

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Camila Westphalen Barroso

**SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS NA BACIA
SÃO GERALDO, NOVA FRIBURGO/RJ, COM BASE NA
ANÁLISE DOS EVENTOS DE JANEIRO DE 2011**

Porto Alegre
julho 2016

CAMILA WESTPHALEN BARROSO

**SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS NA BACIA
SÃO GERALDO, NOVA FRIBURGO/RJ, COM BASE NA
ANÁLISE DOS EVENTOS DE JANEIRO DE 2011**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani
Coorientador: Felipe Gobbi Silveira

Porto Alegre
julho 2016

CAMILA WESTPHALEN BARROSO

**SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS NA BACIA
SÃO GERALDO, NOVA FRIBURGO/RJ, COM BASE NA
ANÁLISE DOS EVENTOS DE JANEIRO DE 2011**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Luiz Antônio Bressani e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2016

Prof. Luiz Antônio Bressani
PhD pelo Imperial College,
University of London
Orientador

Prof. Felipe Gobbi Silveira
Dr. pelo PPGEC/UFRGS,
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Festugato
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul

Marcos Strauss
(Azambuja)
M. Sc. pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul

Prof. Felipe Gobbi Silveira
(UNISINOS/FGS)
Dr. pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Antônio Bressani
(UFRGS)
PhD. pelo Imperial College,
University of London

É com carinho e admiração que dedico este trabalho a meus pais, Clarissa e Ricardo, que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho significa o final de um etapa de vida que somente foi possível pelo apoio que pessoas especiais me dispensaram.

Agradeço meus pais, Clarissa e Ricardo, que, além do incentivo diário e apoio em todos os momentos, me serviram de inspiração. De uma família de engenheiros, eu não poderia sair sem a veia da engenharia.

A Universidade me deu ferramentas para levar adiante minha vida profissional e no papel do Prof. Bressani, orientador deste trabalho, tive o auxílio e apoio necessário para desenvolver este trabalho. Obrigada pela disponibilidade e paciência comigo.

Agradeço ao Eng. Felipe Gobbi, coorientador deste trabalho, que me deu a oportunidade de realizar um trabalho prático, no qual aprendi muito e me fez pegar gosto pela Geotecnia. O seu apoio, comentários e discussões foram essenciais para o trabalho. E também não posso deixar de agradecer pela oportunidade de aprendizado durante o estágio na sua empresa. Agradeço também toda equipe da FGS, por compartilhar conhecimentos, além de me auxiliarem nas tarefas relacionadas à Universidade. Minhas análises, no QGIS, não seriam possíveis, sem a ajuda do Biólogo Adriano Duarte e agradeço o Eng. Bruno Denardin por me auxiliar nos trabalhos de campo. Equipe da FGS, vocês foram fundamentais.

Obrigada a todos os meus amigos e colegas, que de alguma forma, também colaboraram para esta grande conquista da minha vida, e que foram parceiros em momentos de desabafos e de comemoração.

Um agradecimento especial ao Alex, que esteve sempre ao meu lado e me ajudou e apoiou em todos os momentos, aguentando mau humor e crises durante este trabalho, sempre com carinho e paciência. Suas críticas, sempre construtivas, fizeram este trabalho melhor, com certeza.

E por fim, agradeço aos meus avós, tios e primos que sempre me incentivaram e estiveram presentes em todos os momentos da minha vida, mostrando o quanto a presença da família é importante. Graças aos valores ensinados por eles, cheguei até aqui.

Isto não é o fim. Não é sequer o princípio do fim. Mas é,
talvez, o fim do princípio.

Winston Churchill

RESUMO

Este trabalho consiste na análise de suscetibilidade a escorregamentos da bacia de São Geraldo, em Nova Friburgo, no Estado do Rio de Janeiro, com base nos eventos ocorridos em janeiro de 2011. O local apresenta, principalmente, duas unidades geológicas, Granito Nova Friburgo e Batólito Serra dos Órgãos. A pesquisa bibliográfica aponta diversos fatores envolvidos em movimentos de massa e determinação dos parâmetros do solo, além de uma breve descrição das metodologias utilizadas para elaboração de mapa de risco, na qual o mapa de suscetibilidade consiste em uma das principais ferramentas para análise de risco. A primeira etapa deste trabalho consistiu no inventário dos escorregamentos ocorrido em São Geraldo, em janeiro de 2011, seguido de uma visita em campo, onde foram medidas as dimensões do movimento, para realização de análises paramétricas e estimativa dos parâmetros do solo. A primeira análise realizada, levou em conta somente os escorregamentos, a declividade e a geologia do local e, a partir desta, concluiu-se que os movimentos são translacionais e que ocorreram, principalmente, em taludes de solo residual batólito com inclinações superiores a 30°. A estimativa dos parâmetros foi realizada através de análises paramétricas, com variação do parâmetro de poro-pressão e de coesão do solo. Foi elaborado um mapa de suscetibilidade, levando em consideração o solo e a declividade em que ocorreram os escorregamentos. Esse mapa foi refinado através da análise da espessura da camada com adoção do método de taludes infinitos. A última etapa deste trabalho consistiu na análise dos pontos de convergência da drenagem nas rupturas já ocorridas e nas áreas demarcadas no mapa de suscetibilidade. Em grande parte das rupturas ocorridas em 2011 o fluxo da água convergia para elas, o que não ocorreu na maiorias das área demarcadas quanto a declividade. O mapa de suscetibilidade é uma ferramenta importante, porém carece do refinamento de análise para resultados mais assertivos.

Palavras-chave: Análise de Suscetibilidade. Análises Paramétricas. Avaliação de Risco.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas deste trabalho	17
Figura 2 – Representação esquemática do escorregamento rotacional	19
Figura 3 – Representação esquemática do escorregamento translacional	20
Figura 4 – Representação esquemática de quedas rochosas	21
Figura 5 – Representação esquemática de tombamentos	22
Figura 6 – Representação esquemática de corridas	23
Figura 7 – Zonas de fluxo de detrito	23
Figura 8 – Modelo do talude infinito	25
Figura 9 – Equipamento de cisalhamento direto	35
Figura 10 – Envoltória de resistência obtida com ensaios de cisalhamento direto	36
Figura 11 – Equipamento de ensaio de compressão triaxial	36
Figura 12 – Envoltória de resistência obtida com ensaios de compressão triaxial	37
Figura 13 – Delimitação da área de estudo	45
Figura 14 – Mapa Geológico da Folha Duas Barras	46
Figura 15 – Mapa geológico-geotécnico da bacia São Geraldo	48
Figura 16 – Escorregamentos mapeados	49
Figura 17 – Localização dos pontos	50
Figura 18 – Visão geral da ruptura do ponto 01	51
Figura 19 – Localização ponto 01	52
Figura 20 – Visão geral da ruptura do ponto 02	53
Figura 21 – Localização ponto 02	54
Figura 22 – Visão geral da ruptura do ponto 03	55
Figura 23 – Localização ponto 04	56
Figura 24 – Visão geral da ruptura do ponto 04	57
Figura 25 – Visão geral da ruptura do ponto 05	58
Figura 26 – Visão geral da ruptura do ponto 06	59
Figura 27 – Deslocamento do ponto 06	60
Figura 28 – Ponto 07 em janeiro de 2011	61
Figura 29 – Ponto 07 em dezembro de 2015	61
Figura 30 – Relação área de escorregamentos versus geologia local	63
Figura 31 – Mapa dos escorregamentos com a geologia local	64
Figura 32 – Identificação das zonas de movimentação	64
Figura 33 – Mapa dos escorregamentos com a declividade	65

Figura 34 – Envoltória de resistência dos ensaios de cisalhamento de Avelar et al. (2011)	67
Figura 35 – Tensão normal <i>versus</i> tensão cisalhante de Machado (2013)	68
Figura 36 – Resultado análise ponto 7 com $R_u=0,4$	70
Figura 37 – Esquema da superfície de ruptura em duas etapas	71
Figura 38 – Resultado análise da 1ª etapa ponto 5	71
Figura 39 – Resultado análise da 2ª etapa ponto 5	71
Figura 40 – Resultado análise ponto 5 para $R_u=0,4$	72
Figura 41 – Gráfico coesão <i>versus</i> R_u no ponto 3 para $FS=1,00$	73
Figura 42 – Gráfico coesão <i>versus</i> R_u no ponto 5 para $FS=1,00$	74
Figura 43 – Gráfico coesão <i>versus</i> R_u no ponto 6 para $FS=1,00$	75
Figura 44 – Gráfico coesão <i>versus</i> R_u no ponto 7 para $FS=1,00$	76
Figura 45 – Análise de suscetibilidade quanto a declividade	78
Figura 46 – Gráfico espessura da camada de solo <i>versus</i> o fator de segurança	80
Figura 47 – Mapa dos pontos de convergência da drenagem	82
Figura 48 – Mapa dos pontos de convergência da drenagem com destaque aos escorregamentos	83
Figura 49 – Mapa dos pontos de convergência da drenagem com destaque aos as áreas com declividades superiores a 30°	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de risco RHRS.....	43
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Resumo dos pontos estudados	77
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivos secundários	15
2.3 PRESSUPOSTO	16
2.4 PREMISA	16
2.5 DELIMITAÇÕES	16
2.6 LIMITAÇÕES	16
2.7 DELINEAMENTO	16
3 MOVIMENTOS DE MASSA	18
3.1 TIPOS DE MOVIMENTOS	18
3.1.1 Escorregamentos	18
3.1.1.1 Escorregamentos rotacionais	19
3.1.1.2 Escorregamentos translacionais	20
3.1.2 Quedas	20
3.1.2.1 Quedas rochosas	21
3.1.2.2 Tombamentos	21
3.1.3 Corridas	22
3.1.4 Rastejos	24
3.2 MÉTODO DE CÁLCULO	24
4 DEFLAGRAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	26
5 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE INTERESSE	32
5.1 PARÂMETROS DE INTERESSE	32
5.2 CRITÉRIOS DE RUPTURA	33
5.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS	34
6 METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS PARA ANÁLISE DE RISCO GEOTÉCNICO	38
6.1 CONCEITOS BÁSICOS	38
6.2 METODOLOGIAS DE MAPEAMENTO DE RISCO	39
6.2.1 Método do Instituto de Pesquisa Tecnológico	39
6.2.2 Método RHRS	41

7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	45
7.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	46
7.2 MAPEAMENTO DOS ESCORREGAMENTOS	49
7.3 DESCRIÇÃO DOS PONTOS	50
7.3.1 Ponto 01	50
7.3.2 Ponto 02	52
7.3.3 Ponto 03	54
7.3.4 Ponto 04	55
7.3.5 Ponto 05	57
7.3.6 Ponto 06	58
7.3.7 Ponto 07	60
8 ANÁLISE DOS ESCORREGAMENTOS	62
8.1 TOPOGRAFIA E GEOLOGIA	62
8.2 ANÁLISES DE ESTABILIDADE	66
8.2.1 Parâmetros de resistência fixados	66
8.2.2 Resultados das análises paramétricas de estabilidade	69
9 ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE	78
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, movimentos de massa vêm causando grandes desastres para a população. Segundo Kobiyama et al. (2006), esses movimentos são causados principalmente pela evolução dos dias de hoje, devido ao processo de urbanização e industrialização, além do crescente aumento da população e ocupação desordenada dos centros urbanos. Em áreas urbanas, os principais fatores relacionados a esses movimentos são a impermeabilização do solo, a conservação de calor e a poluição do ar. Já em áreas rurais, pode-se destacar a compactação dos solos, o assoreamento dos rios, os desmatamentos e as queimadas.

Carvalho et al. (2007) destacam que esta movimentação de terra possui uma determinada probabilidade de ocorrência e gera consequências. A combinação desses dois fatores é denominada de risco. Em janeiro de 2011, no Rio de Janeiro, na bacia de São Geraldo, em Nova Friburgo, estes movimentos de massas causaram vítimas fatais, além de prejuízos financeiros à população e ao Estado. Desde então, medidas de mitigação de risco têm sido implementadas pelo governo do Estado do Rio de Janeiro.

Diversas tecnologias para análises e mitigação de riscos vêm sendo desenvolvidas, e, cada vez mais, é possível diminuir esses riscos. De acordo com Carvalho et al. (2007), a maneira de reduzir a ocorrência de catástrofes provenientes de movimentações de terra ocorre através de adoção de medidas de prevenção adequadas e, para isso, é necessário realizar estudos dos fenômenos envolvidos em uma avaliação dos riscos. Para o gerenciamento de risco de uma determinada região pode ser realizado um mapeamento dos riscos geotécnicos de movimentos de massa com objetivo de setorizar as regiões e definir o grau de risco para, desta forma, priorizar as medidas preventivas nas áreas mais afetadas. Este mapeamento de riscos geotécnico é realizado através do cruzamento da suscetibilidade a escorregamentos e as possíveis consequências.

Segundo Tominaga (2015a), mais de 15 milhões de pessoas foram afetadas entre o período de 1960 a 2006 pela ocorrência de deslizamento. O mapeamento de risco é uma ferramenta fundamental para gerenciamento de risco deste tipo de desastre natural. Esses mapas vem auxiliando os gestores na tomada de decisão quanto a medidas de mitigação. Entretanto,

existe uma grande variabilidade nas metodologias adotadas e, conseqüentemente, nos resultados obtidos. Isto tem dificultado a utilização dos mapas de risco como ferramenta de gestão e, por vezes, tem desacreditado injustamente esta ferramenta.

Este trabalho tem o objetivo de gerar um mapa de suscetibilidade na bacia São Geraldo, em Nova Friburgo, que possa ser utilizado como ferramenta para geração de um mapa de risco e assim apoiar os gestores na tomada de decisão.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho estão descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como determinar um mapa de suscetibilidade na bacia São Geraldo em Nova Friburgo, região serrana do Rio de Janeiro?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a determinação de um mapa de suscetibilidade da bacia São Geraldo em Nova Friburgo/RJ.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivos secundários do trabalho são:

- a) caracterização geológica e inventário de escorregamentos da região de São Geraldo;
- b) validação das ferramentas de geração de mapa de suscetibilidade;
- c) determinação dos parâmetros do solo local.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as ferramentas adotadas na metodologia desenvolvida neste estudo permitirão a análise de suscetibilidade a escorregamentos da área.

2.4 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que para uma melhor aplicação dos recursos disponíveis para gerenciamento de risco é necessário, primeiramente, a realização de um mapa de suscetibilidade a escorregamentos realístico da área.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da área da bacia de São Geraldo, no município de Nova Friburgo/RJ.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) não serão propostas intervenções nas áreas suscetíveis.

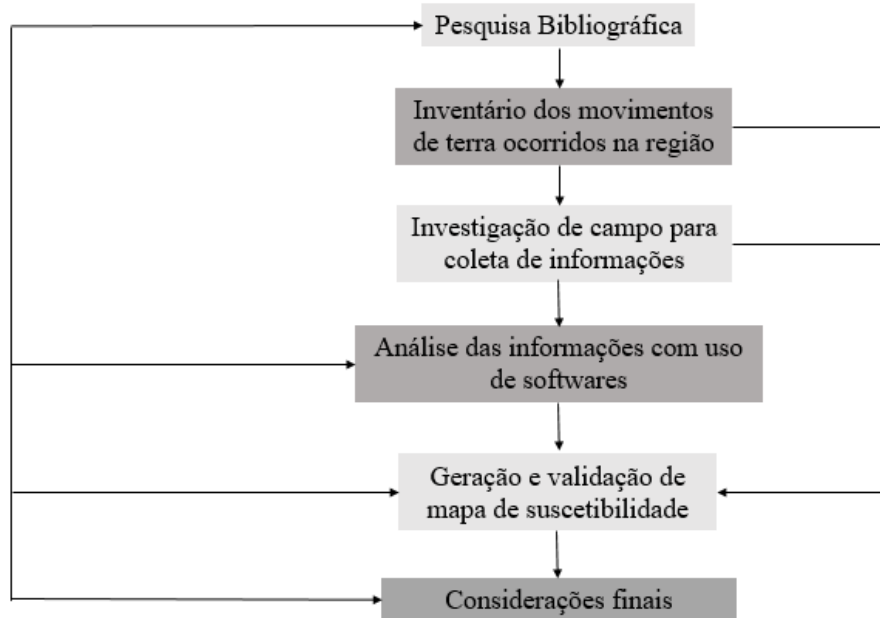
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) inventário dos movimentos de terra ocorridos na região;
- c) investigação de campo para coleta de informações;
- d) determinação dos parâmetros do solo através de análises paramétricas;
- e) análise das informações com uso de *softwares*;
- f) geração e validação de mapa de suscetibilidade;

g) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas deste trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira etapa foi uma das mais importantes e ocorreu ao longo de toda execução do trabalho. Ela consistiu em uma pesquisa bibliográfica de forma a proporcionar um melhor entendimento do tema abordado neste trabalho.

Na segunda etapa foi realizado um inventário dos movimentos de terra ocorridos na região em janeiro de 2011, para que determinação das principais áreas a serem investigadas em campo para coleta de informações. Estas informações foram utilizadas para a realização das análises paramétricas com uso do *SLOPE/W* da *GEOSTUDIO* e do *SLIDE v 6.0*, da *ROSCIENCE*.

A partir dessas análises foi possível gerar o mapa de suscetibilidade considerando a declividade, espessura e convergência da drenagem, que foi validado com os inventários dos movimentos de terras ocorridos. Por fim, foram realizadas as considerações finais do trabalho.

3 MOVIMENTOS DE MASSA

Fiori e Carmignani (2001, p. 167) definem talude como “[...] termo genérico, compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos.”. Existem dois tipos de taludes, os naturais e o artificiais. Os taludes naturais podem ser representados por encostas ou vertentes, e os artificiais, como o nome já diz, são os construídos pelo homem, sendo eles aterros e cortes. Para um melhor entendimento dos fatores instabilizantes desta superfície, é necessário definir os conceitos básicos sobre movimentação de massa.

Aqui serão apresentados os tipos de movimentos mais frequentes e será abordado somente o método de cálculo de escorregamentos translacionais, que são os movimentos que mais ocorreram no local.

3.1 TIPOS DE MOVIMENTOS

Os movimentos de terra também podem ser chamados de deslizamento. Um deslizamento é um movimento de solo, rocha ou vegetação em declive sobre ação direta da gravidade. Essa movimentação ocorre através de uma superfície de ruptura, que pode ser curva ou plana. Eles possuem diversas classificações de acordo com as falhas previstas e suas propriedades. Serão abordados a seguir as classificações dos movimentos mais frequentes (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

3.1.1 Escorregamentos

Os escorregamentos são definidos por Tominaga (2015b, p. 28) como “[...] movimentos rápidos, de porções de terrenos (solos e rochas) com volumes bem definidos, deslocando-se sob ação da gravidade para baixo e para fora do talude ou da vertente.”.

Essa ruptura ocorre quando a relação entre a resistência de cisalhamento do solo ou da rocha e a tensão de cisalhamento na superfície do talude for igual a um. As diferentes superfícies de

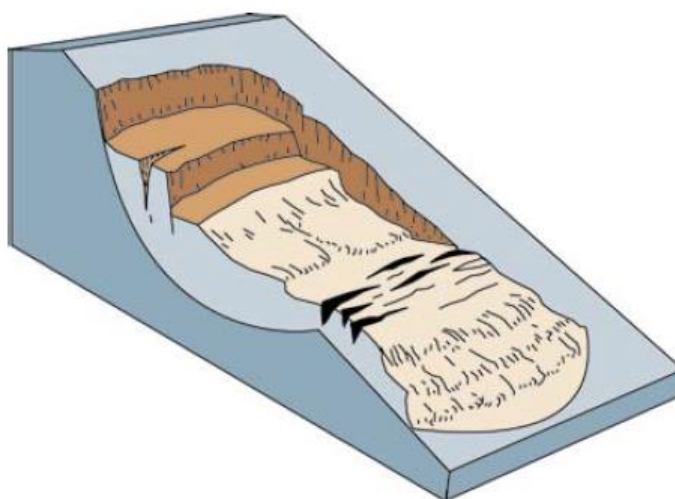
ruptura dividem esse movimento em dois tipos abordados nesse tópico (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

3.1.1.1 Escorregamentos rotacionais

Os escorregamentos rotacionais ou também conhecidos como circulares apresentam a superfície de ruptura em forma de curva, conforme apresentado na figura 2. O movimento ocorre em torno de um eixo, no qual o material do topo da ruptura é deslocado para a parte inferior, em um movimento vertical e, parte desse material, se movimenta em direção ao talude (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

O movimento está normalmente associado a solos homogêneos, como aterros com inclinações entre vinte e quarenta graus. Essa movimentação pode ser prevista através de cuidados em relação a presença de fissuras na crista do talude, que é uma indicação do início de ruptura. A velocidade destes movimentos, a qual depende muito da natureza do terreno, pode variar de bastante lenta a rápida. Quando ocorrerem movimentos lentos, os riscos às estruturas são maiores que à vida (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Figura 2 – Representação esquemática do escorregamento rotacional



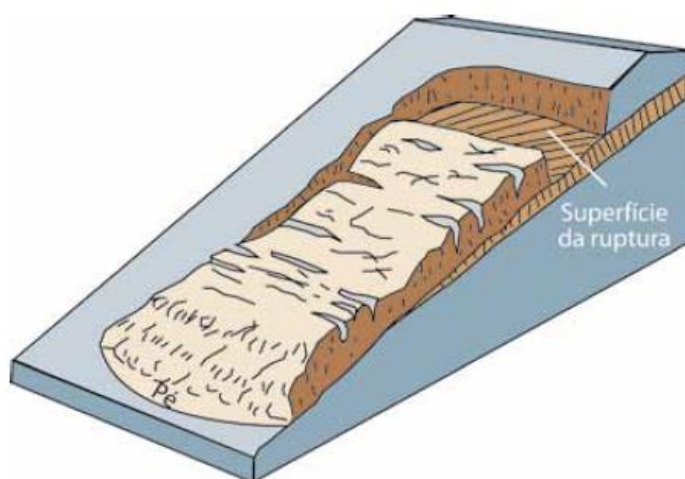
(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 14)

3.1.1.2 Escorregamentos translacionais

Os escorregamentos translacionais ou planares formam superfícies de rupturas planares, onde a massa de solo é movida para fora e para baixo do talude, conforme apresentado na figura 3. Esses movimentos são muito comuns em solos ou rochas heterogêneos que representam descontinuidades geológicas (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Esse movimento é o mais comum dos deslizamentos, os quais podem ocorrer em rochas, solos ou ambos. Apresentam superfícies com profundidades rasas e, em geral, ocorrem em períodos de chuva, pois, por se tratar de um movimento superficial, a infiltração de água é um importante mecanismo de desencadeamento (TOMINAGA, 2015b).

Figura 3 – Representação esquemática do escorregamento translacional



(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 17)

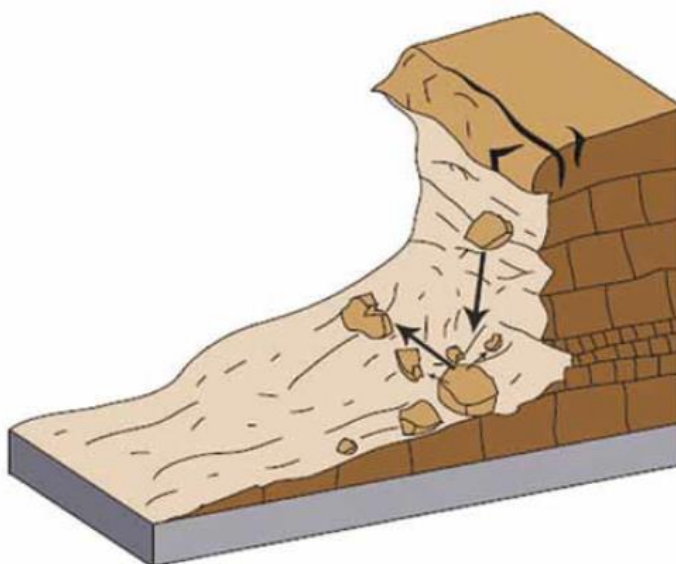
3.1.2 Quedas

A queda ocorre em taludes íngremes onde ocorre a separação do solo ou da rocha da superfície que vem abaixo. Esse movimento é classificado de duas maneiras que são abordadas nesse tópico (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

3.1.2.1 Quedas rochosas

O movimento de queda de blocos ocorre em taludes íngremes ou penhascos. Essa movimentação é definida por Tominaga (2015b, p. 32) como “[...] ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de movimentação.”, isto é, o desprendimento de blocos ou lascas de rocha de um talude, causado pelo intemperismo, sofre ação da gravidade e pode-se associar a outros movimentos como fragmentação, rolagem ou saltação. A figura 4 representa de forma esquemática essa movimentação.

Figura 4 – Representação esquemática de quedas rochosas

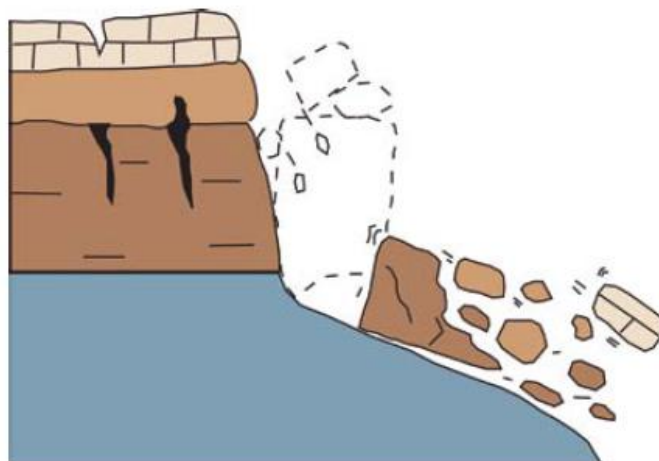


(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 10)

3.1.2.2 Tombamentos

O tombamento ou basculamento consiste na queda das paredes do talude em um movimento mais lento. Highland e Bobrowski (2008, p. 11) definem como “[...] rotação frontal de uma massa de solo ou rocha para fora do talude, em torno de um ponto, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada.”. A causa dessa movimentação é, muitas vezes, o peso exercido pelo material acima da massa deslocada. A figura 5 apresenta um esquema desta movimentação.

Figura 5 – Representação esquemática de tombamentos

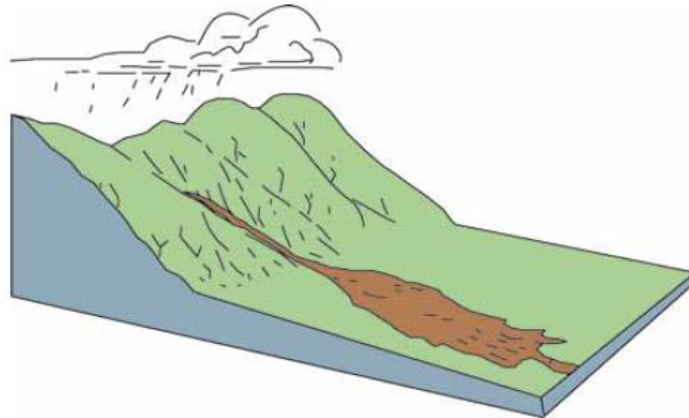


(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 12)

3.1.3 Corridas

As corridas, também conhecidas como fluxo de detritos, são movimentos de massa rápidos ocasionados pela perda de atrito interno das partículas do solo, devido ao excesso de água acumulado. Esse movimento pode ser desencadeado por escorregamentos que, ao ganharem velocidade, provocam a mistura com a água ou a perda da sua coesão. Com isso, ganham velocidade e podem se deslocar em grandes distâncias. Por se tratar de um movimento muito rápido, não existem formas de previsão, mas sim estudos aprofundados como mapas de risco potencial de fluxo de detrito que podem promover alertas, direcionar recursos e tomadas de decisão (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008). A figura 6 representa esquematicamente a geometria dessa movimentação.

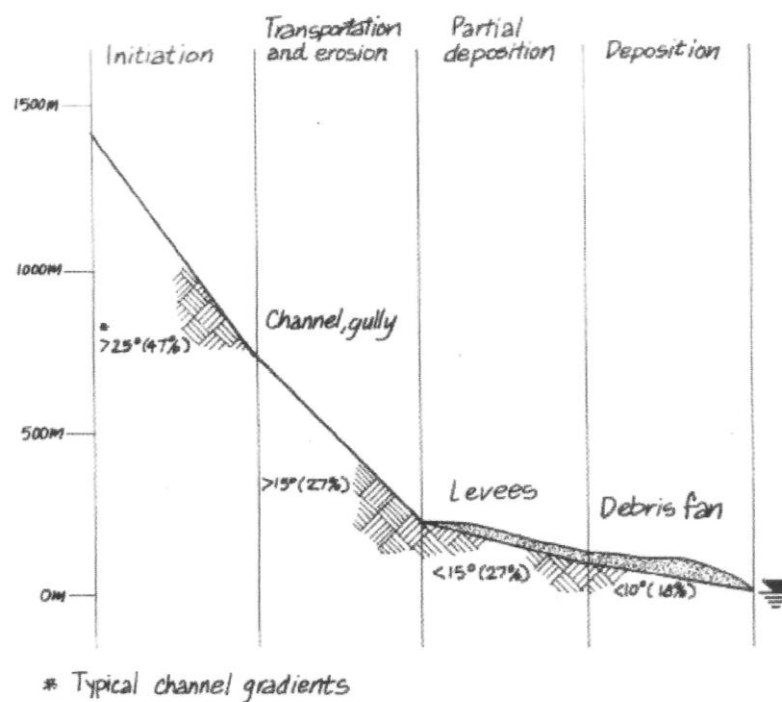
Figura 6 – Representação esquemática de corridas



(fonte: HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008, p. 24)

Segundo VanDine (1996) um perfil desse movimento pode ser, amplamente, dividido em três zonas: iniciação; transporte e erosão; e deposição. A iniciação normalmente exige inclinações maiores que 25° , a zona de transporte e erosão necessitam inclinações maiores que 15° , já a normalmente se iniciam com inclinações inferiores a 10° . VanDine (1996) classificou essas zonas conforme apresentado na figura 7.

Figura 7 – Zonas de fluxo de detrito



(fonte: VANDINE, 1996, p. 5)

3.1.4 Rastejos

Os rastejos, diferente das corridas, são movimentos lentos e contínuos provocados pela ação da gravidade em conjunto com as mudanças climáticas. A expansão e contração do material, devido a variação da temperatura, desencadeia o movimento do talude abaixo. Por outro lado, nem toda a massa movimentada sofre o efeito da temperatura, mas sim o efeito da força gravitacional (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

3.2 MÉTODO DE CÁLCULO

A análise de estabilidade de um talude é realizada através do cálculo do fator de segurança que é definido como a relação da resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante atuante, ou seja, a relação entre esforços estabilizantes sobre esforços instabilizantes (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

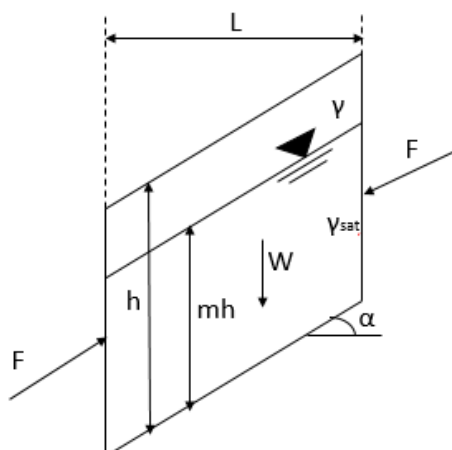
Os movimentos mais observados na área de estudo consistiram em movimentos translacionais, portanto uma das metodologias de cálculo utilizada neste trabalho foi o método do talude infinito.

A principal suposição para denominação de talude infinito é que sua extensão seja muito longa comparada com a sua espessura. O maciço estudado pode ser homogêneo ou estratificado, desde que os estratos sejam paralelos a superfície do talude (GRIFFITHS et al., 2010).

Considerando a força de equilíbrio de uma fatia do talude, conforme apresentado na figura 8, as forças laterais de cada lado da fatia podem ser consideradas iguais e opostas, logo não é necessário saber a sua magnitude, visto que elas se cancelam. Qualquer fatia do talude é igual a outra, logo elas podem ser tratadas como típicas para análise do movimento (GRIFFITHS et al., 2010).

O nível d'água é considerado paralelo ao nível do terreno, sendo ambos constantes ao longo de toda superfície de deslizamentos. A situação mais crítica é aquela em que o nível d'água coincide com o nível do terreno (GRIFFITHS et al., 2010).

Figura 8 – Modelo do talude infinito



(fonte: adaptado GRIFFITHS et al., 2010, p. 571)

Griffiths et al. (2010) obtiveram a expressão para fator de segurança demonstrada na fórmula 1.

$$FS = \frac{c' + h(\cos \alpha)^2(\gamma - m\gamma_w) \tan \phi'}{\gamma h \sin(\alpha) \cos(\alpha)} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

FS = fator de segurança;

c' = coesão efetiva;

h = altura de solo rompido;

α = inclinação do talude

γ = peso específico;

γ_w = peso específico da água;

m = valor entre 0 e 1 correspondente a parcela da altura do nível d'água em relação à altura de solo rompido;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo.

4 DEFLAGRAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa, segundo Tominaga (2015b), são condicionados pela combinação de fatores: meio físico e meio biótico, com a ação humana.

O entendimento da deflagração do movimento de massa está relacionado aos seus agentes e causas. Guidicini e Nieble (1983, p. 50) definem causa como “[...] modo de atuação de determinado agente ou, em outros termos, um agente pode se expressar por meio de uma ou mais causas.”. Esses autores citam como exemplo o caso da água, que em determinada situação é o agente e, em outra, é a causa. Segundo os autores, os agentes são classificados como:

- a) predisponentes;
- b) efetivos;
 - efetivos preparatórios,
 - efetivos imediatos.

Guidicini e Nieble (1983) classificam como agentes predisponentes, o conjunto de condições físicas e bióticas do local, tais como:

- a) geologia;
- b) morfologia;
- c) condições climáticas;
- d) gravidade;
- e) vegetação.

Já os agentes efetivos, como o próprio nome explica, são aqueles responsáveis diretos por desencadear os movimentos, incluindo as ações do ser humano. Os agentes efetivos preparatórios desencadeiam os movimentos através de sua repetição, como chuvas, erosão pela água ou vento; desmatamento, entre outros; enquanto que os agentes imediatos o fazem de imediato, com consequências mais intensas, como terremotos e temporais, podendo levar a colapsos, independente das condições do local (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Para o completo entendimento da deflagração do movimento, além dos efeitos, Guidicini e Nieble (1983) classificaram as causas em três tipos:

- a) internas;
- b) externas;
- c) intermediárias.

As causas internas, quando levam a ruptura de taludes, não apresentam alterações visuais e se encontram somente no interior deste, diminuindo a resistência interna do material com o aumento da pressão hidrostática, diminuição da coesão e ângulo de atrito interno. Elas ocorrem através do efeito de oscilações térmicas e pela diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Segundo Guidicini e Nieble (1983), as causas externas aumentam as tensões de cisalhamento, sem que ocorra a redução da resistência do material. Isto ocorre devido a mudanças na geometria do sistema, efeitos de vibrações e mudanças naturais na inclinação das encostas. Estas alterações promovem aumento na inclinação do declive do talude, deposição de material na crista do talude e oscilações.

Guidicini e Nieble (1983) afirmam que as causas intermediárias são resultados dos efeitos causados por agentes externos no interior do talude. Isto ocorre com a liquefação espontânea, rebaixamento rápido, erosão subterrânea retrogressiva e diminuição do efeito de coesão aparente.

Tominaga (2015b) afirma que a pluviosidade e a ocupação desordenada das encostas são os principais fatores condicionantes dos escorregamentos. Na região tropical úmida brasileira, movimentações de terra já são esperadas em estações chuvosas.

Segundo Bandeira (2003, p. 14), as chuvas fortes e duradouras agem nas instabilizações de talude através de:

- a) elevação do lençol freático, reduzindo a pressão efetiva e gerando forças de percolação;
- b) preenchimento temporário das fendas, trincas e/ou estruturas em solos saprolíticos e rochas (fraturas, juntas, etc.) com geração de pressões hidrostáticas [...];
- c) aumento da umidade sem elevação/formação de nível d'água (solos não saturados), reduzindo a resistência dos solos pela perda de sucção[...].

De acordo com Highland e Bobrowski (2008), a contribuição da ocupação de encostas para a ocorrência de deslizamentos ocorre através de diversos fatores, tais como:

- a) alteração nos sistemas de drenagem;
- b) remoção da vegetação;
- c) aumento da inclinação das encostas através da regressão de bases;
- d) carregamento do cume da encosta;
- e) irrigação de gramado;
- f) vazamento de tubulações;
- g) escavações impróprias de encosta.

Segundo Guidicini e Nieble (1983), é possível realizar a identificação dos movimentos de terra a partir das seguintes observações realizadas em campo:

- a) concentração de matacões;
- b) zonas de quedas de blocos;
- c) fendas de tração;
- d) troncos inclinados;
- e) raízes expostas;
- f) blocos deslocados;
- g) linhas de drenagem subterrânea;
- h) afundamentos de massa de solo;
- i) quebras no alinhamento da vegetação;
- j) deformações em obras de alvenaria;
- k) embarrigamento;
- l) saturação do solo;
- m) pequenos cones de dejeção.

Além dessas observações realizadas em campo, os movimentos de massa também podem ser observados com uso de fotos aéreas através dos seguintes elementos (GUIDICINI; NIEBLE, 1983, p. 91):

- a) mudanças locais em frentes de topografia regulares;
- b) embarrigamento nas encostas ou no pé das mesmas, formando contorno topográfico de saliências e reentrâncias;
- c) mudança no tipo de vegetação, em particular em sua coloração e distribuição;

- d) depressões circulares ou elípticas associadas à mudança ou à ausência de vegetação;
- e) desorganização das linhas de drenagem superficial;
- f) alinhamento de ressurgências de água;
- g) estreitamento no leito de cursos de água;
- h) represamentos naturais de cursos de água;
- i) estreitamento de vales.

A adoção de medidas preventivas ao deslizamento é de extrema importância, pois é possível minimizar ou até mesmo evitar a ocorrência de danos. Estas medidas podem ser agrupadas em dois grupos (TOMINAGA, 2015b):

- a) medidas estruturais;
- b) medidas não-estruturais.

As medidas estruturais consistem na estabilização da encosta através de obras de engenharia. Essas soluções abrangem situações nas quais as medidas não-estruturais, muitas vezes, não solucionam o problema, porém apresentam um custo mais elevado. Essas obras consistem na execução de (CARVALHO et al., 2007):

- a) contenção de encostas;
- b) sistemas de drenagem;
- c) reurbanização de áreas;
- d) proteção da superfície.

A contenção de encostas abrange diversas soluções possíveis, como retaludamentos e aterros, estruturas de contenção, incluindo muro de gravidade, cortina atirantada, barreiras vegetais, muros de espera, entre outros (CARVALHO et al., 2007).

O sistema de drenagem tem como objetivo captar e conduzir as águas das encostas. É uma das medidas mais importantes no processo de prevenção de deslizamentos, pois evita a ocorrência de grandes deflagradores da movimentação de terra, a erosão e a infiltração de água no solo (CARVALHO et al., 2007).

A reurbanização de áreas é uma solução muito vantajosa para o poder público devido a situação na qual diversas famílias ocupam e constroem suas moradias em áreas de risco. O processo de reurbanização consiste em diversos estudos de análise de riscos que resultam em propostas detalhadas com soluções para rede de água potável, esgotos, drenagem, rede elétrica e demais obras necessárias para reduzir riscos, e tornar a área com condições seguras e saudáveis de moradia (CARVALHO et al., 2007).

A proteção de superfícies é realizada através de materiais naturais ou artificiais com intuito de evitar processos erosivos e infiltração de água na encosta. A proteção com uso de materiais naturais pode ser exemplificada com a utilização de solo argiloso para preenchimento de trincas e a própria vegetação da área. Os materiais artificiais são as impermeabilizações asfálticas ou de argamassa e a utilização de telas metálicas (CARVALHO et al., 2007).

As medidas não-estruturais são ações de políticas públicas para o planejamento do uso do solo e gerenciamento. Nestas medidas, obras de engenharia não são adotadas, de forma a apresentar um custo inferior ao das medidas estruturais. Esse grupo de prevenção está diretamente relacionado a (CARVALHO et al., 2007):

- a) planejamento urbano;
- b) legislação;
- c) política habitacional;
- d) pesquisa;
- e) sistemas de alerta e contingência;
- e) educação e capacitação.

Estas medidas apresentam ações distintas, mas com dependência entre elas. A ocupação desordenada das áreas vem aumentando o número de acidentes devido a movimentação de terra. É necessário o planejamento urbano, para que possam ser priorizadas áreas de tratamento, direcionados e definidos os investimentos e, desta forma, ocorra a requalificação dos espaços urbanos. A partir disso, são criadas legislações específicas quanto ao uso do solo. É de extrema importância a elaboração de planos de alertas e de contingência para que se permita a previsão da ocorrência de processos naturais. Para o funcionamento destes planos é preciso um sistema educativo eficaz para difundir este sistema de alerta e contingência (CARVALHO et al., 2007).

Kobiyama et al. (2006) citam algumas maneiras de prevenir os desastres causados por movimentação de massa:

- a) evitar construções em encostas muito íngremes;
- b) não realizar cortes em encostas sem licença da prefeitura;
- c) não desmatar as encostas do morros;
- d) checar a estrutura da casa em busca de rachaduras e fissuras.

5 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE INTERESSE

A geotecnia apresenta diversas incertezas embutidas em todas as fases de uma obra. Isso acarreta um julgamento mais conservador, por parte dos engenheiros, na esperança de garantir a segurança das estruturas. A realização de estudo para mitigação de risco depende de diversos parâmetros que podem ser definidos através de métodos de investigação de campo e de laboratório (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Neste capítulo, serão apresentados quais são os parâmetros importantes para realização das análises de risco, além das maneiras de determinação destes, que poderão ser através de vistorias em campo ou de ensaios de laboratórios.

5.1 PARÂMETROS DE INTERESSE

Segundo Pinto (2006), a ruptura de um solo normalmente ocorre através de um fenômeno de cisalhamento, onde a resistência de cisalhamento do solo é a máxima tensão cisalhante que o solo pode resistir antes da ruptura. Os principais parâmetros que determinam esta resistência são o atrito e a coesão do solo.

De acordo com Fiori e Carmignani (2001), o atrito entre os sólidos surge somente quando é verificada a tendência a movimentação. Em uma partícula em repouso está atuando a força peso, N , e a reação dessa força, de igual magnitude, porém de sentido contrário. Logo, o corpo está em equilíbrio. A aplicação de uma força de tração, T , paralela ao plano, induz o surgimento da força de atrito, F_a . Essa força de atrito atinge um limite máximo com o aumento da força de tração, e o movimento do corpo é eminente. A relação entre a força de tração, quando o limite máximo da força de atrito é atingido, e o peso do corpo é constante.

O ângulo de atrito é o ângulo formado pela resultante da força tangencial, T , e da normal, N , conforme fórmula 2. De acordo com Pinto (2006, p. 260) “Esse valor corresponde ao ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo pode fazer com a normal ao plano sem que ocorra o deslizamento.”.

(fórmula 2)

$$T = N \cdot \tan \varphi$$

Onde:

T = força horizontal;

N = força vertical transmitida pelo corpo;

φ = ângulo de atrito.

A coesão é a parcela de resistência devido à atração química das partículas, formando uma parcela que independente da tensão normal atuante no solo. A coesão em solos sedimentares é muito pequena, quando comparada com a resistência por atrito entre os grãos, porém, em solos cimentados, a coesão real apresenta valores significativos (PINTO, 2006).

5.2 CRITÉRIOS DE RUPTURA

O estudo da resistência ao cisalhamento dos solos é a análise do estado de tensões que prova a ruptura do solo. Os critérios de ruptura são formulados de maneira a melhor refletir as condições de ruptura dos materiais. Os dois critérios mais representativos dos solos é o de Coulomb e o de Mohr. O critério de Coulomb pode ser expresso pela fórmula 3, onde a envoltória é representada por uma reta. Enquanto o critério de Mohr, define que a ruptura ocorre quando o círculo representativo do estado de tensões tangencia uma curva denominada envoltória de resistência. Devido a dificuldade de aplicação de envoltórias curvas, a envoltória de Mohr é, naturalmente, substituída por uma reta pela equação de Coulomb, e esse critério denominado de Mohr-Coulomb (PINTO, 2006).

(fórmula 3)

$$\tau = c + f \cdot \sigma$$

Onde:

τ = tensão cisalhante;

c = coesão;

f = coeficiente de atrito interno;

σ = tensão normal existente no plano de cisalhamento.

5.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

As vistorias de campo tem como objetivo a identificação de fatores responsáveis pela deflagração dos movimentos de massa. As principais áreas observadas no campo são o topo e a base da encosta instabilizada. Os importantes aspectos a serem observados nestas vistorias são (AUGUSTO FILHO, 1992):

- a) formações geológicas;
- b) perfil de alteração;
- c) estruturas;
- d) tipologia de instabilizações existentes;
- e) feições de instabilizações;
- f) surgências d'água;
- g) geometria do talude;
- h) vegetação;
- i) interferências antrópicas e seu histórico.

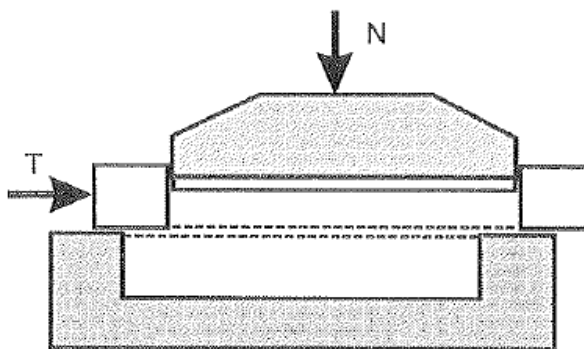
Uma forma de validação e complementação dos aspectos observados em campo ocorre através da realização de ensaios de laboratório, que também são capazes de determinar os parâmetros do solo para a realização de análises de instabilidades (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Segundo Guidicini e Nieble (1983), quando se fala em problemas de estabilidade, as propriedade mais importantes para os materiais são o ângulo de atrito e a coesão de solos e de rochas. Estes dois parâmetros podem ser definidos através da relação entre tensão tangencial (τ) e tensão normal (σ). Essa correlação ocorre em ensaio de cisalhamento direto, onde a inclinação da linha é o ângulo de atrito do solo (ϕ) e a coesão (c) é definida como o valor inicial da tensão cisalhante, ou seja, quando a tensão normal for igual a zero.

Segundo Pinto (2006), os ensaios mais utilizados para determinação da resistência ao cisalhamento dos solos são o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de compressão triaxial.

O ensaio de cisalhamento direto consiste na verificação da tensão cisalhante em conjunto com uma tensão normal ao plano que provoca a ruptura. Nesse ensaio um corpo de prova é colocado na caixa de cisalhamento, conforme apresentado na figura 9, onde, primeiramente, será aplicada uma força vertical, N , e uma força tangencial, T , na parte superior do corpo de prova de forma a provocar o deslocamento (PINTO, 2006).

Figura 9 – Equipamento de cisalhamento direto

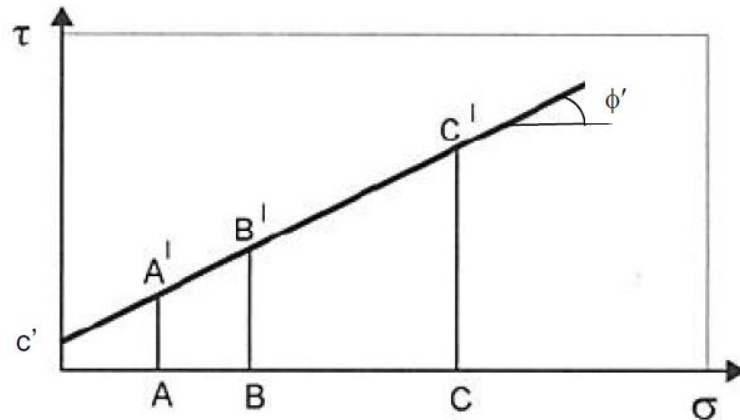


(fonte: PINTO, 2006, p. 265)

O ensaio pode ser realizado em três fases. A primeira é a de inundação que geralmente dura em torno de 24h, a segunda é o adensamento, que consiste na aplicação da força vertical para consolidação do corpo de prova, e a terceira fase consiste na aplicação da força tangencial na metade superior da caixa de ensaio.

A partir desse ensaio são obtidas a tensão normal e a tensão cisalhante através da relação das forças aplicadas com a área da seção transversal do corpo de prova. A partir dos resultados das tensões é obtido a envoltória de resistência, conforme apresentado na figura 10, de onde é são obtidos os parâmetros de coesão e ângulo de atrito (PINTO, 2006).

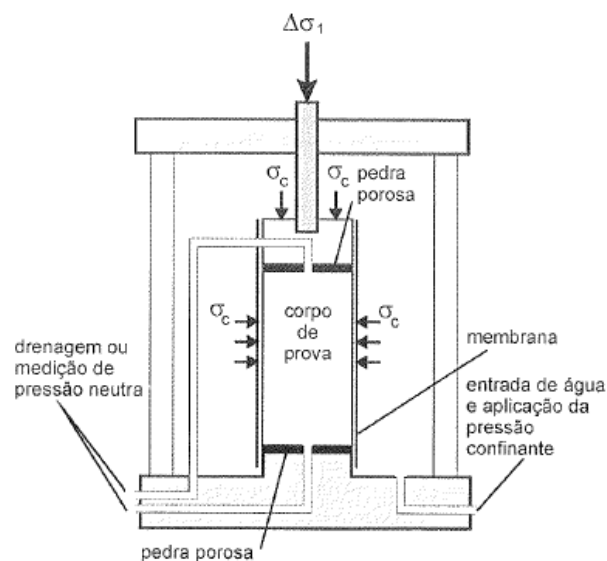
Figura 10 – Envoltória de resistência obtida com ensaios de cisalhamento direto



(fonte: adaptado de PINTO, 2006, p. 263)

No ensaio de compressão triaxial o corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões. O corpo de prova cilíndrico envolto por uma membrana de borracha é colocado em uma câmara de ensaio. Essa câmara é totalmente preenchida por água, sendo assim o corpo fica submetido a uma pressão confinante, σ_c . A fase seguinte do ensaio consiste no cisalhamento da amostra através da aplicação de um deslocamento com velocidade constante no pistão que atravessa a câmara até a ruptura da amostra, conforme apresentado na figura 11 (PINTO, 2006).

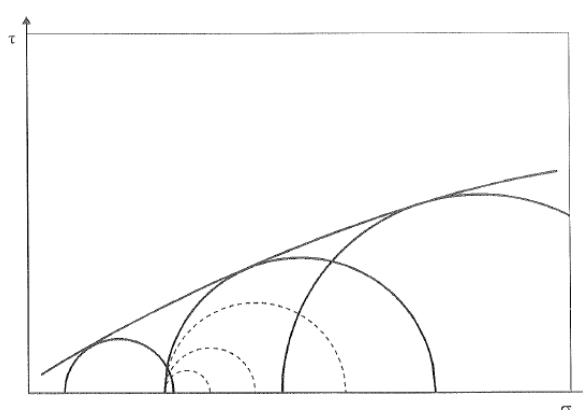
Figura 11 – Equipamento de ensaio de compressão triaxial



(fonte: PINTO, 2006, p. 266)

Os planos horizontais e verticais são os planos principais da amostra, como não há tensões cisalhantes nas bases e nas diretrizes da amostra cilíndrica. A tensão principal maior, σ_1 , equivale a $\sigma_c + \Delta\sigma_1$, enquanto a tensão principal menor, σ_3 , vale σ_c . A tensão devido ao carregamento triaxial é denominada de tensão desviadora e pode ser definida como $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$. Através da realização dos ensaios com diferentes tensões confinantes é obtida a envoltória de resistência apresenta na figura 12 (PINTO, 2006).

Figura 12 – Envoltória de resistência obtida com ensaios de compressão triaxial



(fonte: PINTO, 2006, p. 267)

Os resultados obtidos em laboratório nem sempre são suficientes para realização de análises de estabilidade, sendo necessário a obtenção de mais dados sobre o encosta instabilizada. Uma maneira de realizar esta análise pode ser através de uma retroanálise (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

A retroanálise é uma forma de avaliação da estabilidade de um talude, na qual é possível obter dados de resistência ao cisalhamento. A aplicação nesta análise é realizada supondo que já tenha ocorrido colapsos na área estudada, logo a geometria do talude é reconstituída para as condições de pré-ruptura. Esta reconstituição é realizada com intuito de admitir um fator de segurança igual a um pois, no momento da ruptura, este cai para o valor da unidade (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

6 METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS PARA ANÁLISE DE RISCO GEOTÉCNICO

Os mapas de risco são bastante recentes no Brasil e começaram a surgir apenas próximo de 1990. Foi então que evidenciou-se a necessidade da elaboração de mapas como instrumento fundamental no gerenciamento e redução dos danos causados por acidentes geotécnicos (TOMINAGA, 2015c).

Segundo Tominaga (2015c), a realização desse mapeamento de risco tem como objetivo a redução de acidentes, de forma a priorizar e analisar as medidas preventivas adequadas. Para melhor entendimento do mapa de risco é necessário a compreensão de conceitos básicos para avaliação de risco e perigo, assim como uma análise das metodologias de elaboração desses mapas já existentes. Estes tópicos serão abordados a seguir.

6.1 CONCEITOS BÁSICOS

Os conceitos e terminologias utilizados ao se tratar de risco geotécnico são polemizados por muitos pesquisadores da área e não apresentam definições unânimes. Serão explicitados os termos utilizados pelos Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT). Carvalho et al. (2007, p. 25-26) apresentam a seguir essas definições do IPT:

- a) evento: fenômeno com características, dimensões e localização geográficas registradas no tempo, sem causar danos econômicos e/ou sociais;
- b) perigo (*hazard*): condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável;
- c) vulnerabilidade: grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo;
- d) suscetibilidade: indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade e ocorrência;
- e) risco: relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco;

- f) área de risco: área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Normalmente, no contexto das cidades brasileiras, essas áreas correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (assentamentos precários).

Além dos conceitos definidos pelo IPT, é importante notar a diferença entre evento e acidente. Ambos estão relacionados aos danos causados pela movimentação de terra. Este fenômeno geológico é denominado de evento quando não gera consequências registradas e, por outro lado, quando são registrados danos e perdas denomina-se acidente (TOMINAGA, 2015c).

É importante diferenciar duas abordagens para análise de perigo, sendo uma quantitativa e outra qualitativa. Os métodos qualitativos são altamente subjetivos, pois são baseados em julgamento de especialistas por meio de vistorias em campo. Os métodos quantitativos são baseados em análises estatísticas, no qual são comparadas a distribuição espacial dos fenômenos, com os parâmetros considerados (TOMINAGA, 2015c).

Segundo El-Ramly (2001), a análise qualitativa é mais adequada em situações nas quais somente um ranking relativo dos taludes é suficiente ou, em casos em que os dados são limitados, visto que para as análises quantitativas é necessário um grande número de dados.

6.2 METODOLOGIAS DE MAPEAMENTO DE RISCO

Atualmente são utilizadas diversas metodologias para o mapeamento de risco geotécnico, no tópico a seguir serão definidos alguns métodos utilizados, de forma a possibilitar a escolha de qual será aplicado neste trabalho.

6.2.1 Método do Instituto de Pesquisa Tecnológico

Segundo Carvalho et al. (2007), o mapa de risco desenvolvido pelo IPT consiste na junção de dois mapas:

- a) mapa de inventário;
- b) mapa de suscetibilidade.

O mapa de inventário é essencial para a elaboração do mapa de suscetibilidade e mapa de risco. Este envolve o local dos eventos, o tipo de movimento, o volume, a distância de deslocamento, estado da atividade, data da ocorrência e informações de campo (CARVALHO et al., 2007).

Tendo a primeira etapa executada, é possível a elaboração do mapa de suscetibilidade que indica a probabilidade de ocorrência do evento através de correlações entre fatores e eventos e da classificação em grau de suscetibilidade (CARVALHO et al., 2007).

A partir do mapa de inventário e o de suscetibilidade, é possível gerar o mapa de risco através da conjunção da probabilidade de ocorrência do fenômeno geológico e dos danos sociais e econômicos decorrentes (CARVALHO et al., 2007).

De acordo com Carvalho et al. (2007), os métodos utilizados para realização desses mapeamentos consistem em três etapas:

- a) pré-setorização;
- b) setorização;
- c) determinação de grau de risco.

A primeira etapa está atrelada a experiência do profissional e utiliza a percepção e parâmetros básicos, como declividade, tipologia de processos, posição da ocupação em relação a encosta e a qualidade de ocupação (CARVALHO et al., 2007).

A partir da pré-setorização, é iniciada a setorização. Esta etapa consiste em visitas de campo para compreensão das características do local e determinação do grau de probabilidade de ocorrência do processo ou mesmo dos risco dos setores mapeados (CARVALHO et al., 2007).

Por fim, é possível determinar o risco no qual a encosta se encontra. Para tal, é utilizado um ranking conforme Carvalho et al. (2007) apresenta:

- a) R1: baixo ou sem risco;
- b) R2: risco médio;
- c) R3: risco alto;
- d) R4: risco muito alto.

6.2.2 Método RHRS

O método *The Rockfall Hazard Rating System* (RHRS) consiste em uma padronização da metodologia para determinação de áreas de maiores risco em rodovias para priorização e locação de recursos. A determinação desta priorização ocorre através de inspeções de taludes rochosos para identificar os trechos que apresentam maiores riscos (PIERSON, 1991).

A etapa inicial dessa metodologia é a realização de um *ranking* inicial dos taludes rochosos perigosos encontrados no trecho do estudo, levando em consideração uma estimativa de ocorrência de queda de blocos e no histórico dessas quedas na área. A partir desse estudo inicial, somente os trechos que apresentarem risco intermediário e alto serão estudados detalhadamente (PIERSON, 1991).

De acordo com Pierson (1991), o estudo detalhado das áreas é dividido em dez categorias:

- a) altura do talude;
- b) eficácia da área de captação;
- c) risco médio aos veículos;
- d) distância de visibilidade ou de decisão;
- e) largura da rodovia;
- d) características geológicas;
- e) tamanho do bloco e volume total de blocos;
- f) condições climáticas e presença de água no talude;
- g) histórico de queda de rocha.

A altura do talude influencia na energia potencial, pois taludes mais baixos possuem menor energia que os blocos de taludes mais altos. A medida da altura vertical é realizada a partir do ponto mais alto do talude até o ponto no qual a queda do bloco é esperada (PIERSON, 1991).

A eficácia da área de captação consiste na habilidade de evitar que o bloco atinja a rodovia e depende de diversos fatores como altura e inclinação do talude, geometria da vala de captação, quantidade de blocos por evento e o impacto das irregularidades do talude nas quedas de blocos (PIERSON, 1991).

O risco médio aos veículos corresponde a porcentagem de tempo no qual o veículo estará presente na zona com possíveis quedas de blocos. Esse resultado é obtido através da relação

entre o tráfego de carros diários e o comprimento do talude com a velocidade limite da via (PIERSON, 1991).

A distância de visibilidade ou de decisão consiste no comprimento de rodovia que o motorista necessita para tomada de decisão instantânea, isto é, a relação entre a distância do veículo e a distância de decisão para a velocidade limite da via (PIERSON, 1991).

A largura da rodovia consiste na distância vertical de uma borda do pavimento a outra e, caso essa medida seja variável no trecho estudado, deve ser adotada a menor distância (PIERSON, 1991).

As características geológicas estão divididas em dois casos. O caso 1 é utilizado quando as descontinuidades são as características estruturais dominantes da encosta rochosa. O caso 2 é adotado em taludes com presença dominante de erosão diferencial (PIERSON, 1991).

O tamanho do bloco e o volume total de blocos é uma medida representativa do tipo de evento com maior probabilidade de ocorrência (PIERSON, 1991).

As condições climáticas contribuem para o intemperismo e para a movimentação dos blocos rochosos (PIERSON, 1991).

O histórico de queda de blocos é de grande importância para estudo de potenciais quedas de blocos. Essa informação é obtida com o responsável pela manutenção da rodovia (PIERSON, 1991).

No quadro 1, estão representadas as pontuações para cada situação, em sua respectiva categoria. Para cada trecho estudado é feita a análise da estabilidade com a utilização deste quadro. Os pontos são somados e, no final do estudo, é feito um ranking dos trechos com maiores pontuações, ou seja, maiores riscos, para priorização da adoção de medidas preventivas (PIERSON, 1991).

Quadro 1 – Classificação de risco RHRS

CATEGORIA		CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO E PONTUAÇÃO				
		3 PONTOS	9 PONTOS	27 PONTOS	81 PONTOS	
ALTURA DO TALUDE		25 pés (7,6m)	50 pés (15,2m)	75 pés (22,9m)	100 pés (30,5m)	
EFICÁCIA DA ÁREA DE CAPTAÇÃO		Boa captação	Captação moderada	Captação limitada	Sem captação	
RISCO MÉDIO AOS VEÍCULOS		25% do tempo	50% do tempo	75% do tempo	100% do tempo	
DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE OU DE DECISÃO (%)		Distância de visibilidade adequada (100%)	Distância de visibilidade moderada (80%)	Distância de visibilidade limitada (60%)	Distância de visibilidade muito limitada (40%)	
LARGURA DA RODOVIA		44 pés (13,4m)	36 pés (11,0m)	28 pés (8,5m)	20 pés (6,1m)	
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	CASO 1	CONDIÇÃO ESTRUTURAL	Descontinuidades não persistentes com orientação favorável	Descontinuidades não persistentes com orientação variada	Descontinuidades não persistentes com orientação desfavorável	Descontinuidades persistentes com orientação desfavorável
		SUPERFÍCIE DO BLOCO DE ROCHA	Rugosa e irregular	Ondulado	Lisa	Argilosa ou polida
	CASO 2	CONDIÇÃO ESTRUTURAL	Poucas feições de erosão diferencial	Feições de erosão diferencial ocasionais	Muitas feições de erosão diferencial	Enormes feições de erosão diferencial
		DIFERENÇA NAS TAXAS DE EROÇÃO	Pequena diferença	Moderada diferença	Grande diferença	Extrema diferença
TAMANHO DO BLOCO VOLUME TOTAL DE BLOCOS		1 pé (0,30m) 3 jardas cúbicas (2,3m³)	2 pé (0,61m) 6 jardas cúbicas (4,6m³)	3 pé (0,91m) 9 jardas cúbicas (6,9m³)	4 pé (1,22m) 12 jardas cúbicas (9,2m³)	
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E PRESENÇA DE ÁGUA NO TALUDE		Precipitação baixa a moderada; sem períodos de congelamento; ausência de água no talude	Precipitação moderada ou curtos períodos de congelamento ou presença de água intermitente no talude	Precipitação alta ou longos períodos de congelamento ou presença de água contínua no talude	Precipitação alta e longos períodos de congelamento ou presença de água contínua no talude e longos períodos de congelamento	
HISTÓRICO DE QUEDA DE ROCHAS		Poucas quedas	Quedas ocasionais	Muitas quedas	Quedas constantes	

(fonte: PIERSON, 1991, p. 4, tradução nossa)

Das metodologias abordadas neste capítulo, a metodologia do IPT é utilizada principalmente em encostas ocupadas, onde o meio principal para análise do risco de deslizamentos, é em função da moradia, a sua localização, em função de taludes, e quando se notam rachaduras aparentes na casa. Como a área em questão não apresenta grandes ocupações ao longo das encostas, e não foi realizado cadastramento dos pontos, levando em consideração as moradias, visto que não estavam próximas dos pontos, essa metodologia não pôde ser aplicada neste trabalho. Além disso, este método analisa risco contra áreas ocupadas, também conhecido como risco instalado, enquanto esse trabalho abrange análise contra desastres naturais.

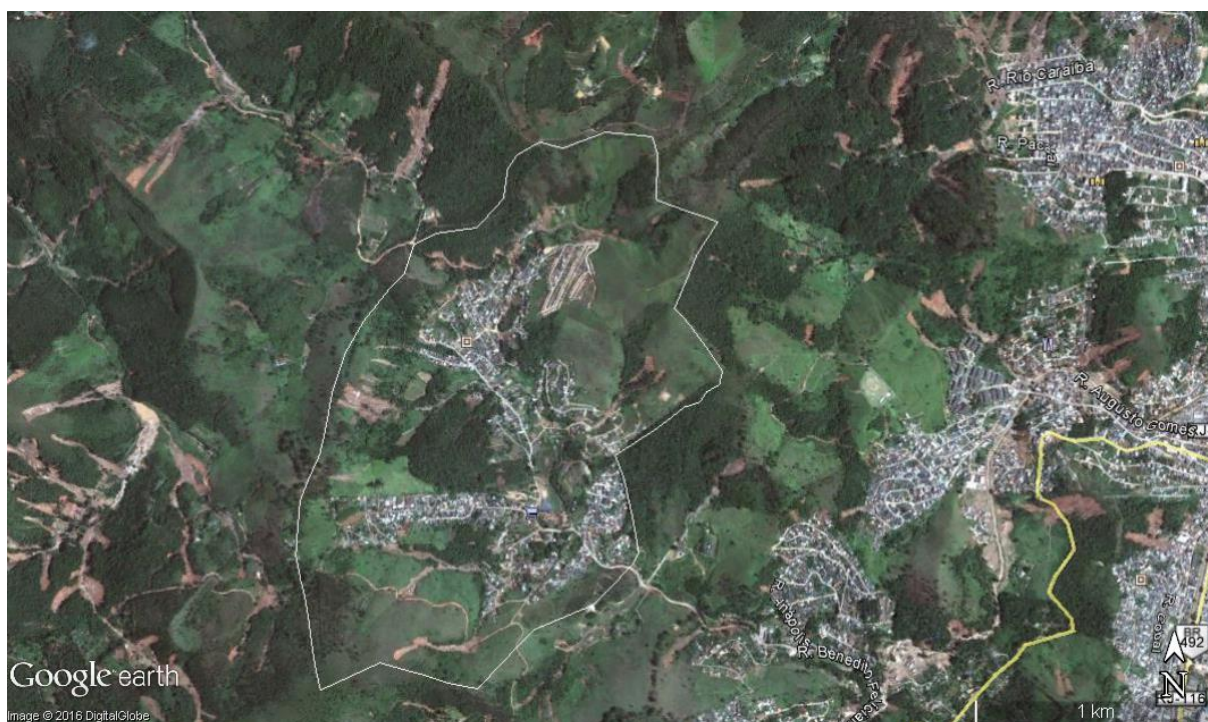
A metodologia RHRS é amplamente utilizada, em caso de taludes rochosos, mas os casos de movimentação de terra, abordados neste trabalho, não são de taludes rochosos, portanto essa metodologia não pode ser aplicada. Mas, por outro lado, o quadro 1 poderia ser adaptado para taludes em solo, e, desta forma, ser aplicado para a área de estudo, pois abrangeria pontos importantes na análise de risco, como altura do talude, condições climáticas, além do histórico de movimentação.

A análise de risco é a relação entre a possibilidade de um dado fenômeno e a magnitude de danos causados por ele. A partir dos conceitos básicos, referentes a análise de risco, que foram abordados neste capítulo, é possível elaborar uma análise de suscetibilidade de escorregamentos para, a partir desta análise facilitar a continuidade do trabalho e realizar uma completa análise de risco da área, em trabalhos futuros.

7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

Em janeiro de 2011, exatamente entre os dias 11 e 12, ocorreu um desastre na região serrana do Rio de Janeiro, afetando, principalmente, as cidades de Teresópolis, Petrópolis e Nova Friburgo. Este evento afetou em torno de 1.000.000 de pessoas. A área de estudo está localizada no município de Nova Friburgo, no bairro São Geraldo, onde o principal acesso se faz pela Rodovia Estadual RJ 130, correspondente a um segmento da BR 492, que une os Municípios de Teresópolis e Nova Friburgo. A área em questão encontra-se delimitada na figura 13, apresenta cerca de 234 ha e é denominada bacia São Geraldo.

Figura 13 – Delimitação da área de estudo

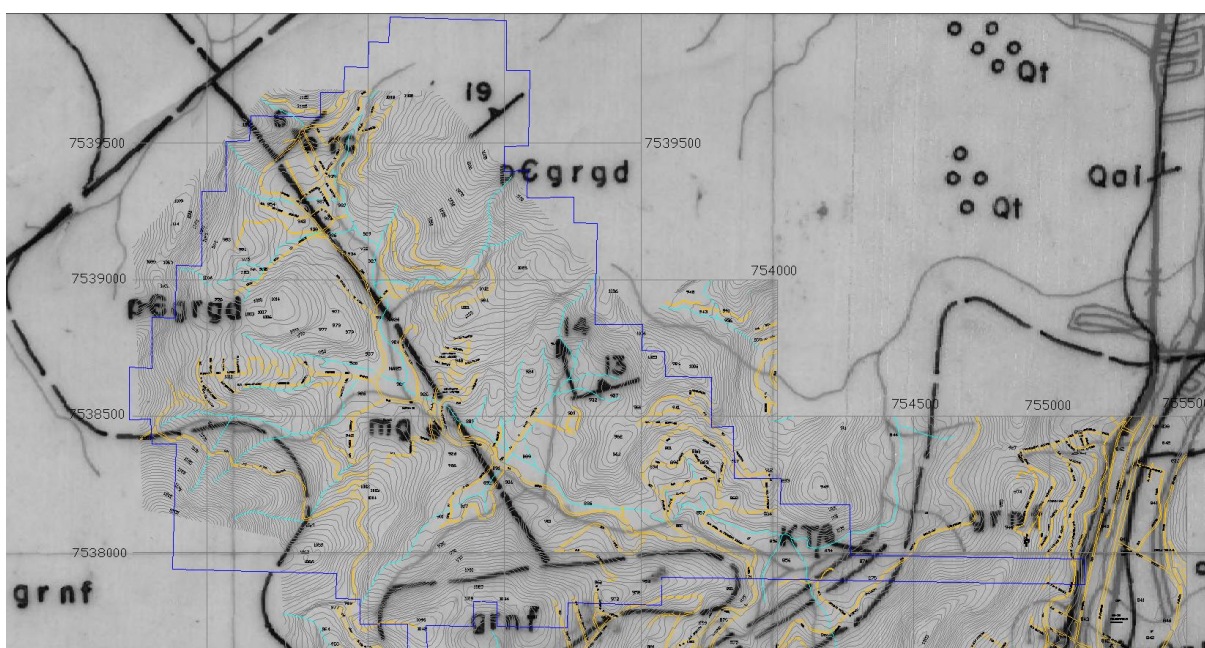


(fonte: Google Earth, 2016)

7.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A caracterização geológica da região está fundamentada em um relatório técnico (trabalho não publicado¹), que estão baseados no Mapa Geológico da Folha Duas Barras e em extensivo trabalho de campo. A figura 14 apresenta a área estudado no Mapa Geológico da Folha Duas Barras, onde observam-se as unidades geológicas Granito Nova Friburgo (grnf) e Batólito Serra dos órgãos (pCgrgd), além de diques básicos (KTβ).

Figura 14 – Mapa Geológico da Folha Duas Barras



(fonte: trabalho não publicado²)

O Granito Nova Friburgo (idade Cambriana) é um granitóide pós-tectônico do tipo-I, com presença marcante de hornblenda e biotita, granulção fina a média e textura equigranular (trabalho não publicado³).

A Unidade Batólito Serra dos Órgãos é uma litologia com composição granítica a granodiorítica, granulometria média a grossa, com presença marcante de biotita, anfibólio e granada e eventuais enclaves leucocráticos (trabalho não publicado⁴).

¹ Apresentado no relatório interno da GEOBRUGG do Mapeamento Geológico-Geotécnico da Bacia São Geraldo – Nova Friburgo (RJ) confeccionado no ano de 2015.

² Idem.

³ Idem.

Além das duas mais expressivas unidades citadas anteriormente, há a ocorrência de diques básicos, compostos por gabros e microgabros de coloração escura, e depósitos aluviais de constituição areno-siltosa, constituindo planícies e terraços formados ao longo dos córregos e riachos (trabalho não publicado⁵).

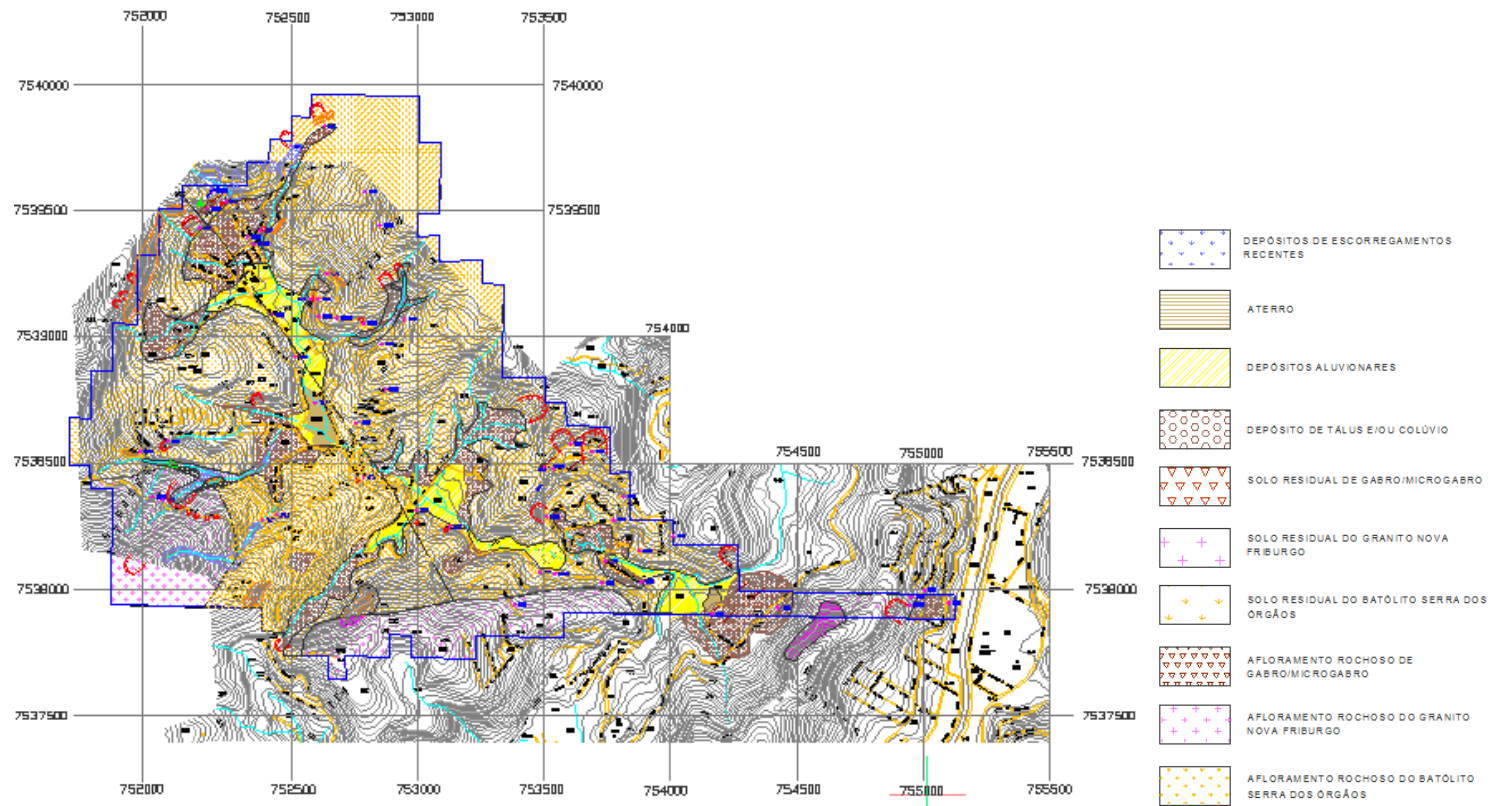
No mapa geológico geotécnico da bacia São Geraldo, apresentado na figura 15, constam as seguintes unidades: depósitos de escorregamentos recentes, aterro, depósitos aluvionares, depósito de tálus e/ou colúvio, solo residual de gabro/microgabro, solo residual do granito Nova Friburgo, solo residual do batólito Serra dos Órgãos, afloramento rochoso de gabro/microgabro, afloramento rochoso do granito Nova Friburgo e afloramento rochoso do batólito Serra dos Órgãos (trabalho não publicado⁶).

⁴ Apresentado no relatório interno da GEOBRUGG do Mapeamento Geológico-Geotécnico da Bacia São Geraldo - Nova Friburgo (RJ) confeccionado no ano de 2015.

⁵ Idem.

⁶ Idem.

Figura 15 – Mapa geológico-geotécnico da bacia São Geraldo

(fonte: trabalho não publicado⁷)

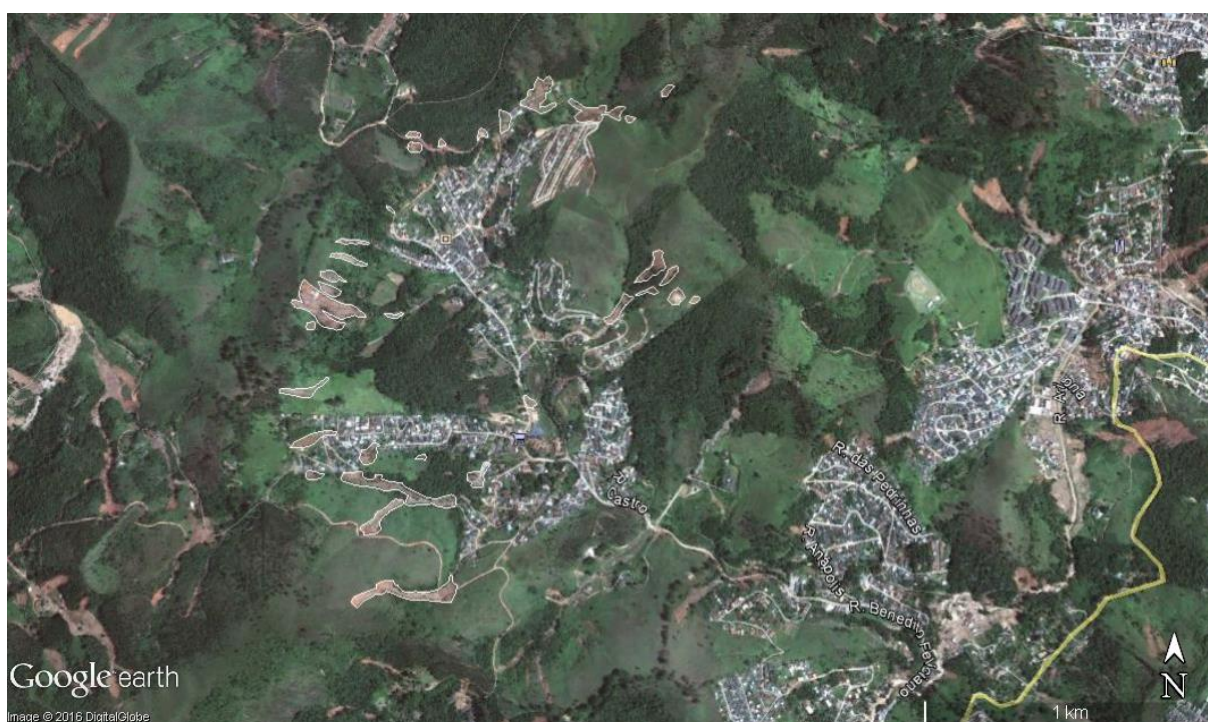
⁷ Apresentado no relatório interno da GEOBRUGG do Mapeamento Geológico-Geotécnico da Bacia São Geraldo - Nova Friburgo (RJ) confeccionado no ano de 2015.

7.2 MAPEAMENTO DOS ESCORREGAMENTOS

O mapeamento dos escorregamentos foi realizado no *Google Earth* com imagem do dia 19 de janeiro de 2011, logo após a ocorrência da movimentação, o que possibilitou a identificação dos diversos deslizamentos.

A partir da imagem de satélite, foram delimitados os diversos escorregamentos em polígonos e, depois locados na levantamento topográfico, realizado pela Prefeitura de Nova Friburgo, através da utilização do programa de *QGIS*. A partir da sobreposição desses dois importantes dados do local, foram selecionadas alguns escorregamentos para realização de uma visita de campo. A fim de selecionar os escorregamentos, foi utilizado como critério a extensão do movimento e sua localização. A figura 16 apresenta os 33 escorregamentos mapeados, a partir da imagem do dia 19 de janeiro de 2011.

Figura 16 – Escorregamentos mapeados

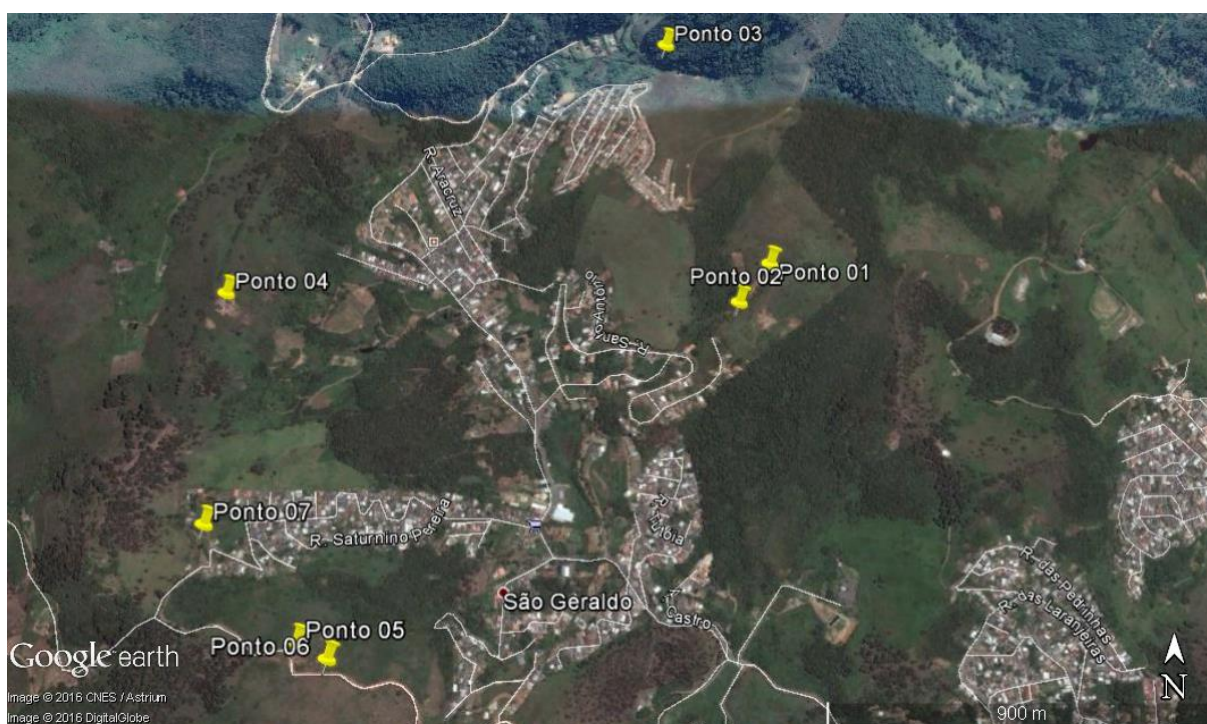


(fonte: Google Earth, 2016)

7.3 DESCRIÇÃO DOS PONTOS

No dia 1º de abril de 2016 foi realizada uma visita de campo na área, com intuito de viabilizar a análise das rupturas previamente escolhidas. Foram visitados 7 pontos escolhidos previamente, em função da extensão do movimento, localização e condições de acesso. A figura 17 apresenta a localização de cada ponto aqui descrito.

Figura 17 – Localização dos pontos



(fonte: Google Earth, 2016)

7.3.1 Ponto 01

Este ponto consiste em um talude com inclinação próxima dos 25° que sofreu um escorregamento translacional com espessura aproximada de 2 metros. Não foram realizadas sondagens no local, porém, conforme levantamento geológico apresentado na figura 15, e considerações realizadas em campo, o solo, no qual ocorreu o escorregamento, pode ser classificado como solo residual batólito da Formação Serra dos Órgãos. A figura 18 apresenta uma visão geral da ruptura.

Figura 18 – Visão geral da ruptura do ponto 01

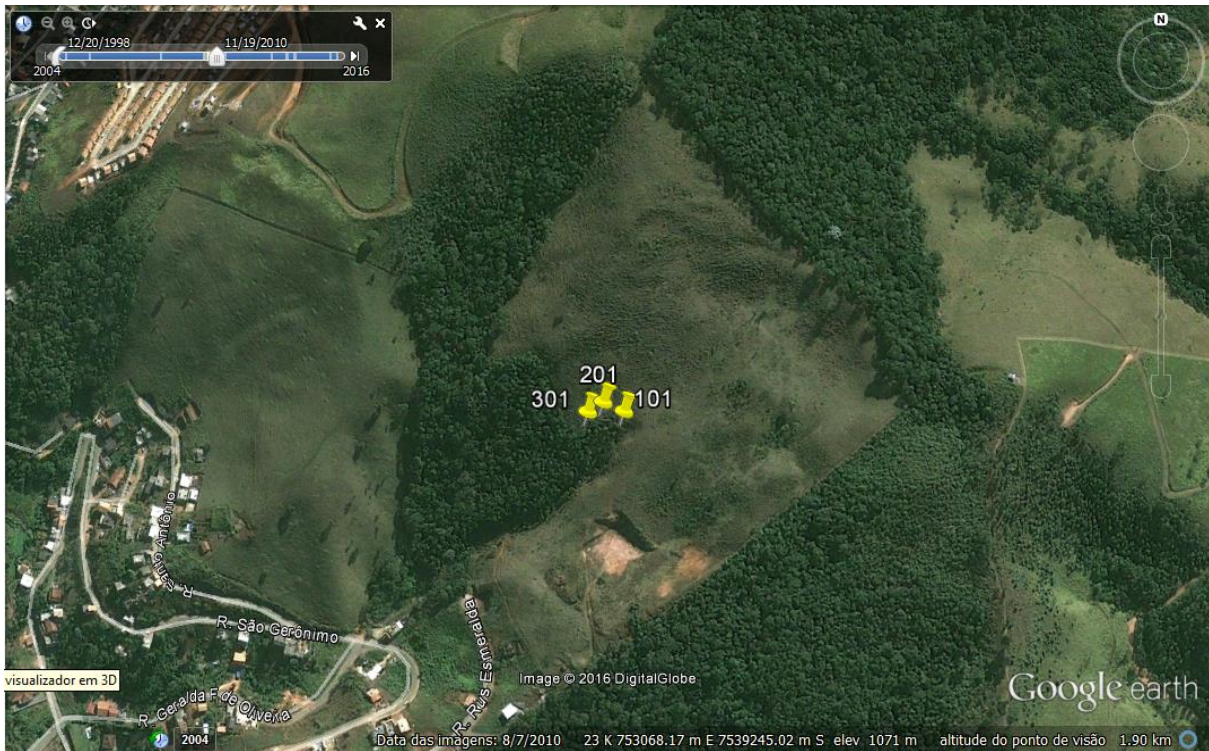


(fonte: foto do autor)

Em campo, foi observada a presença de camada orgânica superficial com espessura aproximada de 20 cm. O talude apresenta indícios de processos erosivos, porém não foi observada a presença de água na face do talude. A ruptura apresenta dimensões aproximadas de 40 metros de extensão e 20 metros de altura.

Em fotos anteriores ao dia dos escorregamentos, foi observado, através das imagens do *Google Earth* que, na localização dessa ruptura, não havia sinal de movimentação e a área apresentava vegetação densa, com diversas árvores. A delimitação do início da ruptura coincide com a mudança da vegetação, conforme apresentado na figura 19.

Figura 19 – Localização ponto 01



(fonte: foto do autor)

7.3.2 Ponto 02

Este ponto consiste em um talude com inclinação aproximada de 30° , onde ocorreu um escorregamento translacional com espessura de, aproximadamente, 4 metros. De acordo com o levantamento geológico, o solo, no qual ocorreu o escorregamento, pode ser classificado como solo residual batólito da Formação Serra dos Órgãos. A ruptura apresenta comprimento aproximado de 12 metros. A figura 20 apresenta uma visão geral da ruptura.

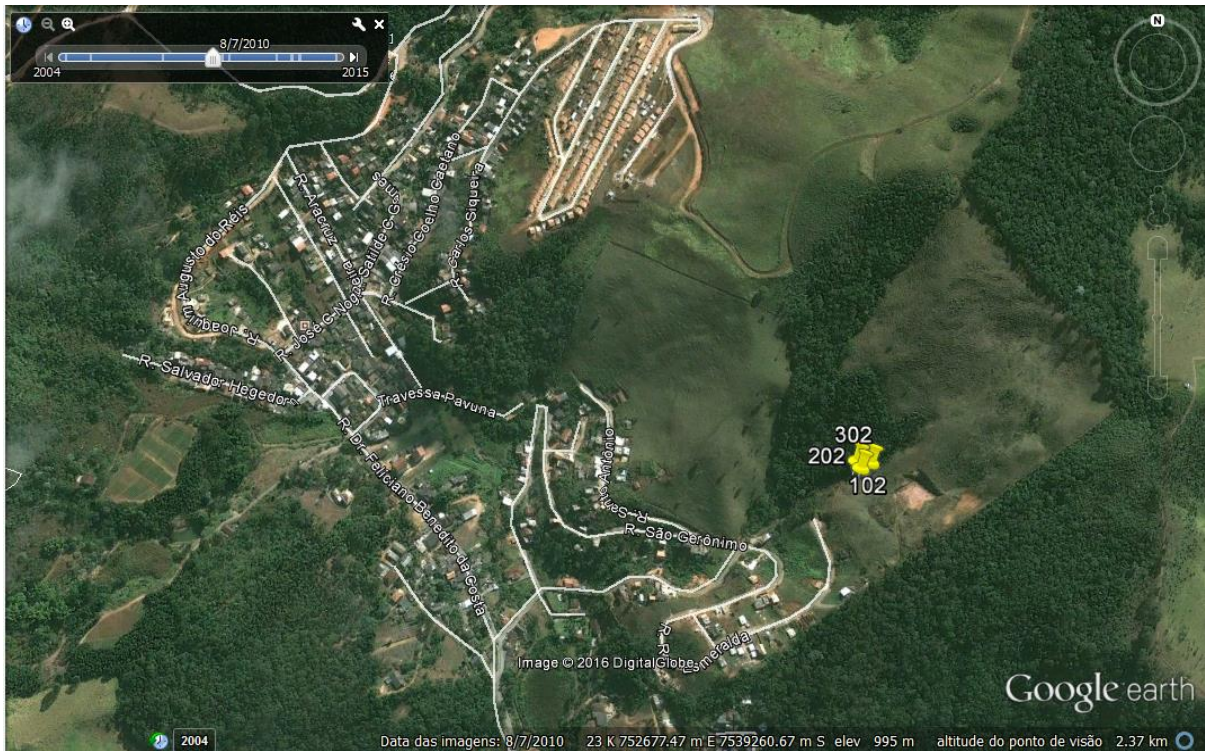
Figura 20 – Visão geral da ruptura do ponto 02



(fonte: foto do autor)

Os pontos 1 e 2 encontram-se muito próximos e na figura 21 está representado a localização do ponto 2. Ambos apresentam características semelhantes, como observado em fotos anteriores ao dia dos escorregamentos, nas quais não constavam sinais de movimentação e apresentavam vegetação densa.

Figura 21 – Localização ponto 02



(fonte: Google Earth, 2016)

7.3.3 Ponto 03

O ponto 03 é caracterizado por um talude de maior inclinação, chegando a valores próximos de 40° . Nesse ponto ocorreu uma ruptura planar com altura de 15 metros, comprimento próximo a 17,5 metros e espessura de 2 metros. Foi observado, em campo, a presença de material proveniente de escorregamentos depositado no pé do talude, além de indícios de erosão. De acordo com o levantamento geológico, este ponto é formado de solo residual batólito da Formação Serra dos Órgãos. A figura 22 apresenta uma visão geral deste ponto.

Figura 22 – Visão geral da ruptura do ponto 03



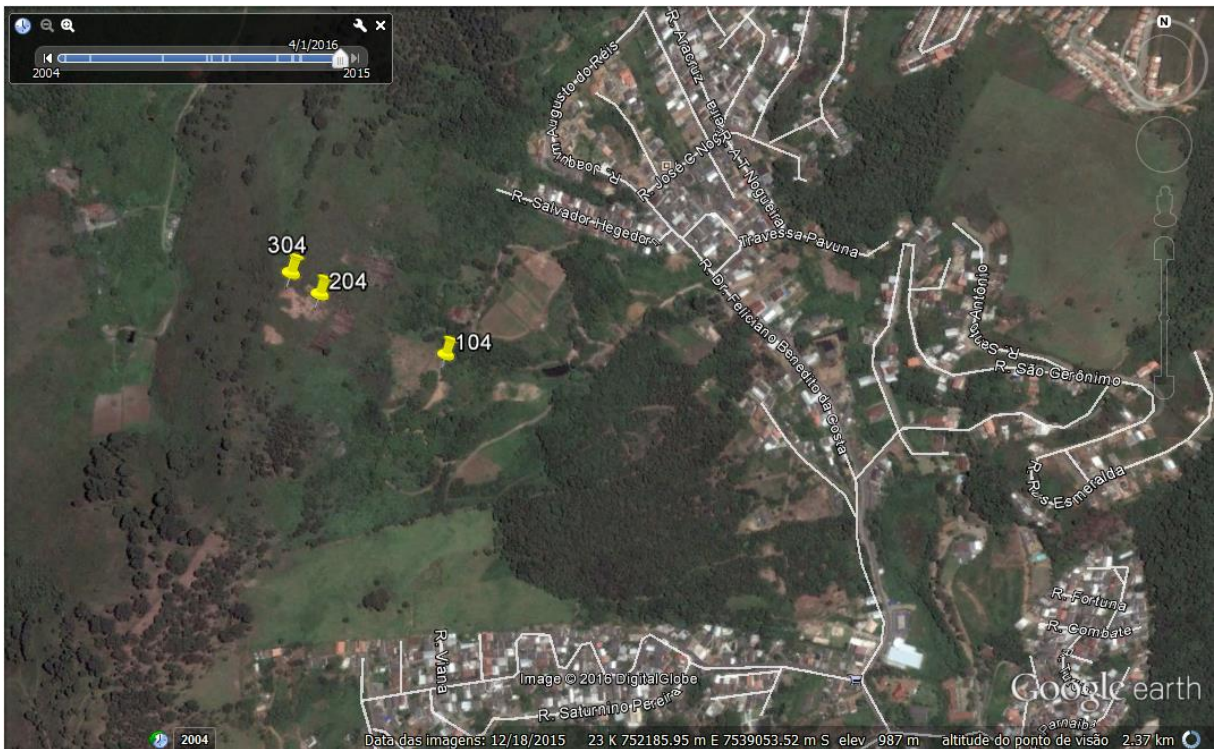
(fonte: foto do autor)

Ao analisar as imagens do *Google Earth*, antes de janeiro de 2011, não foram observados indícios de ruptura e área apresentava vegetação de porte pequeno/médio. Foi observado que parte da área de ruptura já apresenta sinais de vegetação, porém, ainda é possível observar processos erosivos. O solo dessa região estava úmido, mas não foi observada a presença de água no talude.

7.3.4 Ponto 04

Não foi possível chegar próximo da ruptura deste ponto. Por se encontrar em cotas muito altas e terreno muito inclinado, o ponto mais próximo da ruptura está denominado como 104 na figura 23 e os demais pontos foram demarcados de acordo com imagem do *Google Earth*. De acordo com imagens prévias ao escorregamento, não foram observados processos erosivos que pudessem indicar uma possível ruptura. O início dessa ruptura está localizada num divisor de águas, no limite da bacia em estudo.

Figura 23 – Localização ponto 04



(fonte: Google Earth, 2016)

Este ponto está localizado em um talude de inclinação de 45° e largura aproximada de 20 metros. De acordo com o levantamento geológico, o solo no qual ocorreu o escorregamento pode ser classificado como solo residual batólito da Formação Serra dos Órgãos. Analisando as imagens de satélite logo após o escorregamento, foi observada a ocorrência de deslocamento de material até o ponto 104. Durante visita em campo, notou-se que uma boa parte da área, que foi afetada pela movimentação de massa, já apresenta vegetação de pequeno/médio porte, conforme observado na figura 24.

Figura 24 – Visão geral da ruptura do ponto 04



(fonte: foto do autor)

7.3.5 Ponto 05

O ponto 05 consiste em um talude de, aproximadamente, 35° onde ocorreu uma ruptura translacional que possivelmente evoluiu com o processo de erosão. Este ponto não apresenta água na face do talude mas, no contato entre o solo e a rocha, é possível observar a presença de água. O movimento ocorreu com espessura de 1 a 1,5 metros e, de acordo com o levantamento geológico do local, o solo local é classificado como solo residual de granito. A figura 25 apresenta uma visão geral da ruptura, onde pode-se observar a ocorrência de uma estrada na crista do talude, que pode ser um dos fatores determinantes para a ruptura.

Através da análise das imagens de satélites anteriores ao escorregamento, foi observado que não haviam indícios de ruptura e a área apresentava vegetação de pequeno porte.

Figura 25 – Visão geral da ruptura do ponto 05



(fonte: foto do autor)

7.3.6 Ponto 06

O ponto 06 está localizado ao lado do ponto 05, com talude de inclinação aproximada de 35° , o qual sofreu uma ruptura em conjunto com processos erosivos. A ruptura apresenta espessura de 3 metros e o solo local é classificado como solo residual de granito, além de estar muito intemperizado. Como no ponto 5, há uma estrada no topo da ruptura. A figura 26 apresenta uma visão geral da ruptura.

Através da análise das imagens de satélites anteriores ao escorregamento, foi observado que já havia ocorrido rupturas menores no pé do talude e a área apresentava vegetação de gramíneas, igual ao ponto 05.

Figura 26 – Visão geral da ruptura do ponto 06



(fonte: foto do autor)

Durante a visita de campo, foi observado uma trinca no terreno com cerca de 1 metro de espessura, conforme apresentado na figura 27. Provavelmente, essa movimentação está ocorrendo devido ao descalçamento no pé do talude. O deslocamento é tão grande que a água consegue infiltrar por ele, o que pode vir a gerar uma ruptura de grande porte no futuro.

Figura 27 – Deslocamento do ponto 06

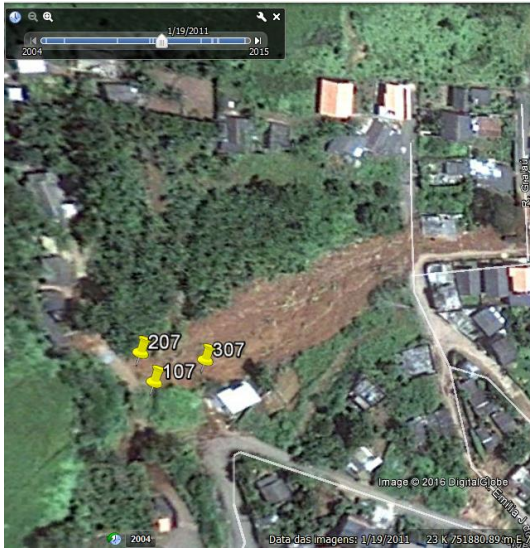


(fonte: foto do autor)

7.3.7 Ponto 07

O ponto 07 consiste em um talude de solo residual batólito da Formação Serra dos Órgãos, com inclinação aproximada de 40° . Neste ponto ocorreu uma ruptura planar com espessura de 1,5 metros e largura de 9 metros. Segundo imagem de satélite, logo após o escorregamento, o movimento chegou a alcançar o pé do talude. Porém, em campo, foi observado que na parte inferior do talude já havia ocorrência de vegetação, conforme observado na figura 28 e na figura 29.

Figura 28 – Ponto 07 em janeiro de 2011



(fonte: Google Earth, 2016)

Figura 29 – Ponto 07 em dezembro de 2015



(fonte: Google Earth, 2016)

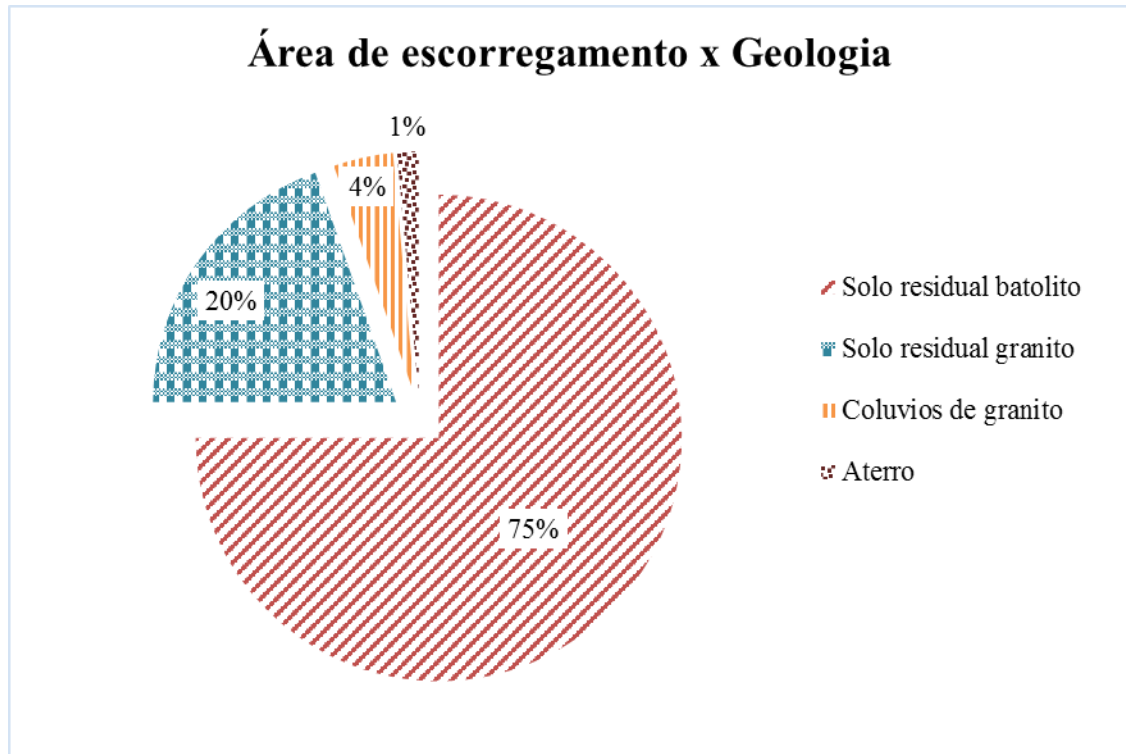
8 ANÁLISE DOS ESCORREGAMENTOS

A partir dos pontos observados em campo, foram realizadas análises de estabilidade. Estas análises foram feitas em duas etapas. Primeiramente, os escorregamentos foram estudados quanto a sua declividade e geologia e após, foram realizadas análises paramétricas de estabilidade para estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

8.1 TOPOGRAFIA E GEOLOGIA

Conforme citado no capítulo 7, os escorregamentos foram mapeados através de imagens do *Google Earth*, logo após os escorregamentos. Considerando somente os pontos nos quais a geologia e a topografia do local são conhecidas, foram mapeados valores próximos a 8 hectares de escorregamentos, atingindo praticamente 4% da área total da delimitação da bacia em estudo.

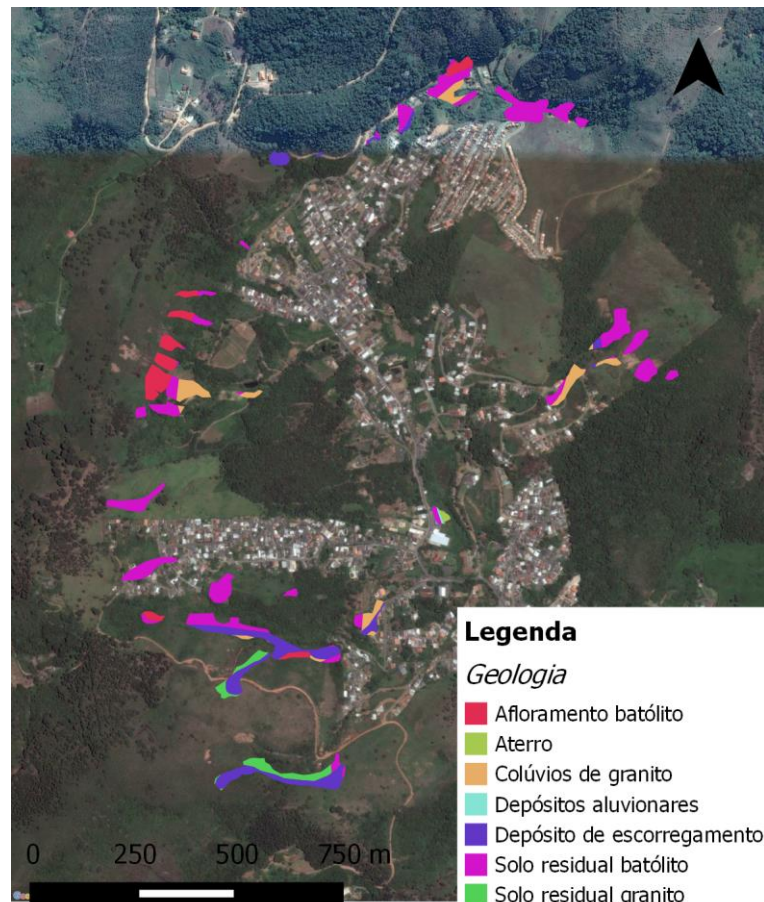
Os 8 hectares de escorregamentos foram agrupados conforme a geologia do local de início do escorregamento. Grande parte dos escorregamentos tiveram início no solo residual batólito, seguido do solo residual de granito, conforme apresentado na figura 30.

Figura 30 – Relação área de escorregamentos *versus* geologia local

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 31 apresenta o mapa dos escorregamentos com a geologia local. A partir deste mapa, é possível confirmar as relações apresentadas na figura 30 e observar que muitos dos escorregamentos estão localizados em diferentes solos, porém a maioria se inicia no solo residual batólito. Este fato já era esperado uma vez que 79% da bacia é formada de solo residual batólito. A partir disto, pode-se supor que muitos dos movimentos ocorreram no contato entre diferentes solos, devido a diferença de permeabilidade ou resistência que, com as grandes precipitações ocorridas, desencadearam a movimentação.

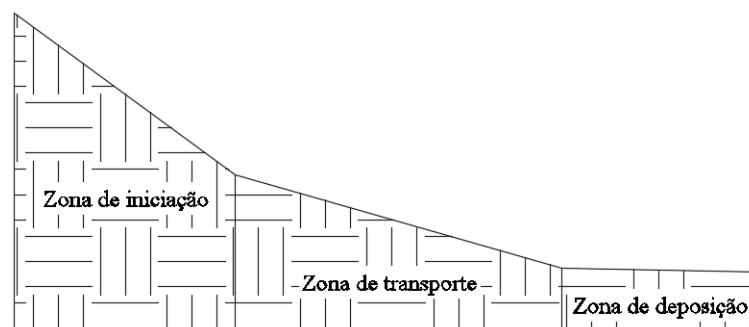
Figura 31 – Mapa dos escorregamentos com a geologia local



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme apresentado no capítulo 3, em um fluxo de detritos, são identificados três importantes zonas conforme a estabilidade do material. São elas, a zona de iniciação, zona de transporte e zona de deposição, conforme representado na figura 32.

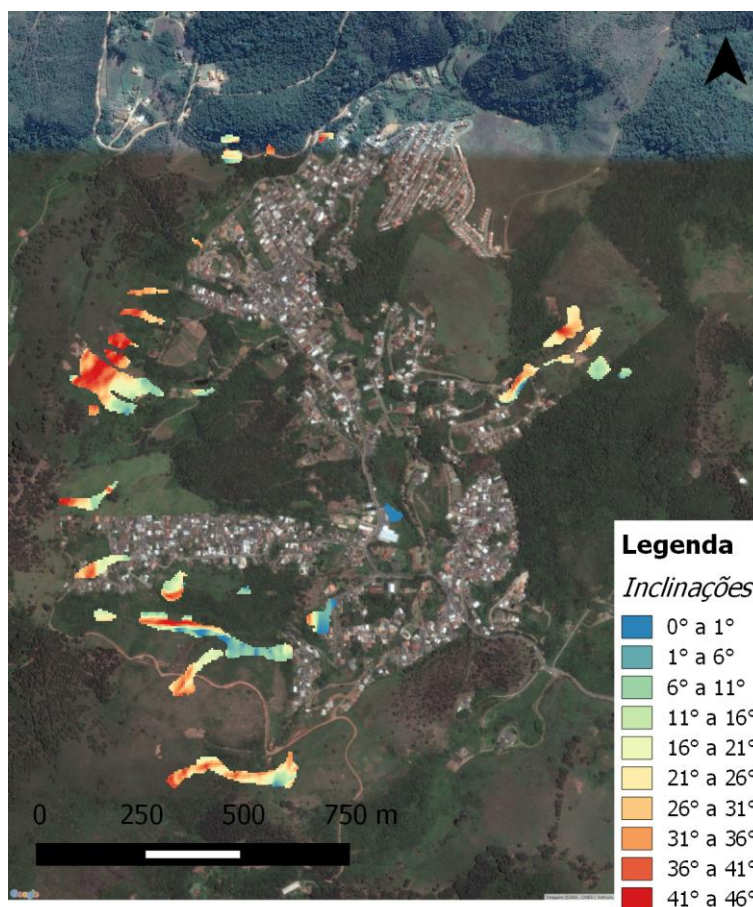
Figura 32 – Identificação das zonas de movimentação



(fonte: adaptado de VANDINE, 1996, p. 5)

Na figura 33, estão representados os escorregamentos com as suas respectivas declividades. É possível observar que a inclinação da iniciação dos escorregamentos ocorre entre 45° e 30° , não variando muito para os diferentes tipos de solo, nos quais os escorregamentos iniciam. A zona de transporte está situada entre as declividades de 30° e 20° , enquanto a zona de depósito apresenta faixa de declividade inferior, entre 0° e 20° .

Figura 33 – Mapa dos escorregamentos com a declividade



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com VanDine (1996), os fluxos de detritos apresentam inclinação típicas de iniciação superior a 25° , de zonas de transporte entre 25° e 15° e de zonas de deposição menores que 10° .

Analisando especificamente as declividades dos pontos visitados em campo, é possível observar que o ponto 04 apresentou a maior declividade de iniciação. Pelas imagens do *Google Earth*, foi um dos movimentos de maior extensão, provavelmente causada pela maior

velocidade do movimento. Analisando a declividade de iniciação, transporte e deposição deste ponto, em conjunto com a classificação de VanDine (1996), o mesmo se enquadra na classificação de fluxo de detritos. Quanto aos demais pontos em solo residual batólito, todos apresentaram declividades próximas entre as etapas, inclusive os pontos 5 e 6, que iniciaram o movimento em solo residual granito. Porém, eles não se enquadram na classificação de fluxo de detrito de VanDine (1996), logo podem ser classificados como escorregamentos translacionais.

8.2 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Conforme visto no capítulo 7, as rupturas encontram-se em solo residual de granito e solo residual batólito. Ambos os solos apresentam parâmetros similares. Desta forma, devido à falta de ensaios de laboratório, os parâmetros fixados não sofrem diferenciação de um solo para o outro.

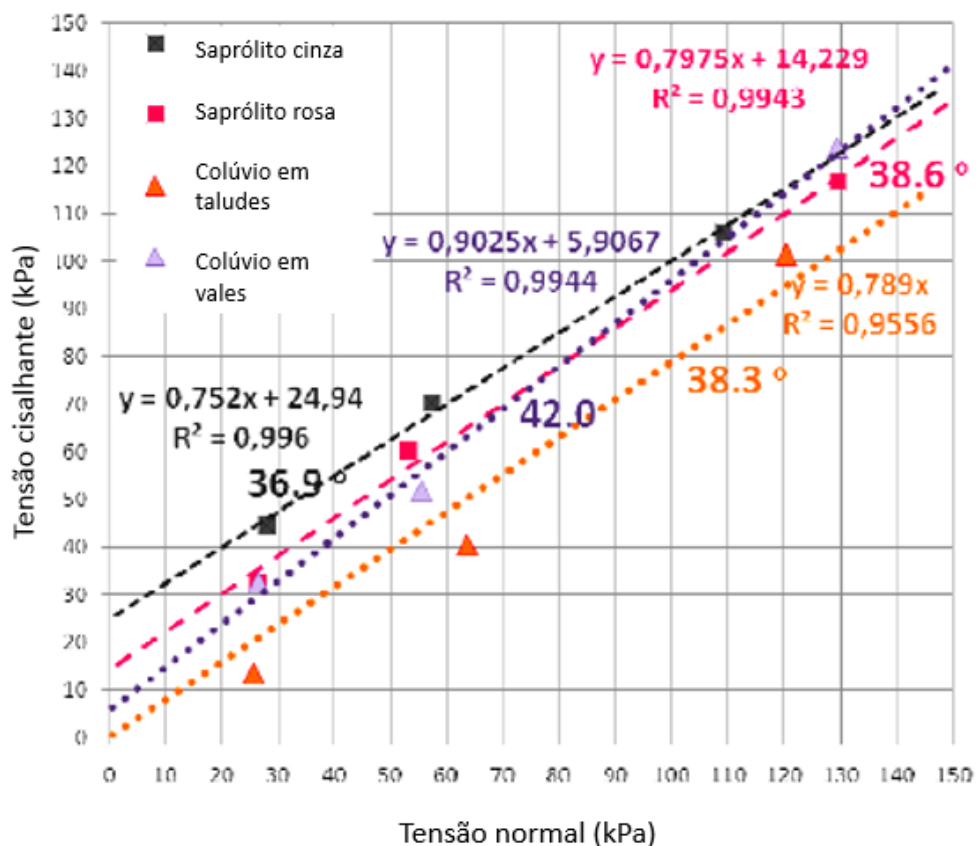
Para determinação dos parâmetros e comportamento do solo em estudo, foram realizadas análises paramétricas dos pontos principais da área. Normalmente, essas análises de estabilidade são realizadas através de retroanálises, de onde, a partir de ensaios do solo local, se obtêm três, de quatro parâmetros necessários para estas análises, sendo eles o peso específico, o ângulo de atrito e a coesão, faltando somente a determinação do parâmetro de poro-pressão (R_u). Como não foram realizados ensaios nos taludes em estudo, não são conhecidos os parâmetros necessários para uma retroanálise. A metodologia adotada para análise de estabilidade desses pontos foi através da fixação do peso específico e do ângulo de atrito do solo, e variação da coesão e do parâmetro de poro-pressão do solo, de forma que a ruptura esteja de acordo com as condições observadas em campo. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo fixados foram retirados de trabalhos publicados de estudo próximos de São Geraldo, conforme apresentado no capítulo 8.2.1, a seguir.

8.2.1 Parâmetros de resistência fixados

De acordo com Avelar et al. (2011), ocorreram 3.562 deslizamentos na região serrana do Rio de Janeiro, e notou-se que haviam quatro tipos que solos predominantes nesses escorregamentos: saprólito cinza (estágio inicial do intemperismo), saprólito rosa (estágio

mais avançado de intemperismo), colúvio avermelhado (solo laterizado) e colúvio castanho em cavidades dos vales. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto nestes solos para a determinação dos parâmetros. A figura 34 apresenta os parâmetros de resistência obtidos por Avelar et al. (2011).

Figura 34 – Envoltória de resistência dos ensaios de cisalhamento de Avelar et al. (2011)



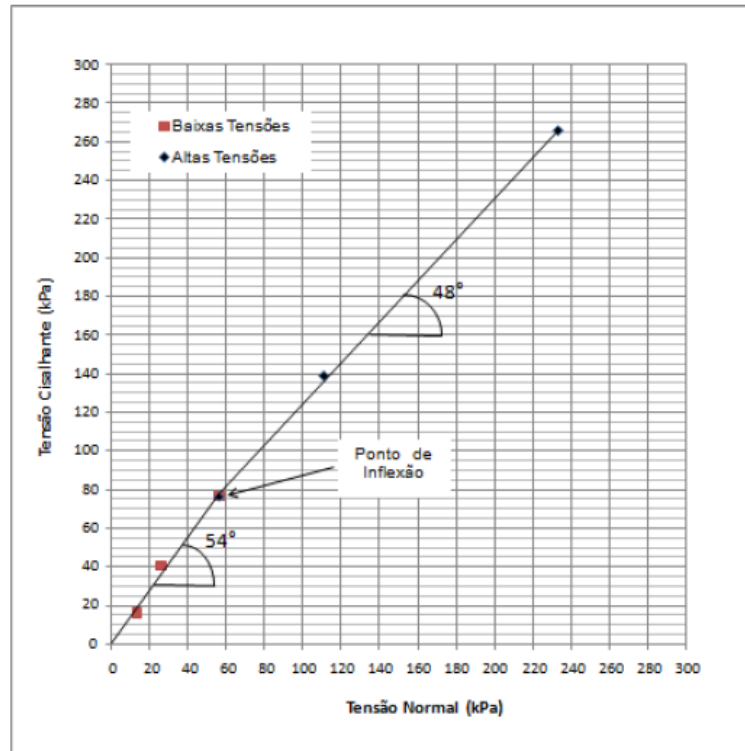
(fonte: AVELAR et al., 2011, p. 4, tradução nossa)

Os pontos analisados apresentam solo saprólito rosa, pois eles apresentam condições mais avançadas de intemperização. De acordo com o resultado dos ensaios de cisalhamento de Avelar et al. (2011), esse solo apresenta ângulo de atrito de 38,6°.

Além deste estudo de Avelar et al. (2011), há também estudos do solo da região de Campo do Coelho, em Nova Friburgo, a 15 km de distância de São Geraldo, por Machado (2013). Esses estudos consistiram na realização de ensaios de cisalhamento direto em amostras do solo saprólito rosa. A partir dos resultados dos ensaios foi observado no gráfico, que relaciona a

tensão normal com a tensão cisalhante, dois comportamentos de resistências distintos, uma para tensões normais maiores que 50 kPa e outro, para tensões menores que 50 kPa, formando um ponto de inflexão, conforme apresentado na figura 35.

Figura 35 – Tensão normal *versus* tensão cisalhante de Machado (2013)



(fonte: MACHADO, 2013)

A partir do critério de Coulomb, foram definidas duas envoltórias de resistência, uma para tensões até 50 kPa, com ângulo de atrito de 54° e coesão efetiva de 0 kPa e outra para tensões maiores que 50 kPa, com ângulo de atrito de 48° e coesão efetiva de 8,7 kPa (MACHADO, 2013).

Machado (2013) definiu peso específico do material de $17,8 \text{ kN/m}^3$, valores coerentes para esse tipo de solo, porém o ângulo de atrito calculado difere do obtido por Avelar et al. (2011).

O valor de Avelar et al. (2011) encontra-se dentro da faixa típica para o tipo de solo, portanto foi o valor adotado nas análises paramétricas a seguir.

8.2.2 Resultados das análises paramétricas de estabilidade

O método mais utilizado para análise de estabilidade, é o método das fatias. O solo acima da superfície de ruptura é dividido em fatias verticais, as quais podem apresentar diferentes larguras. A base de cada fatia é representada por um segmento de reta e não um trecho curvo, logo, quanto menor a largura das fatias, menor o erro induzido no resultado. O fator de segurança é definido como a relação entre o momento resistente e o momento instabilizador. Foi utilizado o método de Morgenstern-Price para o cálculo de FS. Neste método, as superfícies de ruptura analisadas podem assumir qualquer formato

A análise de estabilidade foi realizada com auxílio do programa *SLOPE/W* da *GEOSTUDIO* e o *SLIDE v 6.0* da *ROCSCIENCE*, sempre aplicando o método de Morgenstern e Price.

Devido à falta de sondagens nos pontos em estudo, a análise de estabilidade foi realizada com a utilização do solo homogêneo, com o peso específico e o ângulo de atrito fixados em 17,8kN/m³ e 38,6°, respectivamente. Os parâmetros de saturação do solo e de coesão foram variados de forma a alcançar o fator de segurança igual a 1,00. A saturação do solo foi simulada através do parâmetro de poro-pressão, R_u , onde $R_u=0$ indica um talude seco e $R_u=0,4$ indica um talude praticamente saturado, para o material em questão. O parâmetro R_u é definido como a relação entre a poropressão e a tensão geostática normal efetiva. Os valores de R_u adotados foram 0, 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40. A partir destes parâmetros foram encontrados 5 coesões diferentes para cada nível de saturação, nas quais o fator de segurança atingia o valor unitário.

Através da topografia do local, prévia aos escorregamentos, foram realizadas as seções topográficas no sentido da ruptura dos sete pontos para aplicação no *SLIDE* e *SLOPE/W*. A análise de estabilidade consistiu na delimitação do ocorrência do local da ruptura, conforme observado em campo, para que a superfície de ruptura ficasse mais representativa do ocorrido.

Os pontos 05 e 06 são constituídos de solo residual de granito, enquanto os demais são em solo residual batólito. A partir desta classificação, os pontos foram agrupados por solos e construídos gráficos da coesão *versus* o R_u .

A primeira análise foi realizada através do *SLOPE/W* e consistiu da delimitação da entrada e saída da superfície de ruptura, conforme observado em campo. O talude foi considerado com solo homogêneo, não havendo nenhuma delimitação da espessura.

Foi observado que, devido à falta de maiores limitações para ocorrência do movimento, as espessuras de massa movimentada foram mais espessas do que as observadas em campo. Devido às intensas precipitações de janeiro de 2011, que desencadearam os escorregamentos, foi considerado que as análises que mais se aproximam da realidade, são as que apresentam valores de R_u entre 0,3 e 0,4. Porém, nessa primeira análise, foi observado que, para esses parâmetros de poro-pressão, a coesão do solo apresenta valores mais elevados para que ocorra a ruptura. Os valores de coesão ficaram entre 0 e 30kPa, fazendo com que o movimento apresente uma superfície de ruptura circular e de maior espessura, diferente dos movimentos observados em campo. Na figura 36 está representado o resultado da análise do ponto 7 com $R_u=0,4$.

Figura 36 – Resultado análise ponto 7 com $R_u=0,4$



(fonte: elaborado pelo autor)

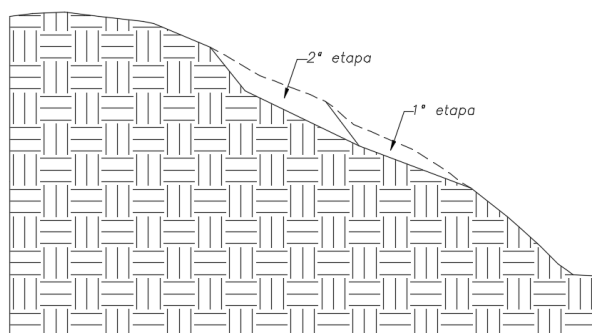
Com essa primeira análise, foi possível confirmar que o solo não é homogêneo e, provavelmente, é somente a primeira camada do solo, com uma espessura próxima ao do movimento ocorrido. Abaixo desta camada os solos são mais resistentes.

Para a segunda análise foi delimitada a primeira camada menos resistente com uma espessura próxima do movimento ocorrido em campo, e, como forma de simular o intemperismo, a segunda camada foi definida com os mesmos parâmetros de peso específico, ângulo de atrito

e de poro-pressão, alterando somente a coesão para valores maiores que o primeiro solo. Essa análise foi realizada através do programa da *ROSCIENCE*, o *SLIDE*. Nela, além da delimitação da espessura do movimento através de uma segunda camada de solo mais resistente, foram delimitados os pontos de entrada e saída da ruptura. Esta análise não pode ser realizada no ponto 4, pois como não foi possível acessá-lo, a ruptura não foi observada de perto, não tendo as medidas necessárias para essa delimitação da segunda camada.

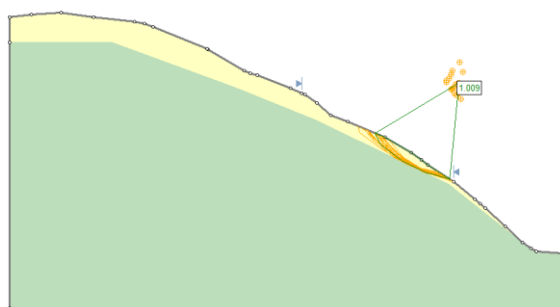
Essa segunda análise apresentou diferentes mecanismos de ruptura. No ponto 5, ela ocorreu em duas etapas, primeiramente rompendo no pé do talude, seguido de uma ruptura acima da delimitação do talude, conforme apresentado no esquema na figura 37. A coesão para que a ruptura acontecesse dessa maneira foi igual a 5,1kPa para R_u igual a 0,4. Os resultados das duas etapas desta análise, está apresentado nas figuras 38 e 39.

Figura 37 – Esquema da superfície de ruptura em duas etapas



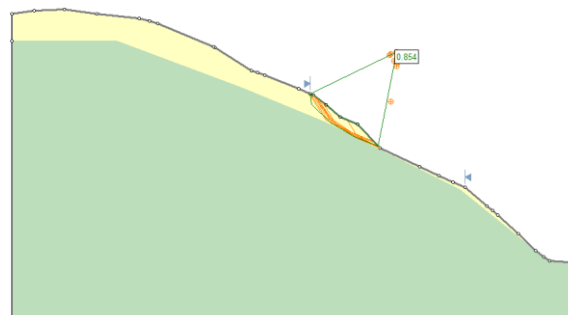
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Resultado análise da 1ª etapa ponto 5



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Resultado análise da 2ª etapa ponto 5

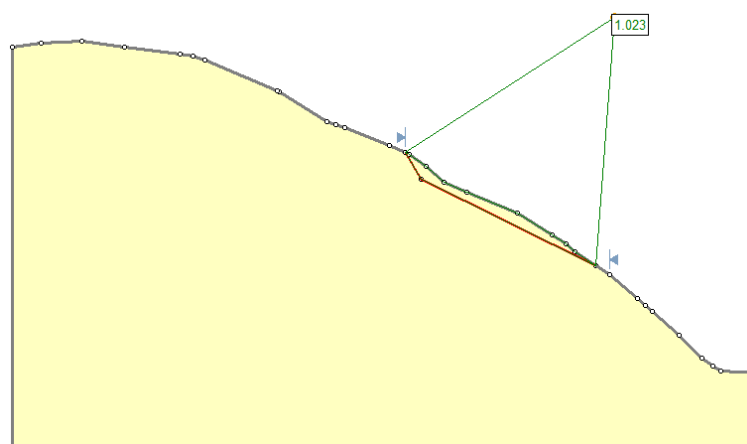


(fonte: elaborado pelo autor)

Nos demais pontos, as rupturas ocorrem em uma etapa e a maioria delas apresentou espessuras e extensões menores que as dimensões medidas em campo. Somente no ponto 3, que a ruptura ocorreu próximo ao observado, a coesão adotada para R_u de 0,4 foi igual a 7,2kPa.

A terceira análise foi a mais representativa das condições observadas em campo e, a partir desta, foi possível determinar um intervalo de valores da coesão. A análise consistiu na definição da superfície de ruptura conforme observado em campo. Esta definição foi realizada através do programa para análise de estabilidade da *ROSCIENCE*, o *SLIDE*. A fim de exemplificar a metodologia aplicada, na figura 40, está representado o resultado da análise do ponto 5 para R_u de 0,4.

Figura 40 – Resultado análise ponto 5 para $R_u=0,4$



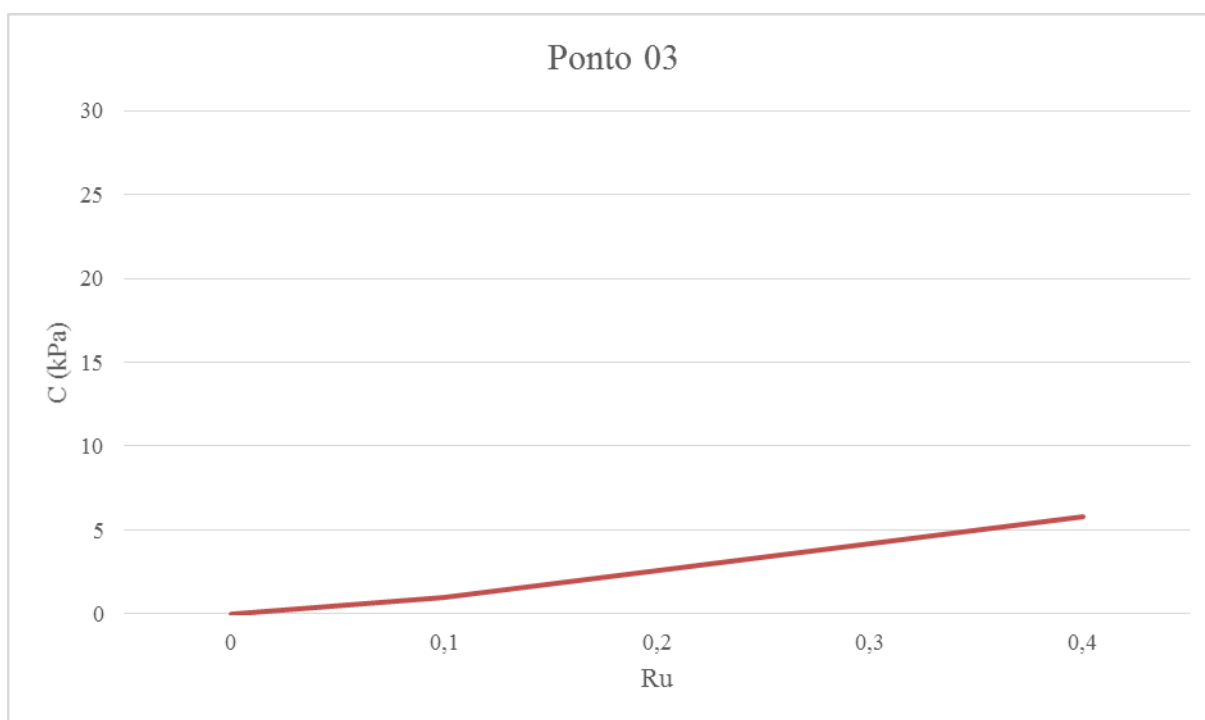
(fonte: elaborado pelo autor)

O ponto 1 teve a superfície de ruptura definida com 20 metros de altura, partindo do pé do talude, e inclinação de 25° . Foram realizadas cinco análises com a variação do R_u de 0 a 0,4, de maneira a encontrar a relação entre a coesão e o parâmetro de poro-pressão. O fator de segurança igual a 1 ocorre somente para $R_u=0,4$ com coesão igual a 0kPa, para R_u inferior a esse valor o fator de segurança é maior que 1.

O ponto 2 é bem similar ao ponto 1, pois a ruptura só ocorre com R_u de 0,4 para uma coesão igual a 0kPa.

O ponto 3 é um talude com inclinação de 40° e ruptura com espessura de 2m. Os valores de coesão encontrados foram superiores aos pontos anteriores, variando entre 0 e 5,9kPa, conforme apresentado na figura 41.

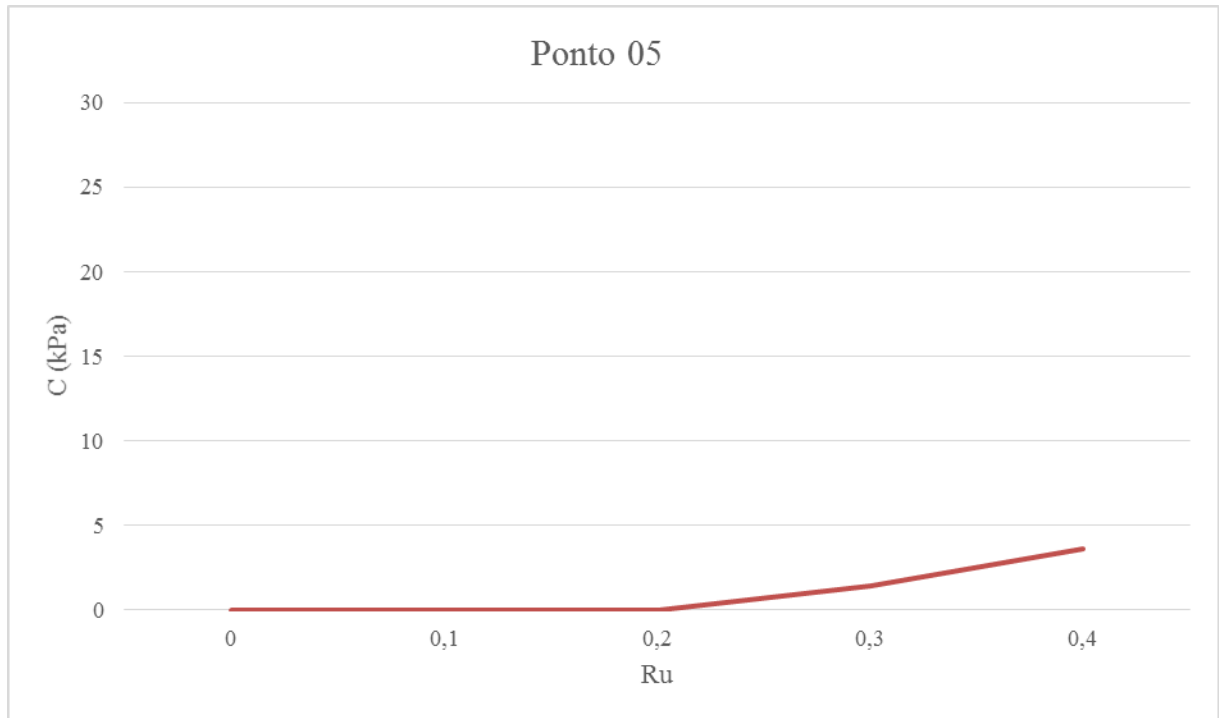
Figura 41 – Gráfico coesão *versus* Ru no ponto 3 para FS=1,00



(fonte: elaborado pelo autor)

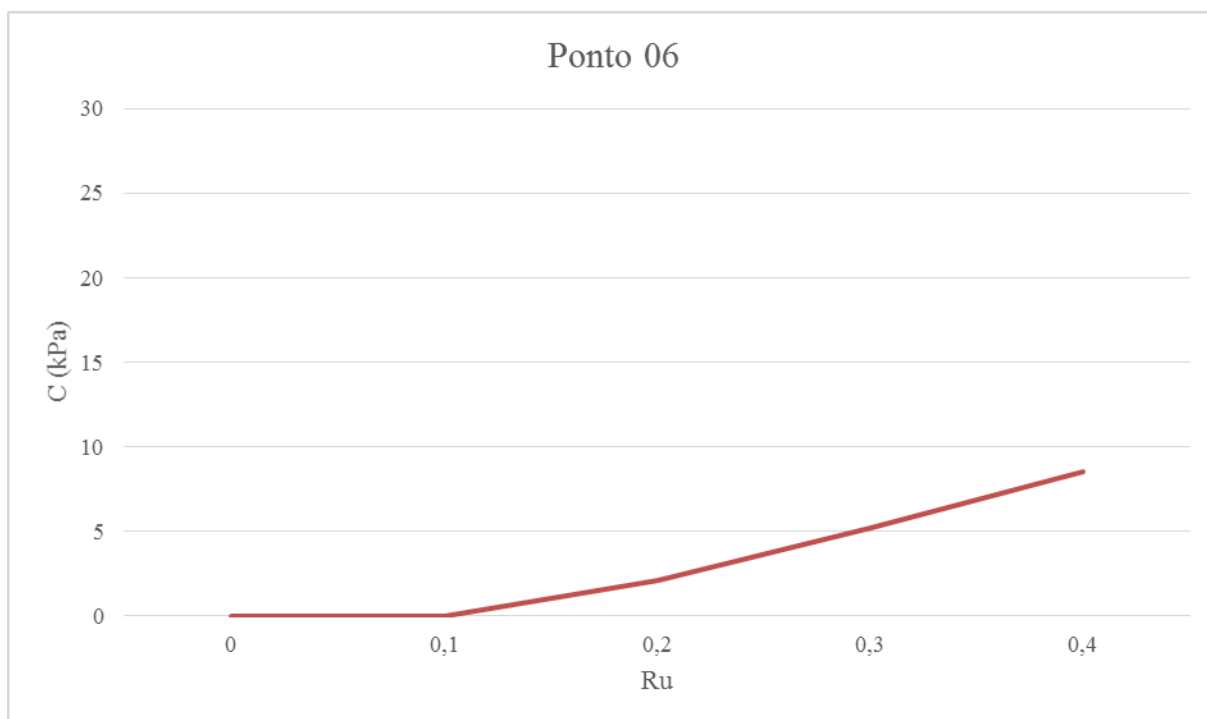
Como o ponto 4 não foi acessível, não foi possível realizar as medições necessárias para a determinação da superfície de ruptura. A única análise realizada neste ponto foi através do *SLOPE/W*, com a delimitação da entrada e saída da superfície de ruptura, que resultou em valores de coesão na ordem de 30kPa, porém não apresentou a superfície de ruptura observada em campo.

O ponto 5 apresentou comportamento do solo diferente dos demais pontos. Este talude apresenta uma inclinação de 35° e espessura de 1,5 metros e a ruptura nesse ponto só ocorre com Ru igual a 0,3 e 0,4, como pode ser observado na figura 42.

Figura 42 – Gráfico coesão *versus* Ru no ponto 5 para FS=1,00

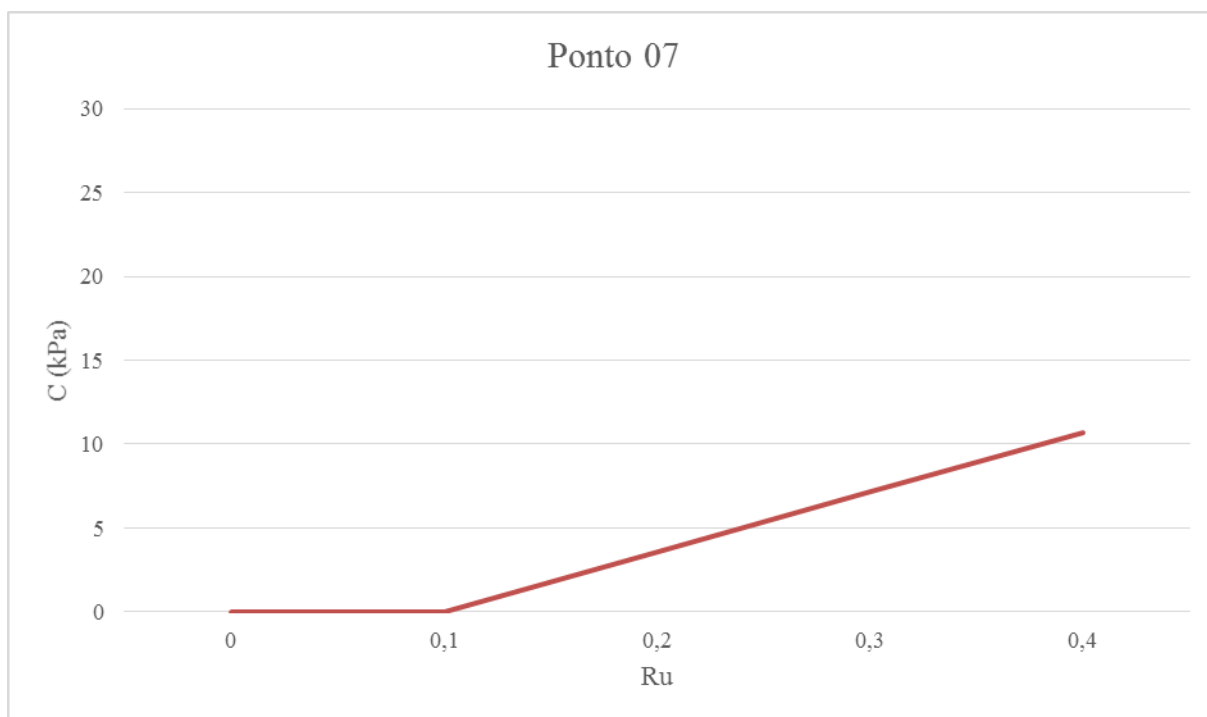
(fonte: elaborado pelo autor)

O ponto 6 encontra-se muito próximo do ponto 5 e apresenta a mesma inclinação de 35° , porém os valores de coesão para cada situação de poro-pressão são diferentes, devido a maior espessura da superfície de ruptura, próximo a 3 metros. Os valores da coesão para cada Ru podem ser observados na figura 43.

Figura 43 – Gráfico coesão *versus* Ru no ponto 6 para FS=1,00

(fonte: elaborado pelo autor)

O ponto 7 consiste em um talude de 40°, com ruptura de espessura de 1,5 metros. Os valores de coesão encontrados foram superiores aos pontos anteriores, variando entre 0 e 10,7 kPa, porém, a ruptura só ocorre com valores de Ru iguais ou superiores a 0,1, conforme apresentado na figura 44.

Figura 44 – Gráfico coesão *versus* Ru no ponto 7 para FS=1,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Das três análises de estabilidade realizadas, a mais realista será adotada nesse trabalho, e consiste no último método apresentado, no qual foi definida a superfície de ruptura similar a verificada em campo. Foi a única maneira encontrada para delimitação da ruptura, o que corrobora a premissa de que há um contato abaixo desta profundidade.

Observando os resultados obtidos na última análise, nota-se que as rupturas ocorreram em todos os pontos, somente com o solo praticamente saturado, com Ru de 0,4. Devido à falta de informações quanto aos parâmetros do solo e, partindo do princípio de que não foram observadas grandes diferenças nos valores coesão, serão adotados os mesmos parâmetros para os dois tipos de solo analisados ao longo do trabalho, solo residual de granito e solo residual batólito.

Durante o período de ocorrência dos escorregamentos, a precipitação acumulada em 24 horas foi de 241,8mm. Supõe-se que o solo encontrava-se praticamente saturado logo, os valores de coesão foram definidos entre 0kPa e 10kPa, conforme apresentado nos gráficos para Ru de 0,4. Na tabela 1 estão apresentados, resumidamente, as informações importantes de cada ponto.

Tabela 1 – Resumo dos pontos estudados

Ponto	Tipo de solo	Espessura da ruptura (m)	i (°) na zona de início	c' para $R_u=0,4$
01	Solo residual batólito	2,0 m	35°	0 kPa
02	Solo residual batólito	4,0 m	30°	0 kPa
03	Solo residual batólito	2,0 m	40°	5,8 kPa
04	Solo residual batólito	—	50°	—
05	Solo residual de granito	1,5 m	45°	3,6 kPa
06	Solo residual de granito	3,0 m	45°	8,5 kPa
07	Solo residual batólito	1,5 m	35°	10,7 kPa

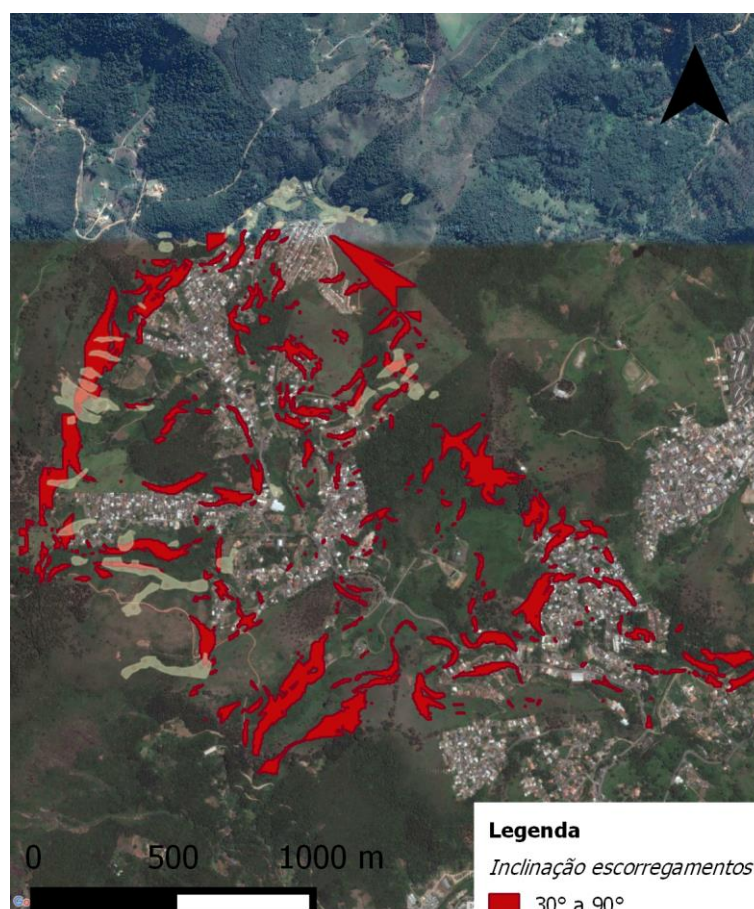
(fonte: elaborado pelo autor)

9 ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE

Todas as informações obtidas em campo, e os resultados das análises de estabilidade tornaram possível a elaboração de uma análise quanto à suscetibilidade de escorregamentos. Esta análise foi realizada em três etapas.

A primeira etapa consistiu na análise de suscetibilidade, avaliando a declividade do terreno. A partir dos resultados apresentados no capítulo 8, chegou-se à conclusão que os escorregamentos ocorreram principalmente nas zonas formadas por solo residual batólito e somente em terrenos com declividades superiores a 30° . Na figura 45 estão representadas, em vermelho, as regiões onde o solo residual batólito possui inclinações de 30° a 90° .

Figura 45 – Análise de suscetibilidade quanto a declividade



(fonte: elaborado pelo autor)

As áreas de batólito com inclinações de 30° a 90°, representadas em vermelho, na figura 45, correspondem a 38,6 ha porém, somente 1,8 ha corresponde aos escorregamentos ocorridos em janeiro de 2011. A partir disto, pode-se concluir que a análise de suscetibilidade, levando em consideração somente o tipo de solo e a declividade, não é o suficiente para a elaboração de um mapa de suscetibilidade.

Existem diversas razões pelas quais nem todas as áreas em vermelho, apresentadas na figura 45, condizem com os escorregamentos ocorridos. As instabilidades não dependem somente da inclinação do terreno e do tipo de solo mas, depende também da poro-pressão, dos parâmetros do solo, da vegetação, além da espessura da camada do solo.

Os parâmetros do solo foram determinados a partir dos sete dos pontos visitados em campo e estimados, conforme citado anteriormente. Por ser uma estimativa, considerando somente os pontos visitados, não é possível afirmar que toda área com este tipo de solo apresente os mesmos parâmetros, portanto a possível heterogeneidade do solo, não será considerada nesta análise.

A vegetação na região não parece ter tido grande influência na ocorrência dos movimentos pois, conforme observado durante a visita em campo, e através das imagens do *Google Earth* prévias aos escorregamentos, as quais mostraram ocorrência tanto em solos com vegetação de grande porte quando em gramíneas.

As próximas duas etapas da realização desta análise de suscetibilidade, consistiram em refinar a área apresentada na figura 45, levando em consideração a espessura da camada e a poro-pressão.

A partir dos capítulos 7 e 8, pôde-se concluir que, na maioria dos pontos observados, ocorreram movimentos translacionais portanto, a análise quanto a espessura da camada do solo, foi realizada através da aplicação da metodologia de cálculo para talude infinito, apresentada no capítulo 3.

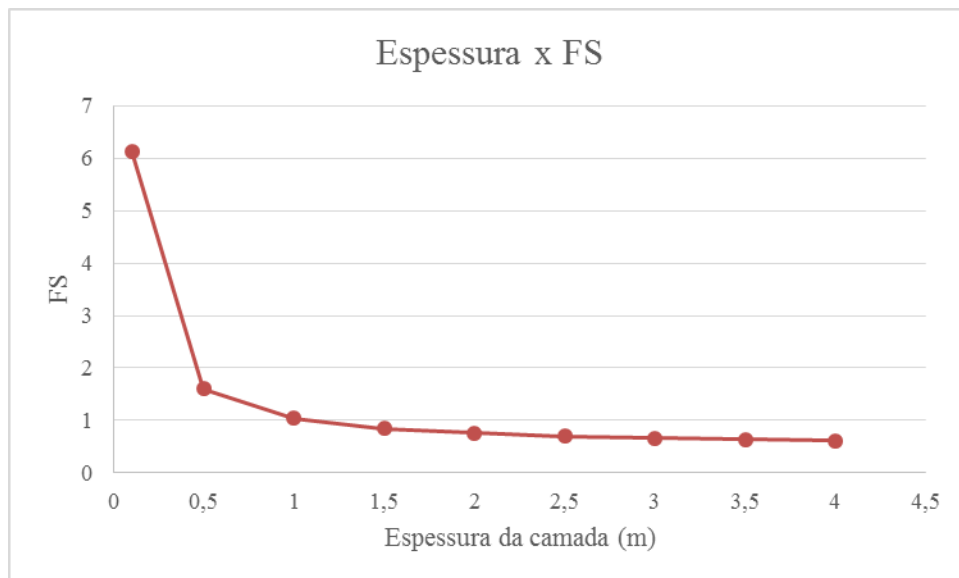
A equação de talude infinito está representada pela fórmula 4.

$$FS = \frac{c' + h(\cos \alpha)^2(\gamma - m\gamma_w) \tan \phi'}{\gamma h \sin(\alpha) \cos(\alpha)} \quad (\text{fórmula 4})$$

Para aplicação desta fórmula foram realizadas algumas suposições. A partir dos resultados das análises de estabilidade, para o solo saturado, a coesão variou entre 0 e 10kPa e, para o cálculo do fator de segurança, adotou-se o valor médio de 5kPa. O mesmo critério adotado para o coesão do solo, foi adotado para a inclinação do talude, onde se considerou um valor médio de 35°. Quanto aos parâmetros do solo, foram adotados os valores determinados no capítulo 8, de 38,6° para o ângulo de atrito e 17,8kN/m³ para o peso específico do solo.

A equação do talude infinito foi aplicada utilizando os valores fixos descritos anteriormente e variando as espessuras da camada do solo entre 0 e 4m, valores estes que são condizentes com os pontos observados na visita de campo. A partir desta variação, foi elaborado um gráfico da relação do fator de segurança com a espessura do solo, que está apresentado na figura 46.

Figura 46 – Gráfico espessura da camada de solo *versus* o fator de segurança



(fonte: elaborado pelo autor)

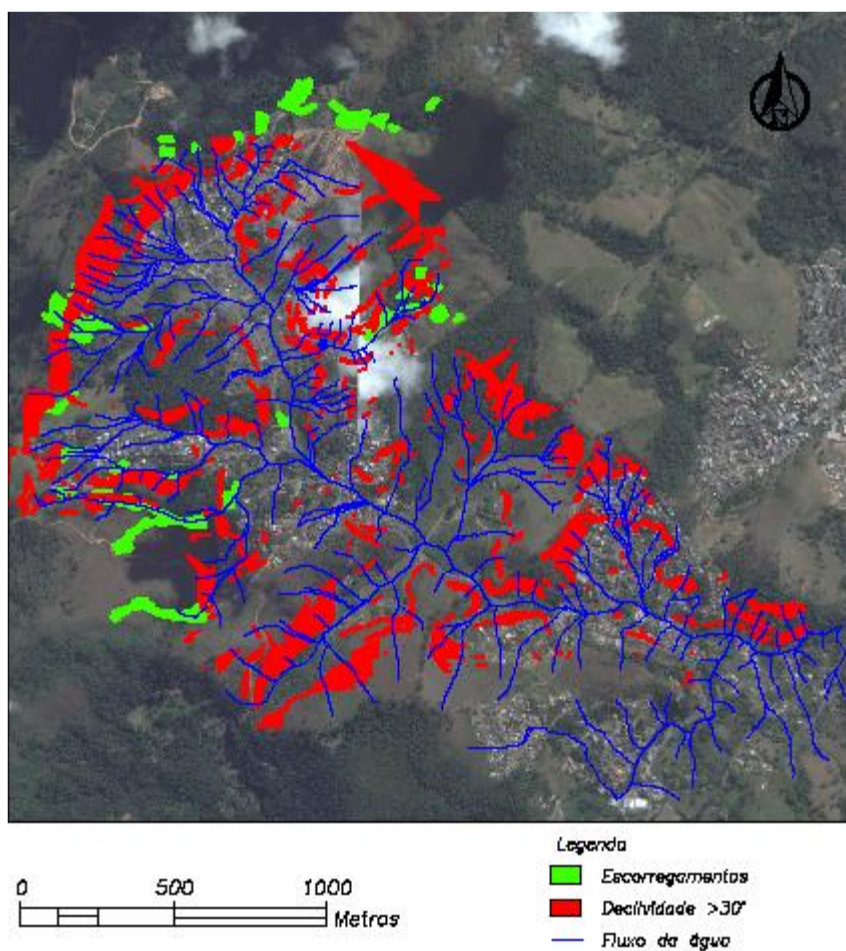
A partir do gráfico apresentado na figura 46, é possível observar que o fator de segurança é igual ou inferior a 1 a partir de espessuras superiores a 1,0 metro. Esta relação da espessura

com o fator de segurança está condizente com os movimentos observados em campo, nos quais as espessuras foram efetivamente superiores a 1,0 metro.

A figura 45 está localizando somente os pontos com inclinações e geologia determinados, e não analisa a espessura da camada que, de acordo com o gráfico da figura 46, deve ser maior que 1,0 metro, para que ocorra a ruptura.

A outra análise realizada relaciona o grau de saturação do solo com a ocorrência do movimento. Nas análises realizadas no capítulo 8, para a determinação dos parâmetros do solo, foi considerado solo saturado, para que fosse possível a ocorrência da ruptura. A condição de ocorrência de ruptura pode não ter sido satisfeita no caso do solo não ser saturado, explicando, assim, a não ocorrência dos escorregamentos nas regiões em vermelho. A saturação do solo pôde ser analisada de uma forma qualitativa a partir da análise dos pontos de convergência da drenagem, com uso do *software* AutoCAD Civil 3D. Na figura 47, está representado o caminho do fluxo da água na área em estudo em conjunto, com as áreas em solo residual batólito com declividade superior a 30° e os escorregamentos ocorridos em janeiro de 2011.

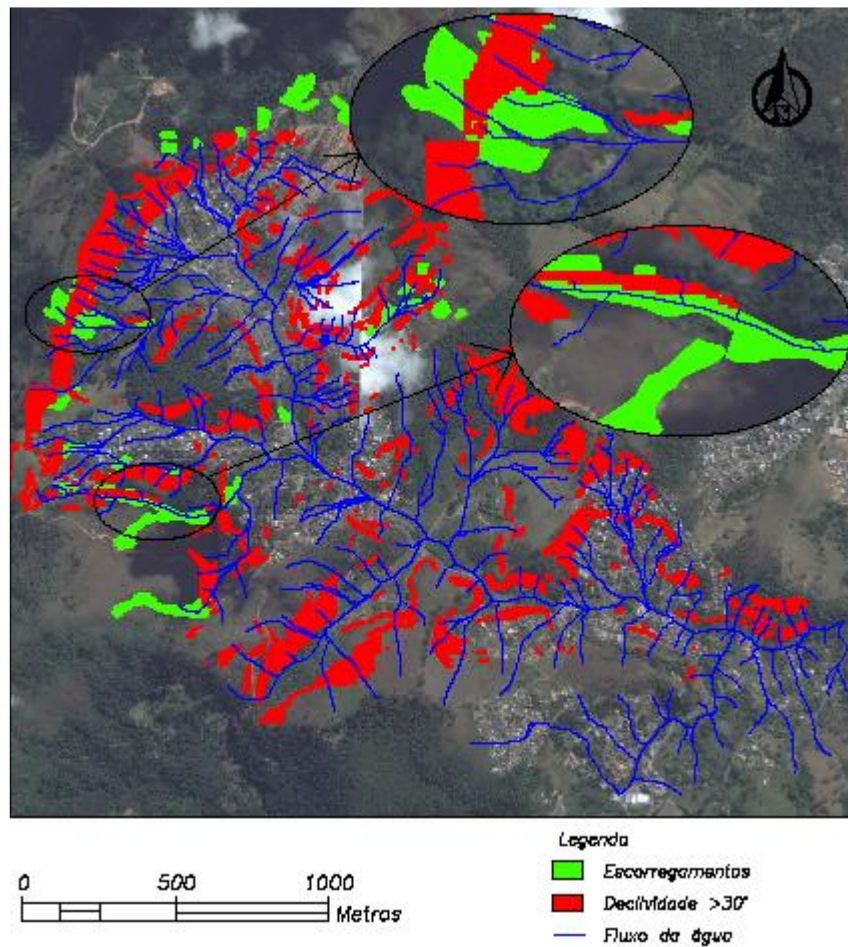
Figura 47 – Mapa dos pontos de convergência da drenagem



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando somente os escoamentos assinalados em verde, é possível observar que alguns deles não apresentam o fluxo d'água no local. Isto ocorre devido a falta do levantamento topográfico naquela área, portanto esses escoamentos não podem ser levados em consideração, nesta análise. Quanto aos demais, é possível separar os movimentos em dois grupos, um grupo onde o início da ruptura está localizada na parte superior da bacia, com grandes declividades, e outro em que os pontos de drenagem convergem para a ruptura. A figura 48 apresenta um exemplo de cada grupo apresentado.

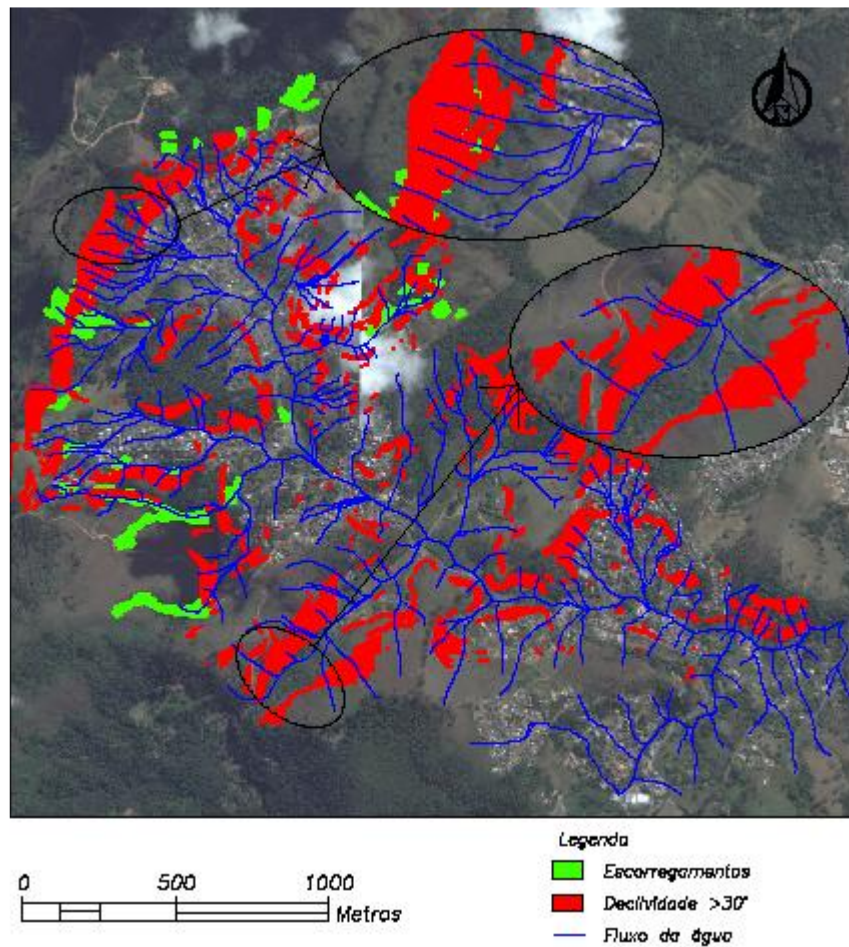
Figura 48 – Mapa dos pontos de convergência da drenagem com destaque aos escorregamentos



(fonte: elaborado pelo autor)

Na análise das áreas com declividade superior a 30°, em solo residual batólito, foi observado que a maior parte dos pontos encontram-se em uma ramificação do fluxo de água, onde, provavelmente, não ocorre a convergência do fluxo de água. Os demais pontos apresentam convergência da drenagem próximo a eles, ou localizados em trechos onde ocorre essa convergência porém, estes pontos são a minoria. O detalhe típico destes pontos pode ser observado na figura 49.

Figura 49 – Mapa dos pontos de convergência da drenagem com destaque as áreas com declividades superiores a 30°



(fonte: elaborado pelo autor)

Através das análises realizadas a partir das figuras 47, 48 e 49 é possível concluir que as áreas consideradas suscetíveis a escorregamentos, analisando somente a topografia e a geologia do local, não escorregaram em janeiro de 2011, possivelmente, devido ao menor grau de saturação do solo que nos demais pontos onde ocorreram as rupturas.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na bacia São Geraldo em Nova Friburgo encontra-se, principalmente, solo residual batólito da Serra dos Órgãos e a determinação dos parâmetros do solo foi realizada através de análises paramétricas, com a determinação da superfície de ruptura, de onde foram retirados os parâmetros de coesão e de poro-pressão. A partir dessas análises, foi possível concluir que, para a ocorrência da ruptura em janeiro de 2011, o solo deveria ter um parâmetro de Ru de cerca de 0,4, que representa a condição saturada.

Ressalta-se que não foram realizadas sondagens na região nem ensaios de laboratório. A análise de suscetibilidade foi feita com base nas informações existentes, como o levantamento topográfico e geológico da área, e através de informações obtidas em visita de campo.

Os trabalhos de campo confirmaram que a determinação dos parâmetros através de análises paramétricas com a determinação da poro-pressão resultou em uma faixa de possíveis valores de coesão, valores julgados dentre da faixa típica para os tipos de solos estudados. A obtenção dos parâmetros do solo através de ensaio de laboratório resulta em valores bem mais precisos que os obtidos através desta análise.

A elaboração do mapa de suscetibilidade, realizada em três etapas, e analisando somente a declividade da região e o tipo de solo, não apresentou bons resultados, pois a área em solo residual batólito, com declividade maiores que 30° , consideradas mais suscetíveis, de acordo com o inventário de escorregamentos, consistiu em uma área bem inferior a área total da bacia. Porém, esta análise não foi o suficiente para análise de suscetibilidade, pois, ao cruzar as áreas de escorregamentos ocorridos em janeiro de 2011, com esta área suscetível, foi observado que a área escorregada consiste em aproximadamente 5% da área considerada suscetível. Portanto, a análise de suscetibilidade, levando em consideração somente esses dois fatores, é pouco eficiente para geração de um mapa suscetibilidade.

As duas etapas finais da elaboração do mapa de suscetibilidade tiveram como objetivo refinar a área obtida com análise das inclinações do solo residual batólito, através do estudo da espessura da camada e dos pontos de convergência da drenagem.

A espessura da camada apresentou grande influência quanto a suscetibilidade a escorregamentos pois, como foi observado nas análises paramétricas dos pontos visitados em campo, quaisquer alterações quanto a espessura da camada acarretaram diferentes valores de fator de segurança. A análise da espessura da camada foi de grande valia para validação das medidas retiradas em campo, onde as espessuras dos movimentos foram superiores a 1 metro, assim como os valores obtidos através do método de talude infinito.

As espessuras das camadas serviram para eliminação das áreas obtidas no mapa de suscetibilidade quanto a declividade, pois, sem maiores informações sobre o solo local, não foi possível determinar quais áreas apresentaram espessuras inferiores a 1 metros, sem o trabalho de campo. Por outro lado, a análise da espessura pode ser uma das justificativas para que não tenha ocorrido a ruptura em todas as áreas consideradas suscetíveis.

A última etapa abordada nesse trabalho, para a análise de suscetibilidade, consistiu no estudo dos pontos de convergência da drenagem, para análise da convergência do fluxo d'água, nas áreas consideradas suscetíveis e nas áreas já escorregadas. A partir desse estudo, foi possível concluir que havia convergência do fluxo d'água para grande parte das áreas escorregadas, enquanto, nas outras áreas consideradas suscetíveis mas que não romperam, não foi observada esta convergência da drenagem. Uma abordagem racional que insira o dimensionamento das drenagens na determinação da suscetibilidade funcionará como um importante incremento na assertividade neste mapa de suscetibilidade.

A análise de suscetibilidade é extremamente importante para o gerenciamento de risco das regiões ocupadas, pois ela é uma ferramenta imprescindível para elaboração do mapa de risco dessas áreas. A análise de suscetibilidade através de análises paramétricas, sem a realização de ensaios, mostrou-se suficiente para refinar a área de suscetibilidade alta, porém, com uma melhor caracterização do solo, o mapa de suscetibilidade poderia fornecer um refinamento mais rico da área em questão.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS; ABGE, 1992. p. 721-733. v.2.
- AVELAR A. S.; NETTO A. L. C.; LACERDA W. A.; BECKER L. B.; MENDONÇA M. B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum, 2th, 2011, Rome. **Proceedings...** Rome, 2011. Não paginado. Disponível em <http://www.inct-reageo.ufrj.br/wp-content/uploads/2013/02/WLF2_519_Avelar.pdf>. Acesso em: 20 maio 2016.
- BANDEIRA, A. P. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe-PE.** 2003. 209 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação do Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2003.
- CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.** Brasília: Ministério das Cidades; São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007.
- COSTA, E. A. da. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes.** 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2005.
- EL-RAMLY, H. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice.** 2001. 391 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering) – Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 2001.
- FABRICIO, J. V. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções.** 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes.** 20. ed. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.
- GOOGLE EARTH PRO, versão: 7.1.5. 1557: software com informações geográficas. [S.I]: Google Inc.
- GRIFFITHS D. V.; HUANG J.; WOLFE G. F. de. Numerical and analytical observations on long and infinite slopes. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, n. 35, p, 569-585, 2011. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nag.909/full>>. Acesso em: 20 maio 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. (1. reimpr.) São Paulo: Blucher, 1983 (reimpr. 1993).

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O Manual do Deslizamento**: um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston, Virgínia: U.S. Geological Survey, 2008.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. de O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. de M. **Prevenção de Desastres Naturais**: conceitos básicos. 1. ed. Curitiba: Organic Trading, 2006.

MACHADO, K. M. **Retroanálise de um deslizamento de encosta em solo residual no município de Nova Friburgo – RJ**. 2013. 65 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PIERSON, L. A. **The Rockfall Hazard Rating System**. Salem, Oregon: Oregon Department of Transportation, 1991.

PINTO, C. DE S. **Curso básico de mecânica dos solos**: em 16 aulas. 3. ed. (4. reimpr.) São Paulo: Oficina de Textos, 2006 (reimpr. 2015).

TOMINAGA, L. K. Desastres naturais: por que ocorrem?. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015a, p. 11-24.

TOMINAGA, L. K. Escorregamentos. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015b, p. 25-38.

TOMINAGA, L. K. Análise e mapeamento de risco. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015c, p. 147-160.

VANDINE, D. F. **Debris flow control structures for forest engineering**. Victoria, British Columbia: Canada. Ministry of Forests Research Program, 1996.