

**Rafael Silva Ribeiro**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ALCANCE DE BLOCOS ROCHOSOS  
UTILIZANDO OS SOFTWARES ROCFALL E PFC-2D**

**Trabalho de Conclusão de Curso**  
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2008



UFRJ

**Rafael Silva Ribeiro**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ALCANCE DE BLOCOS ROCHOSOS UTILIZANDO  
OS SOFTWARES ROCFALL E PFC-2D**

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  
Andrea Ferreira Borges

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2008

RIBEIRO, Rafael Silva

**Análise comparativa do alcance de blocos rochosos utilizando os softwares RocFall e PFC-2D /**  
Rafael Silva Ribeiro - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2008.

xii, 41 p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2008.

Orientadores: Emílio Velloso Barroso, Andrea Ferreira Borges

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Emílio Velloso Barroso; Andréa Ferreira Borges. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Análise comparativa do alcance de blocos rochosos utilizando os softwares RocFall e PFC-2D.

Rafael Silva Ribeiro

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ALCANCE DE BLOCOS ROCHOSOS UTILIZANDO  
OS SOFTWARES ROCFALL E PFC-2D**

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  
Andrea Ferreira Borges

Aprovada em: 17 de dezembro de 2008

Por:

---

Orientador: Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

---

Orientadora: Andrea Ferreira Borges (UFRJ)

---

Eurípedes do Amaral Vargas Junior (UFRJ)

---

Helena Polivanov (UFRJ)

---

Raquel Quadros Velloso (PUC-Rio)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2008

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2008

Aos meus pais Nilma e Francisco, minhas irmãs Renata e Robertha, meus tios Ernani, Helena, Nina e Rosane e meus primos Felipe e Paula.

## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores Emílio e Andrea pelos ensinamentos proporcionados durante a elaboração deste trabalho.

A Engenharia da PUC-Rio Raquel Velloso pela valiosa instrução na utilização do software PFC-2D e por toda atenção e dedicação dada durante esse período de aprendizagem.

Ao Professor Eurípedes Vargas pela oportunidade de utilização do software PFC-2D e conseqüente complementação do trabalho.

Aos companheiros do LEMETRO Amanda, Anderson, Gilmar e Viviane pelo convívio e amizade proporcionado durante esse período de tempo.

## Resumo

RIBEIRO, Rafael Silva. **Análise Comparativa do alcance de blocos rochosos utilizando os softwares RocFall e PFC-2D**. 2008. xii, 41p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Dentre os movimentos de massa, a queda/rolamento de blocos é o tipo que possui maior dificuldade na previsão do início do processo, da trajetória e do alcance dos blocos. A ocorrência deste tipo de movimento de massa vem aumentando em algumas áreas do Estado do Rio de Janeiro. Uma dessas áreas é o Bairro da Glória, Município de Petrópolis, onde há uma encosta com blocos soltos que constituem uma ameaça às construções localizadas no local. O objetivo desse estudo foi verificar o alcance desses blocos instáveis e delimitar zonas de suscetibilidade em função das simulações realizadas pelos softwares RocFall e PFC-2D. Realizou-se uma análise paramétrica que permitiu delimitar faixas de alcance dos blocos e também comparar os resultados obtidos com os dois programas. O trabalho contou com o mapeamento geotécnico na escala de 1:1000, seguindo recomendações da IAEG (1976) e posterior caracterização das unidades mapeadas. De posse deste mapa, foram construídas as seções geológico-geotécnicas consideradas relevantes, onde se fez as simulações. O mapa e as seções geotécnicas são as condições de contorno do problema e a partir das quais se executou a análise do alcance dos blocos. Os resultados mostram que é possível delimitar faixas suscetíveis ao alcance desses blocos rochosos e alertar sobre a situação encontrada para se evitar danos sócio-econômicos que possam ocorrer na localidade.

Palavras-chave: Queda de Blocos; Simulação; Alcance.

## Abstract

RIBEIRO, Rafael Silva. **Comparative analysis of the reach of rocky blocks using the softwares RocFall and PFC-2D**. 2008. xii, 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Amongst the types of mass wasting, rock fall or rolling is the one which provides greater difficulties in predicting the beginning of the process, the path and the reach of the blocks. The incidence of this type of mass wasting has increased in some areas in Rio de Janeiro State. One of these areas is the Quarter of Gloria in the city of Petropolis, where there is a slope with loose blocks, which represents a threat to the buildings located downslope. The aim of this study was to check the reach of some of these unstable blocks and to delimit susceptible zones from the results of rock fall simulations performed using the softwares RocFall and PFC-2D. A parametric analysis was performed to delimit ranges for the distances reached by the blocks and also to compare the results of both softwares. This work used the geotechnical map in the scale of 1:1000, following recommendations of the IAEG (1976) and further characterization of the mapped units. Using this map, the geological-geotechnical sections considered relevant were outlined, and the simulations were performed on these sections. The map and the geotechnical sections are the contour conditions of the problem, used to perform the rock reach analysis. The results show that it is possible to establish regions which are susceptible to being reached by these blocks and to give a warning about this situation, in order to avoid socioeconomic losses in the area.

Key-Words: Rockfall; simulation; reach.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação de Movimentos de Massa, com destaque para a queda de blocos (Varnes, 1958, <i>apud</i> Rahn, 1986). .....	2
Figura 2 - Exemplos de risco de queda de blocos a: (A) Áreas residenciais (Wasowsky & Gáudio, 2000); (B) Infra-estrutura local (Chau <i>et al.</i> , 2002).....	4
Figura 3 - Gráfico mostrando a relação entre a população e o número de movimentos de massa ocorridos nos distritos de Petrópolis entre 1960 e 1999 (Oliveira <i>et al.</i> , 2003). .....	6
Figura 4 - Exemplo de sistema de barreira para contenção de blocos: (A) Construção da barreira com tela metálica e (B) Impedimento da passagem do bloco pela tela metálica (Peila <i>et al.</i> , 1998, <i>apud</i> Dias & Barroso, 2006).....	7
Figura 5 - Localização da área de estudo no Município de Petrópolis.....	8
Figura 6 - Mapa rodoviário de acesso a Petrópolis através da BR-040 (DNIT, 2002).....	9
Figura 7 - Representação digital do terreno. ....	10
Figura 8 - Escarpa da área vista de baixo. Notar o alto ângulo de declive da mesma.....	10
Figura 9 - Visão geral do local de estudo. ....	11
Figura 10 - Localização dos blocos a partir do qual se procedeu o estudo. ....	13
Figura 11 - Ângulos de atritos normais para determinadas superfícies de rocha não intemperizadas (Selby,2005). ....	15
Figura 12 - Etapas metodológicas utilizadas no programa RocFall. ....	16
Figura 13 - Localização das seções topográficas analisadas no programa RocFall. ....	17
Figura 14 - Imagem do software RocFall- RocScience com as unidades geotécnicas identificadas na seção.....	17
Figura 15 - Esquema demonstrando como foi calculada a velocidade vertical de cada simulação a partir da velocidade resultante. ....	18
Figura 16 - Tipos de colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica (Dias & Barroso, 2006). ....	19
Figura 17 - Componentes da colisão de uma partícula em um plano inclinado (Modificado de Carnevale, 1991). ....	19
Figura 18 - Quadro onde se colocou os valores de alguns dos parâmetros utilizados no Rocfall. ....	20

Figura 19 - Simulação de queda/rolamento de bloco em uma das seções, realizado no software RocFall.....	21
Figura 20 - Etapas metodológicas seguidas no programa PFC-2D. (Modificado do Manual do Programa PFC-2D).....	22
Figura 21 - Divisão dos oito blocos rochosos em circunferências. ....	23
Figura 22 - Topografia de uma seção criada no software PFC-2D.....	24
Figura 23 - Localização das 24 seções analisadas pelo software PFC-2D. ....	24
Figura 24 - Um dos blocos divididos em circunferências onde se podem visualizar as ligações normais e paralelas entre as circunferências.....	25
Figura 25 - (A) Valor de força dos contatos que mantem as circunferências unidas entre si; (B) Valor de força dos contatos que não consegue manter as circunferências unidas entre si. ....	26
Figura 26 - De acordo com os valores de rigidez, tem-se uma: (A) Superfície rígida; (B) Superfície flexível. ....	27
Figura 27 - Comportamento de uma esfera após o choque com uma superfície com diferentes valores de amortecimento: (A) $\beta = 0$ e (B) $\beta = 1$ . ....	27
Figura 28 - Gráfico demonstrando a relação entre o amortecimento e o coeficiente de restituição.....	28
Figura 29 - Experimento realizado onde se verificou o problema com relação ao amortecimento.....	29
Figura 30 - Mapa geotécnico da região do Bairro da Glória, Petrópolis (RJ).....	30
Figura 31 - Fotografia de uma lâmina delgada do gnaiss e composição modal da rocha. ....	31
Figura 32 - Resultado do ensaio granulométrico do solo residual. ....	32
Figura 33 - Carta de plasticidade (Carta de Casagrande) com o resultado do solo da área representado pela marca azul. ....	32
Figura 34 - Zona de suscetibilidade a ocorrência de queda de blocos rochosos segundo uma velocidade angular de 0rad/s. para valore de $e$ mínimo e máximo. ....	33
Figura 35 - Zona de suscetibilidade a ocorrência de queda de blocos rochosos segundo uma velocidade angular de 4rad/s. para valore de $e$ mínimo e máximo. ....	34
Figura 36 - Zona de suscetibilidade a ocorrência de queda de blocos rochosos usando o programa PFC-2D, segundo uma velocidade angular de 0rad/s. ....	35
Figura 37 - Comparação entre as áreas de suscetibilidade dos softwares RocFall e PFC-2D. .	36

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Algumas classificações dos Movimentos de Massa no Brasil (Fernandes & Amaral, 1996).....	3
Tabela 2 - Distribuição das classes de declividades na APA Petrópolis (Baptista & Calijuri, 2005).....	9
Tabela 3 - Valores de coeficiente de restituição utilizados no programa RocFall. ....	20
Tabela 4 - Valores de coeficiente de restituição e amortecimento correspondentes. ....	28
Tabela 5 - Raio, volume e massa dos oito blocos estudados. ....	31
Tabela 6 - Número de construções localizadas na zona de suscetibilidade. ....	34
Tabela 7 - Comparação das áreas e número de construções nas zonas de suscetibilidade. ....	36

## Sumário

Agradecimentos .....	vi
Resumo .....	vii
Abstract .....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. RELEVÂNCIA E OBJETIVOS DO ESTUDO .....	5
3. ÁREA DE ESTUDO.....	8
4. METODOLOGIA .....	12
4.1. RocFall.....	15
4.2. PFC-2D.....	21
5. RESULTADOS .....	30
5.1. RocFall.....	33
5.2. PFC-2D.....	35
5.3. Comparação dos resultados obtidos com os dois programas .....	35
6. CONCLUSÕES .....	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

Movimentos de massa correspondem aos mecanismos de transporte de material (solos, rochas e/ou sedimentos), induzidos pela força da gravidade e pela ação combinada ou isolada de fatores naturais e ações antrópicas. Existem na natureza vários tipos de movimentos de massa que envolvem uma grande variação de materiais, processos e fatores condicionantes (Fernandes & Amaral, 1996). Segundo esses autores, dentre as classificações internacionais, destacam-se as de Varnes (1958 e 1968), Hutchinson (1988) e Sassa (1989). São classificações que se baseiam em elementos presentes nos movimentos de massa, tais como material envolvido, velocidade do movimento, mecanismo de ruptura, dentre outros. Na Figura 1, pode ser vista a Classificação de Varnes (1958, *apud* Rahn, 1986), onde o autor correlaciona o tipo de material envolvido com a velocidade dos movimentos de massa (Figura 1).

Segundo Fernandes & Amaral (1996), a nível nacional destacam-se as classificações feitas por Freire (1965), Guidicini & Nieble (1984) e IPT (1991), como mostrado na Tabela 1.

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.

Segundo Brunsden & Prior (1989), a queda de blocos rochosos pode ser definida como todo movimento de material através de queda livre abrupta em encostas muito íngrimes e precipícios, onde o material é geralmente desprendido em blocos. Origina-se devido a compartimentação estrutural do maciço rochoso, dada pela presença de descontinuidades físicas, como falhas e fraturas. A propagação dessas descontinuidades 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 (Vargas *et al.*, 2004).

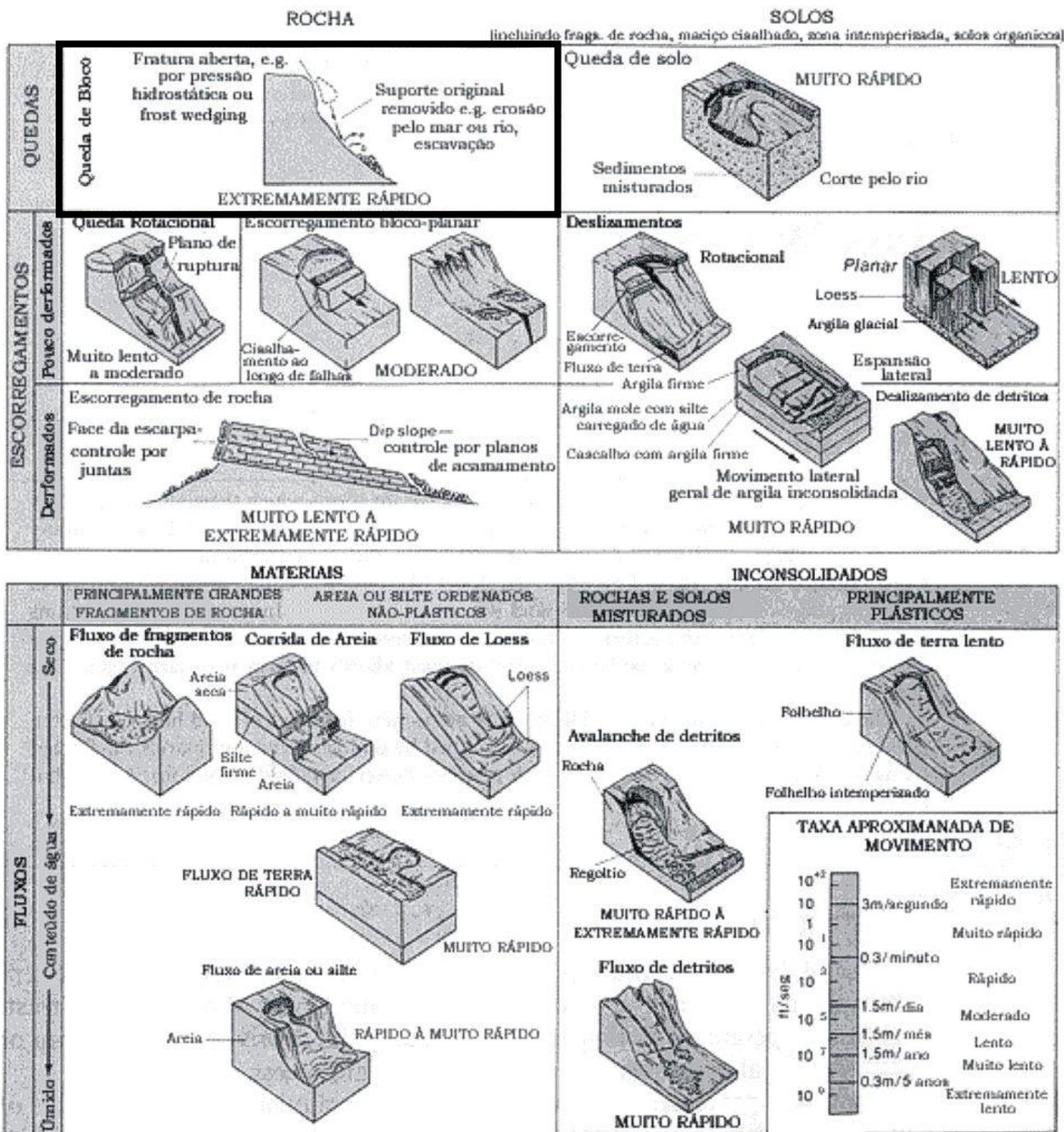


Figura 1 - Classificação de Movimentos de Massa, com destaque para a queda de blocos (Varnes, 1958, *apud* Rahn, 1986).

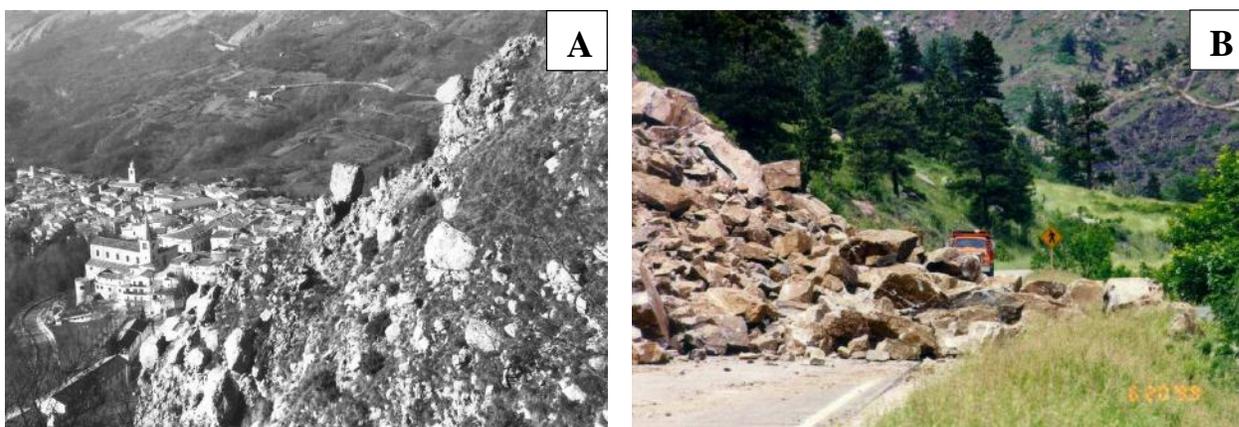
Tabela 1 - Algumas classificações dos Movimentos de Massa no Brasil (Fernandes &amp; Amaral, 1996).

Freire (1965)	Guidicini & Nieble (1984)	IPT (1991)
<p><b>Escoamentos:</b> Rastejos e Corridas</p> <p><b>Escorregamentos:</b> Rotacionais e Tranlacionais</p> <p><b>Subsidências e Desabamentos</b></p>	<p><b>Escoamentos:</b> Rastejos e Corridas</p> <p><b>Escorregamentos:</b> Rotacionais, Translacionais, Queda de Blocos e Queda de Detritos</p> <p><b>Subsidências:</b> Subsidências, Recalques e Desabamentos</p> <p><b>Formas de Transição</b></p> <p><b>Movimentos Complexos</b></p>	<p><b>Rastejos</b></p> <p><b>Corridas de Massa</b></p> <p><b>Escorregamentos</b></p> <p><b>Queda/ Tombamentos</b></p>

Em encostas íngremes, os blocos gerados pela compartimentação estrutural e desconexos do maciço estarão em condição de instabilidade, podendo se movimentarem pela atuação da força gravitacional. O início deste tipo de movimento de massa, a trajetória e o alcance dos blocos são função da geometria da encosta e da rocha, assim como as propriedades que interagem com o bloco e aquelas relacionadas a inclinação da encosta da localidade (Pfeiffer & Higgins, 1990; *apud* Sasiharan, 2006). O relevo influencia decisivamente, pois a movimentação de tais partículas se dará preferencialmente através dos vales presentes (Carnevale, 1991).

Devido à urbanização desordenada em muitas cidades brasileiras, construções são erguidas nas encostas sem obedecer a critérios técnicos. Assim sendo, tem-se um risco à população residente nessas áreas. *Risco* é um termo que pode ser definido como o produto entre a *probabilidade* e a *consequência*, onde *consequência* é qualquer resultado indesejável decorrente de um movimento de massa, que possui uma certa *probabilidade* de ocorrência (Pacheco & Coutinho, 2006). Como consequência dos efeitos provocados por movimentos de massa, tem-se

danos sócio-econômicos, como perdas de vidas humanas, perdas materiais diversas, interrupções de serviços públicos, dentre outros. Segundo Chau *et al.* (2002) a queda de blocos rochosos constitui em um sério risco as rodovias, áreas residenciais e construções situadas em regiões montanhosas (Figura 2). Por isso, a mitigação do problema é extremamente importante para proteção dos residentes nessas áreas.



**Figura 2 - Exemplos de risco de queda de blocos a: (A) Áreas residenciais (Wasowsky & Gáudio, 2000); (B) Infra-estrutura local (Chau *et al.*, 2002).**

Assim sendo, nos últimos anos avanços consideráveis têm sido alcançados na análise da suscetibilidade de queda de blocos, na gestão de riscos e na modelagem das trajetórias de blocos rochosos em 3D. Muitos desses estudos utilizam mapas topográficos e fotografias aéreas (Abellán *et al.*, 2006).

## 2. RELEVÂNCIA E OBJETIVOS DO ESTUDO

Os acidentes envolvendo movimentos de massa vêm aumentando consideravelmente em várias áreas do Estado do Rio de Janeiro, principalmente onde há ocupação irregular em encostas, as quais degradam a paisagem e coloca em risco a vida das pessoas (Oliveira *et al.*, 2003).

O crescimento populacional em determinadas localidades do Estado não foi acompanhado pelo crescimento e melhoria das infra-estruturas regionais, que contribuem decisivamente para a qualidade de vida, e nem foi objeto de políticas públicas que evitassem os impactos negativos sobre os recursos naturais, que se tornam escassos diante da forma desordenada de sua expansão sobre a periferia (Baptista & Calijuri, 2007). Um desses casos é o Município de Petrópolis, onde da década de 60 até o início da década de 80, ocorreram as maiores taxas de crescimento populacional e identificados os maiores problemas ambientais. Até 1960, ainda existiam vales que possibilitassem a expansão dos núcleos urbanos, o que evitou a ocupação das encostas dos morros, não havendo, portanto, impactos negativos diretos sobre a topografia local. A partir de 1970, a cidade de Petrópolis entrou num processo de urbanização acelerado, principalmente depois da construção da rodovia Rio-Juiz de Fora (atual BR-040) em meados de 1970 e mesmo possuindo códigos e decretos que regulamentassem a forma de ocupação, essa se deu de forma desordenada. Como os fundos dos vales já se encontravam urbanizados, passou-se a ocupar as encostas desses vales que até então estavam preservadas por sua vegetação e devido às limitações impostas pelo relevo. (Baptista & Calijuri, 2007)

Em Petrópolis, a grande concentração populacional aliada aos fatores naturais, tem sido responsável pela ocorrência de mais de 1.000 eventos catastróficos nas últimas décadas, onde centenas de pessoas morreram (Oliveira *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2003). Essa afirmação pode ser verificada na Figura 3, onde se percebe a nítida relação entre o número de habitantes atual em cada distrito e o somatório do número de movimentos de massa de 1960 a 1999, também para cada distrito.

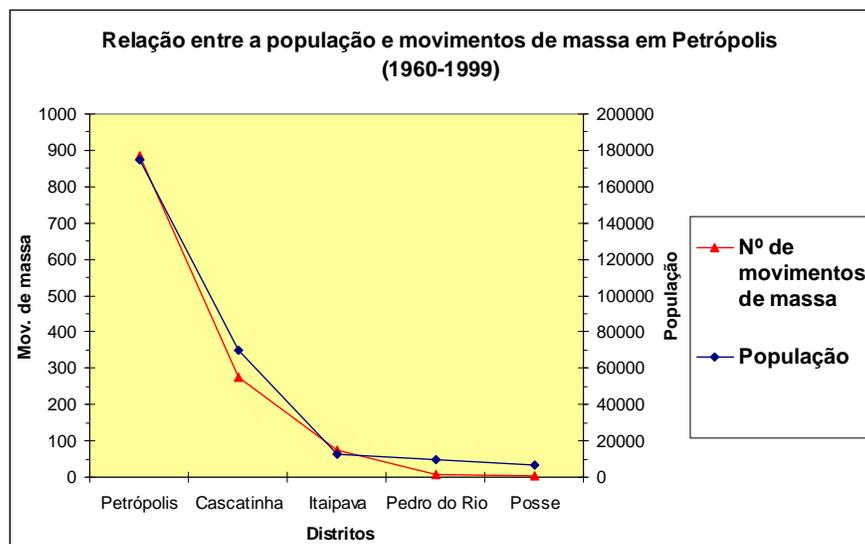


Figura 3 - Gráfico mostrando a relação entre a população e o número de movimentos de massa ocorridos nos distritos de Petrópolis entre 1960 e 1999 (Oliveira *et al.*, 2003).

Segundo Oliveira *et al.* (2001), a porção mais urbanizada do município encontra-se nos distritos de Petrópolis e Cascatinha, sobretudo com ocupações irregulares em encostas bastante íngremes. Assim, as ocorrências de movimentos de massa no Distrito de Petrópolis são as maiores, contrastando com o Distrito de Posse, que teve apenas dois movimentos de massa catalogados e cuja expansão urbana é menor.

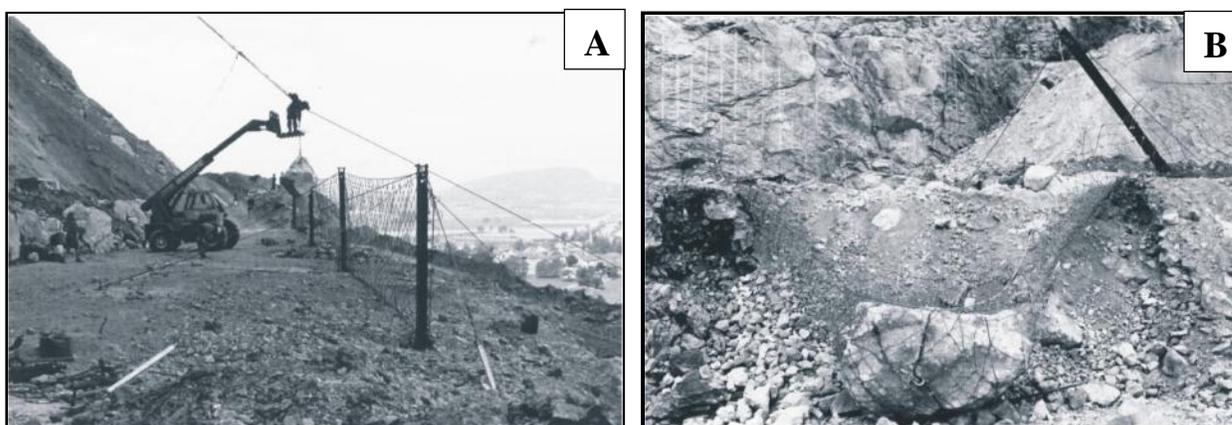
De acordo com Oliveira *et al.* (2003), entre 1960 e 1999 foram verificadas 1.244 ocorrências de movimentos de massa no município, com 1.191 registros de escorregamento, 43 registros de queda de blocos e 10 de corrida de lama.

Do total de movimentos de massa, a do tipo queda de blocos vem aumentando consideravelmente no município, já que na década de 90, a porcentagem deste tipo foi de 14 % do total, enquanto nas décadas de 60, 70 e 80 este número não passou de 3% (Gonçalves, 1998). Isso se deve ao crescente processo de ocupação de encostas íngremes que se deu no município.

Como comparação, na cidade do Rio de Janeiro, o número de instabilidades do tipo queda/rolamento de blocos cresceu desde 1993, perfazendo hoje cerca de 8 % das ocorrências registradas no Inventário Local de Escorregamentos da Fundação Geo-Rio (Vargas *et al.*, 2004).

Assim, é importante encontrar soluções para o caso deste tipo de movimento de massa. Estudos devem ser realizados no campo para se estabelecer a área afetada por estes blocos e para

se determinar o tratamento mais adequado às características de cada região. Para tal propósito, é preciso conhecer os prováveis alcances dos blocos e, principalmente, estudar os parâmetros que influenciam no comportamento desses blocos ao longo de sua trajetória. Com isso, podem ser delimitadas áreas de risco, que posteriormente auxiliam nas ações a serem adotadas, como a realocação de moradias, retirada de pessoas da zona afetada, além da projeção e construção de sistema de barreiras (Figura 4).



**Figura 4 - Exemplo de sistema de barreira para contenção de blocos: (A) Construção da barreira com tela metálica e (B) Impedimento da passagem do bloco pela tela metálica (Peila *et al.*, 1998, *apud* Dias & Barroso, 2006).**

O objetivo central deste trabalho é delimitar e cartografar zonas relativas ao alcance devido à queda/rolamento de blocos em função das simulações realizadas por dois softwares diferentes: o RocFall e o PFC-2D. Foram analisados os resultados apresentados pelos dois programas, tendo como base para este tipo de estudo, uma área habitada e suscetível à ocorrência de mecanismos de instabilidade deste tipo, localizada no Distrito de Cascatinha, Município de Petrópolis. Foi realizado um mapeamento geotécnico para delimitação da ocorrência de solos e rochas, caracterização dos mesmos em laboratório e, por fim, a análise computacional dos prováveis alcances dos blocos, levando-se em consideração os parâmetros físicos e geométricos de interesse para esse tipo de análise.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A área em que se procedeu o estudo (Figura 5) está situada no Bairro da Glória, Distrito de Cascatinha. Trata-se do 2º distrito do Município de Petrópolis, Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. A área focada está dentro dos limites da Área de Proteção Ambiental da Região Serrana de Petrópolis - APA Petrópolis-RJ, não obstante podem-se observar ocupações na região.

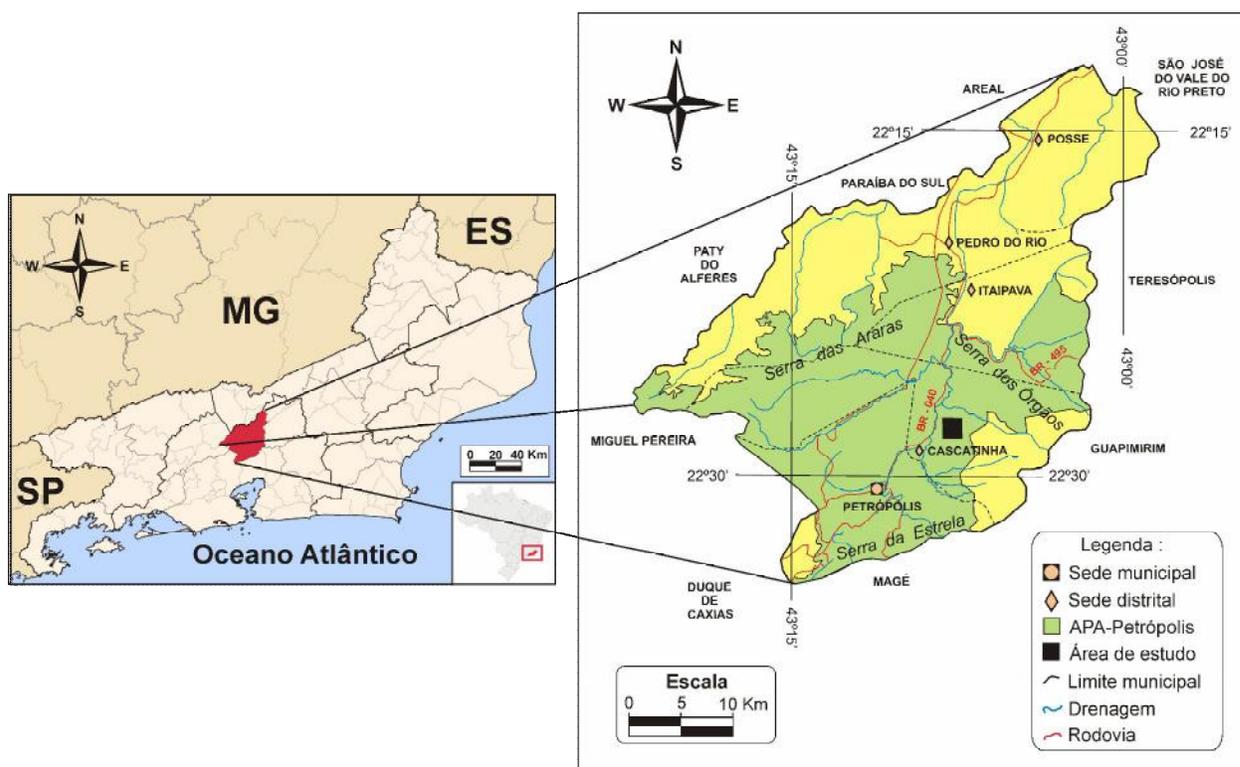


Figura 5 - Localização da área de estudo no Município de Petrópolis.

A APA Petrópolis foi criada em 1982 e regulamentada no ano de 1992 com o objetivo de preservar a vegetação de Mata Atlântica remanescente da região. Possui área de cerca de 594,8 Km<sup>2</sup>, abrangendo áreas urbanas e rurais dos Municípios de Petrópolis, Magé, Duque de Caxias e Guapimirim.

Partindo-se da capital fluminense, a principal via de acesso ao local é a BR-040, também conhecida como Rodovia Washington Luís (Figura 6).

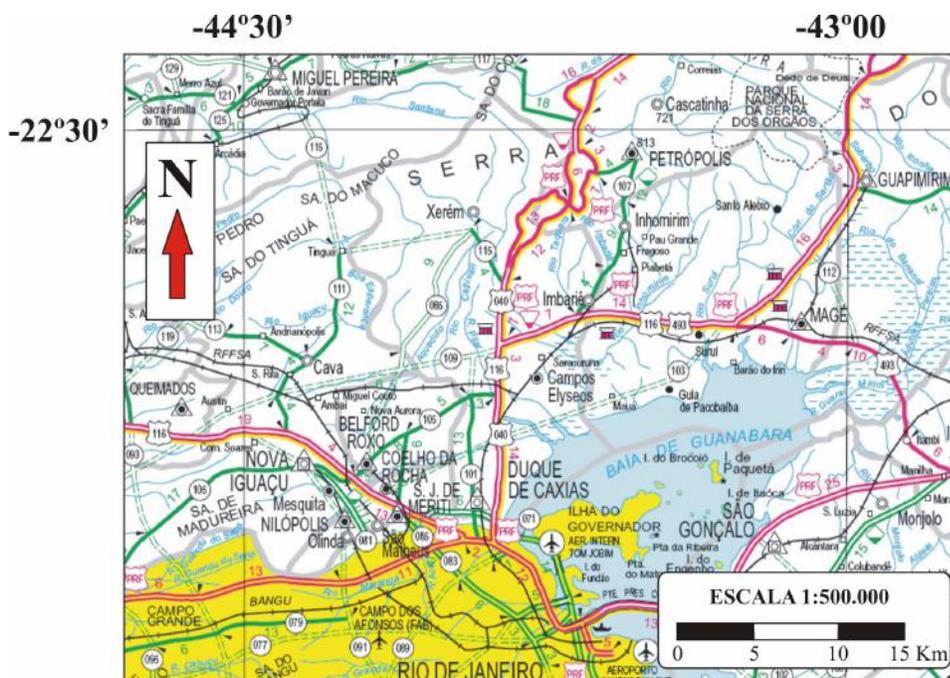


Figura 6 - Mapa rodoviário de acesso a Petrópolis através da BR-040 (DNIT, 2002).

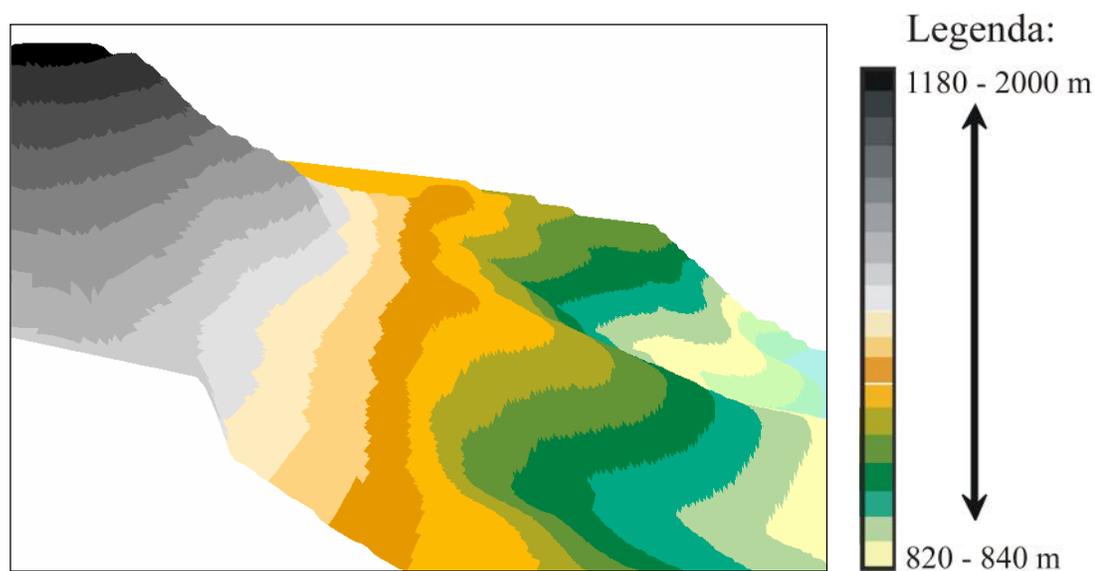
A Serra dos Órgãos ocupa a parte oeste do Município de Petrópolis, enquanto a leste e noroeste está presente o domínio geomorfológico da Serra das Estrelas, que são denominações locais da Serra do Mar. O relevo da área estudada está contido na Unidade Geomorfológica da Serra dos Órgãos (RADAM, 1983), apresentando um relevo acidentado, com desníveis altimétricos que variam de 770 a 1190 m., além de conter vales alongados e escarpas íngrimes. No caso da APA Petrópolis cerca de 70 % de sua área possui declividade acentuada (acima de 30%), visto na Tabela 2. Segundo a Lei Federal nº 6.766/79, que dispõe sobre o parcelamento do solo urbano, em declividades maiores que 45% não deve haver ocupação e os loteamentos e desmembramentos urbanos só serão autorizados em declividades de até 30% (Baptista & Calijuri, 1995), o que não é respeitado na área estudada.

Tabela 2 - Distribuição das classes de declividades na APA Petrópolis (Baptista & Calijuri, 2005).

Classe de Declividade (%)	Área (Km <sup>2</sup> )	Área Relativa (%)
0 - 15	60,04	10,10
15 - 30	122,33	20,56
30 - 45	141,53	23,80
> 45	270,86	45,54

Notadamente há um controle estrutural sobre a morfologia do local, que direciona muitos rios da região, como o Rio Piabanha. Este é o principal curso fluvial do local, cuja drenagem apresenta padrão treliça e retangular (Gonçalves, 1998).

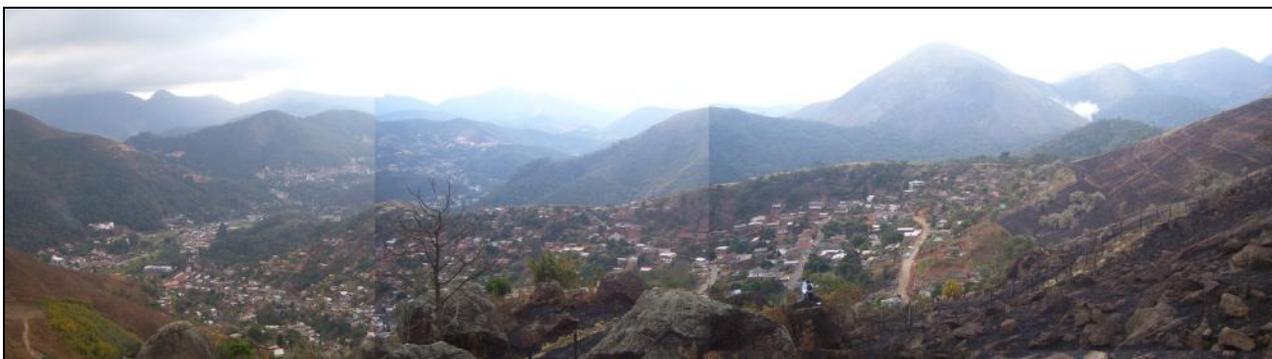
Uma visão geomorfológica do local é retratada na Figura 7, onde se pode notar o relevo acentuado da área estudada. Nesse local há uma porção mais elevada e escarpada (Figura 8), onde se situam blocos de dimensões variadas, e caracterizada por morros em sua maioria com cumes arredondados e vales marcantes, onde está localizada a maior parte das construções (Figura 9). A morfologia geral está intimamente relacionada com as características litoestruturais das rochas e com as condições climáticas da região.



**Figura 7 - Representação digital do terreno.**



**Figura 8 - Escarpa da área vista de baixo. Notar o alto ângulo de declive da mesma.**



**Figura 9 - Visão geral do local de estudo.**

O clima da região é o tropical de altitude, tendo as menores temperaturas do Estado do Rio de Janeiro: média de 21°C no verão e podendo chegar a valores inferiores a 18°C no inverno (Gonçalves, 1998). Apresenta umidade relativa do ar que gira em torno de 83% e precipitação média anual de 2200mm.

Não há vegetação de porte onde ocorrem afloramentos rochosos e onde há solo, ocorrem esparsos arbustos de médio porte e uma vegetação rasteira, consequência do acelerado processo de desmatamento resultante da desordenada ocupação urbana, característico da localidade. Originalmente o local era formado por uma Floresta Montana, subdivisão da Mata Atlântica (RADAM, 1983).

No que se refere à geologia local, a área é formada por afloramentos rochosos de hornblenda-biotita gnaisses, encontrados muitas vezes coberto por solo residual. Estes gnaisses de idade Neoproterozóica correspondem à unidade denominada de Batólito Serra dos Órgãos, pertencente ao Complexo Rio Negro (Tupinambá, 1999). São rochas que se encontram intensamente deformadas e metamorfizadas, estando muitas vezes migmatizadas e fraturadas.

Ainda no local se encontra uma grande área onde há inúmeros blocos rochosos, cujos diâmetros variam de poucos centímetros a uma dezena de metros, no que corresponde a um depósito de tálus.

#### 4. METODOLOGIA

Algumas etapas metodológicas foram seguidas igualmente nos dois programas e serão apresentadas a seguir. Essas etapas são as que se referem à pesquisa bibliográfica, trabalhos de campo e em laboratório.

No início, procedeu-se a uma pesquisa bibliográfica sobre o tema a ser abordado e a área a ser estudada. Foram coletadas informações em teses, periódicos, livros, dentre outras publicações que pudessem subsidiar o trabalho.

O material que serviu como base a este trabalho foi uma foto aérea na escala de 1: 8000, feita pela CERJ/ MONTREAL em 1999. Na citada foto aérea, foi selecionada a área de interesse, a qual foi georreferenciada e a ela sobrepostos os vetores correspondentes às curvas de nível.

Passou-se então ao mapeamento geotécnico. Este mapeamento foi realizado na escala de detalhe de 1:1000, seguindo recomendações da IAEG (1976), onde foram identificadas as unidades geotécnicas presentes na localidade.

Posteriormente foram selecionados oito blocos rochosos (Figura 10) em condições aparentemente críticas e instáveis, a partir dos quais foram construídas as seções topográficas com os trechos correspondentes a cada unidade geotécnica identificada.

As seções foram desenvolvidas de acordo com o possível percurso realizado pelos blocos a serem analisados. Na maior parte das vezes, foram feitas cerca de três seções para cada bloco de rocha: uma aproximadamente ortogonal as curvas de nível e outras duas afastadas de cerca de 15° em relação a primeira.

Para se calcular os valores de massa de cada um dos oito blocos selecionados, se procederam as seguintes etapas:

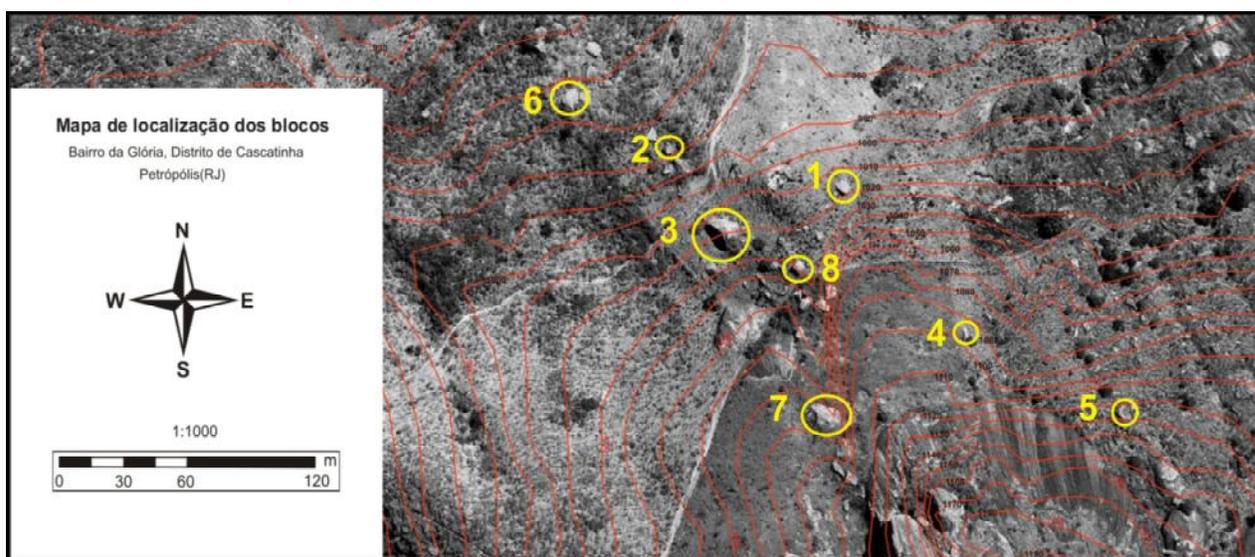
I. Considerando os blocos esféricos e medidos os raios de cada bloco na imagem georreferenciada, foi então calculado o volume aproximado de cada bloco, através da equação  $V=4/3\pi r^3$ , onde  $r$  é o raio da esfera;

II. Depois, foi determinado o valor da massa específica da rocha ( $\rho= 2,55 \text{ g/ cm}^3$ ) com base na técnica da saturação, com procedimentos definidos pela norma NBR 12766 da ABNT (1992).

Resumidamente, seguindo esta norma, deve-se lavar e colocar os corpos-de-prova em estufa por 24 horas. Depois, as amostras são pesadas na balança, anotando-se a massa seca “A”. Posteriormente, o corpo-de-prova é submerso num recipiente por 24 horas. Após esse tempo, é retirada a amostra, sendo então anotada a massa saturada “B”. Por fim, amarra-se o corpo-de-prova num dispositivo da balança, de modo com que a amostra não fique em contato com o fundo do recipiente que contém água, registrando assim a massa submersa “C”. Com estes valores, determina-se então a massa específica ( $\rho$ ), através da Equação 1.

$$\rho = A / (B - C) \quad (1)$$

III. Com este valor e sabendo que  $\rho = m/V$ , foi então calculada a massa de cada bloco.



**Figura 10 - Localização dos blocos a partir do qual se procedeu o estudo.**

Passou-se então a etapa da caracterização dos materiais (rocha e solo) presentes na localidade.

A rocha foi caracterizada tanto megascopicamente, através de amostras de mão, como microscopicamente, através da análise de lâminas delgadas.

Quanto ao solo, foram feitos ensaios para determinação dos Limites de Atterberg, além de ensaio granulométrico. Para tal propósito, foram utilizadas as normas NBR 6459, NBR 6508, NBR 7180 e NBR 7181 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), datadas de 1984.

Seguindo a norma NBR 6459 da ABNT (1984), procedeu-se a determinação do Limite de Liquidez (LL). Em suma, foi utilizada uma determinada massa deste solo de acordo com as especificações exigidas, que foi colocada na concha do aparelho de Casagrande. Por meio do cinzel, abre-se uma ranhura na parte central da massa de solo, dividindo-a em duas partes. Procedeu-se então a quedas sucessivas da concha sobre a base do aparelho, girando a manivela constantemente a duas voltas por segundo. Com isso, foi anotado o número de golpes necessário para o fechamento do sulco, tendo no mínimo seis registros para diferentes teores de umidades. Esses resultados são posteriormente plotados num gráfico, onde é determinado o Limite de Liquidez, dado pelo teor de umidade correspondente a 25 golpes.

Para se obter o Limite de Plasticidade (LP), foram utilizados os procedimentos da norma NBR 7180 da ABNT (1984). É tomada uma certa massa de solo, ao qual acrescenta-se água destilada, amassando-o de forma a conseguir uma massa homogênea. Posteriormente, foram usados 10g. dessa massa, que foi pressionada contra uma placa de vidro com a palma da mão até estar sob a forma cilíndrica de 3mm de diâmetro e 10 cm de comprimento. Foi anotado, então, o valor de umidade para o qual esse solo começou a se fraturar para no mínimo três valores diferentes de umidade. Com esses três valores, foi achada uma média, cujo valor corresponde ao Índice de Plasticidade.

Com os resultados obtidos através desses dois ensaios, calcula-se o Índice de Plasticidade, através da diferença entre os Limites de Liquidez e de Plasticidade (Equação 2), sendo este valor expresso em porcentagem.

$$IP (\%) = LL-LP \quad (2)$$

Foi utilizado um mesmo valor de 30° para o ângulo de atrito em todas as simulações. Este valor foi retirado da literatura de acordo com a litologia dos blocos (gnaisse), como mostra a Figura 11.

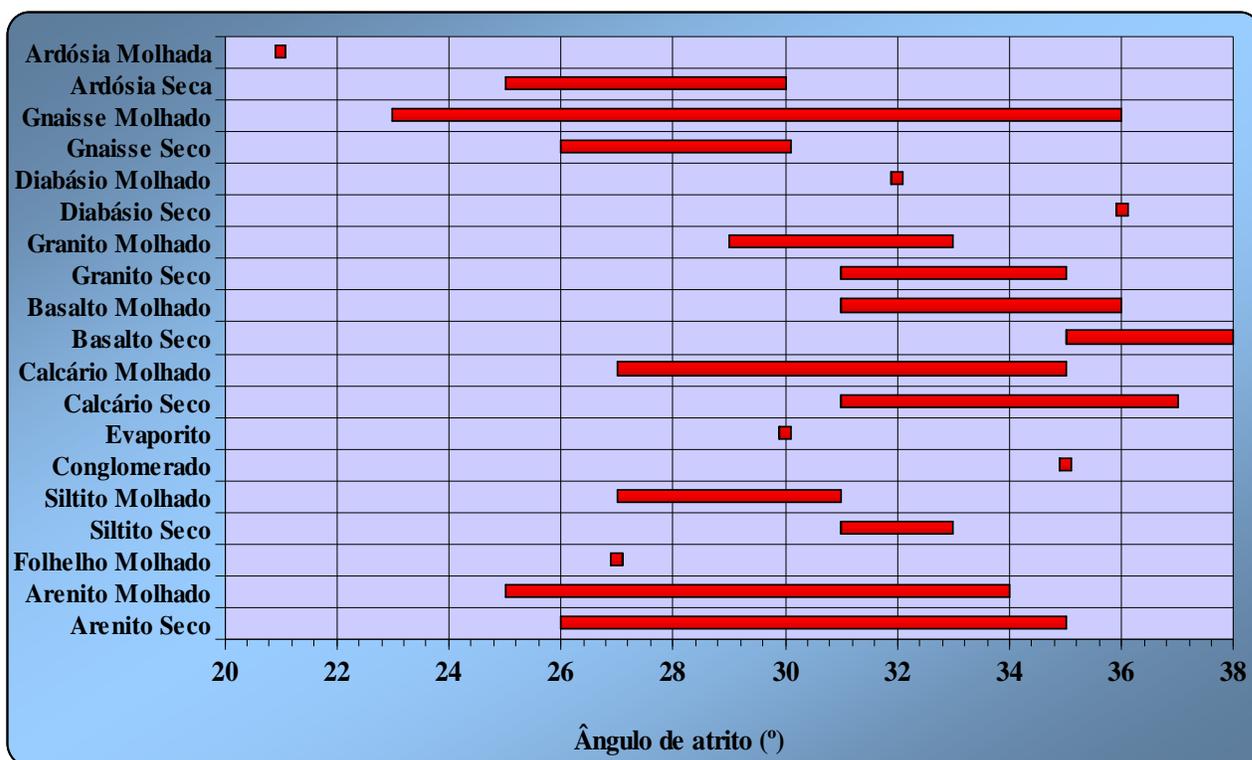
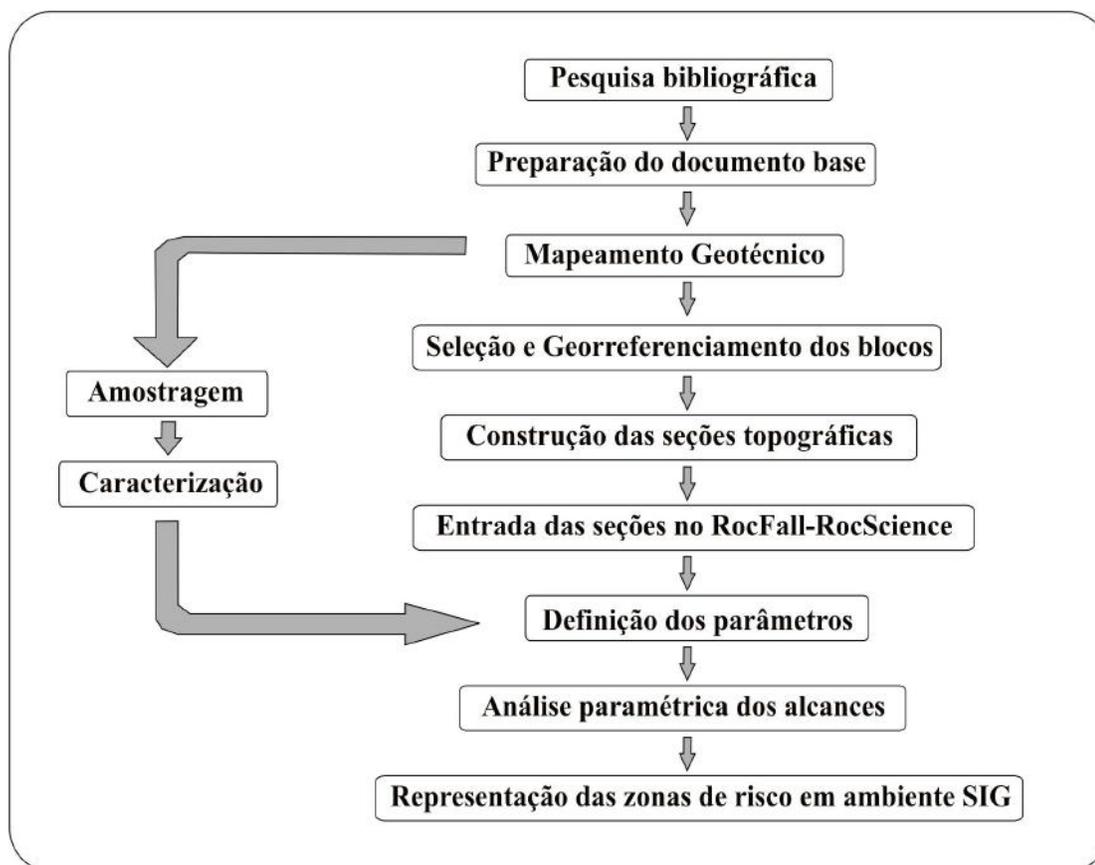


Figura 11 - Ângulos de atritos normais para determinadas superfícies de rocha não intemperizadas (Selby,2005).

#### 4.1. RocFall

As etapas metodológicas adotadas no programa RocFall estão esquematizadas na Figura 12.

Algumas dessas etapas já foram discutidas anteriormente. Segue a continuação da discussão acerca das etapas restantes.



**Figura 12 - Etapas metodológicas utilizadas no programa RocFall.**

Para o programa RocFall, foram construídas um total de 18 seções topográficas, como mostrado na Figura 13. O ideal era a construção de um total de 24 seções, como foi feito para o PFC-2D, mas os 18 perfis construídos já bastaram para se obter um resultado satisfatório.

A partir dos perfis topográficos foram construídas seções geotécnicas, as quais são elementos essenciais para a análise computacional realizada no software RocFall (Figura 14). Cada unidade contém aspectos físicos próprios relevantes no estudo, que influenciam no comportamento dos blocos ao longo do percurso.

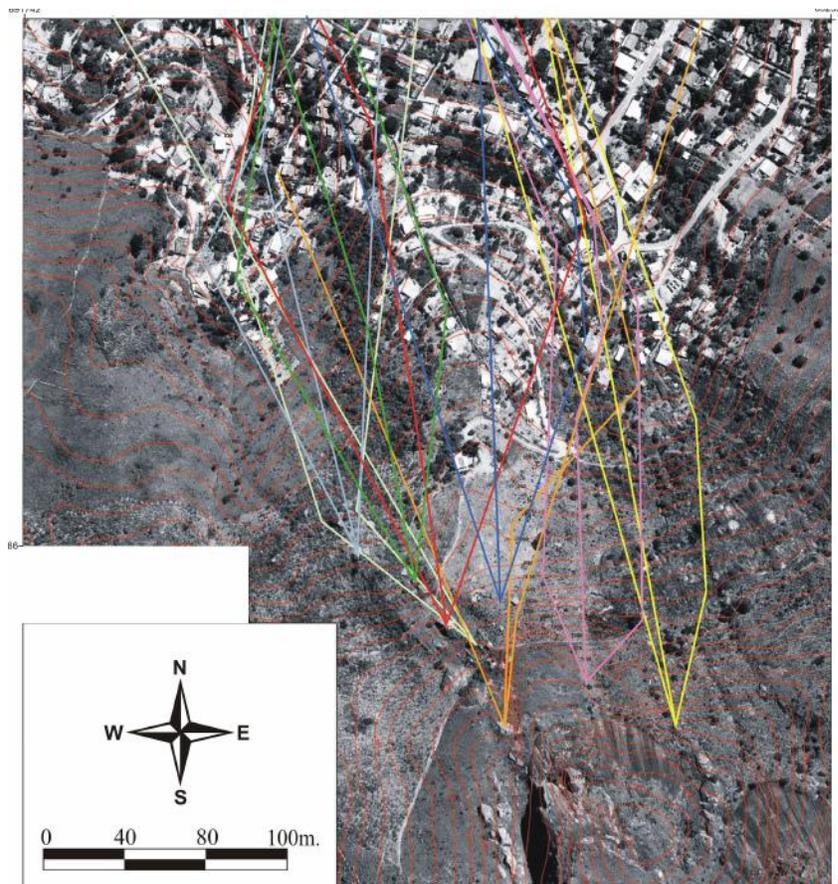


Figura 13 - Localização das seções topográficas analisadas no programa RocFall.

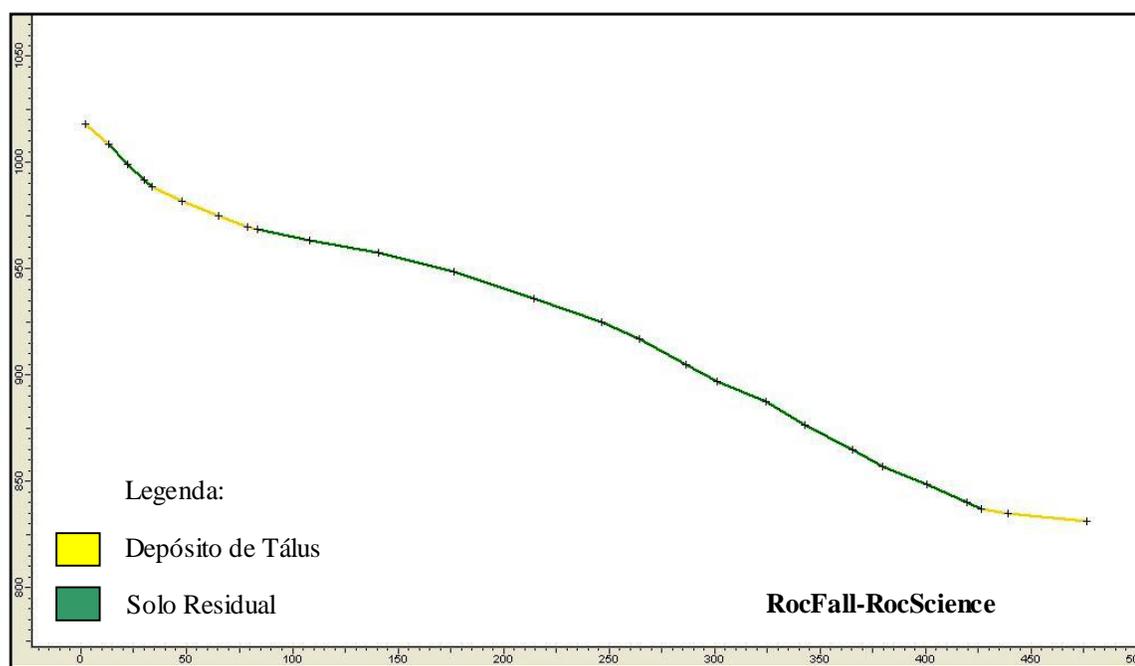
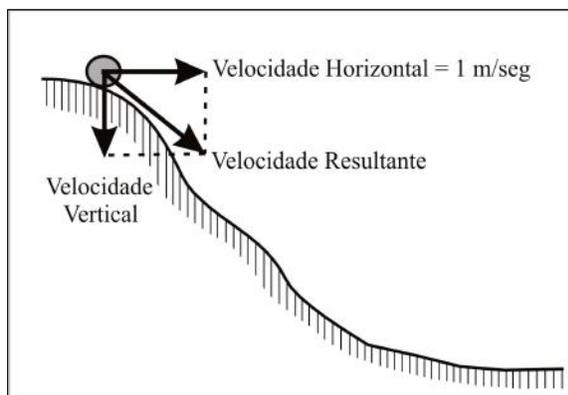


Figura 14 - Imagem do software RocFall- RocScience com as unidades geotécnicas identificadas na seção.

A velocidade inicial horizontal foi fixada em 1m/seg, que é a mínima aceita pelo RocFall, adotando-se assim uma postura conservadora da análise. Já a velocidade inicial vertical variou de seção para seção, impondo que o vetor resultante fosse paralelo ao declive inicial da topografia onde o bloco está situado (Figura 15).



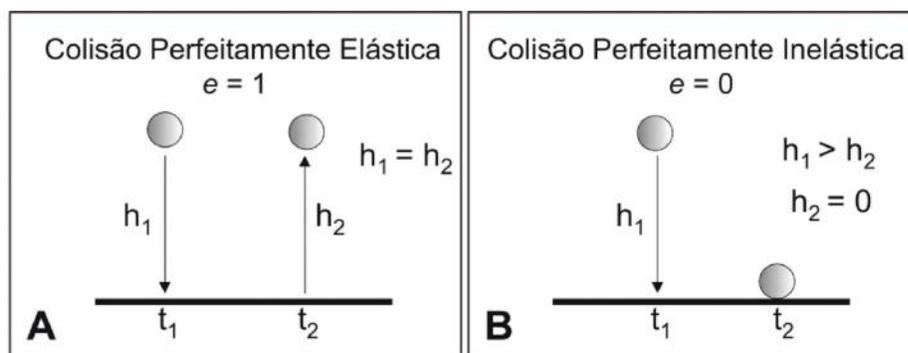
**Figura 15 - Esquema demonstrando como foi calculada a velocidade vertical de cada simulação a partir da velocidade resultante.**

Quanto a velocidade angular, os valores usados para o RocFall variaram de 0 rad/s. a 4 rad/s. O primeiro valor representa queda dos blocos, enquanto nos outros casos há o rolamento pela superfície da encosta.

Dentre os parâmetros utilizados pelo RocFall, talvez o coeficiente de restituição seja o mais importante a ser estudado e também o de mais difícil obtenção (Stevens, 1998). 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 (Equação 3).

$$e = \frac{V_{n+1}}{V_n} \quad (3)$$

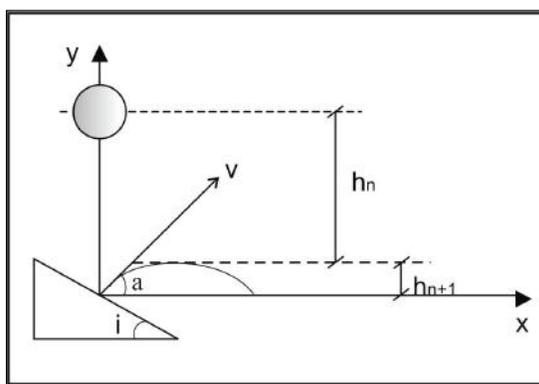
Seu valor pode variar entre 0 e 1. Quando  $e = 0$ , toda a energia cinética é perdida durante a colisão de uma partícula com a superfície (Figura 16-A). Assim, a altura da partícula após a colisão com a superfície ( $h_2$ ) será nula. Este processo é denominado de *Colisão Perfeitamente Inelástica*. Já quando o coeficiente de restituição chega a seu valor máximo, isto é,  $e = 1$ , ocorre uma *Colisão Perfeitamente Elástica*, onde toda a energia cinética envolvida na colisão é preservada (Figura 16-B). Neste caso, a altura  $h_2$  será a mesma da altura anterior a colisão ( $h_1$ ).



**Figura 16 - Tipos de colisões: (A) Colisão Perfeitamente Elástica; (B) Colisão Perfeitamente Inelástica (Dias & Barroso, 2006).**

No caso de blocos de rocha, o coeficiente de restituição possui valores intermediários, ou seja, entre zero e um ( $0 < e < 1$ ), no que se chama de *Colisão Parcialmente Inelástica*. Neste caso, há perda gradual da energia à medida que ocorrem as sucessivas colisões dos blocos com a superfície (Dias & Barroso, 2006). Assim, um bloco ao rolar em uma encosta terá uma altura menor a cada colisão em relação a altura apresentada anteriormente e chegará um momento onde esta altura será zero, pois toda a energia foi perdida. A dissipação total da energia significa que o bloco não mais se movimentará, tendo atingido seu alcance máximo.

De acordo com Carnevale (1991), no caso de encostas como mostrado na Figura 17, devem ser considerados os coeficientes de restituição normal e tangencial. Para o cálculo destes componentes, é necessário se conhecer o ângulo de inclinação da superfície em relação a horizontal ( $i$ ), o ângulo que o vetor velocidade faz em relação a horizontal ( $\alpha$ ), a altura inicial do bloco ( $h_n$ ) e a altura máxima alcançada pelo bloco em relação ao ponto inicial de impacto após a primeira colisão ( $h_{n+1}$ ).



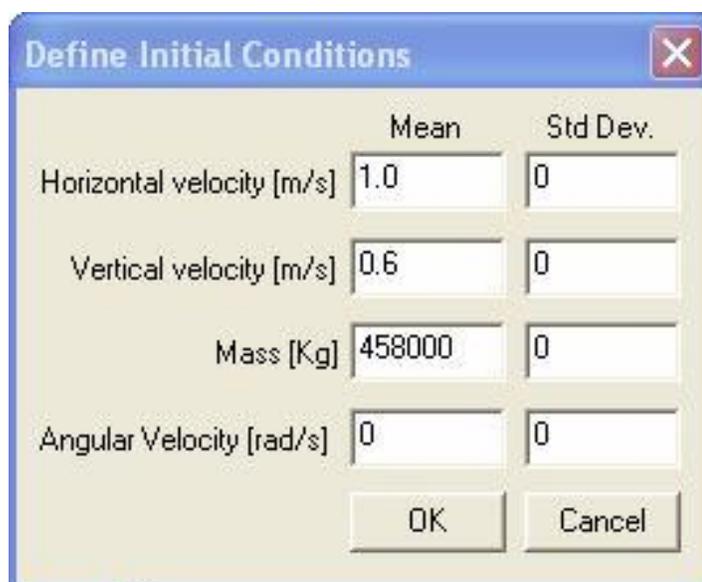
**Figura 17 - Componentes da colisão de uma partícula em um plano inclinado (Modificado de Carnevale, 1991).**

Os valores de coeficiente de restituição ( $e$ ) de cada material foram retirados de uma lista fornecida pelo próprio programa. Foram usados valores mínimo e máximo tanto para o  $e_{\text{normal}}$  quanto para o  $e_{\text{tangencial}}$ , como mostrados na Tabela 3. Contudo, vale ressaltar que os valores de coeficiente de restituição para diferentes tipos de solos e rochas são dados ainda escassos na literatura técnica.

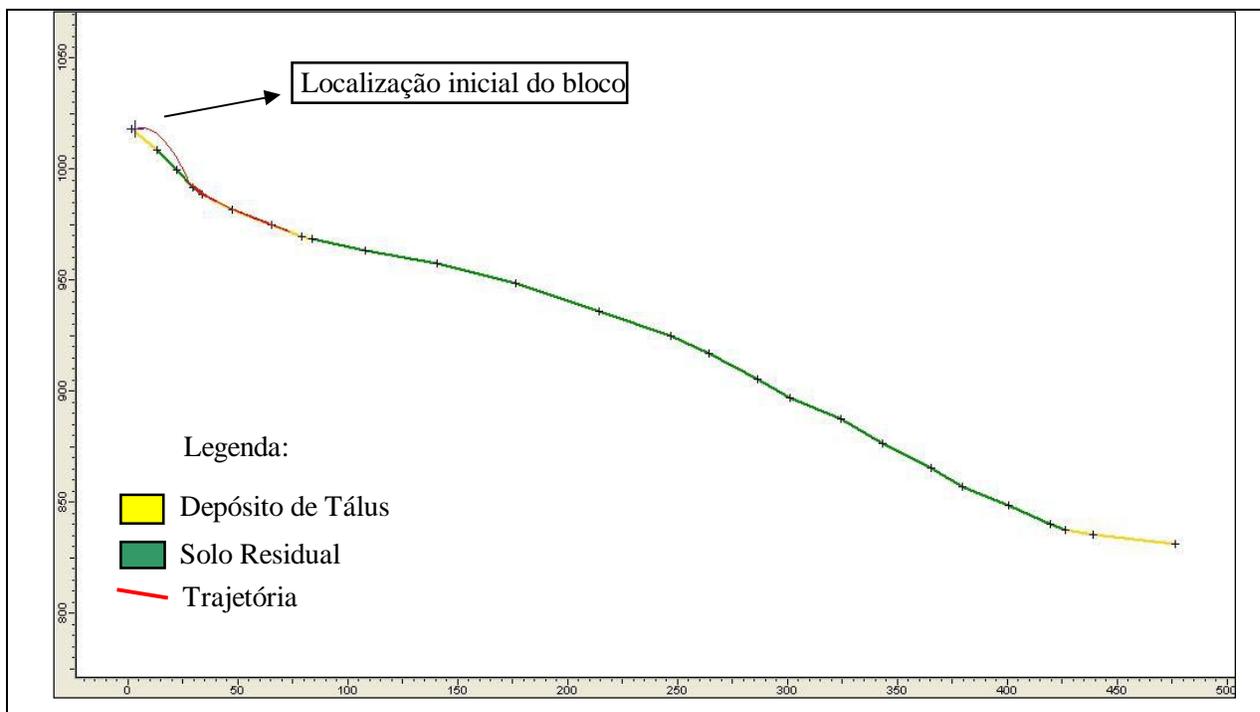
**Tabela 3 - Valores de coeficiente de restituição utilizados no programa RocFall.**

Material	$e_{\text{normal}}$		$e_{\text{tangencial}}$	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Rocha Sã	0,44	0,50	0,90	0,96
Depósito de Tálus	0,30	0,34	0,82	0,86
Solo Residual	0,36	0,42	0,54	0,60

A seguir, passou-se a etapa de simulação do alcance dos oito blocos no programa RocFall-RocScience. Este programa baseia-se nos conceitos de balística e a análise é realizada em duas dimensões. Com os blocos rochosos já situados e as seções geológico-geotécnicas já postas no programa, foram atribuídos os valores aos parâmetros para realização da simulação (Figura 18). Finalmente foi realizada a simulação da queda desses blocos, onde foi possível determinar o alcance (Figura 19).



**Figura 18 - Quadro onde se colocou os valores de alguns dos parâmetros utilizados no Rocfall.**



**Figura 19 - Simulação de queda/rolamento de bloco em uma das seções, realizado no software RocFall.**

Os resultados dessas simulações foram representados em mapa, para o que foi utilizado o Software Arc Gis 9.1, no qual estão as seções, os respectivos alcances dos blocos em cada seção onde foi realizada e a interpolação final para delimitação da área de risco.

#### **4.2. PFC-2D**

As etapas metodológicas adotadas no software PFC-2D estão esquematizadas na Figura 20.

O software PFC-2D é uma eficiente ferramenta na solução de problemas físicos relacionados ao movimento e a interação de partículas, através da modelagem em duas dimensões. Para isso, é inserido no programa uma série de comandos provenientes da linguagem FISH, através do qual se modela um sistema real para simular o processo geológico de interesse. O programa modela o movimento e a interação entre as partículas baseado no Método dos Elementos Discretos (DEM).

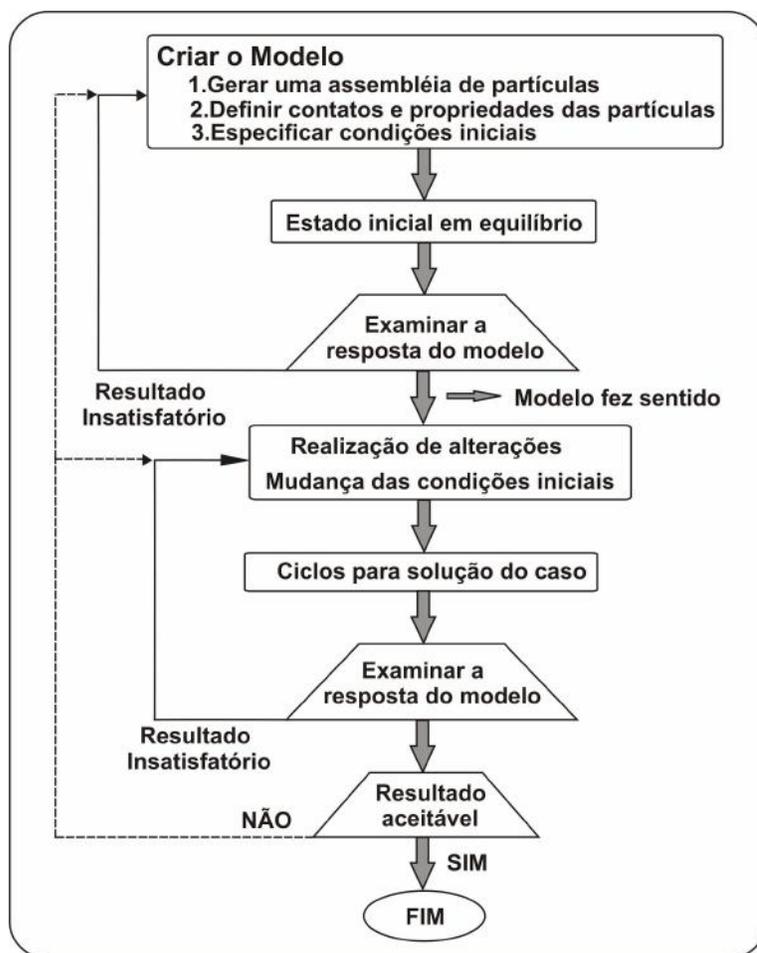
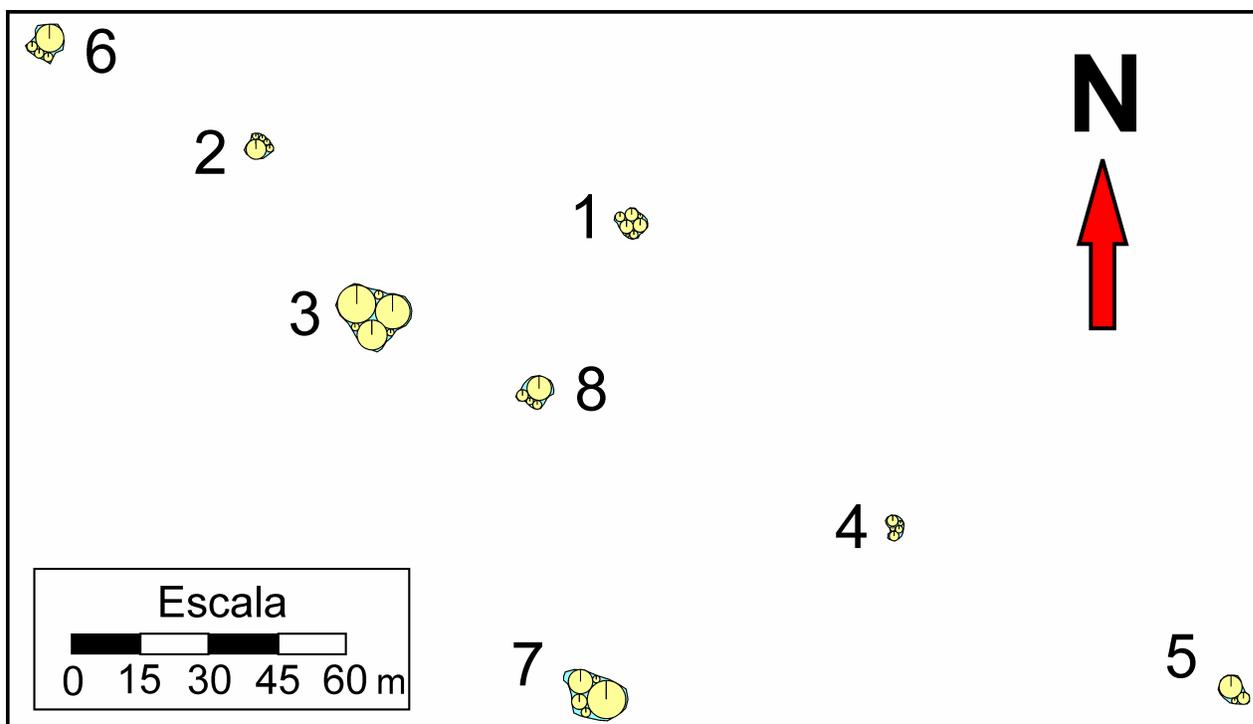


Figura 20 - Etapas metodológicas seguidas no programa PFC-2D. (Modificado do Manual do Programa PFC-2D).

*Modelo* é um sistema artificial que representa, de modo simplificado, um sistema real. A arte da modelagem consiste em incluir no modelo um número restrito de componentes, os quais representam os aspectos mais importantes do sistema real, no sentido de afetar a resposta que se pretende prever. (Bussab & Morentim, 1995). No caso do software PFC-2D, três componentes são necessários para se construir um modelo:

- Conjunto de partículas, onde o programa adota dois tipos básicos de partículas: circunferências e retas. É preciso saber o número, o tamanho e a localização dessas partículas no plano;
- Contatos e propriedades dessas partículas, que ditam o tipo de resposta que o programa dará sobre o problema apresentado;
- Condições iniciais, que definem o estado *in situ* do modelo.

No caso da modelagem de queda/rolamento de blocos o conjunto de partículas a que se refere o programa são os blocos rochosos e a topografia do local. Com relação aos oito blocos rochosos já analisados anteriormente, estes foram divididos em circunferências de tal forma com que mantivessem o formato apresentado na fotografia aérea (Figura 21). Foi preciso localizar o centro e colocar o raio de cada circunferência no plano.



**Figura 21 - Divisão dos oito blocos rochosos em circunferências.**

Quanto à topografia da região, foi criada uma série de segmentos de reta interligados uns aos outros, de tal modo a representar o mais fiel possível o formato original de cada seção topográfica (Figura 22). Para isso, foi preciso localizar o início e o fim de cada um desses segmentos de reta no plano, sendo confeccionadas um total de 24 seções geotécnicas para a simulação (Figura 23). O número de 24 seções se deve ao fato de serem feitas três seções para cada bloco estudado.

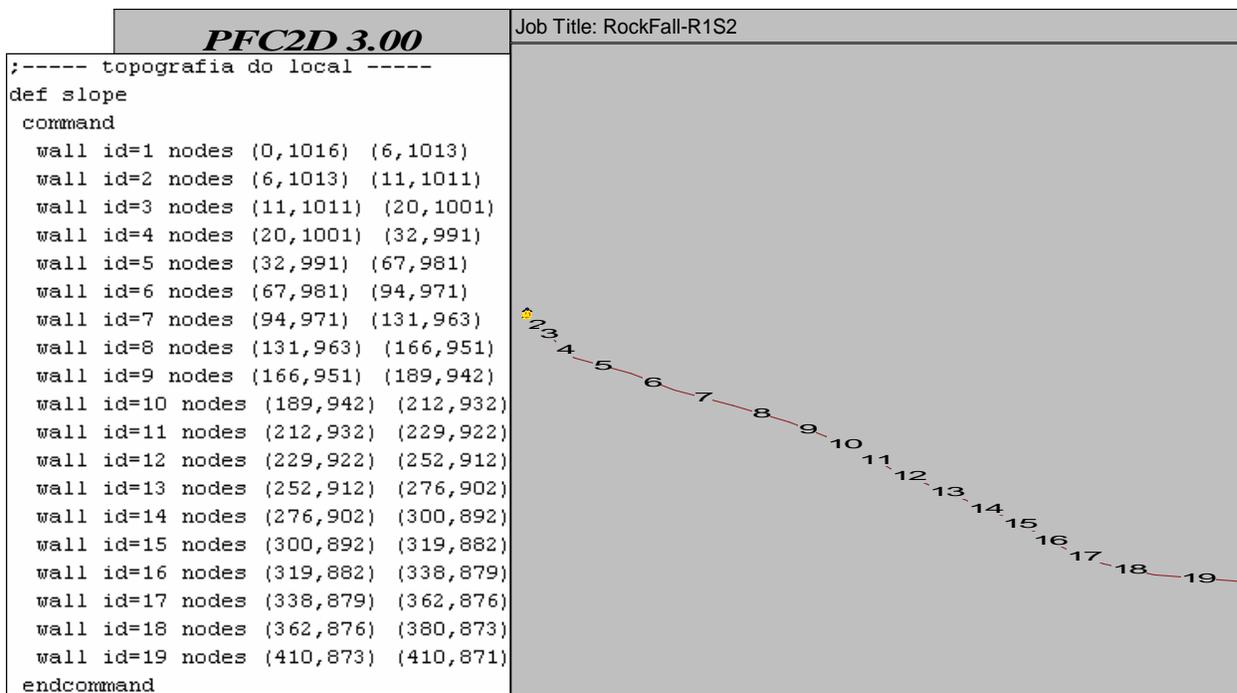


Figura 22 - Topografia de uma seção criada no software PFC-2D.

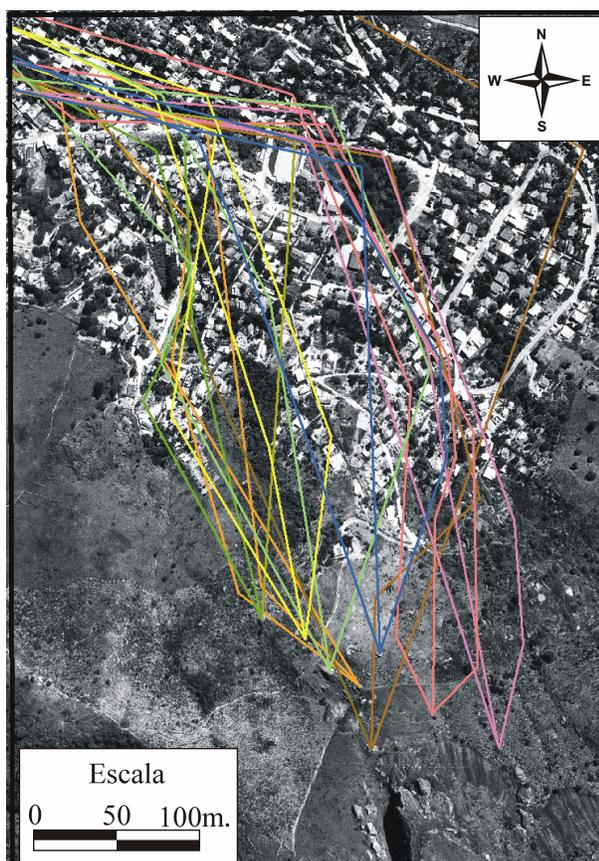


Figura 23 - Localização das 24 seções analisadas pelo software PFC-2D.

Posteriormente foi preciso definir os valores dos contatos e das propriedades dessas partículas. Ocorrem dois tipos de contato entre essas partículas:

- Ligações normais: reproduzem o efeito de adesão atuando sobre uma pequeníssima área em contato entre duas partículas. Estão representados na Figura 24 por retas vermelhas;
- Ligações paralelas: que reproduzem o efeito de um material adicional (como por exemplo cimentação) depositada após as partículas estarem em contato. Estão representados na Figura 24 por retas amarelas.

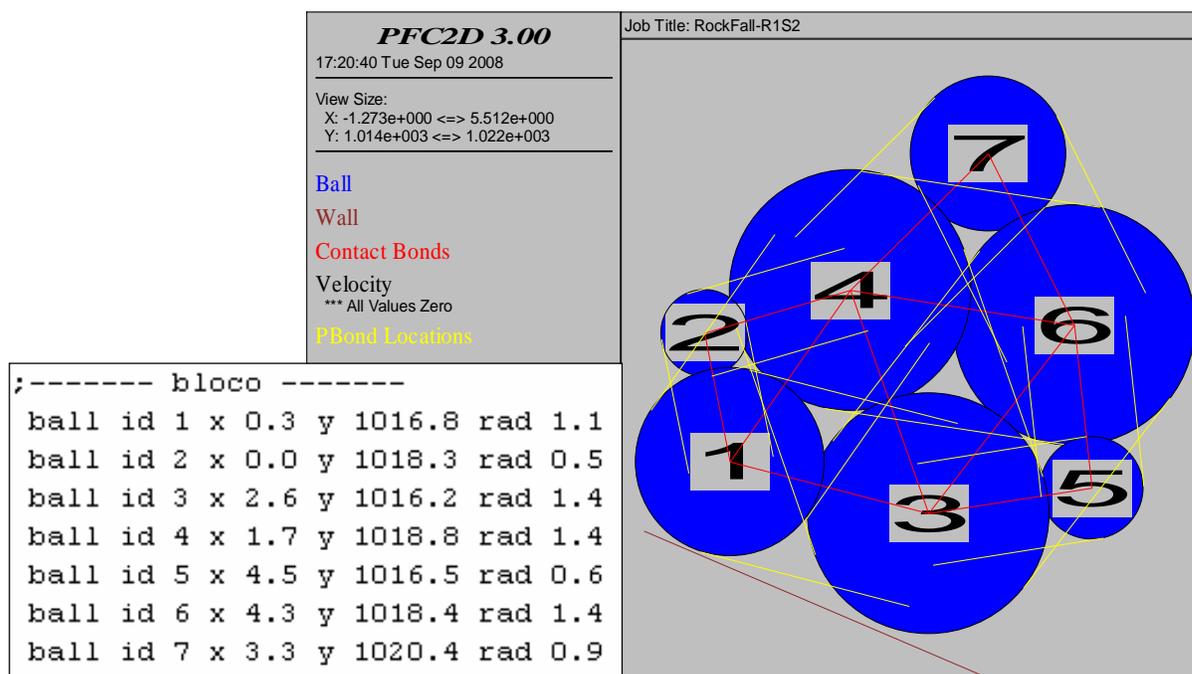
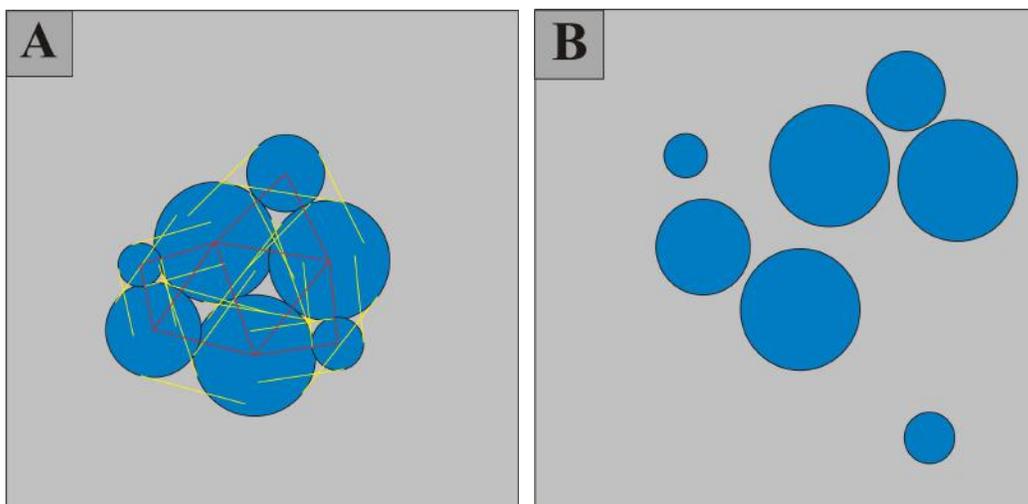


Figura 24 - Um dos blocos divididos em circunferências onde se podem visualizar as ligações normais e paralelas entre as circunferências.

Foram utilizados valores mínimos de tensão que anulassem a força de repulsão nos contatos existentes entre essas circunferências. Isso foi feito para que as circunferências ficassem unidas entre si (Figura 25-A), evitando assim a desunião entre essas partículas durante a simulação (Figura 25-B). Assim, o valor utilizado para ligações normais e paralelas foi de  $5.10^8 \text{ N/m}^2$ .



**Figura 25 - (A) Valor de força dos contatos que mantem as circunferências unidas entre si; (B) Valor de força dos contatos que não consegue manter as circunferências unidas entre si.**

Com relação às propriedades físicas dessas partículas, foram utilizados os mesmos valores para os parâmetros já existentes no RocFall, como massa específica ( $2550 \text{ Kg/m}^3$ ) e o coeficiente de atrito, que usa o valor correspondente a tangente do ângulo de atrito ( $\text{tg } 30^\circ = 0,577$ ).

Mas outros parâmetros não estão contemplados no RocFall e estão presentes no PFC-2D, como a rigidez e o amortecimento.

A rigidez pode ser entendida como a resistência de um corpo à deformação quando uma força é aplicada sobre ele, definida pela Equação 4, onde  $P$  é uma força constante aplicada no corpo e  $\delta$  é o deslocamento produzido pela força.

$$k = \frac{P}{\delta} \quad (4)$$

O programa discrimina dois tipos de rigidez: a rigidez normal ( $K_n$ ) e a rigidez cisalhante ( $K_s$ ). Para efeitos de simplificação foram usados valores iguais de  $K_n$  e  $K_s$ . O valor usado foi aquele que permitisse com que a superfície topográfica se comportasse de forma rígida (Figura 26-A) e não elástica (Figura 26-B). Para isso foi usado o valor de  $10^8 \text{ N/m}$ .

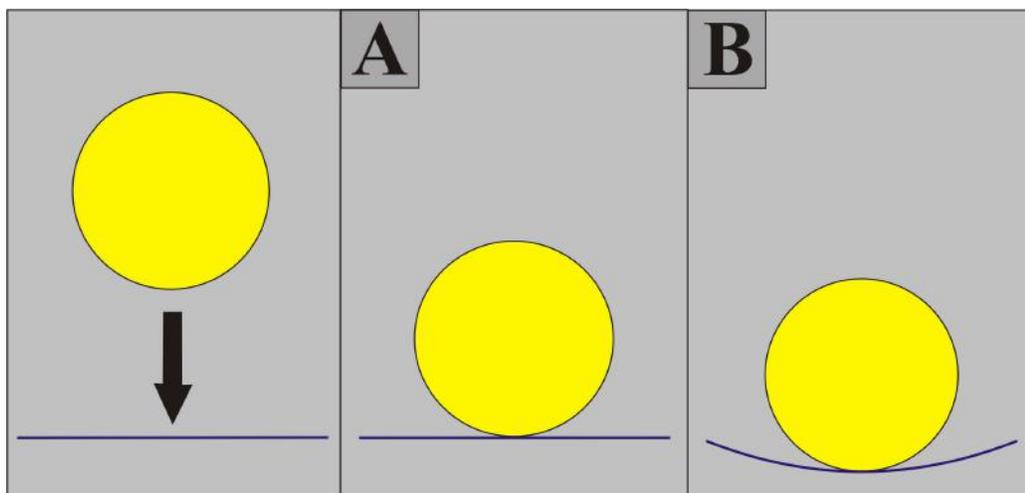


Figura 26 - De acordo com os valores de rigidez, tem-se uma: (A) Superfície rígida; (B) Superfície flexível.

O amortecimento ( $\beta$ ) pode ser definido como sendo todo efeito, gerado deliberadamente ou inerente a um sistema, que tenda a reduzir a amplitude das oscilações de um sistema oscilatório. Para uma superfície onde  $\beta=0$  (Figura 27-A), toda energia após o choque de um corpo com a superfície é preservada, de tal forma que após o choque a esfera retorna para a mesma altura anterior ao impacto. Já em superfícies com  $\beta=1$ , toda a energia da esfera após o impacto é perdida e a altura é nula após o impacto (Figura 27-B).

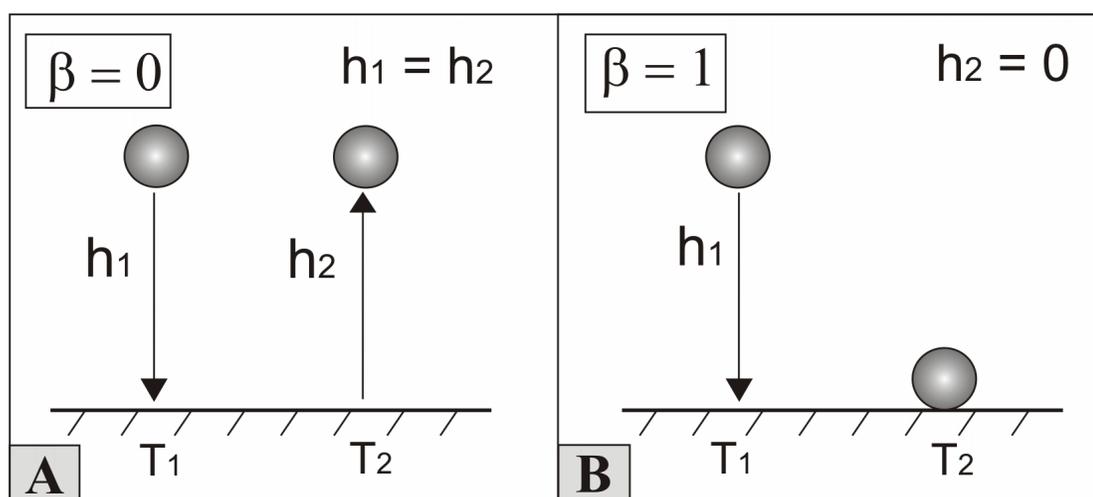
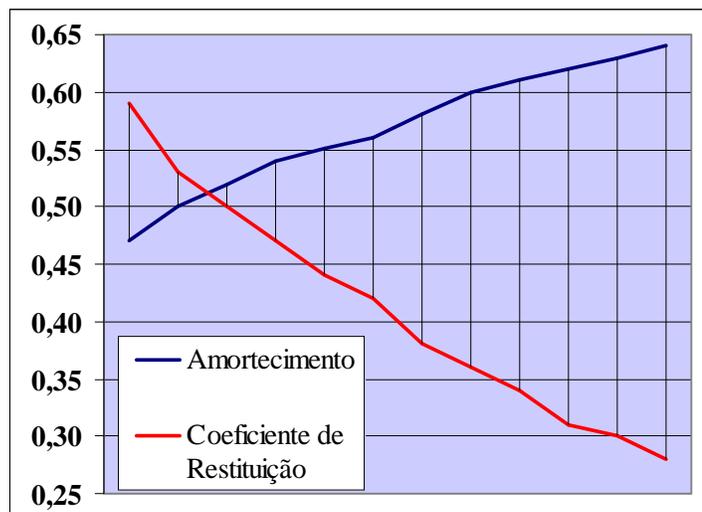


Figura 27 - Comportamento de uma esfera após o choque com uma superfície com diferentes valores de amortecimento: (A)  $\beta = 0$  e (B)  $\beta = 1$ .

Como se vê, há uma intrínseca relação entre o coeficiente de restituição e o amortecimento, comprovada pela Figura 28, onde quanto maior o valor de um desses atributos menor será o valor do outro.



**Figura 28 - Gráfico demonstrando a relação entre o amortecimento e o coeficiente de restituição.**

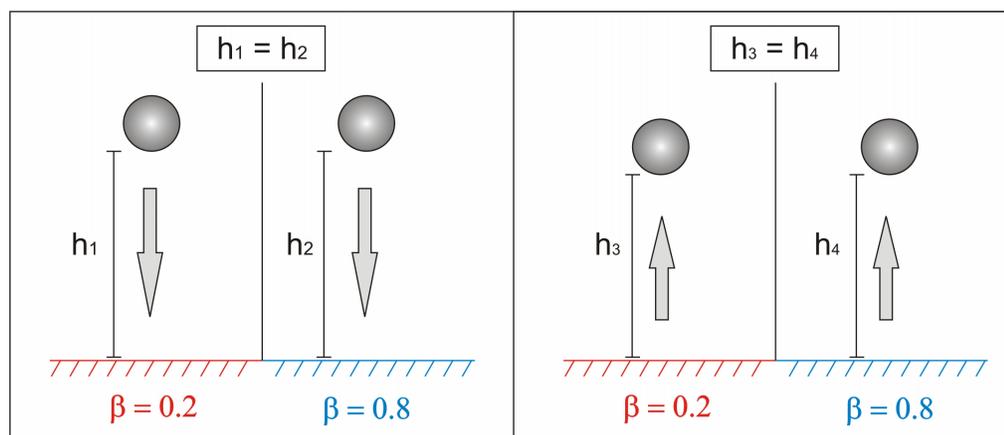
Assim, os valores de amortecimento inseridos no PFC-2D foram calculados de acordo com os valores de coeficiente de restituição ( $e$ ) empregados no programa RocFall. Para isso foi realizada uma experiência onde uma circunferência cai de uma determinada altura sob diferentes valores de amortecimento para a superfície no qual a circunferência colide. Para cada experimento foi produzido um gráfico onde, a partir da razão entre as velocidades após o impacto com a superfície e anterior a esse impacto, foi calculado o valor de coeficiente de restituição. Isso foi feito exhaustivamente até serem encontrados os valores de amortecimento ( $\beta$ ) correspondentes aos valores de  $e$  utilizados no RocFall (Tabela 4).

**Tabela 4 - Valores de coeficiente de restituição e amortecimento correspondentes.**

$e$	0,30	0,34	0,36	0,42	0,44	0,50	0,54	0,60	0,82	0,86	0,90	0,96
$\beta$	0,63	0,61	0,60	0,56	0,55	0,52	0,47	0,44	0,31	0,24	0,19	0,14

Após essa etapa, foi feita outra experiência para se comprovar o funcionamento do parâmetro amortecimento durante a simulação da queda/rolamento de blocos: duas circunferências caem de uma mesma altura e se chocam com uma superfície que apresenta dois diferentes valores de amortecimento. O resultado esperado era que essas circunferências retornassem com alturas diferentes, o que não ocorreu (Figura 29). Vários experimentos foram tentados sem nenhum

sucesso, visto que o problema pode ser do próprio software. A solução encontrada para se contornar esse problema foi fazer uma média ponderada dos valores de amortecimento para cada seção geotécnica, tentando se aproximar de uma situação mais realista possível.



**Figura 29 - Experimento realizado onde se verificou o problema com relação ao amortecimento.**

As condições iniciais utilizadas no PFC-2D foram definidas com os mesmos valores que aqueles utilizados pelo software RocFall. Os valores utilizados foram, para a velocidade inicial horizontal de 1 m/seg, a velocidade inicial vertical variou de acordo com a declividade inicial onde o bloco está situado, a gravidade de 9,81 m/s<sup>2</sup> e a velocidade angular de 0 rad/s. Esse valor foi o único utilizado nas simulações com o PFC-2D devido ao fato de que a área suscetível a ocorrência de queda/rolamento de blocos rochosos foi muito maior que o esperado, sendo assim usado apenas o valor mínimo para a velocidade angular.

Com todos os valores definidos, temos um estado inicial do modelo em equilíbrio. Posteriormente é analisada a resposta desse modelo. Assim, se o modelo fizer sentido, são realizadas alterações através de mudanças das condições inicialmente colocadas. Depois são feitas as ciclagens do modelo pelo programa, onde se faz as simulações e são examinadas as respostas apresentadas pelo modelo. Caso o resultado seja aceitável, chegamos ao fim do processo de modelagem e são analisados os alcances desses blocos, com a delimitação de zonas de suscetibilidade no mapa, para o que foi utilizado o Software Arc Gis 9.1.

## 5. RESULTADOS

Com o mapeamento geotécnico realizado em campo (Figura 30), foram identificadas três unidades geotécnicas distintas: a primeira formada por afloramentos de gnaiss, a segunda por solo residual, que ocupa a maior parte da área mapeada e a terceira representada por depósito de tálus, cujos blocos possuem raio variando desde poucos centímetros a uma dezena de metros.

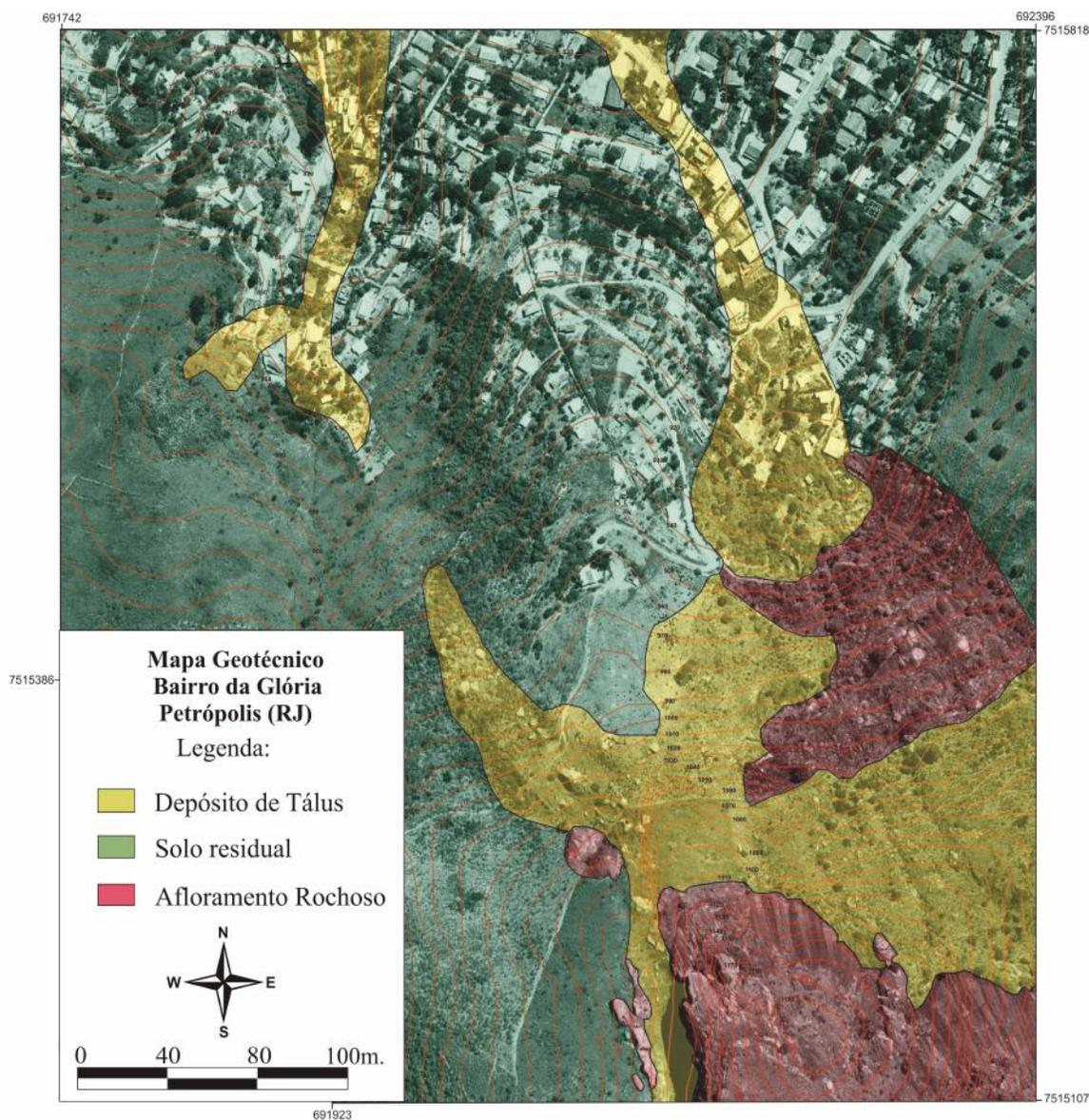


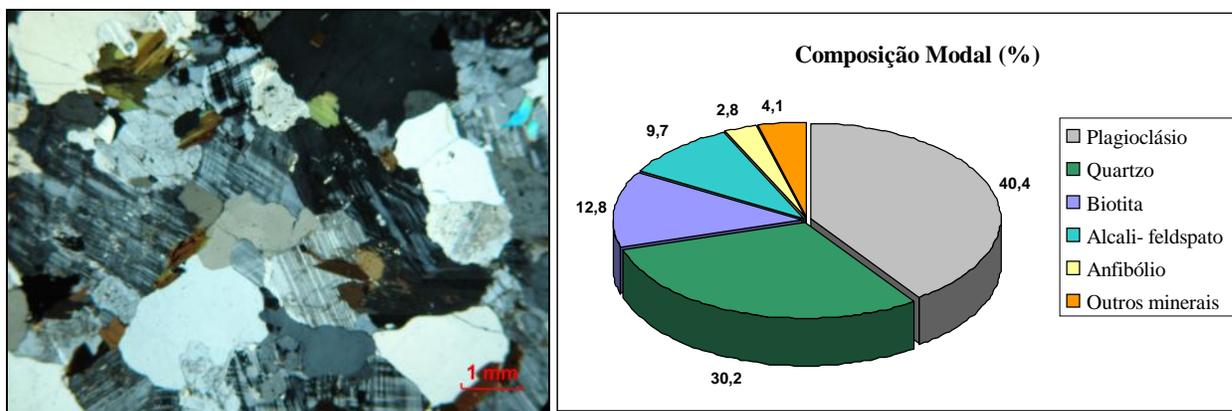
Figura 30 - Mapa geotécnico da região do Bairro da Glória, Petrópolis (RJ).

Em relação aos oito blocos rochosos analisados, foram calculadas suas massas, como mostra a Tabela 5.

A rocha leucocrática encontrada em campo e que compõe esses blocos é um Hornblenda-biotita gnaiss de granulação média e coloração acinzentada, cuja composição modal é apresentada esquematicamente na Figura 31.

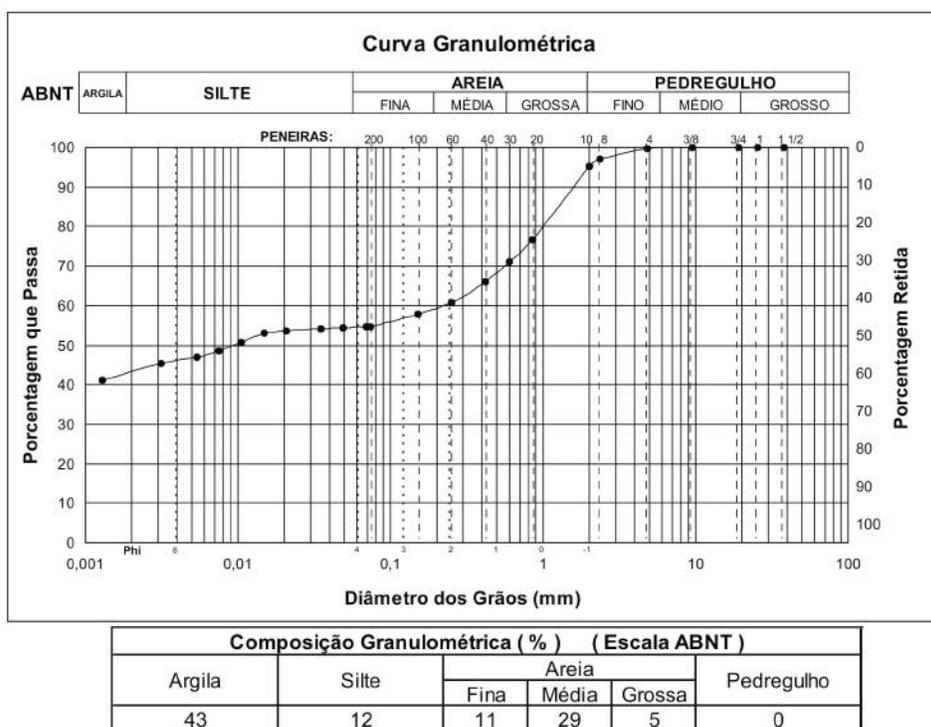
**Tabela 5 - Raio, volume e massa dos oito blocos estudados.**

N° do bloco	Raio (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Massa (ton)
1	3,5	179,6	458
2	2,5	65,4	167
3	7,0	1436,8	3664
4	2,0	33,5	85
5	3,0	113,1	288
6	4,5	381,7	973
7	6,0	904,8	2307
8	2,0	33,5	85



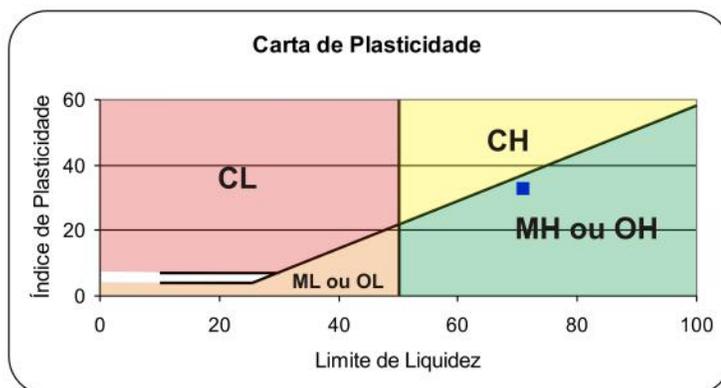
**Figura 31 - Fotografia de uma lâmina delgada do gnaiss e composição modal da rocha.**

Já o solo residual apresenta uma composição predominantemente argilosa, constatado através do resultado do ensaio granulométrico (Figura 32).



**Figura 32 - Resultado do ensaio granulométrico do solo residual.**

Apresenta um Limite de Liquidez de 71 % e um Limite de Plasticidade de 38 %, resultando para esse solo um Índice de Plasticidade de 33%, sendo classificado como um Solo de Alta Plasticidade. Quando plotados os valores de Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez na Carta de Casagrande (Figura 33), segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), o solo é classificado como MH (Siltoso de alta compressibilidade) ou CH (Argiloso de alta compressibilidade), embora esteja situado no campo de MH/ OH. Isso se deve ao fato do ponto estar muito próximo a reta que divide os campos de MH e CH (Pinto, 2000).



**Figura 33 - Carta de plasticidade (Carta de Casagrande) com o resultado do solo da área representado pela marca azul.**

## 5.1. RocFall

As cartas de suscetibilidade feitas de acordo com as simulações realizadas pelo programa RocFall estão representadas pelas figuras 34 e 35. A primeira, com velocidade angular de 0 rad/s. (Figura 34), representando mecanismos de queda, e a segunda, para uma velocidade de 4 rad/s. (Figura 35), representando situações de rolamento.

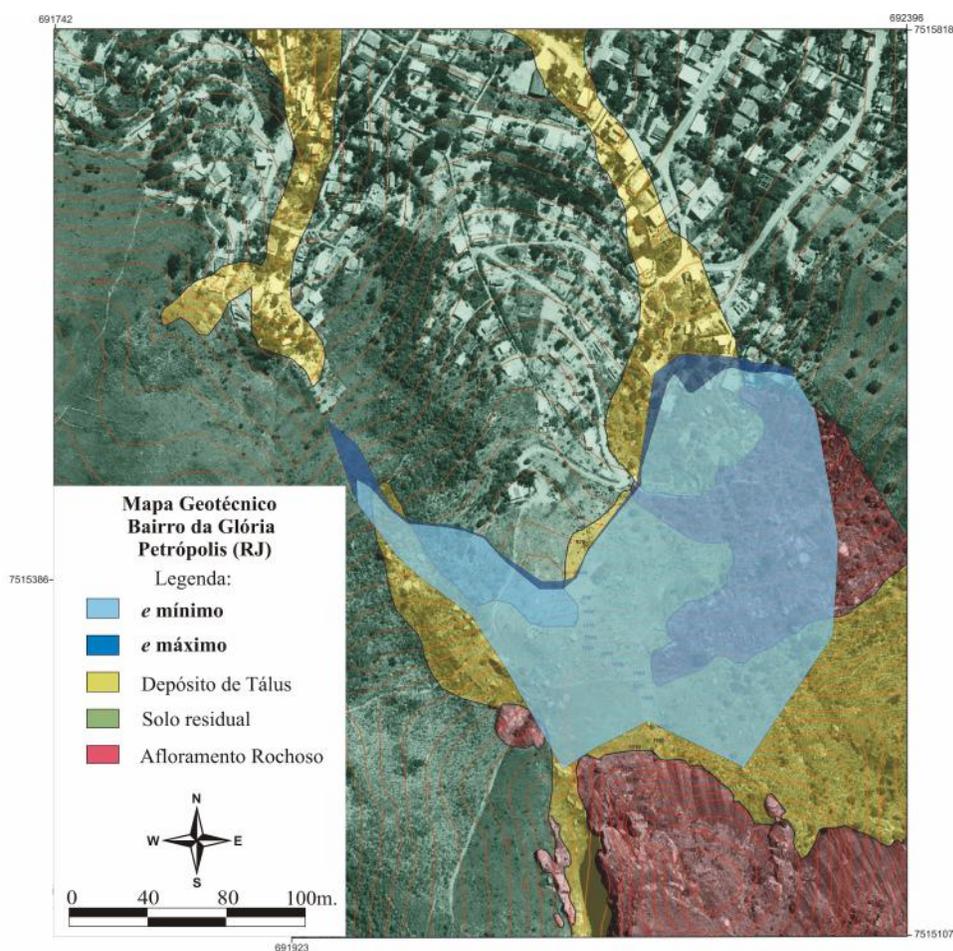
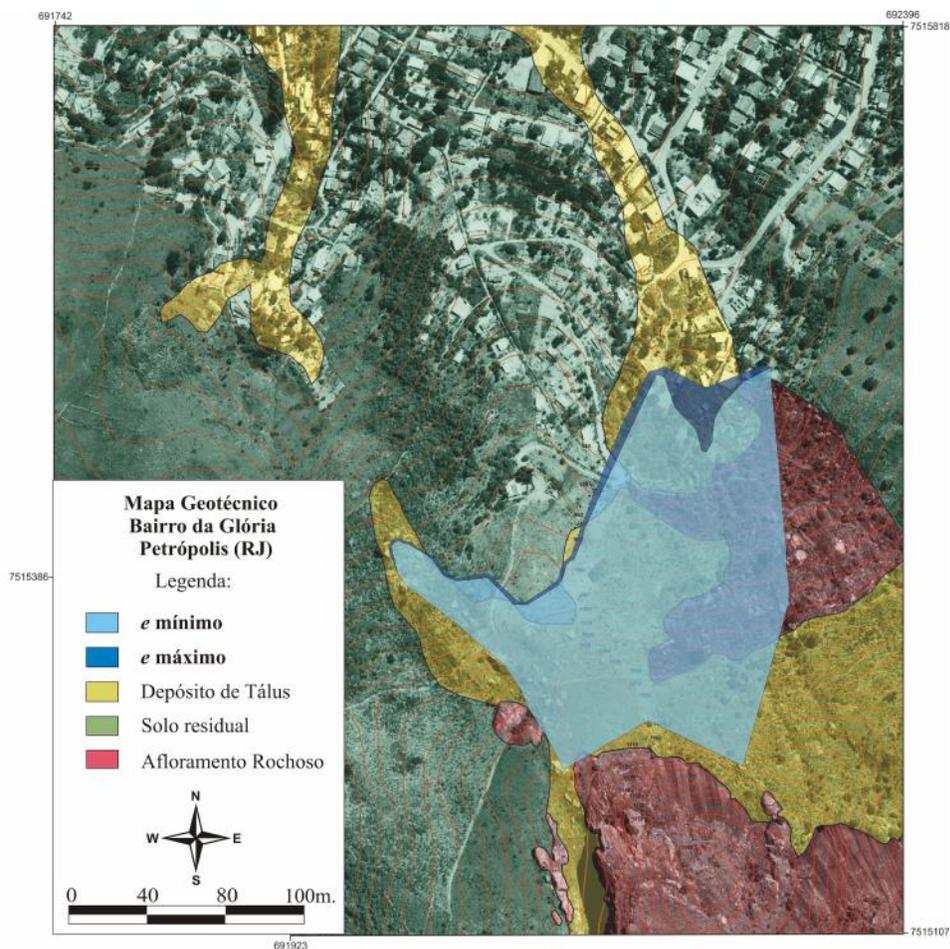


Figura 34 - Zona de suscetibilidade a ocorrência de queda de blocos rochosos segundo uma velocidade angular de 0rad/s. para valor de  $e$  mínimo e máximo.



**Figura 35 - Zona de suscetibilidade a ocorrência de queda de blocos rochosos segundo uma velocidade angular de 4rad/s. para valor de  $e$  mínimo e máximo.**

Nelas podem ser vistas as zonas que são afetadas segundo o uso de valores máximo e mínimo para coeficiente de restituição específico para as unidades geotécnicas mapeadas e que se apresentam nas trajetórias dos blocos.

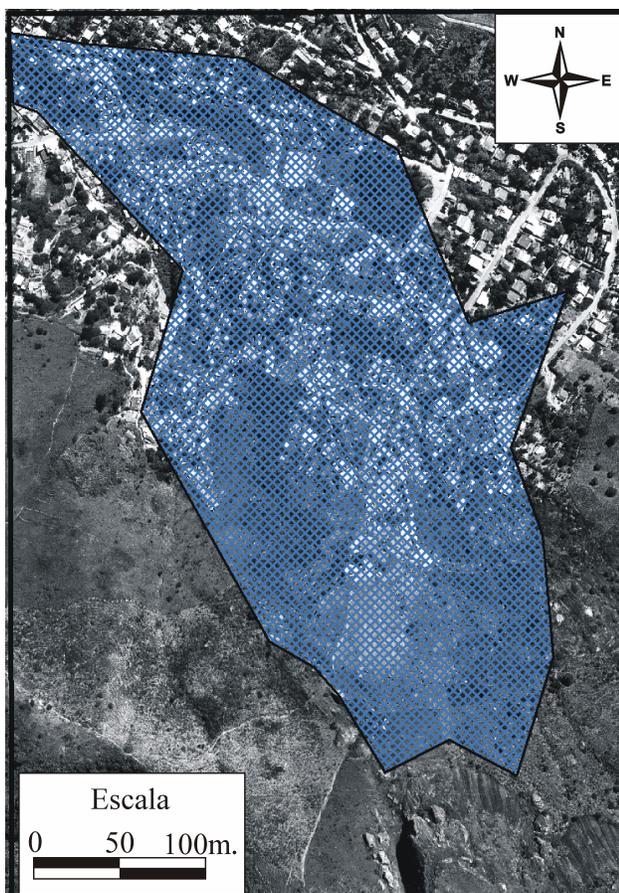
A Tabela 6 mostra o número de construções que estão nessas zonas de risco, de acordo com essa variação dos valores do coeficiente de restituição máximo e mínimo e das velocidades angulares de 0 e 4 rad/s.

**Tabela 6 - Número de construções localizadas na zona de suscetibilidade.**

$e$ \ Velocidade angular	0 rad/s	4 rad/s
Mínimo	3	8
Máximo	8	12

## 5.2. PFC-2D

A carta de suscetibilidade feita de acordo com as simulações realizadas pelo programa PFC-2D está representada pela Figura 36. Nela pode ser vista a zona afetada segundo os valores dos parâmetros analisados pelo modelo criado pelo PFC-2D.



**Figura 36 - Zona de suscetibilidade a ocorrência de queda de blocos rochosos usando o programa PFC-2D, segundo uma velocidade angular de 0rad/s.**

## 5.3. Comparação dos resultados obtidos com os dois programas

Com os dados obtidos pelos dois programas, podemos comparar os resultados apresentados pelos alcances das simulações realizadas. Pode ser constatado que tanto a área suscetível à queda/rolamento de blocos quanto o número de construções localizadas nessas áreas aumentaram quando as simulações foram realizadas com o software PFC-2D quando comparado com o

resultado apresentado pelo RocFall para uma velocidade angular de 4 rad/s., como pode ser observado na Figura 37 e na Tabela 7.

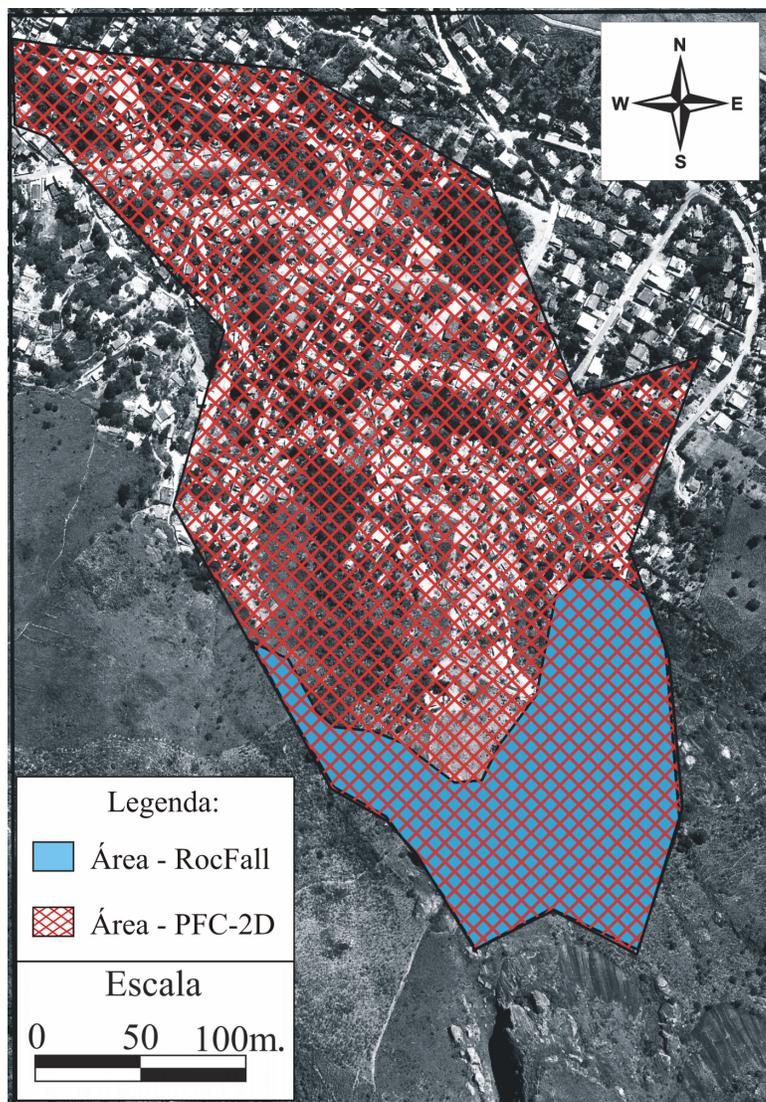


Figura 37 - Comparação entre as áreas de suscetibilidade dos softwares RocFall e PFC-2D.

Tabela 7 - Comparação das áreas e número de construções nas zonas de suscetibilidade.

Software	Área atingida pelos blocos	Nº de construções na zona de suscetibilidade
<b>RocFall</b>	53.180 m <sup>2</sup>	12
<b>PFC-2D</b>	239.605 m <sup>2</sup>	238

## 6. CONCLUSÕES

O mapeamento geotécnico realizado na área mostrou-se imprescindível para o estabelecimento das zonas de risco na área. Com as unidades geotécnicas identificadas, foi possível realizar a simulação das quedas/rolamentos dos blocos, mostrando a distância alcançada pelos mesmos. Isto mostra que a confecção do mapa geotécnico é uma etapa chave na análise de problemas deste tipo e, portanto, deve ser realizado com método e critério.

Como resultado deste estudo, verifica-se que o número de construções situadas na área suscetível a uma eventual queda/rolamento de blocos aumentou cerca de vintes vezes quando o modelo foi analisado pelo software PFC-2D. Isso se deve ao fato de que este programa é mais elaborado no que diz respeito a análise de movimentos de massa, com um número de parâmetros mais relevantes que aqueles apresentados pelo RocFall. Além disso, o programa RocFall considera os blocos circulares em suas simulações, ao passo que o PFC-2D considera o formato apresentado por cada um dos blocos analisados. Por isso, os dados proporcionados pelo PFC-2D são mais confiáveis que aqueles obtidos com o RocFall.

Mas quando se trata de simplicidade e rapidez nas simulações realizadas, o software RocFall é mais vantajoso em relação ao PFC-2D. Além disso, o RocFall é um programa mais fácil e didático em relação ao PFC-2D, pois este exige que o usuário aprenda quais comandos serão necessários para se atender a finalidade desejada pelo indivíduo e qual o momento correto de utilizá-los nos dados de entrada.

Deve-se ressaltar que os números apresentados já estão desatualizados, pois a fotografia aérea analisada é do ano de 1999. Essa afirmação foi confirmada pela ida a localidade no ano de 2007, onde o número de construções cresceu de forma assustadora. Este fato não invalida o trabalho que tem o objetivo principal de apresentar metodologia adequada para tratar este tipo de instabilidade.

Através desta pesquisa, podemos perceber que é de extrema importância analisar o tipo de movimento de massa que ocorre em uma determinada região, para que assim se possa não só verificar as causas destes movimentos de massa, como também definir áreas mais suscetíveis a eles

e, a partir daí, propor e aplicar formas de prevenção. Espera-se que medidas de prevenção sejam tomadas pelos órgãos competentes em relação a área estudada.

Além disso, o estudo mostra que a variação de alcance dos blocos em função dos parâmetros apresentados, como o coeficiente de restituição e a velocidade angular é relevante neste tipo de análise, dependendo do tipo de planejamento que se deseja fazer em uma área. Assim, o estudo mais aprofundado acerca destes parâmetros é de vital importância para este tipo de ocorrência.

Sugere-se que sejam realizadas novas simulações no PFC-2D separando-se em trechos as seções geotécnicas e simulando-se o movimento dos blocos em cada trecho seqüencialmente, a fim de possibilitar a atribuição dos valores corretos de amortecimento, pois a utilização de valores médios leva a erros nos resultados.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellán, A. *et al.* 2006. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain), *Engineering Geology*, 88: 136-148.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. 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.
- 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.
- Baptista, A.C. & Calijuri, M.L. 2007. Caracterização espaço-temporal por sensoriamento remoto da expansão urbana na APA Petrópolis. *In: ANAIS XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, Florianópolis. INPE, p. 5091-5098.
- Brunsden, D. & Prior, C. B. 1984. *Slope instability*. Wiltshire, John Wiley & Sons. 619 p.
- Bussab, W.O. e Morettin, P.A. 1995. *Estatística básica*. São Paulo, Atual Editora, 321p.
- Carnevale, G. 1991. Simulações Teóricas de Casos de Desmoronamento de Taludes Rochosos de Taludes Rochosos. *Solos e Rochas*, 14 (1): 21-40.
- Chau, *et al.* 2002. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39: 69–77.
- 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.
- DNIT. 2002. Mapa rodoviário do Estado do Rio de Janeiro. Ministério dos Transportes. Escala 1:500.000. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/menu/rodovias/mapas>. Acesso em 11 mar. 2008.

- Fernandes, N. F & Amaral, C. P. 1996. Movimentos de Massa: uma Abordagem Geológico Geomorfológica. *In: GUERRA, A. J. T. & Cunha, S.B. (Orgs.) Geomorfologia e Meio Ambiente*, Editora Bertrand Brasil, p. 123 – 194.
- 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.
- Itasca. 2003. *Manual do Programa PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions), Versão 3.0*. Minneapolis, Minnesota, Estados Unidos.
- Oliveira, F. L., Gonçalves, L. F. H. & Guerra, A. J. T. 2001. Avaliação dos Movimentos de Massa Ocorridos no Município de Petrópolis (RJ) entre 1960 e 1999. *In: IX SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA-Construindo a Geografia Para o Século XXI*, 1, Recife. p. 50-51.
- Oliveira, F. L., Gonçalves, L. F. H. & Guerra, A. J. T. 2003. Análise comparativa dos dados históricos de movimentos de massa ocorridos em Petrópolis - RJ, das décadas de 1960 até 1990. *Geo UERJ*, Rio de Janeiro.
- Pacheco, M. & Coutinho, R.Q. 2006. Avaliação de Risco de Deslizamentos nas Encostas de Petrópolis (RJ) e da Região Metropolitana de Recife (PE). *Solos e Rochas*, 29 (2): 223-235.
- Pinto, C. S. 2000. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. São Paulo, Oficina de textos. 247p.
- 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.
- Sasiharan, N. *et al.* 2006. Numerical analysis of the performance of wire mesh and cable net rockfall protection systems. *Engineering Geology*, 88: 121 –132.
- Selby, M.J. 2005. *Hillslope Materials and Processes*. 2005. Oxford University Press, Oxford, England. 451p.

- 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.
- Vargas Jr, E.A.; Castro, J.T.; Amaral, C. & Figueiredo, R.P. 2004. On Mechanics for Failures of Some Rock Slopes in Rio de Janeiro, Brasil: Thermal Fatigue? *In: 9<sup>th</sup> International Symposium on Landslides: Evaluation and Stabilization.*, 2, Rio de Janeiro. p. 1007-1012.
- Wasowsky, J. & Gáudio, V. Del. Evaluating seismically induced mass movement hazard in Caramanico Terme (Italy), 2000. 1fot., color, 5,6 cm x 8 cm.