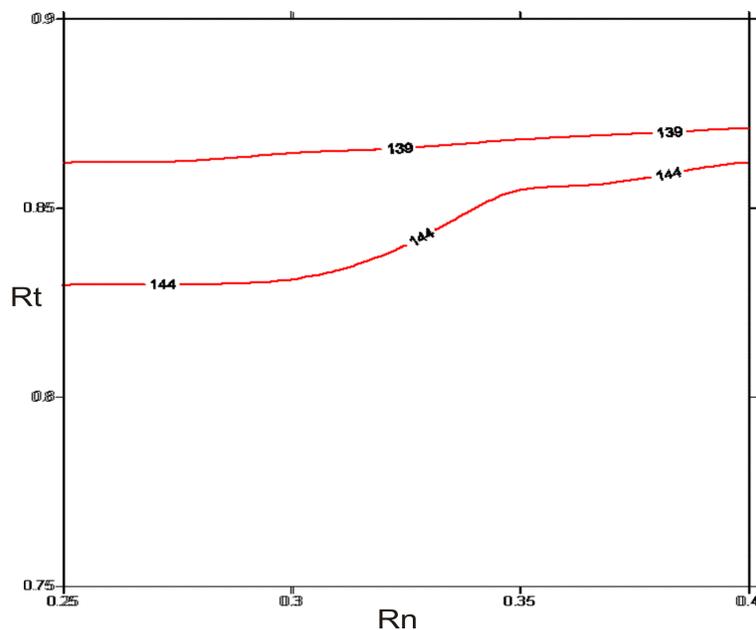


Figura 24: Gráfico de alcances para *bedrock* fixado em $R_n=0,69$ e $R_t=0,85$.

GRÁFICO 4: Rocha fixada em $R_n=0,90$ e $R_t=0,99$ (figura 25); depósito de tálus variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,40$ e $0,75 \leq R_t \leq 0,90$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 2 (212m de alcance), 9 (144m de alcance), 15 (139m de alcance).

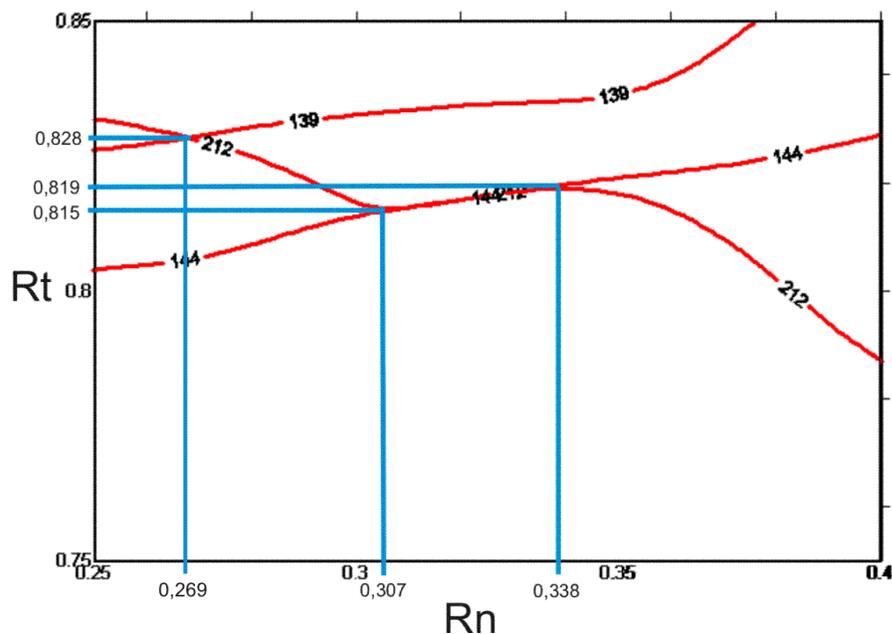


Figura 25: Gráfico de alcances para *bedrock* fixado em $R_n=0,90$ e $R_t=0,99$.

Nos gráficos 1, 2 e 3 observamos que as curvas de alcances reais não se cruzam, não permitindo estabelecer os valores de coeficientes de restituição mais prováveis. Já as interseções do gráfico 4 nos permitem dizer que para o **depósito de tálus**, que teve seu valor de coeficientes de restituição variado, encontramos os seguintes valores arredondados:

R_n mínimo = 0,27;

R_n máximo = 0,34;

R_t mínimo = 0,815;

R_t máximo = 0,83.

5.1.2 Para valores de coeficientes de restituição do depósito de tálus fixados e variação dos coeficientes de restituição do afloramento rochoso (*bedrock*)

GRÁFICO 5: Depósito de tálus fixado em $R_n=0,28$ e $R_t=0,76$ (figura 26) e *bedrock* variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,95$ e $0,5 \leq R_t \leq 1,0$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 2 (212m de alcance), 13 (78m de alcance), 15 (139m de alcance).

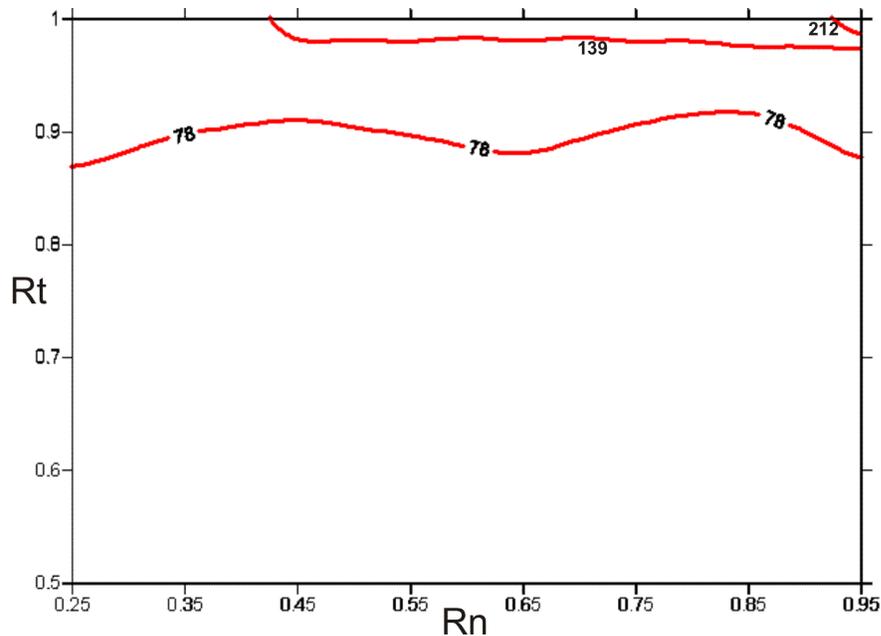


Figura 26: Gráfico de alcances para depósito de tálus fixado em $R_n=0,28$ e $R_t=0,76$.

GRÁFICO 6: Depósito de tálus fixado em $R_n=0,32$ e $R_t=0,82$ (figura 27) e *bedrock* variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,95$ e $0,5 \leq R_t \leq 1,0$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 2 (212m de alcance), 13 (78m de alcance), 15 (139m de alcance).

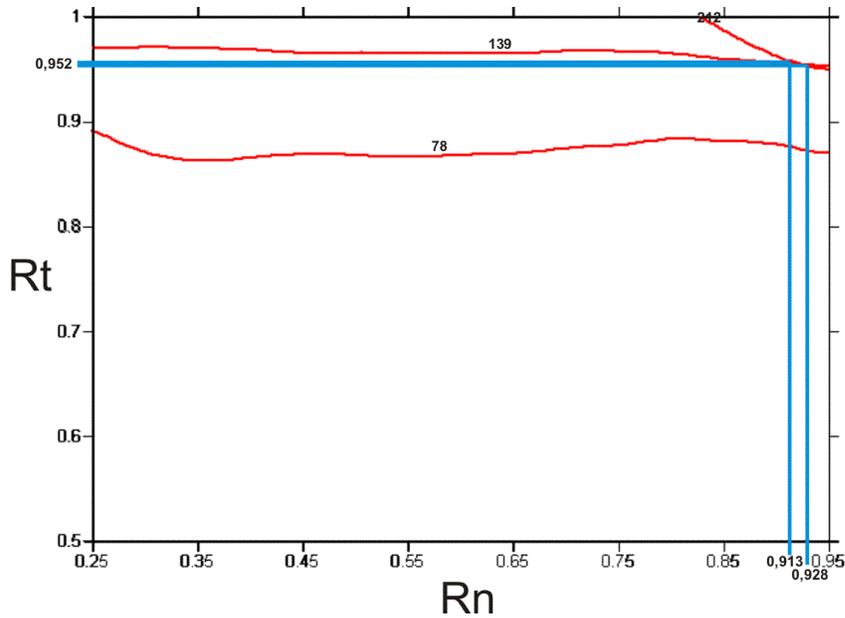


Figura 27: Gráfico de alcances para depósito de tálus fixado em $R_n=0,32$ e $R_t=0,82$.

GRÁFICO 7: Depósito de tálus fixado em $R_n=0,36$ e $R_t=0,88$ (figura 28) e *bedrock* variando com $0,25 \leq R_n \leq 0,95$ e $0,5 \leq R_t \leq 1,0$ (em intervalos de 0,05) para os blocos 2 (212m de alcance), 13 (78m de alcance), 15 (139m de alcance).

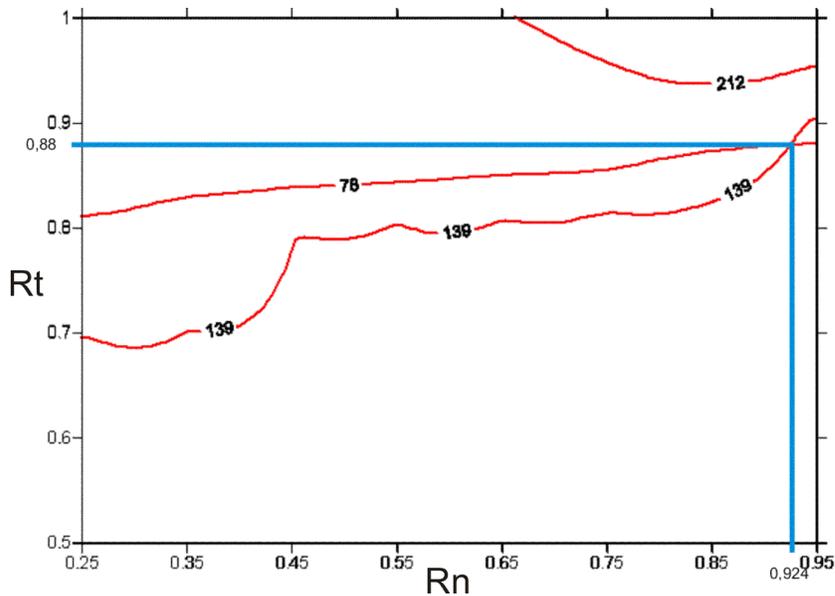


Figura 28: Gráfico de alcances para depósito de tálus fixado em $R_n=0,36$ e $R_t=0,88$.

Pelas interseções que apresentaram os gráficos 6 e 7, encontramos os coeficientes de restituição mais prováveis para o **afloramento rochoso**:

Rn mínimo = 0,91;

Rn máximo = 0,93;

Rt mínimo = 0,88;

Rt máximo = 0,95.

Em vista destes resultados, foi feita uma tabela comparativa (tabela 6) com os resultados apresentados neste trabalho e os resultados obtidos por Fernandes (2010), o qual utilizou também o método da retrossimulação para a estimativa dos melhores coeficientes de restituição para as mesmas unidades geotécnicas.

DEPÓSITO DE TÁLUS				
Rn		Rt		
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Autor
0,27	0,34	0,815	0,83	Presente trabalho (Lima, 2011)
0,29	0,34	0,74	0,84	Fernandes (2010)
AFLORAMENTO ROCHOSO				
Rn		Rt		
Mínimo	Mínimo	Mínimo	Máximo	Autor
0,91	0,93	0,88	0,95	Presente trabalho (Lima, 2011)
0,46	0,51	0,86	0,89	Fernandes (2010)

Tabela 6: Comparação dos resultados encontrados no presente trabalho com Fernandes (2010).

Como se pode observar, os valores que tiveram maior variação foram os coeficientes tangenciais mínimo e máximo do afloramento rochoso. Mas isso se deve ao fato de que Fernandes (2010) considerou os valores de Rn mínimo como 0,31 e máximo até 0,51, ou seja, uma faixa de valores menos abrangente que o presente trabalho.

6. CONCLUSÕES

A retroanálise desenvolvida neste trabalho é absolutamente indicada para estudos em regiões de risco habitadas por não afetar o local analisado.

Foram feitas análises da trajetória de 15 blocos, apenas 5 destas foram aptas a ter seus alcances reais e suas relações com os coeficientes de restituição interpolados e dentre os gráficos de alcances reais gerados, apenas 3 apresentaram interseção na curva de alcances indicando a faixa de valores de coeficientes de restituição normais e tangenciais para as unidades geotécnicas estudadas: o afloramento rochoso e o depósito de tálus. Logo, esta rota seguida para a retroanálise se revelou trabalhosa, indicando que é preciso grande número de análises para que se consiga um resultado satisfatório. Apesar desta dificuldade de se obter o coeficiente de restituição, que já é bem conhecida na literatura, o método da retroanálise se mostrou eficaz, pois forneceu um intervalo bem restrito dos coeficientes para os materiais estudados. Os intervalos de coeficientes de restituição normais (R_n) e tangenciais (R_t) são, respectivamente, para o depósito de tálus: $0,27 \leq R_n \leq 0,34$ e $0,815 \leq R_t \leq 0,83$, e para o afloramento rochoso de gnaiss: $0,91 \leq R_n \leq 0,93$ e $0,88 \leq R_t \leq 0,95$.

A retroanálise é um método muito indicado para a descoberta da faixa de valores de coeficientes de restituição normal e tangencial para diferentes unidades geotécnicas além das que foram feitas neste estudo, em outras localidades, visto que os valores que circulam na literatura possuem faixas muito amplas.

Sugere-se para trabalhos futuros que sejam feitas análises com um número maior de blocos, mas caso inexistam expressivamente na área escolhida também podem ser definidas mais de uma trajetória para os blocos que serão analisados, a fim de tentar obter mais gráficos de curvas de alcance e conseqüentemente interseções que possam indicar e comprovar as faixas de coeficientes de restituição já conhecidas.

Através deste método torna-se possível tabelar os valores das faixas de coeficientes de restituição correspondentes a cada unidade, e posteriormente a realização de uma previsão mais exata dos alcances dos blocos de movimentos

de queda e rolamento futuros, contribuindo como base para a confecção de mapas de áreas de risco e para uma prudencial realocação da população que habita estas áreas por parte do governo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. 1984. Rio de Janeiro, 1984. 6p.
- _____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8p.
- _____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.
- _____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- _____. **NBR 12766**: Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro, 1992. 2 p.
- Augusto Filho, O. & Virgili, J.C. 1998. Estabilidade de taludes. *In*: Oliveira, A. M. S. & Brito, S. N. A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap.15, p. 243-269.
- Baptista A. C. 2005. *Análise da paisagem e identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa na APA Petrópolis – RJ: subsídio ao planejamento urbano*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 96 p.
- Baptista, A.C. & Calijuri, M.L. 2005. Suscetibilidade das áreas de risco a movimentos de massa na APA Petrópolis. *Natureza & Desenvolvimento*, 1 (1): 51-58.
- Carnevale, G. 1991. Simulações Teóricas de Casos de Desmoronamento de Taludes Rochosos de Taludes Rochosos. *Solos e Rochas*, 14 (1): 21-40.
- Chau, K. T.; Wong R. H. C.; Wu J. J. 2002. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39: 69–77.
- Chau, K. T.; Wong, R. H. C.; Liu J.; Lee C. F. 2003. Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36 (5): 383-408.
- CPRM, 2005. *Atlas Geoambiental: subsídios ao planejamento territorial e à gestão ambiental da bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape*. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/gestao/ppga_valedoribeira/Registros%20fotogr%E1ficos/adri anopolis.htm

- Dana, J. D. 1976. *Manual de Mineralogia*. Rio de Janeiro, Livros científicos S.A., 642 p.
- Dias G. P. & Barroso E. V. 2006. Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas: Aplicação na Previsão do Alcance de Blocos em Encostas. *In: Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. 29 (2): 149-167.
- Dias F. P. & Herrmann M. L. P. 2002. Susceptibilidade a deslizamentos: Estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC. *Caminhos de geografia – Instituto de Geografia (UFU)*, 3 (6): 57-73.
- Fernandes R. R. 2010. *Determinação de valores mais prováveis de coeficiente de restituição através de uma retrossimulação feita com auxílio do software Rocfall*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Curso de Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 63 p.
- Gonçalves, L. F. H. 1998. *Avaliação e Diagnóstico da distribuição Espacial e Temporal dos Movimentos de Massa com a Expansão da Área Urbana de Petrópolis – RJ*. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 169p.
- Guerra A. J. T.; Lopes P. B. M.; Santos Filho R. D. 2007. Características geográficas e geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 8(1): 77-86.
- Hoek, E. 2006. *Practical Rock Engineering*. Vancouver, 237 p.
- IBAMA, 2002. *Modelo de valoração econômica dos impactos ambientais em unidades de conservação*. Empreendimentos de Comunicação, Rede Elétrica e Dutos Estudo Preliminar.
- Imre. B.; Råbsamena S.; Springman, S.M. 2008. A coefficient of restitution of rock materials. *Computers & Geosciences*, 34(4): 339-350.
- Infanti Junior, N. & Fornasari Filho, N. 1998. Processos de Dinâmica Superficial. *In: Oliveira, A. M. S. & Brito, S. N. A. (Eds.). Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 9, p.131-152.
- Jiming Kong; SONG Shuzhi; WANG Chenghua & CHENG Zefu. 2006. Analysis of rockfall and its impact on the cut-and-cover tunnel in dynamics. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 11(4):905-909.
- RADAM, 1983. *Levantamento de recursos minerais*. Ministério das Minas e Energia. 22.
- Rahn, P.H. 1986. *Engineering Geology: An Environmental Approach*. New Jersey, USA, Elsevier, 589 p.

- Reimer, E. S. 2006. *Inventário dos Movimentos de Massa e Análise da Suscetibilidade aos Escorregamentos Rasos em Solo no Distrito de Cascatinha, Petrópolis, RJ*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 125 p.
- Ribeiro, Rafael Silva. 2008. *Análise comparativa do alcance de blocos rochosos utilizando os softwares RocFall e PFC-2D*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Curso de Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 54 p.
- Richards L. R.; Peny B.; Bell D. H. 2001. Laboratory and field evaluation of the normal coefficient of restitution for rocks. *In: Rock Mechanics - A challenge for Society*. Sarkka P.; Elorante P. (eds) Proceedings of the Isrm Regional Symposium Eurock, Espoo, Finland, 4 - 7 June 2001, p. 149-153.
- Schweigl J; Ferretti C.; Nössing, L. 2003. Geotechnical characterization and rockfall simulation of a slope: a practical case study from South Tyrol (Italy). *Engineering Geology*, 67(2003):281-296.
- Sobreira, F. G. 2001. Susceptibilidade a processos geológicos e suas conseqüências na área urbana de Mariana (MG). *Geobr*: 43-60. Disponível em <http://www.degeo.ufop.br/geobr>.
- Stevens, W.D. 1998. *RocFall: A Tool Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of RockFalls*. Thesis of Master, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canadá.
- Tupinambá, M.1999. *Evolução tectônica e magmática da Faixa Ribeira na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 222p.
- UNESCO-IAEG (1976). Engineering geological mapping. A guide to their preparation. Commission on Engineering Geological Maps of the IAEG. *Earth Sciences*, 15. The Unesco Press.
- Whalley, W. B. 1984. Rockfalls. *In: Brunsden D. & Prior D. B. (Eds.) Slope Instability*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, cap. 7, p. 217-243.

8. APÊNDICE

O resultado apresentado para a massa específica ($\rho=1,63$) foi muito baixo, sendo comparável a massa específica de solos visto que rochas granito-gnáissicas idealmente apresentariam um valor entre $2,57 \leq \rho \leq 2,65$ visto que o valor da densidade (d) do feldspato e do quartzo são, respectivamente, 2,65 e 2,57 (Dana, 1976) e $d = \text{Massa específica do mineral} / \text{Massa específica da água}$ (que é igual a 1). Logo, o valor de massa específica apresentado neste trabalho trata-se de um erro experimental. Ribeiro (2008) também fez o ensaio de massa específica utilizando rochas da mesma área de estudo e encontrou um valor de $\rho=2,55$, que é coerente, pois a rocha pode estar um pouco alterada e conter microporos.

Portanto, utilizou-se um valor errôneo para calcular a massa dos blocos, e também depois, na inserção do valor destas massas no RocFall, para a simulação dos alcances. Para saber se este erro é realmente relevante e implicaria em total imprecisão do trabalho, a massa dos blocos foi recalculada (tabela 6) utilizando o valor encontrado por Ribeiro (2008), e uma nova análise foi feita no RocFall com o objetivo de comparar os valores de alcances que se obteve anteriormente e nesta nova análise.

Nº do Bloco	Raio(m)	Volume(m ³)	Massa Específica(g/cm ³)	Massa(Kg)
1	2,66	78,84	2,55	201035,94
2	2,56	70,28	2,55	179204,41
3	1,74	22,07	2,55	56269,95
4	1,80	24,43	2,55	62294,01
5	2,42	59,37	2,55	151382,23
6	2,45	61,60	2,55	157082,22
7	1,54	15,30	2,55	39011,35
8	1,28	8,78	2,55	22400,55
9	1,96	31,54	2,55	80426,10
10	2,56	70,28	2,55	179204,41
11	2,96	108,63	2,55	277015,41
12	2,80	91,95	2,55	234478,42
13	1,62	17,81	2,55	45412,34
14	2,56	70,28	2,55	179204,41
15	2,48	63,89	2,55	162923,54

Tabela 7: Massa específica ($\rho=2,55$) e massa dos blocos corrigidos.

Foram inseridas no RocFall os valores dos blocos 2, 9 e 15, que foram três trajetórias em que ocorreram interseções nas curvas de alcance como foi visto na figura 25. Para o bloco 2 foram refeitas as tabelas de Rn e Rt da rocha fixados e de depósito de tálus fixados, e para os outros dois, apenas de Rn e Rt da rocha fixados.

A tabela 7 mostra o alcance obtido com o valor de massa do bloco utilizando-se $\rho=1,63$ e $\rho=2,55$, e ainda apura a diferença entre elas. Dentre a diferença dos alcances dos blocos 2, 9 e 15, a tabela mostra as deste último, pois foi o que apresentou a maior diferença, sendo esta de 0,72. Há casos ainda em que a diferença é igual a zero.

		Rocha Rn=0.27 Rt=0.55			Rocha Rn=0.48 Rt=0.70		
		Dep. De Talus			Dep. De Talus		
Rn	Rt	Alcance(m)	Novo alcance(m)	Diferença	Alcance(m)	Novo alcance(m)	Diferença
0.25	0.75	129.97	130.09	0.12	130.07	130.04	-0.03
0.25	0.8	132.79	132.87	0.08	132.98	132.98	0
0.25	0.85	136.03	136.03	0	136.28	136.36	0.08
0.25	0.9	144.96	144.97	0.01	145.54	145.62	0.08
0.3	0.75	129.49	129.6	0.11	129.49	129.6	0.11
0.3	0.8	132.08	132	-0.08	132.14	132.22	0.08
0.3	0.85	136.67	136.69	0.02	137.06	137.12	0.06
0.3	0.9	144.76	144.86	0.1	144.7	144.75	0.05
0.35	0.75	129.16	129.28	0.12	129.23	129.28	0.05
0.35	0.8	131.43	131.56	0.13	131.49	131.56	0.07
0.35	0.85	135.7	135.82	0.12	135.96	136.03	0.07
0.35	0.9	143.79	143.88	0.09	143.73	143.88	0.15
0.4	0.75	128.58	128.62	0.04	128.58	128.62	0.04
0.4	0.8	130.72	130.8	0.08	130.78	130.69	-0.09
0.4	0.85	134.86	134.84	-0.02	135.12	135.16	0.04
0.4	0.9	142.95	142.9	-0.05	143.34	143.34	0
		Rocha Rn=0.69 Rt=0.85			Rocha Rn=0.90 Rt=0.99		
		Dep. De Talus			Dep. De Talus		
Rn	Rt	Alcance(m)	Novo alcance(m)	Diferença	Alcance(m)	Novo alcance(m)	Diferença
0.25	0.75	130.2	130.26	0.06	130.25	130.26	0.01
0.25	0.8	133.11	133.2	0.09	133.86	133.85	-0.01
0.25	0.85	136.74	136.8	0.06	143.71	144.21	0.5
0.25	0.9	146.19	146.28	0.09	-	-	-
0.3	0.75	129.62	129.6	-0.02	129.61	129.49	-0.12
0.3	0.8	132.4	132.44	0.04	132.52	132.65	0.13
0.3	0.85	136.35	136.36	0.01	142.02	142.57	0.55
0.3	0.9	145.41	145.41	0	-	-	-
0.35	0.75	129.23	129.28	0.05	129.67	129.49	-0.18
0.35	0.8	131.49	131.56	0.07	133.05	133.09	0.04
0.35	0.85	136.03	136.03	0	141.32	141.81	0.49
0.35	0.9	143.99	143.88	-0.11	-	-	-
0.4	0.75	128.71	128.73	0.02	129.03	128.84	-0.19
0.4	0.8	130.91	130.8	-0.11	132.27	132	-0.27
0.4	0.85	135.38	135.38	0	137.38	138.1	0.72
0.4	0.9	143.85	143.88	0.03	-	-	-

Tabela 8: Alcance encontrado anteriormente (com $\rho=1,63$), o novo alcance (com $\rho=2,55$) e a diferença entre eles. Em vermelho está a máxima diferença encontrada.

O valor do alcance anterior onde ocorreu a máxima diferença foi de 137,38, com uma diferença positiva de 0,72. Trata-se de um erro da ordem de 0,5% ou 0,00524 (visto que $137,38 \times 0,00524 \approx 0,72$).

A fim de confirmar se esta diferença pode de fato ser considerada ínfima no que se refere ao objetivo central deste estudo, que é determinar uma faixa restrita de coeficientes de restituição para as unidades geotécnicas, foi feita uma nova interpolação de alcances com os valores corretos para os três blocos anteriormente citados no Surfer e a sobreposição destas novas curvas (em azul) com as anteriores (em vermelho e com linha mais espessa) (figura 29).

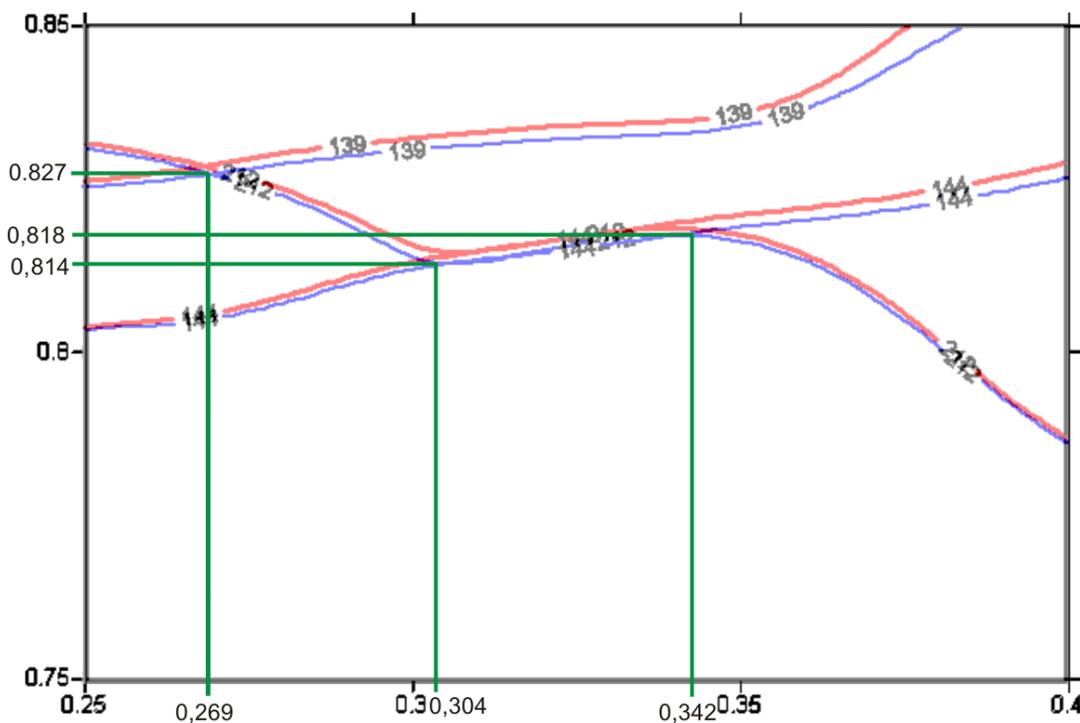


Figura 29: Sobreposição das curvas geradas anteriormente (em vermelho) com as novas curvas, geradas a partir dos valores corretos de massa e alcance (em azul).

Através da figura 29, é possível notar que as curvas anteriores e as novas se sobrepõem ilustrando uma pequena diferença, que mesmo assim, não interfere nos valores de coeficientes de restituição encontrados anteriormente (figura 25) para o depósito de tálus, os quais foram:

Rn mínimo = 0,27;

Rn máximo = 0,34;

Rt mínimo = 0,815;

Rt máximo = 0,83.

Pode-se concluir também, que apesar do erro experimental ter interferido essencialmente na massa dos blocos, mesmo que seja corrigido, não fará com que obtenhamos a massa exata dos blocos observados em campo porque o RocFall analisa-os como esféricos, introduzindo por si só, um erro sistemático. Quanto a isso, ainda não se sabe se este método de análise através do RocFall insere imprecisões que poderiam interferir de modo significativo na aquisição da faixa de coeficientes de restituição para cada unidade geotécnica.

Provavelmente, o erro não interferiu significativamente nos resultados do trabalho porque, como o afloramento rochoso é íngreme, apresentando apenas uma parte em sua base com menor declividade, e o depósito de tálus apresenta declividade mais suave que o primeiro, quando sofre a queda, o bloco interage pouco com o afloramento, apresentando movimentos de saltação, rolamento no depósito de tálus/ colúvio no qual pára. Então, no caso da massa específica não ter tido significativa importância, não pode ser expandido para outros trabalhos, isto é, não pode ser uma conclusão geral devido a esta particularidade que foi observada apenas na região analisada por este estudo.