

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAIELY MINOZZO

ESTUDO PROBABILÍSTICO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS  
GRAVITACIONAIS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO,  
NO MUNICÍPIO DE MORRETES (PR)

CURITIBA

2018

MAIELY MINOZZO

ESTUDO PROBABILÍSTICO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS  
GRAVITACIONAIS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO,  
NO MUNICÍPIO DE MORRETES (PR)

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Construção Civil, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

M666e Minozzo, Maiely

Estudo probabilístico da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na bacia hidrográfica do rio sagrado, no município de Morretes (PR) [Recurso eletrônico] / Maiely Minozzo – Curitiba, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.  
Orientador: Vitor Pereira Faro

1. Método de Monte Carlo. 2. Análise Probabilística. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faro, Vitor Pereira. III. Título.

CDD: 530.415

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

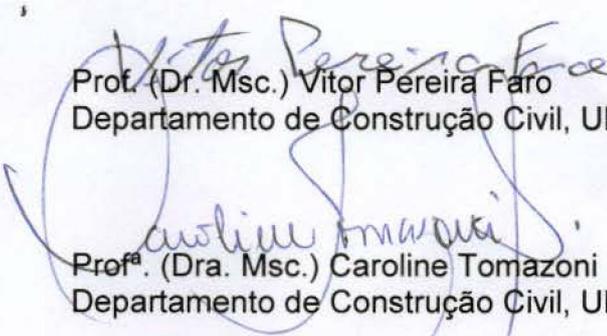
## TERMO DE APROVAÇÃO

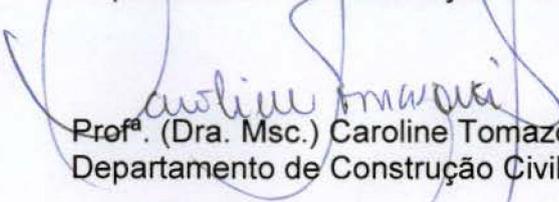
MAIELY MINOZZO

ESTUDO PROBABILÍSTICO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS  
GRAVITACIONAIS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO,  
NO MUNICÍPIO DE MORRETES (PR)

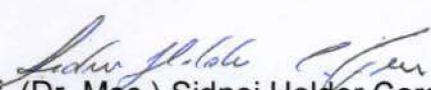
Dissertação apresentada como requisito parcial à para obtenção do grau de Mestre em Construção Civil, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

  
Prof. (Dr. Msc.) Vitor Pereira Faro  
Departamento de Construção Civil, UFPR

  
Prof<sup>a</sup>. (Dra. Msc.) Caroline Tomazoni  
Departamento de Construção Civil, UFPR

  
Prof<sup>a</sup>. (Dra. Msc.) Roberta Bomfim Boszczowski  
Departamento de Construção Civil, UFPR

  
Prof. (Dr. Msc.) Sidnei Helder Cardoso Teixeira  
Departamento de Construção Civil, UFPR

CURITIBA, 7 DE DEZEMBRO DE 2018

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grata a Deus pelo dom da vida e por ter despertado em mim a paixão pela vida acadêmica.

Ao meu orientador Vitor Pereira Faro meu respeito, admiração e profunda gratidão pela confiança, amizade, paciência e conhecimentos compartilhados.

A banca de defesa composta pelos professores Caroline Tomazoni, Roberta Bomfim Boszczowski e Sidnei Helder Cardoso Teixeira, pela contribuição resultante da avaliação deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná pela contribuição à minha formação acadêmica.

À Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil (CEPDEC), Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG), Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) por todo o material gentilmente fornecido.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho: David Bispo Ferreira, Edir Edemir Arioli, Jordana Furman, Marianne Bayerl Neves e Paolla Custodio da Silva.

Em especial à minha família, meu marido William Vargas Jorge e meus amigos Milena Arruda Silva, Gislaine Klenk, Eduardo Damin, Ana Beatriz Rodrigues Vespasiano e Pedro Bomfim Segobia, pelo companheirismo, cumplicidade e suporte emocional para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo probabilístico da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, localizada no município de Morretes, estado do Paraná. O local é caracterizado por grande parte do relevo com declividades superiores a 20%, solo raso e expressivo índice pluviométrico, decorrente de chuvas orográficas, que favorecem a ocorrência de escorregamentos translacionais. A ocupação antrópica das 641 pessoas que vivem nesta localidade está distribuída nos fundos de vales e encostas inferiores dos morros adjacentes à Serra do Mar. Para elaborar este trabalho, a distribuição de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa se deu com base no método de equilíbrio limite de talude infinito. Os parâmetros de entrada do modelo consistem nos parâmetros geotécnicos do solo, espessura da camada de solo, inclinação da vertente e sucção matricial líquida. A análise foi baseada no método probabilístico Monte Carlo, que consiste na simulação estatística de sequências numéricas aleatórias. Este método permite quantificar as incertezas devido à variabilidade dos parâmetros geotécnicos, possibilitando a determinação de uma probabilidade de ruptura e um índice de confiabilidade. A elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa para as condições de solo saturado e não saturado evidenciou a necessidade de obter-se um mapeamento detalhado das cicatrizes dos movimentos gravitacionais. A distribuição da suscetibilidade resultante da análise probabilística representa uma ferramenta de apoio à identificação de ocorrência de eventos críticos pela Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil para a Bacia do Rio Sagrado.

Palavras-chave: Análise Probabilística. Método de Monte Carlo. Distribuição de suscetibilidade.

## **ABSTRACT**

This dissertation aims to present a probabilistic study of the susceptibility of landslides at the Rio Sagrado watershed, located in the city of Morretes, in the southern Brazilian state of Paraná. The area is characterized by relief a large part of the relief with slopes higher than 20%, variable soil depths and the weather is marked by strong rainfall intensities due to orographic rains, favorable factor for the occurrence of translational landslides. The anthropic occupation of the 641 people that live in this locality is distributed along the lowlands and less inclined slopes of the hills adjacent to the Serra do Mar. In order to elaborate this work, the distribution of susceptibility to landslides took place based on the limit equilibrium method of infinite slope. The input parameters of the model consisted of geotechnical soil parameters, soil layer thickness, slope of the hillside and suction liquid matrix. The analysis was based on the Monte Carlo probabilistic method, which consists on the statistical simulation of random numbers sequences. This method allows to quantify the uncertainties due to the variability of the geotechnical parameters, enabling the determination of a probability of rupture and a reliability index. The elaboration of susceptibility maps to mass gravitational movements for the saturated and unsaturated soil conditions evidenced the need to obtain a detailed mapping of the scars of the landslides. The distribution of susceptibility resulting from the probabilistic analysis represents a tool to support the identification of occurrence of critical events by the Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil at the Rio Sagrado watershed.

**Key-words:** Probabilistic Analysis. Monte Carlo Method. Distribution of Susceptibility.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – QUEDA DE BLOCOS .....	23
FIGURA 2 - TOMBAMENTO .....	24
FIGURA 3 - ESCORREGAMENTO. A) ROTACIONAL; B) TRANSLACIONAL.....	25
FIGURA 4 - RASTEJO .....	26
FIGURA 5 – CORRIDA DE MASSA.....	27
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA DE UMA ENCOSTA COMPOSTA POR ALÚVIO, COLÚVIO E TÁLUS LIMITADO POR UMA ESCARPA ROCHOSA..	33
FIGURA 7 – EXEMPLO DE CURVA DE SUÇÃO DE UM SOLO .....	36
FIGURA 8 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA DE SOLOS NÃO SATURADOS.....	39
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO MATRICIAL x REPRESENTAÇÃO VETORIAL ...	41
FIGURA 10 – ESQUEMA RESUMO DA ORIGEM DAS INCERTEZAS EM GEOTECNIA .....	43
FIGURA 11 – ESQUEMA RESUMO DAS INCERTEZAS DOS PARÂMETROS.....	44
FIGURA 12 – EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	47
FIGURA 13 - DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO.....	51
FIGURA 14 - MAPA DE SUBSTRATO ROCHOSO E MATERIAL INCONSOLIDADO .....	55
FIGURA 15 - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO, VISTA DA RODOVIA BR-277 PISTA SENTIDO SUL .....	57
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA GERAL DAS ETAPAS DA PESQUISA.....	60
FIGURA 17 - PROCEDIMENTO DE COLETA DE AMOSTRA INDEFORMADA .....	62
FIGURA 18 – TEOR DE UMIDADE: A) PESAGEM DAS CÁPSULAS. B) PREENCHIMENTO DAS CÁPSULAS COM SOLO. C) PESAGEM DAS CÁPSULAS COM SOLO. D) SECAGEM EM ESTUFA. E) PESAGEM DO CONJUNTO CÁPSULA COM SOLO SECO.....	63
FIGURA 19 – PESO ESPECÍFICO DO SOLO: A) PESAGEM E B) MEDIÇÃO DO MOLDE METÁLICO. C) MOLDAGEM E D) PESAGEM DO CORPO DE PROVAS..	64
FIGURA 20 - DENSIDADE DOS GRÃOS: A) AQUECIMENTO DO CONJUNTO. B) RESFRIANDO EM TEMPERATURA AMBIENTE. C) PESAGEM DO CONJUNTO..	64
FIGURA 21 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: A) PENEIRAMENTO GROSSO. B) SEDIMENTAÇÃO.....	65

FIGURA 22 - LIMITES DE ATTERBERG. A) LIMITE DE PLASTICIDADE; B) LIMITE DE LIQUIDEZ.....	67
FIGURA 23 - PRENSA DE CISALHAMENTO DIRETO SOLOTEST .....	69
FIGURA 24 - MOLDAGEM DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	70
FIGURA 25 - MONTAGEM CÉLULA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE PICO.....	70
FIGURA 26 - MONTAGEM DA CÉLULA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO RESIDUAL.....	71
FIGURA 27 - MAPA SIMPLIFICADO DO MATERIAL INCONSOLIDADO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO .....	76
FIGURA 28 - VARIAÇÃO DA SUCÇÃO AO LONGO DO TEMPO – TENS-01 A TENS-06.....	77
FIGURA 29 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	82
FIGURA 30 - CURVA DE RETENÇÃO DO SOLO SEDIMENTAR.....	83
FIGURA 31 - CURVA DE RETENÇÃO DO SOLO RESIDUAL DE GRANITO .....	84
FIGURA 32 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA DE TÁLUS.....	85
FIGURA 33 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA DE COLÚVIO 1. ....	86
FIGURA 34 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA COLÚVIO 2. ....	86
FIGURA 35 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA RESIDUAL DE GRANITO. ....	87
FIGURA 36 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA TÁLUS .....	89
FIGURA 37 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA COLÚVIO 1 .....	90
FIGURA 38 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA COLÚVIO 2 .....	90
FIGURA 39 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA RESIDUAL DE GRANITO .....	90
FIGURA 40 – MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS PRESENTES NA BACIA DO RIO SAGRADO .....	92
FIGURA 41 – ESPACIALIZAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA DO RIO SAGRADO .....	94

FIGURA 42 – RASTER DE DECLIVIDADE. A) RASTER ORIGINAL COM VALOR DE PIXEL IGUAL A ZERO; B) RASTER CONSISTIDO COM A SUBSTITUIÇÃO DOS VALORES INFERIORES A 0,003 .....	95
FIGURA 43 - RASTERS DE ENTRADA NO MODELO - A) DECLIVIDADE; B) PROFUNDIDADE DO SOLO; C) PESO ESPECÍFICO SATURADO; D) COESÃO; E) ÂNGULO DE ATRITO; .....	100
FIGURA 44 – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO.....	101
FIGURA 45 – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A MGM OBTIDA A PARTIR DE RETROANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....	104
FIGURA 46 - RASTERS DE ENTRADA. A) DECLIVIDADE; B) PROFUNDIDADE DO SOLO; C) COESÃO; D) ÂNGULO DE ATRITO; E) SUÇÃO MATRICIAL; F) PESO ESPECÍFICO NATURAL.....	107
FIGURA 47 – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA PARA A CONDIÇÃO DE SOLO NÃO SATURADO .....	108
FIGURA 48 – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A MGM OBTIDA A PARTIR DE RETROANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....	111
FIGURA 49 – COMPARATIVO DAS CARTAS DE SUSCETIBILIDADE OBTIDAS	115

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PRINCIPAIS DESASTRES NATURAIS NO BRASIL ENTRE 2000 E 2007 .....	18
GRÁFICO 2 - DISTRIBUIÇÃO DE MORTES DEVIDO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NO DECORRER DOS ANOS ENTRE 1988 E ABRIL DE 2015. ....	19
GRÁFICO 3 - INCREMENTO DE GASTOS DO GOVERNO FEDERAL COM DESASTRES NATURAIS DE 2004 A 2010. ....	20
GRÁFICO 4 - VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES SOLOS .....	96
GRÁFICO 5 - VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO PARA DIFERENTES SOLOS .....	97
GRÁFICO 6 - VARIAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO SATURADO PARA DIFERENTES SOLOS .....	98
GRÁFICO 7 - VARIAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO NATURAL PARA DIFERENTES SOLOS .....	99
GRÁFICO 8 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO .....	100
GRÁFICO 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO RESULTANTE DA RETROANALISE .....	105
GRÁFICO 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO NÃO SATURADO.....	109
GRÁFICO 11 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO NÃO SATURADO RESULTANTE DA RETROANALISE ...	112

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TIPO DE ROCHA E MATERIAL RESULTANTE DO INTEMPERISMO .....	32
QUADRO 2 - EQUAÇÕES DE AJUSTE PARA A CURVA DE RETENÇÃO .....	37
QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DO SUBSTRATO ROCHOSO E MATERIAL INCONSOLIDADO .....	56
QUADRO 4 - CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO .....	73
QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A PARTIR DO NÍVEL DE CONFIABILIDADE .....	77
QUADRO 6 – INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA – 29/08/2017 .....	93

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COEFICIENTES DE CONFIANÇA PARA A DISTRIBUIÇÃO NORMAL .....	47
TABELA 2 – RESUMO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DA BACIA DO RIO SAGRADO .....	58
TABELA 3 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	61
TABELA 4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	80
TABELA 5 - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO COM AS FRAÇÕES DOS SOLOS ENQUADRADAS SEGUNDO A ESCALA DA ABNT.....	81
TABELA 6 - RESUMO DAS TENSÕES MÁXIMAS DE PICO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....	88
TABELA 7 - RESUMO DAS TENSÕES RESIDUAIS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....	88
TABELA 8 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO .....	91
TABELA 9 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO .....	99
TABELA 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE EM RELAÇÃO ÀS CLASSES DE DECLIVIDADE .....	102
TABELA 11 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DA RETROANALISE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO .....	105
TABELA 12 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O SOLO NÃO SATURADO .....	106
TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE EM RELAÇÃO ÀS CLASSES DE DECLIVIDADE .....	109
TABELA 14 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DA RETROANALISE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO .....	112

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	21
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
2.1	MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA .....	22
2.1.1	Classificação dos movimentos gravitacionais de massa .....	22
2.1.2	Fatores que induzem movimentos gravitacionais de massa .....	27
2.1.3	Estabilidade de taludes – Equilíbrio limite de talude infinito .....	30
2.2	SOLOS RESIDUAIS.....	31
2.3	SOLOS COLUVIONARES.....	32
2.4	PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO.....	33
2.4.1	Sucção.....	34
2.5	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO .....	38
2.6	SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	40
2.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS NA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS .....	41
2.7.1	Conceitos básicos de estatística.....	45
2.7.2	Método de Monte Carlo .....	48
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>50</b>
3.1	DEFINIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO .....	50
3.2	CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA.....	52
3.2.1	Serra do Mar.....	52
3.2.2	Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.....	53
3.3	DADOS PRETÉRITOS .....	58
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>60</b>
4.1	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO.....	61
4.1.1	Caracterização dos solos .....	62
4.1.2	Sucção pelo método do papel filtro.....	67
4.1.3	Parâmetros de resistência.....	69
4.1.4	Espessura da camada de solo e modelo de declividade .....	72
4.2	ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE.....	73
4.2.1	Validação da distribuição probabilística de suscetibilidade .....	78

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>80</b>
5.1	ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	80
5.1.1	Caracterização .....	80
5.1.2	Sucção pelo método do papel filtro.....	82
5.1.3	Parâmetros de resistência .....	85
5.2	LEVANTAMENTO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA .....	91
5.3	ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE.....	95
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>116</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>119</b>
	<b>ANEXO A – TABELA RESUMO DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS.....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa (MGMs) são um dos principais processos de evolução e desenvolvimento de encostas. No Brasil, estes processos estão presentes em locais montanhosos e serranos, tratando-se de processos comuns e recorrentes nas regiões Sul e Sudeste, principalmente na região da Serra do Mar e nas encostas adjacentes. Apesar de ser um processo natural, devido à intervenções antrópicas e ao avanço do tecido urbano em áreas suscetíveis a escorregamentos, os MGMs representaram 11% dos desastres naturais no Brasil entre os anos de 2000 e 2007, atingindo milhares de pessoas que residem nestas áreas (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2007).

Para realizar uma análise de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa adequada deve-se observar a topografia, geologia, geomorfologia, processos de instabilização da região de estudo e as propriedades e resistências dos solos. Contudo, devido ao processo de formação natural, as propriedades do solo são altamente dependentes dos processos geológicos atuantes em sua concepção, o que acarreta em incertezas sobre o resultado obtido em análises envolvendo este material. Isto se deve principalmente devido ao modelo utilizado ou aos parâmetros de entrada, visto que estes apresentam uma variabilidade em decorrência da heterogeneidade do material estudado. As incertezas da análise podem estar relacionadas com a heterogeneidade e anisotropia do solo, bem como a erros de medida, devidos ao observador ou aos instrumentos utilizados para definição dos parâmetros de entrada e erros de amostragem.

Assim, problemas geotécnicos, devido ao seu alto grau de incerteza, vêm sendo tratados através de análises probabilísticas. No caso da estabilidade de taludes, isto acontece, principalmente, devido à variabilidade dos parâmetros geotécnicos e eventos pluviométricos. Combinado a isso, tem-se o uso de ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que possibilitam o georreferenciamento dos dados levantados, e auxiliam nos processos de tomada de decisões ambientais e territoriais. Assim, o uso de Sistema de Informações Geográficas configura uma poderosa ferramenta para a investigação quantitativa e qualitativa de problemas multicritério.

A identificação e mapeamento das áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, com o grau de risco e os processos de instabilização do

local, consiste em uma das formas de gerenciamento de ameaças em diversos países. Desta forma este trabalho visa responder a seguinte problemática: qual é a suscetibilidade a movimento gravitacional de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado em Morretes (PR), através do Método Probabilístico de Monte Carlo?

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral determinar probabilisticamente a distribuição de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, no município de Morretes (PR).

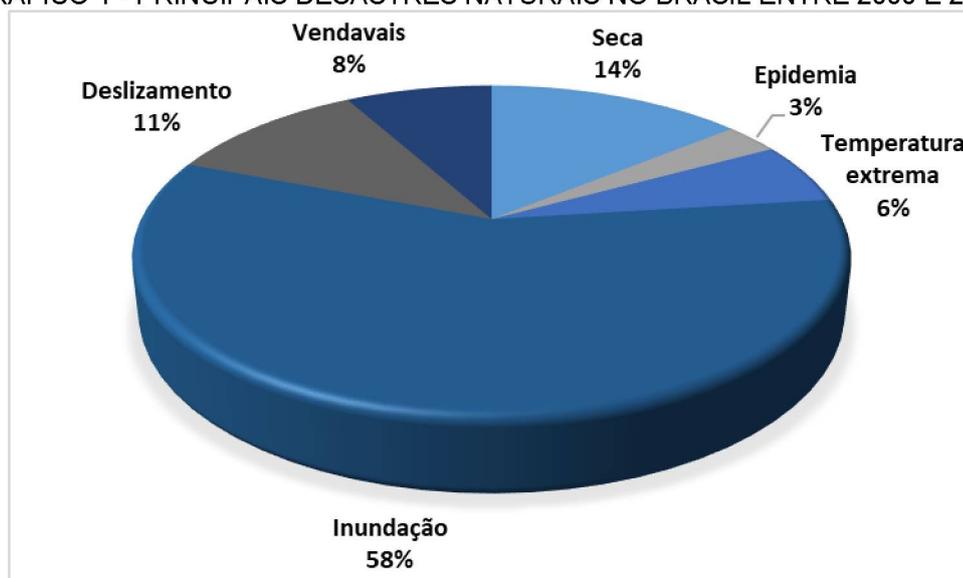
Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Caracterizar o comportamento geotécnico dos solos da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.
- b) Elaborar cenários de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.
- c) Fornecer subsídios técnico-científicos à geração de Sistemas de Alerta e Alarme - SAAs no Estado do Paraná, para uso da Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil – CEPDEC.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os movimentos gravitacionais de massa consistem em um processo natural que fazem parte da evolução geomorfológica de regiões serranas. Contudo, o crescimento da ocupação urbana desordenada em áreas de encostas tem ocasionado um aumento progressivo do número de acidentes associados a esses processos. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2007), deslizamentos estão entre os principais tipos de desastres naturais do Brasil (GRÁFICO 1).

GRÁFICO 1 - PRINCIPAIS DESASTRES NATURAIS NO BRASIL ENTRE 2000 E 2007.

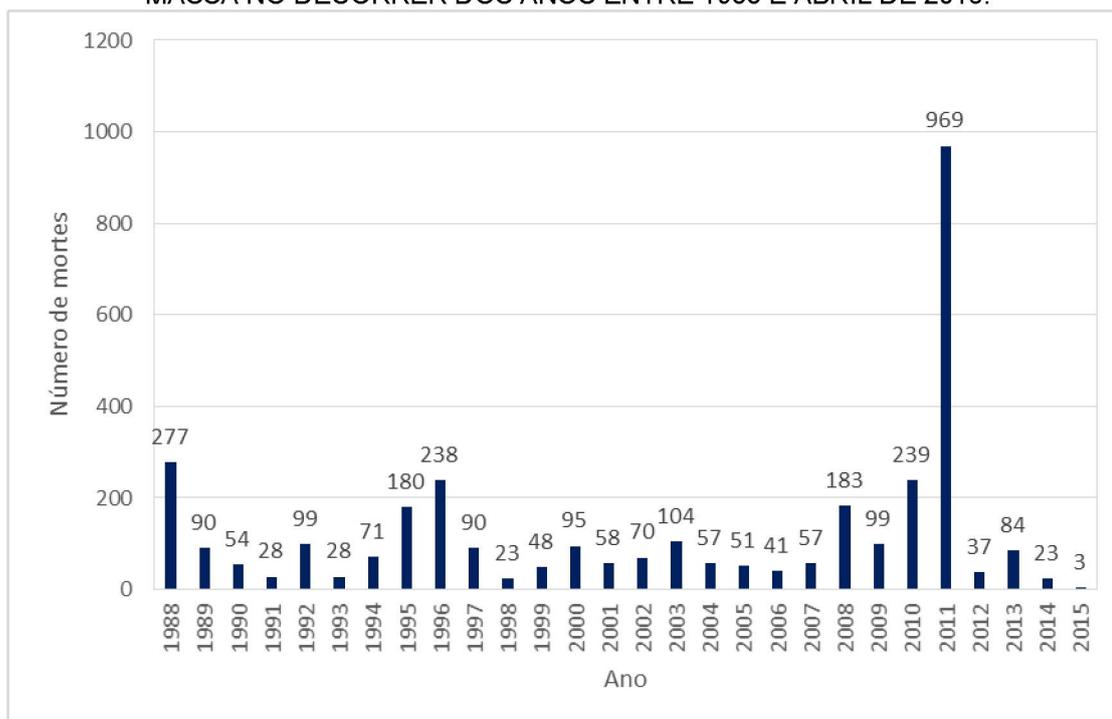


FONTE: Ministério do Meio Ambiente (2007).

A região da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado em Morretes conta com mais de 500 habitantes fixos, além de milhares de frequentadores temporários e ocasionais. Esta região é composta por grandes depósitos de tálus e colúvio. O colúvio desta região é altamente instável e propenso a deslizamentos planares e rotacionais, podendo fornecer grandes volumes de sedimentos e formar fluxos de detritos. Apesar de ser mais estável que o colúvio, o tálus possui alta probabilidade de tombamento de blocos, bem como fornecimento de material para fluxo de massas. A combinação desses materiais instáveis com altas declividades e a remoção da cobertura vegetal resulta em condições propícias para movimentos gravitacionais de massa com alto poder destrutivo (MINEROPAR, 2014).

Segundo a Defesa Civil Paranaense (2018), os movimentos gravitacionais de massa são recorrentes no estado, tendo afetado 259.264 pessoas no período de 2010 a 2018. O GRÁFICO 2 apresenta os dados de óbitos ocasionados por deslizamentos registrados no Banco de Mortes de 1988 a abril de 2015. Destaca-se neste gráfico o ano de 2011 quando ocorreu o desastre na Região Serrana do Rio de Janeiro, afetando principalmente os municípios de Nova Friburgo, 429 mortes, Teresópolis, 382 mortes, e Petrópolis, 74 mortes.

GRÁFICO 2 - DISTRIBUIÇÃO DE MORTES DEVIDO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NO DECORRER DOS ANOS ENTRE 1988 E ABRIL DE 2015.

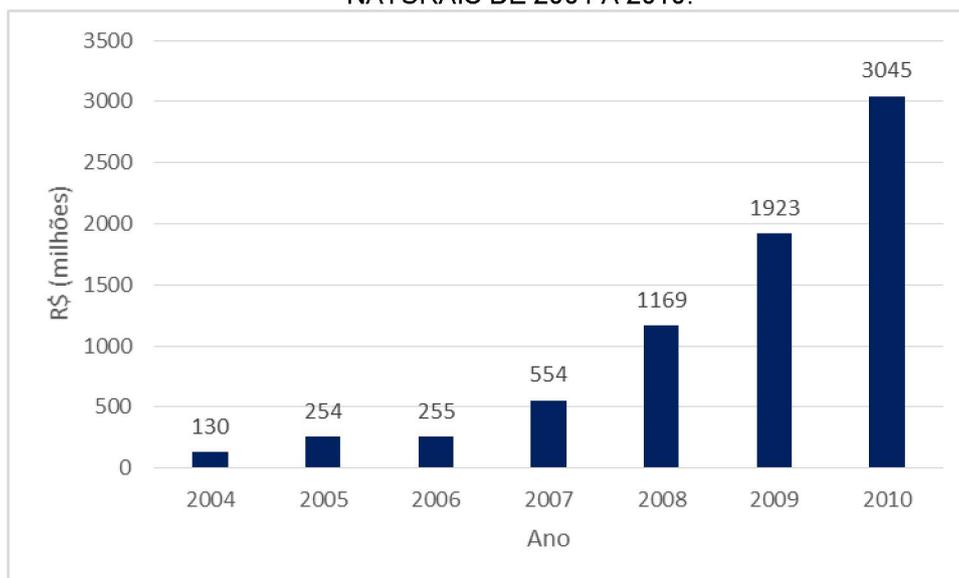


FONTE: Macedo e Martins (2015).

A ocorrência de desastres naturais ocasiona, além dos danos ambientais e sociais, gastos ao governo para realizar a recuperação destas áreas. Segundo um estudo realizado pelo Banco Mundial e o Centro de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da UFSC (ONU BR, 2017), o Brasil perdeu R\$ 182,8 bilhões com desastres naturais entre os anos de 1995 e 2014. Desse montante, cerca de R\$ 137,3 bilhões são devidos a impactos nos serviços públicos e privados, na agricultura, na pecuária e na indústria. O restante (R\$ 45,4 bilhões) são referentes a danos na infraestrutura, nas habitações e nas instalações de saúde, ensino e comunitárias, entre outras. O GRÁFICO 3 apresenta o incremento de gastos do governo federal com desastres naturais de 2004 a 2010.

Em março de 2011 ocorreram mais de 2.500 acidentes geológicos (MGMs, erosão acelerada, assoreamento de drenagens e inundações), no litoral paranaense (MINEROPAR, 2014). De acordo com a Geoplanejamento (2011), na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado os movimentos gravitacionais de massa afetaram oito residências, sendo que duas dessas apresentaram destruição total, e quatro pontes (três com destruição total).

GRÁFICO 3 - INCREMENTO DE GASTOS DO GOVERNO FEDERAL COM DESASTRES NATURAIS DE 2004 A 2010.



FONTE: CEMADEM (2012).

Devido aos desastres recorrentes no país, no ano de 2012 instaurou-se a Lei Federal nº 12.608 (BRASIL, 2012), que dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil, além de autorizar a criação do sistema de informações e monitoramento de desastres. Com esta lei tornou-se dever da União, dos estados e dos municípios a adoção de medidas necessárias para redução dos riscos causados por desastres naturais, entre outras atribuições.

De acordo com Schuster e Kockelman (1996), o planejamento do uso do solo é uma das principais maneiras de reduzir as perdas ocasionadas por movimentos de massa gravitacionais. Neste processo mapeia-se as áreas sujeitas a MGMs e reservadas para espaços abertos ou com outra atividade de menor intensidade. Os autores citam que a carta de suscetibilidade a MGMs é utilizada desde 1975, no distrito de San Mateo - Califórnia, para controlar a densidade de ocupação.

Entender e caracterizar o comportamento das variáveis que influenciam na ocorrência de desastres, bem como realizar o mapeamento das áreas suscetíveis a MGMs são atividades essenciais para o desenvolvimento de um sistema de alerta eficaz. Assim, pode-se minimizar os impactos decorrentes do desastre, tanto de caráter social e ambiental quanto economicamente.

Deste modo, esta pesquisa é realizada em parceria com o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do

Paraná (ITCG), Defesa Civil do Paraná, Águas Paraná e Paranacidade, como fornecedores de dados do meio físico e equipe técnica para coleta de amostras de solo, sendo os dois primeiros financiadores das visitas à área de estudo. A Universidade Federal do Paraná (UFPR) contribuiu para esta pesquisa cedendo equipamentos e laboratórios para a análise das amostras.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos:

Capítulo 1 - Introdução: breve introdução sobre as incertezas dos parâmetros do solo, movimentos gravitacionais de massa no Brasil e problemática da pesquisa. Este capítulo apresenta também a definição dos objetivos da pesquisa, justificativa e parcerias.

Capítulo 2 - Referencial teórico: apresenta a revisão bibliográfica com relação aos solos residuais e coluvionares; definição, classificação e fatores que induzem à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa; parâmetros hidráulicos e de resistência dos solos, bem como análises estatísticas na estabilidade de encostas e avaliação de risco.

Capítulo 3 - Área de estudo: apresentação das características da área de estudo, como localização, geomorfologia, aspectos climáticos e dados pré-existentes de ensaios de campo e laboratório.

Capítulo 4 - Materiais e métodos: expõe os materiais e os métodos utilizados na realização dos ensaios de campo e laboratório, além das análises probabilísticas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa.

Capítulo 5 – Resultados e discussões: apresenta os resultados dos ensaios de caracterização e resistência das amostras de solo, bem como as discussões a respeito das distribuições de probabilidade obtidas.

Capítulo 6 – Considerações finais: descreve as conclusões acerca do estudo e apresenta as recomendações para trabalhos futuros.

Ao final deste documento são apresentadas as referências bibliográficas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas definições pertinentes à base teórica deste trabalho, composto por tópicos que abordam temas como solos residuais e coluvionares, movimentos gravitacionais de massa, parâmetros hidráulicos e de resistência do solo, análises estatísticas na estabilidade de encostas, entre outros.

### 2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa consistem no deslocamento de sedimentos, rocha e/ou solo ao longo de uma encosta natural, por meio da força da gravidade (SILVEIRA, 2008). Os movimentos gravitacionais de massa são um dos principais processos de evolução e desenvolvimento de encostas, visto que estão ligados às condições climáticas úmidas, alto intemperismo químico e à inclinação e altura das vertentes (BIGARELLA *et. al*, 1978).

Os movimentos gravitacionais de massa ocorrem quando a resistência ao cisalhamento do solo é reduzida até o ponto em que os materiais não suportam mais as tensões geradas pela força da gravidade. Este fato ocorre principalmente por efeito da saturação do solo, por infiltração de água e da variação do lençol freático (MINEROPAR, 2014).

De acordo com Zuquette e Pejon (2004), tratam-se de processos comuns e recorrentes nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, principalmente na região da Serra do Mar e nas encostas adjacentes. Na localidade de Floresta (Morretes - PR) no desastre de 2011, os deslizamentos de encostas geraram material para um fluxo de detrito que destruiu edificações, arrasou parte da Mata Atlântica, alterou o curso de rios e cobriu uma grande área cultivada com sedimentos arenosos (MINEROPAR, 2014).

#### 2.1.1 Classificação dos movimentos gravitacionais de massa

Não há um consenso com relação à classificação dos movimentos gravitacionais de massa. Contudo, dos sistemas de classificação mais utilizados é o de Varnes (1978), nesta classificação os movimentos gravitacionais de massa podem ser separados em queda, tombamento, escorregamentos, rastejos e fluxos. Os MGMs podem ocorrer de forma isolada ou em conjunto, dependendo das características do local.

A queda consiste na separação de um fragmento de solo ou rocha, caindo livremente pela ação da gravidade (FIGURA 1), estes movimentos ocorrem rapidamente e podem ser seguidos de movimentos menores, levando à separação progressiva da massa de sua origem (VARNES, 1978). Trata-se de um fenômeno localizado, que ocorre geralmente em escarpas verticais e subverticais, onde a separação do material acontece mais comumente em planos de fraqueza estrutural, sendo a pressão d'água e a dilatação de materiais os principais responsáveis por este movimento (MINEROPAR, 2014).

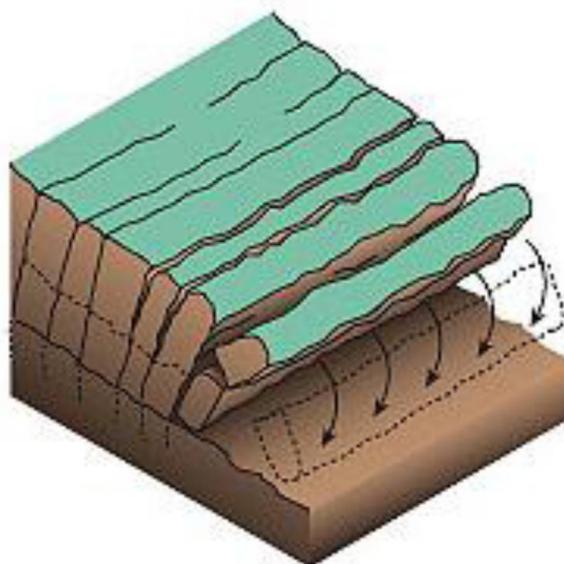
FIGURA 1 – QUEDA DE BLOCOS



FONTE: Projeto Apoema (2018).

O tombamento (FIGURA 2) compreende a rotação de blocos de rocha em torno de um eixo da base, por efeito da gravidade e desequilíbrio na base de sustentação, podendo ou não culminar em queda ou deslizamento, dependendo da geometria da massa defeituosa e da orientação e extensão das descontinuidades (VARNES, 1978). Os tombamentos se diferem das quedas pois a ruptura dos blocos ocorre no pé da escarpa, onde não existe face livre abaixo do bloco deslocado (MINEROPAR, 2014).

FIGURA 2 - TOMBAMENTO

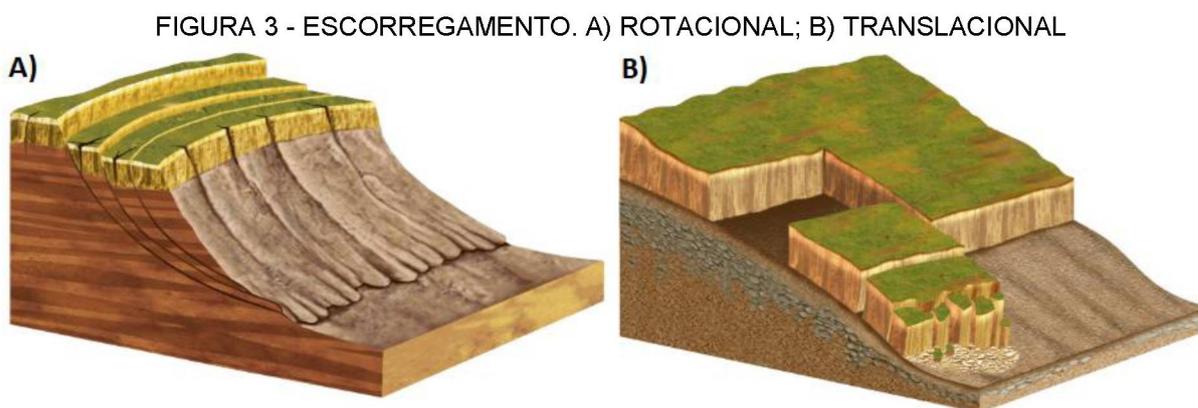


FONTE: Infraestrutura urbana (2011).

Os escorregamentos consistem no movimento rápido de solo ou rocha, de duração relativamente curta, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para o lado ao longo de uma superfície de deslizamento. Estes movimentos podem ser subdivididos em decorrência da forma de seu plano de ruptura (rotacional ou translacional), sendo predominantemente rotacional em solos coesivos e translacional em maciços rochosos estratificados (DNIT, 2010). Os escorregamentos rotacionais (FIGURA 3 - A) apresentam uma superfície de ruptura curva e estão relacionados a ambientes com presença de solos profundos que permitem a maior infiltração e percolação da água.

Os escorregamentos translacionais (FIGURA 3 - B) possuem superfície planar relacionada à presença de estruturas, depósitos de encostas, contatos entre solo e rocha e entre horizontes do solo. Este tipo de deslizamento pode progredir indefinidamente se a superfície estiver suficientemente inclinada e enquanto a resistência ao cisalhamento ao longo desta superfície permanecer menor que a força motriz (VARNES, 1978). Estes movimentos apresentam uma zona de origem, situada imediatamente abaixo da escarpa principal, uma zona de trânsito e uma zona de deposição dos materiais deslocados (MINEROPAR, 2014). Lopes (2006); Fernandes e Amaral (1996) *apud* Kozciak (2005) citam que os movimentos translacionais possuem uma superfície de ruptura que varia entre 0,5 e 5,0 metros de profundidade. Segundo Lopes (2013), os MGMs translacionais ocorrem quando uma determinada massa se desloca sobre uma superfície inclinada que caracteriza um plano de ruptura,

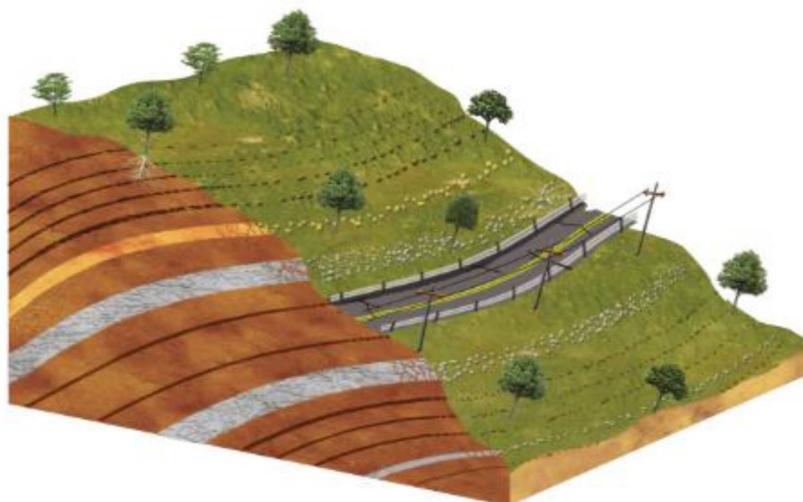
sendo que este plano pode chegar a uma profundidade de até cinco metros. A FIGURA 3 ilustra os deslizamentos rotacional e translacional.



FONTE: Projeto Apoema (2018).

O rastejo (FIGURA 4) é o deslocamento das camadas de solo que ocorre de maneira lenta e contínua, alcançando vários horizontes do solo, este movimento é mais rápido na superfície, e diminui, gradualmente, com a profundidade (GUIDICINI e NIEBLE, 1984). Por serem movimentos lentos, são facilmente observados ao longo do tempo, pela inclinação de vegetação e postes (DNIT, 2010). De acordo com Mineropar (2014) esta movimentação ocorre devido às tensões tangenciais fortes o suficiente para causar deformação permanente, porém insuficiente para conduzir à ruptura brusca. Segundo Gonçalves (2014) o movimento de rastejo é provocado pela ação da gravidade e possui várias causas, sendo as variações climáticas e a variação térmica as principais. Este tipo de movimento de massa se diferencia dos escorregamentos pois seu mecanismo de deformação se assemelha ao de um líquido muito viscoso, contudo, ao longo de sua evolução, estes movimentos podem facilitar movimentos mais rápidos, caracterizando-se como o escorregamento (GONÇALVES, 2014).

FIGURA 4 - RASTEJO

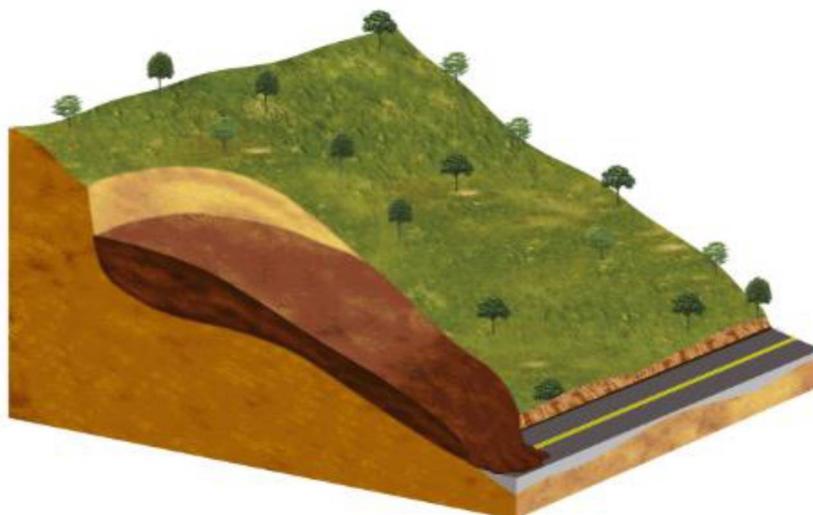


FONTE: Projeto Apoema (2018).

De acordo com Mineropar (2014), os fluxos podem ser subdivididos em fluxos de detritos e fluxos de lama. O primeiro trata-se de fluxos saturados por água em mistura homogênea com detritos variados, onde a porcentagem de materiais grossos é superior a 50%. A velocidade do fluxo de detritos depende da quantidade de água presente, da porcentagem de material sólido e da declividade do terreno, podendo variar entre 1 m/ano a mais de 100 km/h. O fluxo de detritos tem alto poder destrutivo, podendo se deslocar por grandes distâncias.

O fluxo de lama se difere do fluxo de detritos pela porcentagem de materiais grossos, que é significativamente inferior, sendo que a porcentagem de material fino nesses fluxos é superior a 50%. Sua velocidade pode ser superior a 1 km/h, podendo atingir velocidades de 30 m/s ou mais de 100 km/h, em apenas alguns segundos. Como os fluxos de lama podem atingir velocidades elevadas e percorrer longas distâncias, são potencialmente muito perigosos (MINEROPAR, 2014). O fluxo de lama juntamente com o fluxo de detritos é denominado corrida de massa, como ilustra a FIGURA 5.

FIGURA 5 – CORRIDA DE MASSA



FONTE: Projeto Apoema (2018).

### 2.1.2 Fatores que induzem movimentos gravitacionais de massa

Segundo Guidicini e Nieble (1984) os agentes de instabilização de encostas podem ser subdivididos em:

- a) Predisponentes: unidades geológicas, topografia, características geotécnicas dos solos, clima, hidrologia, gravidade, radiação solar e tipo de cobertura vegetal;
- b) Efetivos preparatórios: pluviosidade, variações de temperatura, dissolução química, congelamento e degelo, ação de fontes e mananciais, erosão pela água e pelo vento, oscilação do nível de lagos, das marés e do lençol freático e ação antrópica;
- c) Efetivos imediatos: chuvas intensas, fusão do gelo e da neve, erosão, terremotos, ondas, vento, ação antrópica acelerada.

Dentre os diversos agentes e causas dos movimentos de massa, destaca-se a correlação entre pluviosidade e escorregamentos. É de conhecimento generalizado a vinculação dos escorregamentos a estação de chuvas e, dentro dela, à ocorrência de chuvas intensas.

Dourado, Arraes e Silva (2012) analisaram o desastre ocorrido no Rio de Janeiro entre os dias 11 e 12 de Janeiro de 2011, que atingiu sete cidades da região serrana e resultou na morte de 947 pessoas. Os movimentos gravitacionais de massa foram ocasionados por condições climáticas extremas de precipitação acumulada em

24 horas de 241,8 mm, com pico de 61,8 mm em uma hora, o que ajudou a compor a precipitação acumulada entre os dias 1º e 12 de Janeiro de 573,6 mm.

Parizzi *et al.* (2010) estabeleceram uma correlação entre taxas de precipitação e escorregamentos na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. As ocorrências de escorregamentos registradas nos períodos de 2006 a 2008 foram comparadas aos registros de pluviosidade e pode-se concluir que as numerosas ocorrências de escorregamento estavam associadas, principalmente, a eventos de chuva excepcional. Assim, verificou-se que os parâmetros hidráulicos do solo são de extrema importância para a determinação da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa de uma região.

A movimentação do terreno ocorre quando a resistência ao cisalhamento do solo é reduzida ao ponto em que os materiais não suportam mais as tensões geradas pela força da gravidade. Deste modo, Mineropar (2014) cita em seu trabalho os principais fatores que influenciam na ocorrência de MGMs:

- a) Relevo: vertentes côncavas favorecem a instabilidade pois concentram os fluxos de água superficial e subterrânea. Os vales em V geralmente apresentam elevado gradiente hidráulico que facilita o rápido escoamento da água precipitada. As vertentes convexas dispersam o fluxo de água superficial e subterrânea.
- b) Solo: mantos espessos de material inconsolidado, que ocorrem mais comumente em vertentes côncavas, acumulam maiores volumes de materiais e desenvolvem tensões cisalhantes maiores por efeito da força da gravidade. Contudo, os solos rasos podem se saturar rapidamente e entrar em colapso por liquefação ou solifluxão.
- c) Drenagem: os obstáculos ao escoamento acumulam água precipitada e favorecem a infiltração, aumentando a suscetibilidade local a movimentos gravitacionais de massa.
- d) Vegetação: as camadas superficiais de solo são mais maduras e estáveis, porém as mais profundas são imaturas, com menor coesão e baixa resistência ao cisalhamento. A alteração ou remoção da cobertura vegetal facilita a infiltração da água e a erosão das camadas superficiais de solo, expondo níveis mais profundos e frágeis do material inconsolidado. As espécies pivotantes contribuem na estabilidade do terreno, pelo menos até 45°, enquanto espécies com

raízes superficiais prejudicam a estabilidade, tanto pela infiltração quanto pelo acréscimo de peso.

- e) Umidade: o aumento da umidade do solo reduz a coesão e a resistência ao cisalhamento do material inconsolidado. Segundo Gao (1993 *apud* LISTO, 2015), encostas cujo material de alteração está constantemente exposto ao ciclo de umedecimento e secagem podem ser mais suscetíveis à ruptura, em decorrência do aumento das fissuras e da porosidade. Assim, a orientação de vertentes (posição das faces do terreno com relação à distribuição da radiação solar) influencia no teor de umidade sobre o terreno, interferindo também nos processos biofísicos, tais como tipologia de cobertura vegetal, espessura do solo, entre outros (COLÂNGELO, 1995 *apud* LISTO, 2015).
- f) Declividade: declividades superiores a 25° favorecem a atuação da força da gravidade e o desenvolvimento de tensões cisalhantes na cobertura do material inconsolidado. Sendo que a maioria dos movimentos gravitacionais de massa ocorrem em declividades de 25° a 45°. Segundo Fernandes *et al.* (1994 *apud* LISTO, 2015), o ângulo da encosta influencia na velocidade de deslocamento do material, assim como na capacidade de transporte.
- g) Amplitude: a amplitude do relevo combinada com a declividade, medida vertical da base ao topo das elevações, contribui para o aumento do comprimento da encosta, acúmulo de energia e água ao longo do transporte dos materiais instabilizados.
- h) Intervenção antrópica: potencializa a instabilidade quando impõe alterações na geometria do terreno, aumento da umidade, remoção da cobertura vegetal, entre outras.

Além disso, Bigarella *et al.* (1994) afirmam que as propriedades dos solos superficiais e a composição litológica subjacente influenciam nos processos de movimentos gravitacionais de massa, seja como fator desencadeante ou como material.

### 2.1.3 Estabilidade de taludes – Equilíbrio limite de talude infinito

Talude trata-se de um termo genérico que compreende qualquer superfície inclinada que limita um maciço, podendo ser natural ou artificial. Conceitualmente, qualquer talude de grande extensão e com mesmo perfil de solo, pode ser considerado um talude de extensão ilimitada (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Assim, segundo Fiori e Carmignani (2009), o talude consiste em uma massa de solo submetida a forças devido ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. Esse sistema de forças atua em equilíbrio, uma vez que as duas primeiras se somam e tendem a movimentar o maciço para baixo, enquanto a última resiste a esta movimentação.

De tal modo, com o intuito de comparar a estabilidade do talude em diferentes cenários de equilíbrio-limite, define-se o fator de segurança como a razão entre as forças resistentes ao escorregamento e as forças solicitantes favoráveis ao movimento. A Equação 1 apresenta a expressão empregada por Fiori e Carmignani (2009) para o cálculo do fator de segurança de um talude:

$$FS = \frac{C_s + (u_a - u_w) \tan \phi^b + \left[ (\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_w) h \cos i \right] \tan \phi}{(h \gamma_{nat}) \sin i} \quad (1)$$

Onde:

$FS$  – fator de segurança;

$C_s$  – intercepto coesivo do solo (kPa);

$\phi$  – ângulo de atrito interno do solo (graus);

$\gamma_{nat}$  – peso específico do solo natural (kN/m<sup>3</sup>);

$\gamma_w$  – peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);

$h_w$  – altura da zona de solo saturada, perpendicular à vertente (m);

$h$  – espessura do solo, perpendicular à vertente (m);

$i$  – inclinação da vertente (graus);

$(u_a - u_w)$  – sucção matricial líquida;

$\phi^b$  – parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a um aumento na sucção.

## 2.2 SOLOS RESIDUAIS

De acordo com Chiossi (1979), solo é o material resultante da decomposição e desintegração da rocha por agentes intempéricos. Este material pode ser dividido em dois grandes grupos com base em sua origem: solo residual, quando o material decomposto permanece no local em que se deu a transformação e; solo transportado ou sedimentar, quando o solo é transportado por um agente para uma localidade diferente a da transformação.

A intensa atividade do intemperismo químico nas regiões de climas quentes e úmidos suscita na decomposição das rochas com a formação de solos residuais. Esta decomposição não ocorre de maneira contínua, homogênea e total na faixa de solo, pois podem existir minerais nas rochas mais resistentes à decomposição, fazendo com que essas áreas permaneçam inalteradas no solo (DNIT, 2010). Lambe e Whitman (1969) ratificaram o fato de solos residuais serem mais abundantes em climas úmidos e quentes, onde a vegetação mantém os produtos do intemperismo químico *in situ*, não permitindo que estes sejam transportados.

Pode-se dividir esse grupo em função do grau de alteração, conforme cita o DNIT (2010):

- a) Solo residual maduro: solos consideravelmente homogêneos, que perderam a estrutura original da rocha mãe;
- b) Saprólitos: solos que mantêm a estrutura original da rocha mãe, porém perderam a consistência, compreendendo um estágio intermediário entre solo e rocha;
- c) Rocha alterada: material que lembra a rocha mãe no seu aspecto, mas apresenta alterações progressivas nos seus horizontes, conservando parte da estrutura da rocha e dos seus minerais, com transições para rocha-sã, entretanto sua resistência é inferior à da rocha sã.

Chiossi (1979) cita que todos os tipos de rocha formam solo residual. O QUADRO 1 resume alguns tipos de rochas e o material resultante do intemperismo das mesmas.

QUADRO 1 - TIPO DE ROCHA E MATERIAL RESULTANTE DO INTEMPERISMO

<b>Tipo de rocha</b>	<b>Tipo de solo</b>
Basalto	Argiloso (pouca areia)
Quartzito	Arenoso
Filitos	Argiloso
Granito	Areno-argiloso (micáceo)
Calcário	Argiloso

FONTE: Chiossi (1979).

Segundo Massad (2010), na Serra do Mar, região do pré-cambriano, ocorrem solos residuais de gnaisses, micaxistos e granitos. Sendo que estes últimos, formados por minerais de quartzo, feldspato e mica, dão origem a solos micáceos, com partículas de argila (feldspato) e grãos de areia (quartzo).

### 2.3 SOLOS COLUVIONARES

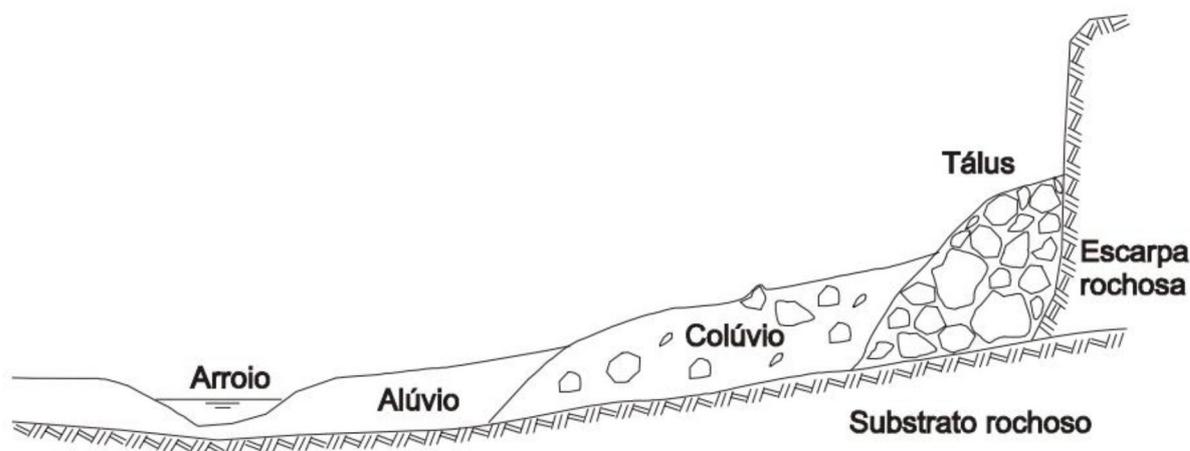
Os solos sedimentares são resultado do transporte de grãos por meio de um agente transportador. Estes solos foram depósitos mais inconsolidados, menos resistentes, compactos e homogêneos que os solos residuais, sua profundidade é variável e ocorre em áreas mais restritas (CHIOSSI, 1979). A divisão desse grupo depende do agente transportador, destacando-se os solos: aluviais (transportados pelas águas); coluviais (transportados pela gravidade) e eólicos (transportados pelo vento).

Os depósitos coluvionares consistem em solo residual cujo transporte se deve exclusivamente à ação da gravidade, como nos escorregamentos, em distâncias relativamente pequenas. Estes depósitos podem ser formados de solo misturado com blocos de rocha e sua composição depende dos tipos de rocha existentes nas áreas mais elevadas, visto que estes depósitos são de ocorrência localizada, situando-se geralmente ao pé de encostas naturais. Depósitos coluvionares constituem-se de materiais inconsolidados, permeáveis e sujeitos a movimentos gravitacionais de massa (CHIOSSI, 1979; MASSAD, 2010).

Segundo Nichel (2011) a forma de deposição e a granulometria das partículas são as principais características que diferenciam o colúvio dos tálus e dos alúvios. Tálus são depósitos formados por blocos de rocha e matacões, preenchidos ou não por solo, que se desprendem da escarpa e portanto se localizam ao pé das mesmas. Os alúvios consistem em depósitos de material fino carregado pelo fluxo d'água e assentados ao pé das encostas onde a declividade é baixa. Os colúvios situam-se entre os tálus e os alúvios, tanto com relação a zona de deposição quanto à

granulometria. A FIGURA 6 representa esquematicamente a composição de uma encosta que apresenta os materiais supracitados.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA DE UMA ENCOSTA COMPOSTA POR ALÚVIO, COLÚVIO E TÁLUS LIMITADO POR UMA ESCARPA ROCHOSA



FONTE: Nichel (2011).

De acordo com a Geoplanejamento (2011) nos sedimentos encontrados na Serra do Mar paranaense prevalece a granulometria fina, com quantidades variadas de areias e seixos, comumente sem estruturas, sendo frequente a ocorrência de colúvios superpostos, com características texturais ou de coloração diferentes.

## 2.4 PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO

O solo em sua condição saturado é composto de três fases: sólida, gasosa e líquida. Normalmente, as hipóteses admitidas dentro da Mecânica dos Solos dizem respeito a solos saturados, devido a aceitação de que a condição saturada tende a ser mais crítica em diversas situações ou devido a simplificações de cálculo (VILAR, 2004). Segundo Vargas (1974), a caracterização dos solos é fundamental para compreender seu comportamento hidrológico, sendo essenciais na investigação do armazenamento e movimento da água.

A condutividade hidráulica dos solos é uma propriedade que retrata a capacidade de um fluido ser transportado em um meio poroso e depende tanto das propriedades do meio quanto das propriedades do fluido. Portanto, este parâmetro depende diretamente das dimensões, da geometria e da configuração dos poros do solo (FREEZE e CHERRY, 1979 *apud* LISTO, 2015).

### 2.4.1 Sucção

De acordo com Marinho (1997) a sucção (pressão na água inferior a pressão atmosférica) ocorre quando a água está presente somente nos poros menores de solo, ou seja, quando ele se encontra não saturado. A condição de não saturação do solo ocorre na camada de solo acima do nível d'água, a umidade desta região pode ser devida a percolação da água de precipitação atmosférica ou por capilaridade (TERLIEN, 1997). Assim, sucção consiste na pressão isotrópica da água intersticial, resultado de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/ solo absorva ou perca água, alterando o seu grau de saturação (MARINHO, 1997).

Segundo Soto (2004) o potencial da água presente em um solo não saturado é composto de diferentes partes, sendo que os mais importantes nesta condição são os potenciais gravitacionais, pneumáticos, osmóticos e matricial. Porém, por apresentar pouca influência nos resultados, o potencial gravitacional e pneumático podem ser desprezados quando o potencial gravitacional e pneumático podem ser desprezados, o potencial total consiste na soma da sucção matricial e sucção osmótica e corresponde ao trabalho total das forças de capilaridade, absorção e osmose.

Beneveli *et al.* (2004) definem a sucção, ou tensão negativa de água, como a quantidade de energia por unidade de volume necessária para se retirar a água do meio poroso, ou seja, a capacidade do solo de reter água. Assim, a sucção é um parâmetro de tensão necessária na definição do comportamento mecânico dos solos não saturados, visto que a resistência ou a deformabilidade destes solos estão sujeitas à pressão negativa de sua água intersticial.

A sucção total pode ser interpretada como a soma dos componentes matricial e osmótico, tais componentes foram expostos por Marinho (1997) e Soto (2004):

- a) Sucção total: energia livre da água intersticial, ou seja, diferença de pressão através de uma membrana semipermeável que separa água pura do sistema água intersticial/solo;
- b) Componente matricial: está relacionado com a “matriz” do solo, a combinação do tipo de partículas e arranjo estrutural. Consiste em um potencial de pressão em decorrência da ação conjunta das forças capilares e de adsorção, que surgem da interação entre a água e as partículas minerais do solo;

- c) Componente osmótico: se deve à contração química da água no solo, ou seja, ocorre porque a água presente nos poros possuem sais dissolvidos que exercem uma sucção osmótica a fim de levar a água do solo ao estado original de água padrão.

A sucção matricial é igual a sucção total quando a água presente no solo corresponde à água padrão, pois isso elimina o componente osmótico e resta somente a capilaridade e adsorção (SOTO, 2004). A capilaridade surge pela ação de forças não equilibradas na interface água-ar que fazem com que a superfície do líquido se contraia, minimizando sua área e adquira uma energia potencial que reflete a diferença de pressão entre o ar e a água. Já o fenômeno de adsorção está relacionado às cargas superficiais não balanceadas na superfície do solo, podendo haver atração ou repulsão dependendo do tipo e magnitude das cargas elétricas superficiais existentes nas partículas do solo (MACHADO e VILAR, 2015).

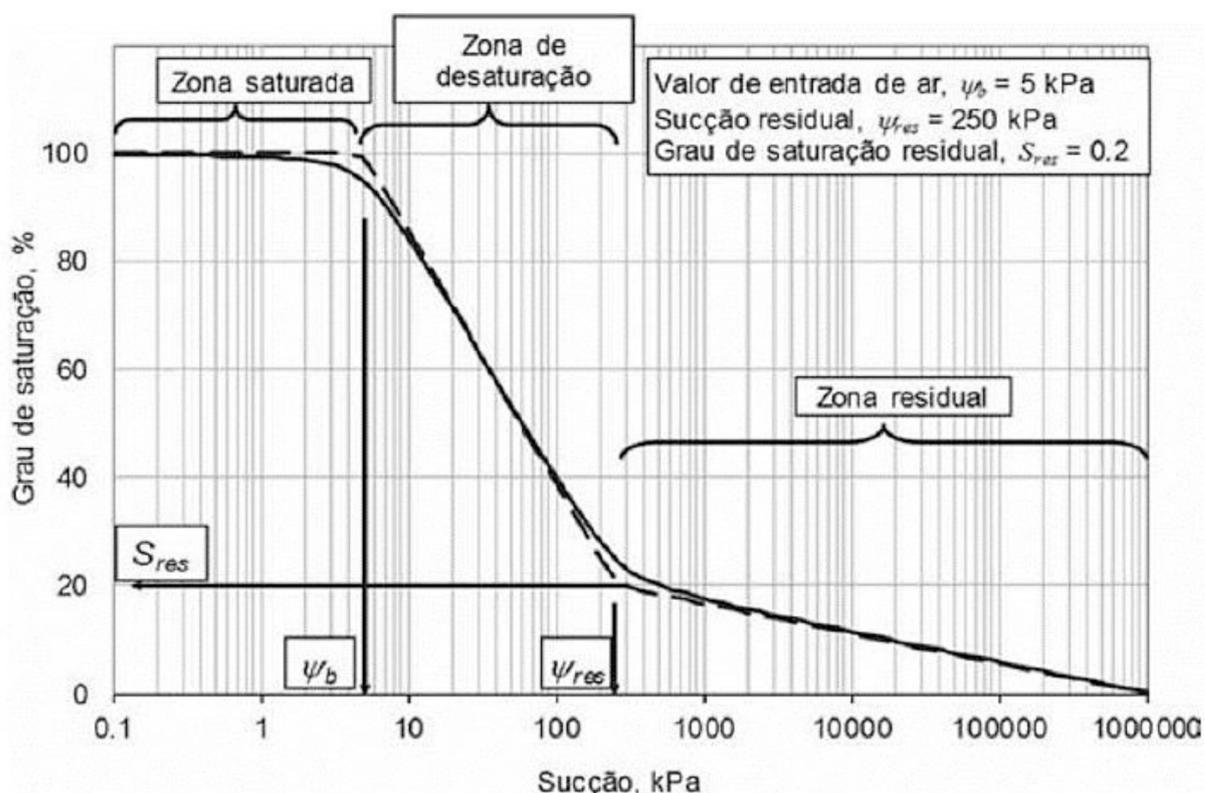
A sucção atua em solos não saturados provocando um incremento na sua resistência ao cisalhamento (BENEVELI *et al.*, 2004). Contudo, Beneveli e Campos (2004) citam que os solos possuem diferentes valores de sucção dependendo do seu umedecimento e secagem. Isto porque, a cada ciclo de umedecimento e secagem ocorre a modificação da estrutura do solo, podendo acarretar na diminuição da resistência ao cisalhamento deste solo.

A instabilização de uma encosta por meio da perda de sucção acontece devido ao processo de infiltração e do avanço da frente de saturação, ocasionando perda de coesão aparente e redução da resistência ao cisalhamento. Os deslizamentos que ocorrem devido a estes processos são registrados durante períodos de chuva, devido à elevação do nível d'água ou saturação das camadas superficiais de solo. A condição de não saturação do solo ocorre na camada acima do lençol freático e, nesta região, a umidade pode ser decorrente de processos de infiltração da água de chuva ou por ascensão por meio dos vazios (capilaridade) (TERLIEN, 1997).

Segundo Gitirana Jr. *et al.* (2015), a curva de retenção consiste na representação gráfica da relação entre a quantidade de água presente no material poroso (teor de umidade) e a energia necessária para remover essa água (sucção). A partir da curva de retenção é possível obter-se os parâmetros hidráulicos de solos não saturados (GEHLING, 2004), facilitando a compreensão do comportamento do solo com a variação do teor de umidade.

A curva de retenção geralmente apresenta três trechos definidos por parâmetros distintos. O primeiro trecho corresponde a zona saturada, onde o solo está completamente saturado até que o valor da sucção atinja o “valor de entrada de ar”, ou seja, a máxima sucção suportada pelos maiores poros antes de serem drenados. O segundo trecho corresponde a zona de desaturação, que consiste no intervalo de sucção onde ocorre o processo de drenagem do solo em relação ao fluxo de água líquida que se encontra nos poros do solo “livres”. O terceiro trecho inicia no grau de saturação residual, associado à sucção residual, onde a saída de água ocorre predominantemente por processos de transferência de vapor a sucções extremamente altas (GITIRANA JR. *et al.*, 2015), conforme FIGURA 7.

FIGURA 7 – EXEMPLO DE CURVA DE SUCCÃO DE UM SOLO



FONTE: Gitirana Jr. *et al.* (2015).

Segundo Gerscovich (2012) as curvas de retenção apresentam diferentes comportamentos dependendo da composição do solo, distribuição granulométrica, estrutura, distribuição dos poros e mineralogia. Assim, os solos argilosos apresentam curvas suaves devido a distribuição dos poros que permitem reter a maior parte da água, enquanto que os solos arenosos tendem a apresentar uma perda brusca de

umidade em decorrência de poros maiores, que se esvaziam quanto atingem uma certa sucção matricial.

As curvas de retenção podem apresentar formato uni modal, bi-modal ou tri-modal. Porém, na maioria dos casos, as relações matemáticas encontradas na literatura para ajuste da curva de retenção são para curvas do tipo uni-modal, assim para outros formatos de curva devem-se encontrar equações que se ajustem aos diferentes patamares (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). O QUADRO 2 apresenta o resumo das equações empíricas para este ajuste.

QUADRO 2 - EQUAÇÕES DE AJUSTE PARA A CURVA DE RETENÇÃO

<b>Autores</b>	<b>Equação</b>	<b>Parâmetros</b>
Gardner (1956)	$\theta_n = \frac{1}{(1 + a_g \psi^{n_g})}$	$a_g, n_g$
Brooks e Correy (1964)	$\theta_n = 1 \quad \psi \leq \psi_b$ $\theta_n = \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-\lambda_{bc}} \quad \psi > \psi_b$	$\psi_b, \lambda_{bc}$
Brutsaert (1966)	$\theta_n = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\psi}{a_b}\right)^{n_b}\right)}$	$a_b, n_b$
Van Genuchten (1980)	$\theta_n = \frac{1}{\left(1 + (a_{vg} \psi)^{n_{vg}}\right)^{m_{vg}}}$	$a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}$
McKee e Bum (1984)	$\theta_n = 1 \quad \psi \leq \psi_b$ $\theta_n = \exp\left(\frac{a_{m1} - \psi}{n_{m1}}\right) \quad \psi > \psi_b$	$a_{m1}, n_{m1}, \psi_b$
McKee e Bumb (1987)	$\theta_n = \frac{1}{\left(1 + \exp\left[\frac{(a_{m2} - \psi)}{n_{m2}}\right]\right)}$	$a_{m2}, n_{m2}$
Fredlund e Xing (1994)	$w = \frac{C(\psi) w_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a_{fx}}\right)^{n_{fx}}\right)\right]^{m_{fx}}}$	$a_{fx}, n_{fx}, m_{fx}, \psi_r$
	$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)}$	
Gitirana Jr. e Fredlund (2004) - unimodal	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{res}}}\right)^d} + S_2$	$\psi_b, \psi_{res}, S_{res}, a$

FONTE: Gitirana Jr. *et al.* (2015).

De acordo com Marinho *et al.* (2015) a técnica do papel filtro consiste na maneira mais simples e econômica para medição da sucção do solo. Esta técnica consiste no uso de papéis filtro como instrumentos de medida para a quantificação indireta da sucção matricial do solo.

## 2.5 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO

A resistência ao cisalhamento de um solo equivale a tensão de cisalhamento máxima que pode ser aplicada à estrutura do solo. Quando este valor é atingido, toda a resistência do solo foi mobilizada e então ocorre a ruptura (LAMBE e WHITMAN, 1969).

As componentes principais da resistência ao cisalhamento de solos saturados são o ângulo de atrito e a coesão, obtidos por uma interpolação linear dos resultados experimentais de resistência. O valor do ângulo de atrito depende do tipo de mineral que constitui o solo, da estrutura das partículas, da quebra de grãos, da dilatância e do grau de entrosamento das partículas (FUTAI *et al.*, 2004). Já a coesão (cimentação das partículas e atração química entre as mesmas) aumenta com a quantidade de argila e a atividade coloidal, com a razão de pré-adensamento e com a diminuição da umidade sendo, portanto, uma característica de solos muito finos (VARGAS *et al.*, 1986 apud LISTO, 2015). Segundo Varnes (1978), a redução dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, bem como as variações da poro-pressão do solo podem diminuir a resistência das encostas.

Contudo, no caso dos solos não-saturados a sucção consiste em uma terceira variável da resistência ao cisalhamento. Segundo o modelo de Fredlund *et al.* (1978, apud FUTAI *et al.*, 2004), o ângulo de atrito interno do solo independe da sucção (constante) e a coesão pode ser descrita pela coesão efetiva (saturada) acrescida de uma parcela que varia linearmente com a sucção matricial.

De acordo com Campos e Motta (2015) diversas equações foram propostas para determinar as tensões efetivas em solos não saturados, sendo que a expressão mais conhecida é a de Bishop (1959), dada pela Equação 3. Uma variação na pressão dos poros ( $u_w$ ) afeta somente a sucção matricial. Assim, quando o solo encontra-se saturado, a sucção se anula, resultando equação de Terzaghi de tensões efetivas.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

Baseado no conceito de tensões variáveis, Fredlund *et al.* (1978) propuseram a seguinte equação para determinação da resistência ao cisalhamento para solos não saturados:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)_f \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \phi^b \quad (3)$$

Onde:

$c', \phi'$  – parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

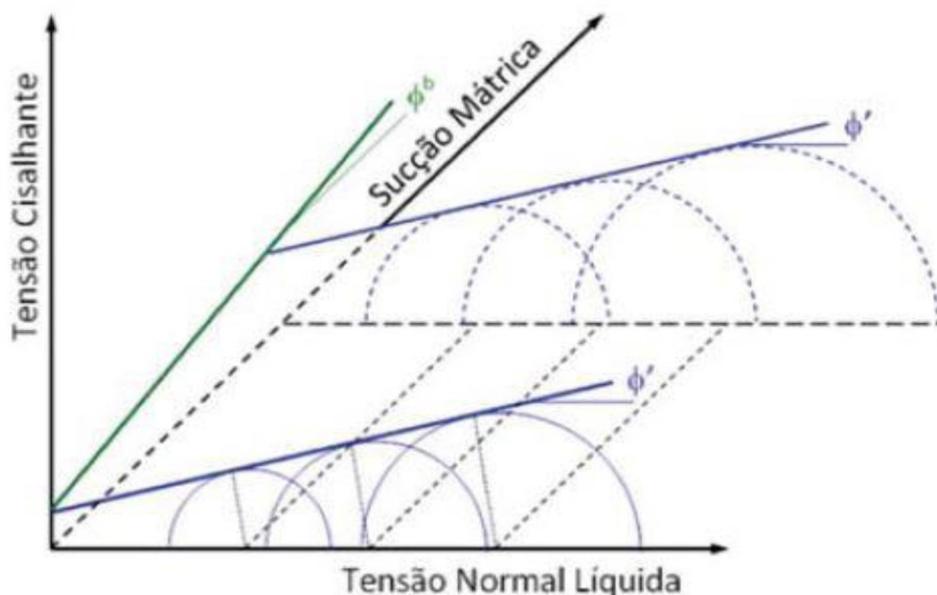
$(\sigma_n - u_a)_f$  – tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;

$(u_a - u_w)_f$  – sucção matricial na ruptura;

$\phi^b$  – parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a um aumento na sucção.

Segundo Campos e Motta (2015), nos solos saturados a envoltória de resistência é definida em um gráfico bidimensional que relaciona o estado de tensão com a tensão cisalhante. Contudo, no caso de solos não saturados a envoltória de ruptura é definida em um gráfico tridimensional. Fredlund e Rahardjo (1993) descreveram como se obtém tal envoltória, denominada Envoltória de Ruptura Estendida de Mohr-Coulomb. Conforme ilustrado na FIGURA 8, o gráfico tridimensional apresenta a tensão cisalhante ( $\tau_f$ ) no eixo das ordenadas e as variáveis de estado de tensão ( $(\sigma_n - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ ), no eixo das abscissas. A envoltória de resistência consiste em um plano com inclinação  $\phi^b$  (eixo  $\tau$  versus  $(u_a - u_w)$ ) e eixo  $\tau$  versus  $(\sigma_n - u_a)$ . Qualquer linha nesse plano, traçada paralela aos eixos  $\tau$  versus  $(\sigma_n - u_a)$ , intercepta o plano definido pela origem dos eixos  $\tau$  versus  $(u_a - u_w)$  em uma ordenada  $c = c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi^b$ .

FIGURA 8 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA DE SOLOS NÃO SATURADOS



FONTE: Fredlund *et al.* (1978) *apud* Campos e Motta (2015).

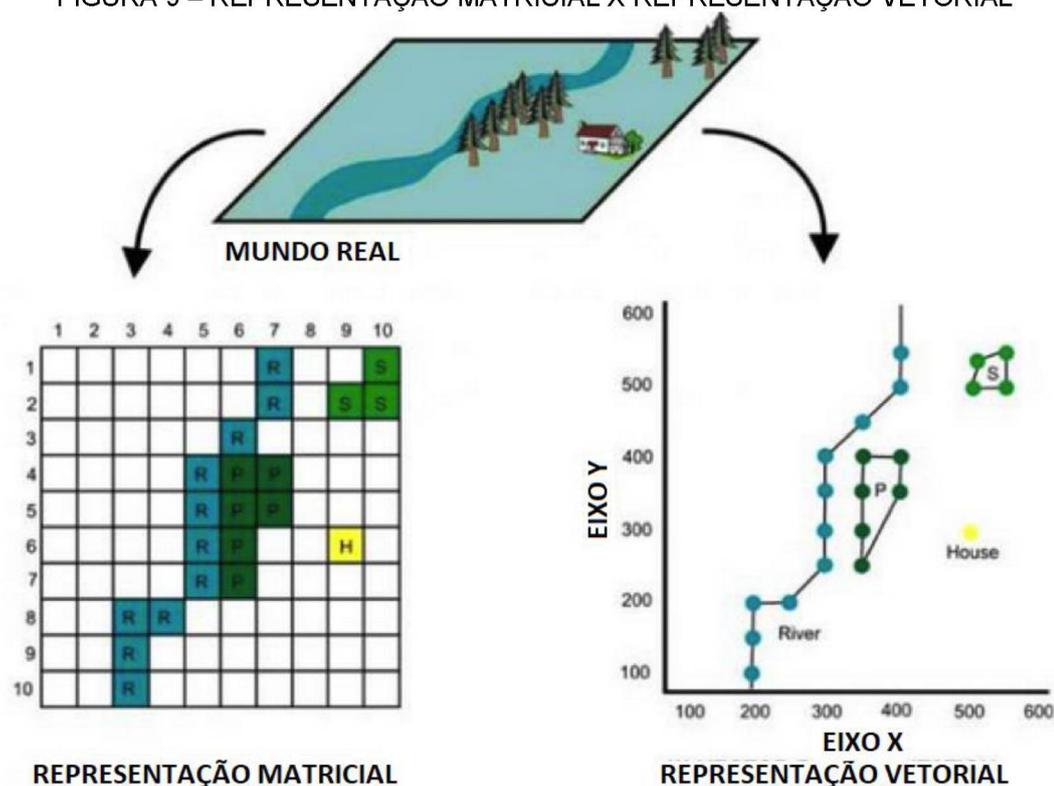
## 2.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) consiste em um sistema automatizado utilizado para armazenamento, análise e manipulação de dados geográficos, ou seja, dados que representam fenômenos e objetos em que a localização geográfica é indispensável na análise e inerente à informação. Os dados tratados neste sistema incluem imagens de satélite, modelos numéricos do terreno, redes, dados tabulares e mapas temáticos (CÂMARA *et al.*, 1996). Os dados de entrada em plataformas SIG são representados em formato matricial (*raster*) ou vetorial.

Nos dados matriciais, cada célula corresponde um valor do campo representado (ou seja, não pode haver dois valores distintos para uma mesma célula), a sobreposição de matrizes através da combinação dos valores das células ou junção de conjuntos de várias células adjacentes em uma única célula são algumas das operações típicas neste tipo de representação (CÂMARA *et al.* 1996). De acordo com Ferreira (2006), a estrutura matricial consiste em uma matriz bi-dimensional, onde cada elemento desta estrutura (pixel/célula) contém um número inteiro ou real. Ou seja, um pixel corresponde ao menor componente de uma imagem digital, sendo que o conjunto de milhares de pixels formam a imagem inteira.

Na estrutura vetorial, a localização e aparência gráfica de cada elemento são representados por um ou mais pares de coordenadas e sua geometria é descrita utilizando pontos, linhas e polígonos (FERREIRA, 2006). A FIGURA 9 ilustra a diferença entre a representação vetorial e a matricial.

FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO MATRICIAL X REPRESENTAÇÃO VETORIAL



FONTE: Joseph (2014).

## 2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS NA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

Segundo Costa (2005) os métodos analíticos consistem em métodos diretos, derivados de uma expressão para a função densidade de probabilidade do fator de segurança, de alta complexidade matemática (geralmente impraticável). Já os métodos aproximados são métodos indiretos, que necessitam do conhecimento da média e da variância de todos os parâmetros de entrada, bem como da função de desempenho que defina o fator de segurança. Neste caso, o fator de segurança consistirá em uma função aleatória que varia como função de variáveis aleatórias de carregamentos e resistências.

De acordo com Costa (2005) a modelagem determinística e a modelagem probabilística são conceitualmente diferentes. Isso porque na modelagem determinística os dados disponíveis são adotados a fim de obter a melhor estimativa simples para cada variável de entrada, que são utilizadas em modelos analíticos de previsão de desempenho. Este método supõe que o erro estimado, diferença entre o valor real da variável de entrada e o valor estimado, é igual a zero. Porém, no caso

em que as propriedades do material são variáveis, como no caso do solo, esta justificativa não se aplica.

Os modelos determinísticos tiveram ampla aceitação nas últimas quatro décadas, modelos como os de Bishop, Morgenstern-Price e Janbu tornaram-se parte da prática diária do geotécnico. Nestes métodos, seleciona-se um fator de segurança admissível com base na experiência do profissional, o talude é considerado seguro caso o fator de segurança calculado seja maior ou igual ao admissível. Deste modo, a prática convencional confere uma grande importância ao fator de segurança, todavia este valor depende dos parâmetros de entrada selecionados, do modo de ruptura adotado, da confiabilidade das hipóteses por julgamento e da acurácia dos métodos de análise escolhidos. Assim, para um determinado problema pode haver inúmeros fatores de segurança, visto que dependendo do julgamento e experiência de cada geotécnico poderão ser adotados parâmetros, suposições e métodos de análise diferentes (COSTA, 2005).

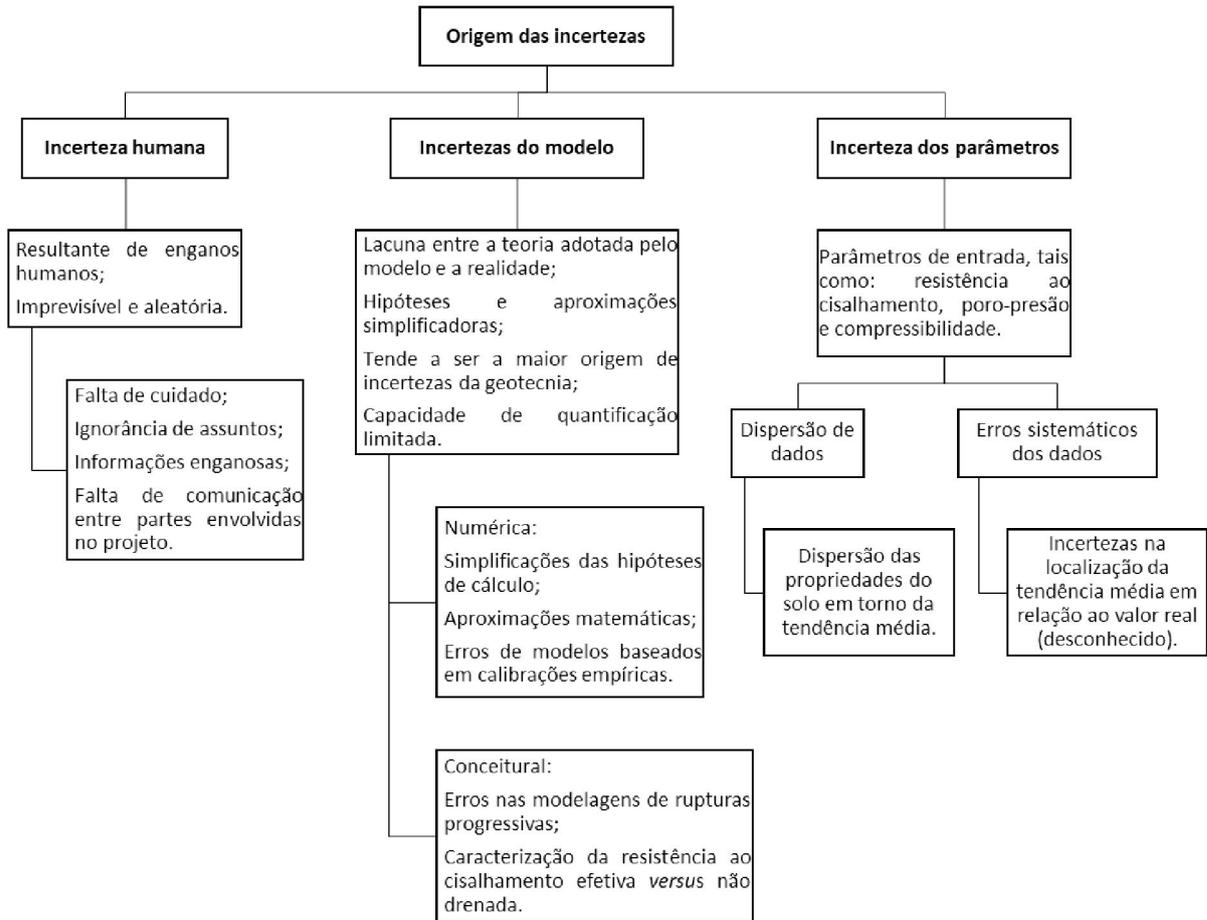
O método probabilístico, entretanto, objetiva utilizar a teoria da probabilidade para elaborar um procedimento sistemático para o tratamento de incertezas de maneira quantitativa. Visto que esta modelagem reconhece as incertezas nos parâmetros de entrada e os trata como variáveis aleatórias, podendo assumir qualquer valor em um intervalo definido, com determinada probabilidade de ocorrência com base nos dados disponíveis. Deste modo, obtém-se um intervalo de possíveis resultados e suas respectivas probabilidades (COSTA, 2005). Os métodos estatísticos e probabilísticos surgem como uma alternativa sistemática de inserir a variabilidade de parâmetros e calcular o risco de ruptura ou a confiabilidade de estruturas (ASSIS, 2002).

Segundo EL-RAMLY (2001), os métodos de análise probabilística de estabilidade de taludes baseiam-se nos mesmos princípios dos métodos determinísticos. Porém, devido ao fato de considerarem-se as diversas origens de incerteza, os resultados da análise vão além do fator de segurança, visto que pode-se obter o desempenho mais provável e a variabilidade potencial devidos às incertezas envolvidas.

Morgenstern (1995 *apud* EL-RAMLY, 2001) categorizou as incertezas geotécnicas nas três categorias citadas abaixo e esquematizadas na FIGURA 10: incerteza dos parâmetros geotécnicos de análise (FIGURA 11); incerteza do modelo,

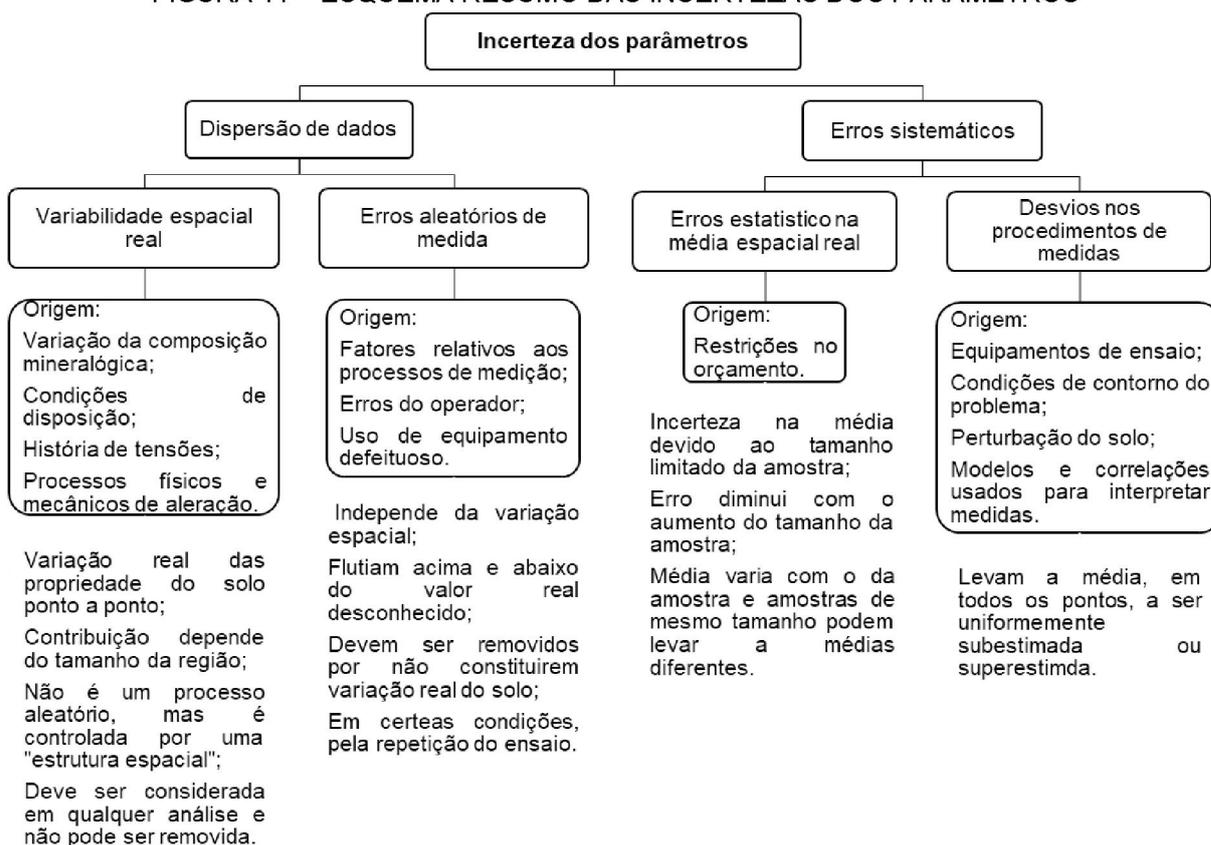
devida às limitações das teorias utilizadas análise e; incerteza humana, devida a erros humanos.

FIGURA 10 – ESQUEMA RESUMO DA ORIGEM DAS INCERTEZAS EM GEOTECNIA



FONTE: adaptado de Costa (2005).

FIGURA 11 – ESQUEMA RESUMO DAS INCERTEZAS DOS PARÂMETROS



FONTE: Costa (2005).

Os geotécnicos frequentemente encontram problemas de representatividade de amostras em suas análises, tomando decisões baseadas em poucos dados e que podem, estatisticamente, não representar corretamente o fenômeno estudado (COSTA, 2005). Whitman (1974) cita as principais aplicações da probabilidade e estatística na geotecnia:

- Pesquisa de informações, exploração e investigação geotécnica otimizadas.
- Utilização da teoria da confiabilidade para avaliação de segurança de maneira lógica e consistente.
- Aperfeiçoamento do projeto diante das incertezas.
- Avaliação de risco.

Portanto, podemos utilizar os métodos probabilísticos a fim de elaborar análises de distribuição de suscetibilidade de encostas a movimentos gravitacionais de massa.

## 2.7.1 Conceitos básicos de estatística

Uma forma prática de considerar a variabilidade espacial e dos parâmetros do solo é aplicando-se conceitos básicos de estatística. A seguir tem-se uma breve explicação com relação a medidas de tendência central e medidas de dispersão de dados.

### 2.7.1.1 Medidas de tendência central

De acordo com Assis (2002) as medidas de tendência central são utilizadas para representar o conjunto de observações por uma maneira mais sintética, ou seja, uma medida de tendência central, conforme apresentadas a seguir.

**Média aritmética:** consiste na medida mais utilizada e é representada pela relação:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

Onde:

$\bar{x}$  – média aritmética;

$x_i$  – valor na posição “i” no conjunto de dados;

n – quantidade de dados.

**Média ponderada:** utilizada quando os números ( $x_i$ ) a serem sintetizados possuem diferentes graus de importância ( $p_i$ ), é definida por:

$$\bar{X}_p = \frac{(x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (5)$$

Onde:

$\bar{X}_p$  – média ponderada

$x_i$  – valor na posição “i” no conjunto de dados;

$p_i$  – pesos.

**Mediana:** trata-se do valor do "meio" de um conjunto de “n” observações,  $x_1$ ,  $x_2$ , ...,  $x_n$  dispostos em ordem crescente. Quando “n” é ímpar, este valor é único; se “n” é par, a mediana é a média aritmética simples dos dois valores centrais.

**Moda:** consiste na medida de tendência central que se caracteriza pelo valor mais frequente (maior frequência absoluta simples).

A média consiste em uma medida sensível a valores extremos de um conjunto de observações, enquanto a mediana não sofre de maneira tão significativa com a presença de valores extremos (ASSIS, 2002).

### 2.7.1.2 Medidas de dispersão ou variabilidade

A representação de uma distribuição somente através de sua média não permite uma conclusão correta a respeito da mesma, visto que a média é significativamente influenciada por valores extremos. Assim, utiliza-se medida de dispersão, a fim de expressar com que grau as observações individuais diferem do valor médio representativo da população (ASSIS, 2002). As medidas de dispersão mais utilizadas são a variância ( $s^2$ ) e o desvio padrão ( $s$ ), sendo:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (6)$$

Onde:

$s^2$  – variância;

$x_i$  – valor na posição “i” no conjunto de dados;

$\bar{x}$  – média aritmética dos dados;

$n$  – quantidade de dados.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (7)$$

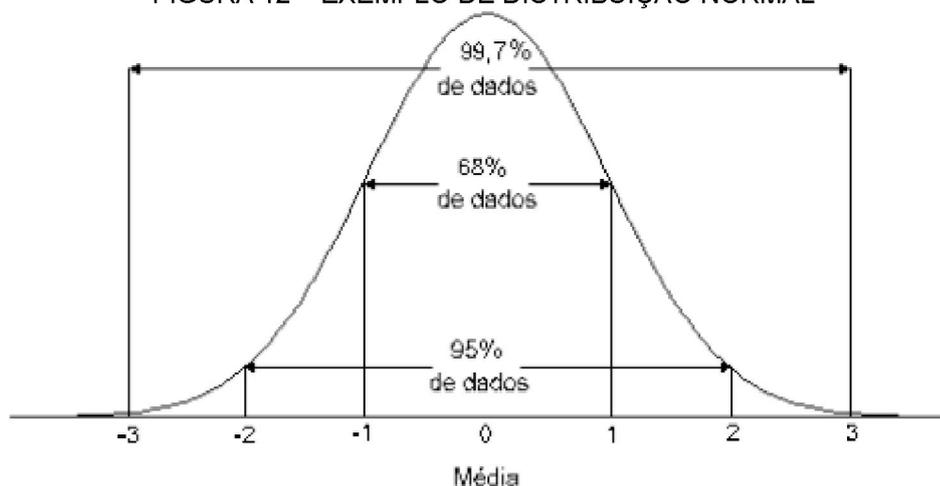
Onde:

$s$  – desvio padrão;

$s^2$  – variância.

**Distribuição normal:** em um conjunto de dados com distribuição descrita por uma curva normal (Gaussiana), a distribuição é simétrica e a média (pico da curva) coincide com os valores de mediana e também com a moda. O desvio padrão nesta curva corresponde aos pontos onde a curvatura muda, de ambos os lados em relação ao centro (FERNANDES, 1999). A FIGURA 12 ilustra três exemplos de distribuições normais com a mesma média, mas com diferentes desvios padrões.

FIGURA 12 – EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL



FONTE: Fernandes, (1999).

Nos métodos probabilísticos, o número de iterações necessárias para obter-se o grau de confiança esperado é dado por:

$$n = \frac{h_{\alpha/2}^2}{4\varepsilon^2} \quad (8)$$

Onde:

$n$  – número de iterações;

$h_{\alpha/2}$  – Coeficientes de confiança para a distribuição normal (TABELA 1);

$\varepsilon$  – máximo erro permissível na estimativa.

TABELA 1 - COEFICIENTES DE CONFIANÇA PARA A DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Nível de confiança (%) (1 - $\alpha$ )	$h_{\alpha/2}$
90	1,64
95	1,96
95,45	2,00
98	2,33
99	2,58
99,5	2,81
99,73	3,00
99,9	3,29
99,99	3,89
99,994	4,00

FONTE: Assis (2002).

### 2.7.2 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo foi formalizado em 1949 com o artigo *The Monte Carlo Method* de autoria de John von Neumann e Stanislaw Ulam. Trata-se de um método de simulação estatística que se baseia na utilização de sequências de números aleatórios para o desenvolvimento de simulações, proporcionando uma aproximação da solução, sendo que quanto maior a amostra, menor o erro de aproximação (NASSER, 2012).

De acordo com Farias e Assis (1998), o método de Monte Carlo é considerado direto e exato, sendo eficiente para problemas matemáticos complexos onde as avaliações analíticas são difíceis devido às estimativas dos sistemas de desempenho. No método de Monte Carlo, os parâmetros de entrada são estabelecidos pela sua média e desvio padrão, resultando na distribuição de probabilidades do fator de segurança, no índice de confiabilidade e na probabilidade de ruptura (COSTA, 2005).

Apaza e Barros (2014) realizaram a comparação dos métodos probabilísticos de Primeira Ordem e Segundo momento (FOSM), Estimativas Pontuais (PE) e Monte Carlo (MC) em dois casos reais de estabilidade de taludes reportados na literatura, o primeiro de um talude de mineração e o segundo de um talude submerso. Foram utilizados os métodos de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price para a avaliação da estabilidade do talude. Os autores concluíram que o fator de segurança e a probabilidade de ruptura são influenciados pelos métodos de análise de estabilidade adotados. Além disso, concluíram que o método de Monte Carlo apresenta vantagens em relação aos outros dois métodos probabilísticos, isto porque permite a obtenção da curva de distribuição estatística do fator de segurança, da curva de convergência da probabilidade de ruína e das correlações entre as variáveis envolvidas nas análises.

Segundo EL-RAMLY (2001), este método é considerado um método semi-probabilístico que trabalha com a variação dos parâmetros de entrada. Os passos para a análise consiste em:

- a) Escolher o modelo determinístico de base (Janbu, Bishop, Morgenstern-Price, Spencer, etc.);
- b) Definir os parâmetros de entrada que serão modelados probabilisticamente e as funções de distribuição das variáveis;

- c) Estimar novos parâmetros de entrada do modelo determinístico adotado, respeitando a curva de distribuição de frequência de Gauss (Normal). Posteriormente, determinar os fatores de segurança correspondentes a esses parâmetros através de combinações de variáveis obtidas aleatoriamente com base na sua distribuição de probabilidades;
- d) Repetir o processo diversas vezes a fim de determinar a distribuição de frequências da variável de desempenho, de onde se obtém suas principais características de variação, o FS médio e probabilidade de ruptura.

EL-RAMLY (2001) cita como vantagens da simulação de Monte Carlo, com relação aos métodos analíticos e aproximados, a desnecessidade de compreensão estatística e matemática dos outros métodos; o fornecimento da forma da função de distribuição de probabilidades do fator de segurança e a probabilidade de ruptura, não havendo necessidade de se adotar uma forma para essa distribuição e; o fato de que o aumento do número de parâmetros de entrada não aumenta a complexidade da análise. Contudo, como desvantagem este autor expõe que raramente se utiliza a simulação de Monte Carlo com variáveis aleatórias correlacionadas, devido à dificuldade de gerar valores aleatórios que mantenham essa correlação entre as variáveis.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo dessa dissertação foi escolhida com base nas características geomorfológicas, nos aspectos ambientais e na sua importância social.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

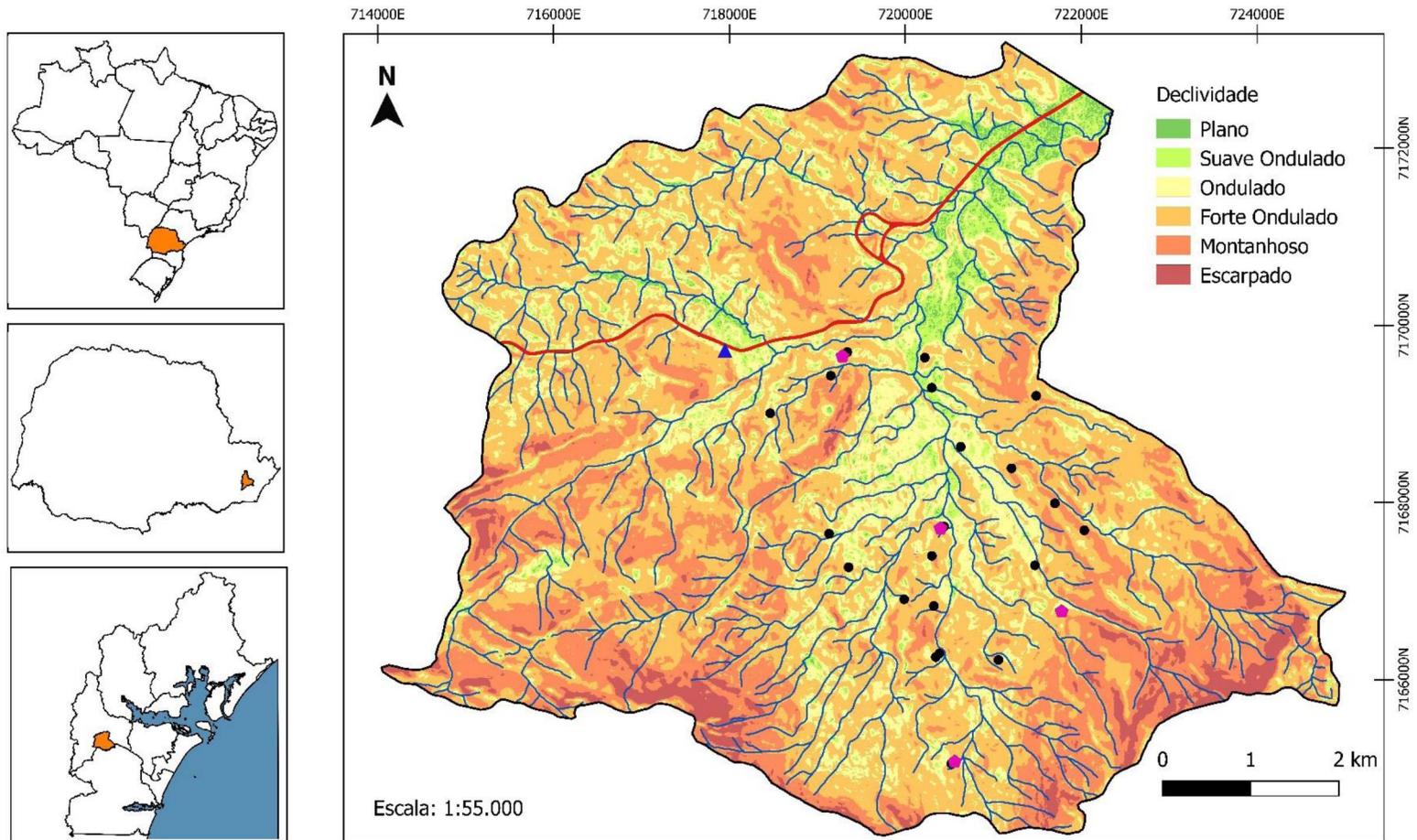
A área de estudo, com cerca de 58,62 km<sup>2</sup>, corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado. De acordo com Mineropar (2014) os quatro maiores rios dessa bacia hidrográfica (Sagrado, Canhembora, Ribeirão Grande e Brejatuba) recebem as águas de dezenas de afluentes que ocupam mais de 158 km<sup>2</sup> nos sopés da Serra do Mar. A delimitação da bacia neste trabalho desconsidera as sub-bacias adjacentes dos rios Sambaqui, Zoador e Pitinga pois suas fisiografias são menos propícias à geração de impactos de movimento gravitacionais de massa sobre os núcleos rurais (Mineropar, 2014).

A Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado está localizada na Serra do Mar, situada inteiramente na cidade de Morretes, litoral paranaense, sendo delimitada pelas coordenadas UTM-E 714.043 e 724.997 e UTM-S 7.173.191 e 7.164.240, fuso 22S.

Esta bacia hidrográfica é caracterizada por altas declividades, solo raso, remoção crescente da vegetação e expressivo índice pluviométrico (decorrente de chuvas orográficas) que favorecem a ocorrência de escorregamentos translacionais (MARÉS MIKOSIK *et al.*, 2010). A FIGURA 13 apresenta a localização da área de estudo, bem como o mapa de declividade da mesma onde se podem comprovar as altas declividades da bacia hidrográfica.

A ocupação antrópica na Bacia do Rio Sagrado está distribuída nos fundos de vales e encostas inferiores dos morros adjacentes à Serra do Mar. Habitam nesta bacia aproximadamente 520 famílias, sendo que cerca de 270 delas são residentes fixos e 250 ocupantes ocasionais de sítios e chácaras (SAMPAIO e ALVES, 2013). De acordo com levantamento executado pela defesa civil estadual em maio de 2018, atualmente nesta bacia há 641 moradores fixos cadastrados e 492 edificações, que incluem residências fixas, de veraneio e abandonadas, além de igrejas e comércios (DEFESA CIVIL PARANANESE, 2018), distribuídos conforme ilustra a FIGURA 41 no subitem 5.2.

FIGURA 13 - DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO



### LOCALIZAÇÃO E DECLIVIDADE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO

Legenda: — rodovia      ◆ Amostras indeformadas      ▲ Estação pluviométrica do SIMEPAR  
 — hidrografia      ● Pontos de amostragem da MINEROPAR

Fonte: Sistema de Referência de Coordenadas Projetadas, SIRGAS 2000, UTM 22S. Banco de Dados do ITCG e SIMEPAR.

FONTE: a autora (2018).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA

A seguir são abordados os principais aspectos geomorfológicos da Serra do Mar e da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.

### 3.2.1 Serra do Mar

A Serra do Mar é um dos principais compartimentos geomorfológicos do Brasil. Este complexo de montanhas possui densa rede de rodovias, ferrovias, oleodutos, gasodutos, linhas de transmissão, instalações urbanas e indústrias energéticas de extrema importância econômica, além de interligar os maiores portos de importação e exportação das Regiões Sul e Sudeste (LISTO, 2015).

A Serra do Mar paranaense separa o planalto meridional e a planície litorânea e é composta por serras marginais descontínuas que se elevam 500 a 1000 metros acima do nível do planalto (BIGARELLA *et al.*, 1978), sustentada por diferentes litologias, em maior parte rochas metamórficas de alto grau como migmatitos, xistos e gnaisses e mais raramente quartzitos, comumente relacionados com rochas intrusivas do ciclo metamórfico mais jovem (OKA-FIORI *et al.*, 2006).

O intemperismo químico e físico é intenso devido às características climáticas desta região, o que resulta em condições favoráveis para a formação de espessas camadas intemperizadas. Porém, devido à alta declividade das encostas, há uma constante remoção de material, resultando em uma cobertura pedológica heterogênea (AUGUSTO FILHO, 1992 *apud* LISTO, 2015). Segundo Paula *et al.* (2006), predominam na Serra do Mar rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico e Cambissolos Háplicos adjunto à Neossolos Litólicos. Porém, na planície predominam solos hidromórficos sobre sedimentos do quaternário.

De acordo com Wolle e Carvalho (1989 *apud* LISTO, 2015), os solos da Serra do Mar são porosos de espessura variável, com solos superficiais de granulometria argilo-arenosas e areno-siltosos no horizonte saprolítico. Essa disposição de materiais no perfil favorece a infiltração de água, que em casos de maior saturação do solo, pode deflagrar movimentos gravitacionais de massa.

Segundo LISTO (2015), as elevadas taxas pluviométricas são um dos grandes responsáveis pela deflagração de movimentos gravitacionais de massa na Serra do

Mar, visto que estão diretamente relacionados à circulação atmosférica e às características topográficas.

De acordo com a Geoplanejamento (2011), a partir de levantamentos geológicos sistemáticos realizados pela Comissão da Carta Geológica do Paraná, publicados em Bigarella *et al.* (1967) e Fuck *et al.* (1969), foi possível definir as grandes unidades geológicas da Serra do Mar paranaense:

- a) Sequência extensa de rochas metamórficas com estrutura predominantemente gnáissica e ocorrência subordinada de quartzitos, anfibólitos, xistos e ultrabásicas;
- b) Rochas granitóides constituindo “stocks” e batólitos de granitos de “anatexia” e rochas granitóides alcalinas;
- c) Uma bacia vulcano-sedimentar com vulcanismo ácido-intermediário e diques ácidos associados, não metamórfica e pouco deformada;
- d) Diques básicos de idade mesozóica em numerosas quantidades, interceptando discordantemente a sequência regional;
- e) Depósitos de tálus e colúvio-aluvionares de idade recente;
- f) Depósitos aluvionares predominantemente arenosos e marinhos com a formação de extensos terraços e cordões litorâneos.

As vertentes da Serra do Mar apresentam muita energia devido aos processos morfogenéticos, dependentes de fortes declividades e elevado gradiente altitudinal, acompanhado do regime pluviométrico, o que gera solos pouco desenvolvidos, com litologia exposta em diversas áreas (GEOPLANEJAMENTO, 2011). De acordo com Oka-Fiori *et al.* (2006) o relevo das vertentes apresentam topos alongados e cristas com vertentes predominantemente retilíneas e vales em “V” encaixado.

Nas porções inferiores as formas são classificadas como rampas dissecadas com vertentes predominantemente retilíneas e vales em “V” (OKA-FIORI *et al.* 2006). Nessas áreas encontram-se os depósitos coluviais, devido aos processos de acumulação de sedimentos derivados das partes altas, transportados devido à ação da gravidade (GEOPLANEJAMENTO, 2011).

### 3.2.2 Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado

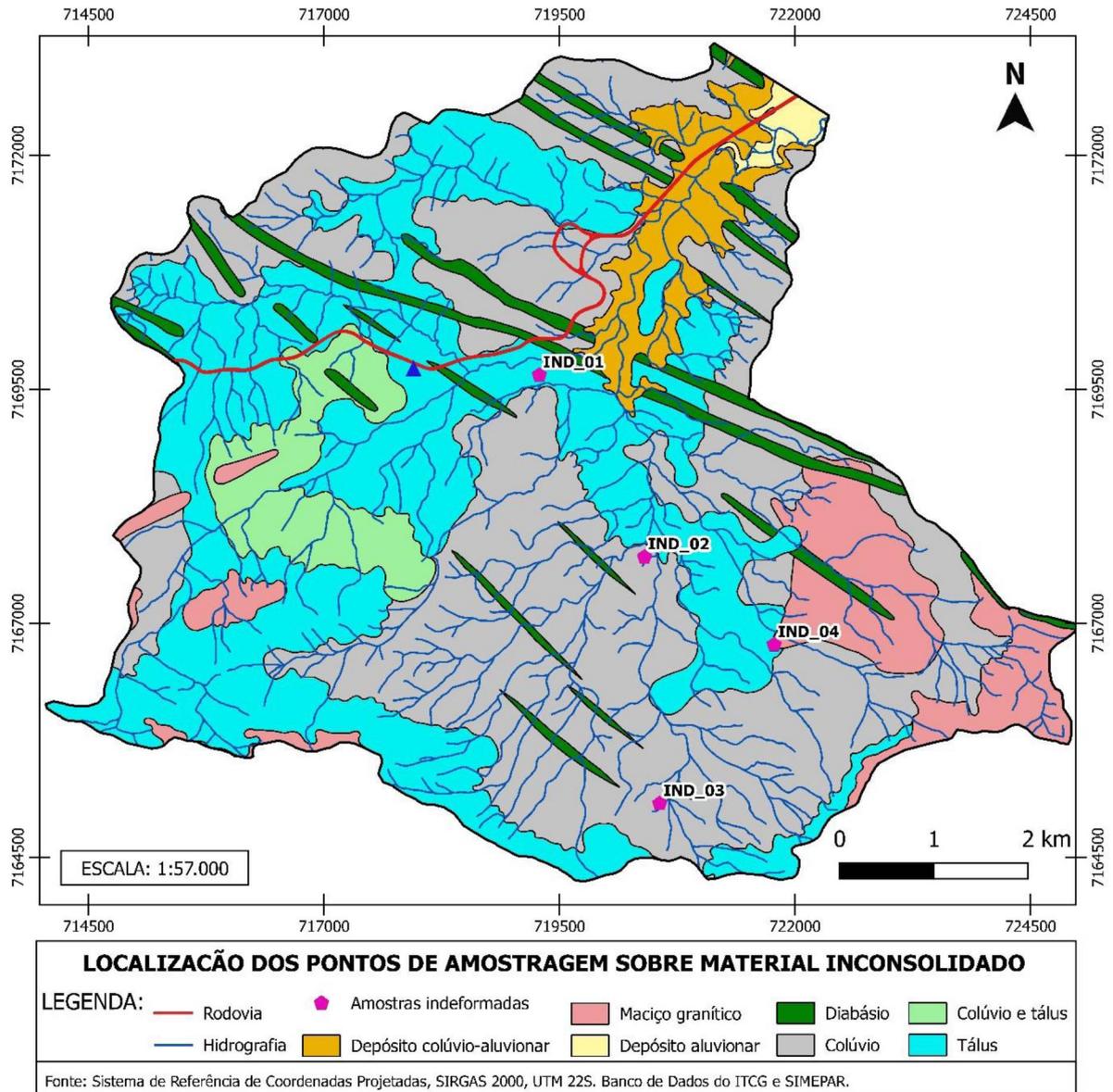
A Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado é composta por planícies aluviais, áreas coluviais montanhosas, morros, colinas esparsas, mangues e, predominantemente,

serras. Os morros consistem em ascensões sustentadas pelas rochas do embasamento que sobressaem da planície e possuem, no geral, encostas com declividade acima de 45%. As colinas são elevações de perfil convexo e relevo mais suave que os morros, com declividade das vertentes na maioria das vezes inferior a 20%. As serras possuem as maiores elevações altimétricas, com encostas de maior declividade e entalhamento por drenagens que formam vales em “V” (GEOPLANEJAMENTO, 2011).

De acordo com Mineropar (2014), o material inconsolidado consiste em depósito de colúvio, tálus e aluvionar, além de diques de diabásio e solo residual de granito, conforme mapa do substrato rochoso e material inconsolidado apresentado na FIGURA 14. Os solos desta área possuem grande concentração de finos, com permeabilidade variando de média a baixa. Os depósitos coluviais são formados principalmente pelos sedimentos provenientes das vertentes e possuem alta suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa.

De acordo a Geoplanejamento (2011), a diferença de cota na Bacia do Rio Sagrado é de aproximadamente 1.375 metros, isto porque a altitude varia de 1.381 metros acima do nível do mar, nas serras, e 6 metros nas áreas de planície. Devido à elevada amplitude vertical, os processos morfogenéticos desnudam as vertentes e depositam sedimentos nas porções mais baixas da Bacia, enquanto que as porções mais elevadas estão diretamente relacionadas aos granitos e às rochas pertencentes ao Complexo Granítico-Gnáissico.

FIGURA 14 - MAPA DE SUBSTRATO ROCHOSO E MATERIAL INCONSOLIDADO



FONTE: adaptado de Mineropar (2014).

O QUADRO 3 apresenta um resumo descritivo do substrato rochoso e material inconsolidado encontrado na Bacia do Rio Sagrado e sua respectiva origem e relação com os movimentos gravitacionais de massa, conforme levantamento da Mineropar (2014).

QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DO SUBSTRATO ROCHOSO E MATERIAL INCONSOLIDADO

Unidade	Descrição	Origem	Relações com MGM
Depósito aluvionar	Camadas e lentes de cascalho, areia, silte e argila. Proporções de sedimentos finos aumentam das cabeceiras para a foz dos canais de drenagem.	Deposição de sedimentos ativos de drenagem atual, em regime de fluxo variável, desde baixa energia (períodos de clima normal) até alta energia (períodos de chuvas intensas).	Sem relações imediatas com movimentos gravitacionais de massa. Formam planícies de deposição de sedimentos liberados por erosão e MGMs nas encostas da bacia hidrográfica.
Depósito colúvio-aluvionar	Camadas e lentes de cascalho com blocos de rocha derivados de colúvio e tálus. Sem variação de granulometria regular e evidente.	Deposição de sedimentos clásticos (matacões, blocos e seixos) e finos (areia, silte e argila), na forma de fluxos de lama e detritos, em períodos de chuvas intensas.	Liberação de materiais constituintes de solo residual, colúvio e tálus, por erosão acelerada, em eventos com formação de fluxos de lama e detritos.
Depósito coluvionar	Depósitos com extensão mapeável e espessura de mais de 2 m, constituídos de matriz arenosa a argilosa sustentando blocos de rocha arredondados com diâmetros de até 0,60 m. Colúvio de granito tem matriz areno-siltosa, friável, porosa e de baixa coesão aparente. Colúvio de diabásio tem matriz argilosa, homogênea, compacta, com baixa porosidade e alta coesão aparente.	Deposição de materiais mobilizados por deslizamentos translacionais, menos frequentemente rotacionais, em períodos de chuvas intensas e/ou prolongadas, a partir de 1 milhão de anos atrás até os dias de hoje (período Holoceno).	Material altamente instável e propenso à geração de deslizamentos translacionais e rotacionais, podendo fornecer grandes volumes de sedimentos e formar fluxos de detritos ao longo dos canais de drenagem.
Depósito misto de colúvio e tálus	Depósitos restritos e descontínuos de colúvio com mais de 2 m de espessura, entremeados a blocos subangulosos a subarredondados de tálus granítico com diâmetros de 0,8 a 6 m.	Deslizamentos de encostas em períodos de chuvas intensas e/ou prolongadas, sobre depósitos de tálus mais antigos, e erodidos durante períodos de clima úmido.	Colúvio tem menor propensão à geração de deslizamentos translacionais porque forma áreas restritas e descontínuas entre blocos de tálus.
Depósito de tálus	Depósitos de blocos subangulosos a subarredondados de granito com diâmetros de 0,8 a 6 m podendo incluir remanescentes isolados de colúvio com até 2 m de espessura.	Queda de blocos ao sopé de escarpas montanhosas, em condições de clima árido a semiárido, há mais de 1 milhão de anos (período Pleistoceno).	Depósitos de tálus são mais estáveis do que colúvio porque se sustentam em blocos de 1 a 300 t. Erosão do colúvio remanescente entre blocos de tálus pode liberá-los, incorporando-os a fluxos de detritos.
Diabásio	Diques de diabásio.	Ascensão de magma básico em fraturas da crosta terrestre, durante a abertura do oceano Atlântico.	Solo residual e colúvio argiloso, compacto, com alta coesão aparente e baixa permeabilidade têm boa estabilidade e baixa erodibilidade.
Maciço rochoso	Maciço de rocha constituído de granito médio a grosso, equigranular a porfírico, isotrópico e com disjunção espaçada a intervalos de 1 a 3 m. Contém capa de decomposição rasa com saprólito (alteração de rocha com estrutura primária preservada) e solo residual, que não podem ser individualizados na escala do mapa.	Remanescentes de escarpas e montanhas terciárias, geradoras de depósitos de tálus, que foram intemperizados no Holoceno, gerando colúvio sob condições de clima úmido.	Zona de contato com colúvio é favorável à infiltração de água e mais propensa à geração de deslizamentos translacionais. Solo residual e saprólito fornecem, por meio de erosão e rastejo, materiais propensos à geração de deslizamentos translacionais.

FONTE: Mineropar (2014).

A FIGURA 15 ilustra a Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, vista da rodovia BR-277 pista sentido sul. A depressão vista ao fundo, ao longo do divisor d'água com a Bacia do rio do Ipê, contém a passagem para a localidade de Canavieiras.

FIGURA 15 - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO, VISTA DA RODOVIA BR-277 PISTA SENTIDO SUL



FONTE: Mineropar (2014).

Os principais afluentes da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado são os rios Canhembora, Candonga, Ribeirão Fundo, Sambaqui (sub-bacia desconsiderada neste trabalho) e Ribeirão Grande. Na maior parte do seu curso o rio Ribeirão Grande possui planície restrita e um vale encaixado em “V”, enquanto que no rio Ribeirão Fundo, em sua porção média e inferior, encontra-se planície mais aberta, mas ainda assim restrita comparada a do rio Sagrado.

### 3.3 DADOS PRETÉRITOS

Há pelo menos treze anos, a Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado é objeto de estudos relacionados com movimentos gravitacionais de massa (BORCHARDT, 2005; MARÉS MIKOSIK *et al.*, 2010; MARÉS MIKOSIK, 2011; BUENO, *et al.*, 2012).

Borchardt (2005) realizou o diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de vertentes do alto e médio curso da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado através da aplicação de um método de quantificação de risco de MGM através da análise de pós ruptura em cicatrizes de ocorrências. Para realização deste trabalho a autora analisou 41 pontos dentro da bacia, entre análise tátil visual e retirada de amostras deformadas e indeformadas. A TABELA 2 resume os dados de pontos de interesse para esta dissertação.

TABELA 2 – RESUMO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DA BACIA DO RIO SAGRADO

Nº da amostra	20	21	22
UTM	7.173.695 S 721.662 E	7.169.650 S 719.063E	7.167.503 S 719.822 E
Tipo de solo (EMBRAPA, 1999)	Podzólico	Cambissolo Álico	Cambissolo Distrófico
Coesão (kPa)	5,84	7,19	0
Ângulo de atrito (°)	30,51	24,56	33,11
Peso específico natural (kN/m³)	17,6	16,5	14,2
Umidade (%)	33,5	36,4	57,9

FONTE: Borchardt (2005).

Marés Mikosik *et al.* (2010) realizaram uma análise integrada das ocorrências dos escorregamentos translacionais rasos na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado através do modelo de estabilidade de encostas SINMAP (Stability Index MAPing), com base em mapas de declividade gerados a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução espacial de 10 metros e parâmetros físicos do solo como transmissividade, coesão e ângulo de atrito. Este estudo resultou em uma carta de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos (dividido em 6 classes variando do estável ao muito instável), validados pelo mapeamento das cicatrizes decorrentes de movimentos gravitacionais de massa.

Bueno *et al.* (2011) analisaram a sensibilidade do modelo digital do terreno, da bacia hidrográfica do Rio Sagrado, nas simulações com o programa SINMAP para modelagem das condições geomorfológicas propícias à geração de MGMs. Foram executadas simulações com MDT's de resolução de 5, 10, 20, 30, 50 e 100 metros. Os autores concluíram que a resolução do MDT interfere no mapa de estabilidade,

distribuição da declividade e área de contribuição específica, sendo assim, influenciando no resultado de simulações do modelo SINMAP. Assim, conforme a diminuição da resolução do MDT aumenta a porcentagem de áreas estáveis e diminuem as áreas com indicação de instabilidade pelo modelo.

Em decorrência do desastre ambiental de março de 2011, a Mineropar contratou a empresa Geoplanejamento para executar o mapeamento geológico-geotécnico da porção leste da Serra do Mar do estado do Paraná, em uma área de aproximadamente 1.800 km<sup>2</sup>, incluindo a Bacia do Rio Sagrado, com base em parâmetros morfométricos extraídos de modelo digital do terreno.

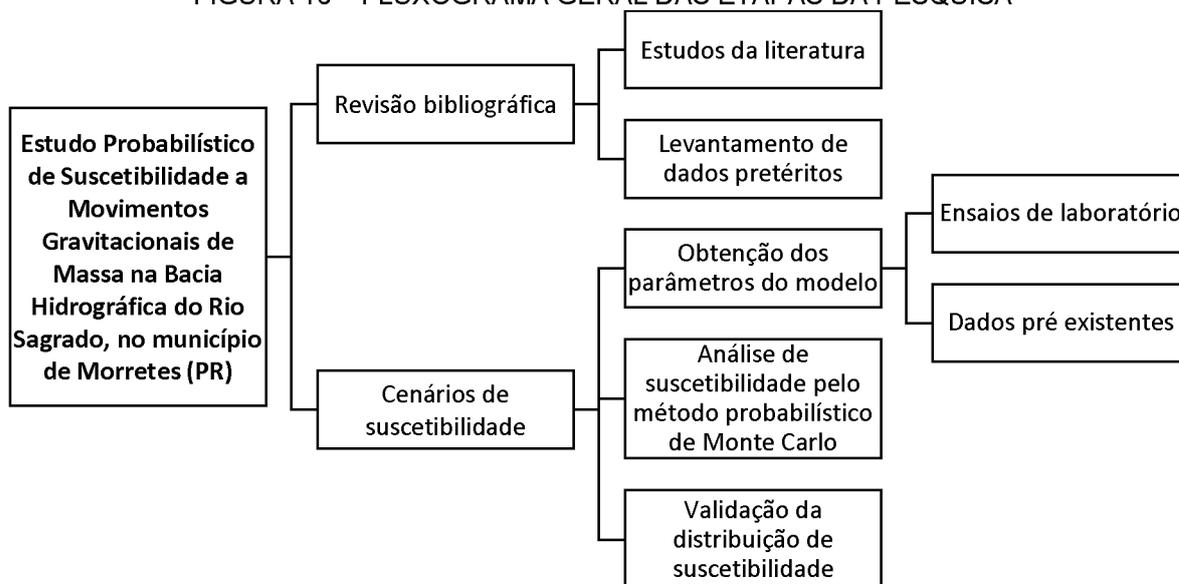
Em 2014, a Mineropar realizou o mapeamento de áreas de riscos associados a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado. Tal trabalho incluiu a análise de fotografias aéreas, atividades de campo para coleta de amostras indeformadas de solo, determinação da permeabilidade *in situ* e ensaios de caracterização do solo. A localização dos pontos de amostragem encontra-se na FIGURA 13 e a tabela resumo dos ensaios geotécnicos encontra-se no Anexo A. Estes dados são utilizados nesta dissertação como fontes relevantes de informação da região.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A distribuição de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa se deu com base no método determinístico de equilíbrio limite de talude infinito apresentado no subitem 2.1.3. Os parâmetros de entrada do modelo utilizado consistem nos parâmetros geotécnicos do solo, espessura da camada de solo, inclinação da vertente e sucção matricial líquida. Cumpre destacar que desconsideraram-se nesta análise as parcelas de pressão do peso da vegetação sobre as vertentes e pressão exercida pelo vento sobre a cobertura vegetal, para fins de simplificação do modelo.

Desconsiderou-se, ainda, a altura da zona de solo saturada pois entende-se o nível d'água não tem influência no fator de segurança nas áreas planas, locais estes onde o nível d'água é aflorante. Já nas áreas com inclinação significativa, com base nos estudos de Victorino (2015) para um trecho da BR 376 localizada na Serra do Mar Paranaense entre os km 646 e km 682 da rodovia, considerou-se que o nível d'água encontra-se em profundidade suficiente para que não atinja a superfície de ruptura adotada neste estudo. As principais etapas que compreendem este trabalho são apresentadas no fluxograma da FIGURA 16.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA GERAL DAS ETAPAS DA PESQUISA



FONTE: a autora (2018).

#### 4.1 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO

Para desenvolvimento desta dissertação, foram coletadas amostras indeformadas e deformadas em 4 pontos da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, em locais que representassem as características gerais da área de estudo. Estas amostras foram utilizadas em campanhas de ensaios composta por ensaios de cisalhamento direto, sucção pelo método do papel filtro, determinação do teor de umidade natural, peso específico natural, densidade relativa dos grãos, composição granulométrica e limites de Atterberg.

Foram coletadas amostras deformadas (DEF), para os ensaios de classificação do solo, e amostras indeformadas (IND) de 40 x 40 x 40 cm<sup>3</sup>, para a determinação dos índices físicos e da resistência ao cisalhamento. A TABELA 3 apresenta as coordenadas, cota altimétrica e profundidade de coleta de cada uma das amostras. A localização espacial dos pontos de coleta pode ser observada na FIGURA 13, apresentada no subitem 3.1.

TABELA 3 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM

Ponto	Data da amostragem	Cota (m)	Coordenadas	Profundidade de coleta (m)	Classificação do solo
01	13/03/2018	156	719.284 E 7.169.649 S	0,90	Tálus
02	14/03/2018	231	720.400 E 7.167.706 S	1,00	Colúvio
03	11/04/2018	407	720.562 E 7.165.072 S	1,25	Colúvio
04	11/04/2018	372	721.777 E 7.166.769 S	1,10	Residual de granito

FONTE: a autora (2018).

Os pontos de coleta foram selecionados a partir da análise dos dados descritos pela Mineropar (2014), buscando-se coletar amostras dos diferentes tipos de solos presentes na bacia hidrográfica, com base no mapa de substrato rochoso e material inconsolidado. A coleta de amostras permitiu readequar o mapa apresentado pela Mineropar (2014) com relação ao limite do maciço granítico, conforme FIGURA 14, apresentada no subitem 3.2.2.

Para a retirada da amostra indeformada, abriu-se um poço até a profundidade aproximada de 1 metro e marcou-se o terreno com o auxílio de uma caixa de madeira. Posteriormente removeu-se o solo externo a essa área, ajustando a caixa ao solo até que o topo da caixa atingiu a cota do topo da amostra. O bloco foi envolvido por

plástico filme e atadura gessada, identificado e cortado próximo à base da caixa, mantendo-se um excesso de solo, a fim de que fosse separado do terreno. A amostra foi colocada dentro de uma caixa de madeira para o transporte até o laboratório, conforme FIGURA 17. As amostras deformadas foram retiradas no mesmo local que as indeformadas a fim de se obter os parâmetros de um mesmo ponto.

FIGURA 17 - PROCEDIMENTO DE COLETA DE AMOSTRA INDEFORMADA



FONTE: a autora (2018).

A caracterização dos solos e o ensaio de cisalhamento direto foram realizados no Laboratório Didático de Solos e no Laboratório de Ensaios Especiais em Solo da UFPR, respectivamente.

O material das amostras deformadas foi utilizado na realização de ensaios para verificações dos teores de umidade natural, densidade relativa dos grãos, índices de consistência e da granulometria dos solos. Já a amostra indeformada foi utilizada no ensaio de cisalhamento direto, peso específico natural, teor de umidade e sucção pelo método do papel filtro.

#### 4.1.1 Caracterização dos solos

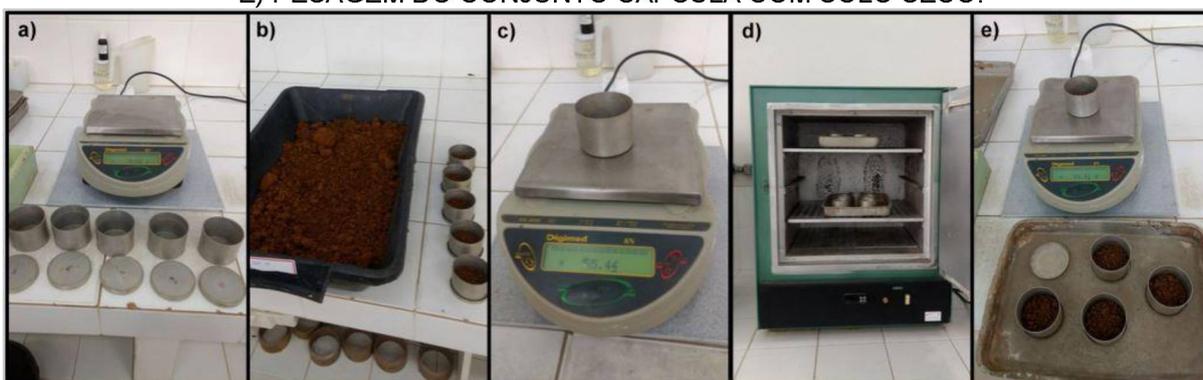
Os índices físicos do solo são grandezas que relacionam os pesos e/ou volumes das partes sólidas e dos vazios presentes no solo. A partir da umidade, peso específico natural e densidade relativa dos grãos é possível determinar diversas grandezas do solo, tal como índice de vazios, porosidade, entre outros. Desta maneira, foram executados em laboratório ensaios para a determinação do teor de umidade, peso específico natural e densidade relativa dos grãos, os métodos utilizados para esta determinação serão apresentados a seguir.

#### 4.1.1.1 Teor de umidade

O teor de umidade consiste na relação entre o peso da água e o peso dos sólidos presentes na amostra de solo. Determinou-se o teor de umidade dos solos em todas as amostras coletadas em campo, deformadas e indeformadas, com base nos procedimentos apresentados no anexo da NBR 6457/2016. O teor de umidade constante na amostra deformada foi determinado após a chegada do solo em laboratório no mesmo dia da coleta. Já o teor de umidade da amostra indeformada foi aferido quando moldaram-se os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto.

Foram realizadas três determinações do teor de umidade por amostra, a fim de se obter a média das determinações. Após devidamente pesadas e identificadas, as amostras foram acondicionadas para secagem em estufa com a temperatura entre 105 °C e 110 °C até a constância da massa. A FIGURA 18 ilustra os procedimentos executados.

FIGURA 18 – TEOR DE UMIDADE: A) PESAGEM DAS CÁPSULAS. B) PREENCHIMENTO DAS CÁPSULAS COM SOLO. C) PESAGEM DAS CÁPSULAS COM SOLO. D) SECAGEM EM ESTUFA. E) PESAGEM DO CONJUNTO CÁPSULA COM SOLO SECO.



FONTE: a autora (2018).

#### 4.1.1.2 Peso específico natural do solo

O peso específico natural do solo consiste na relação entre o peso total da amostra de solo e seu volume total. Assim, os pesos específicos dos solos foram determinados, a partir das 4 amostras indeformadas, durante a realização dos procedimentos de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto. Os volumes dos corpos de prova foram definidos baseados nas dimensões dos moldes metálicos, que foram pesados, permitindo o cálculo do peso específico, conforme FIGURA 19.

FIGURA 19 – PESO ESPECÍFICO DO SOLO: A) PESAGEM E B) MEDIÇÃO DO MOLDE METÁLICO. C) MOLDAGEM E D) PESAGEM DO CORPO DE PROVAS.



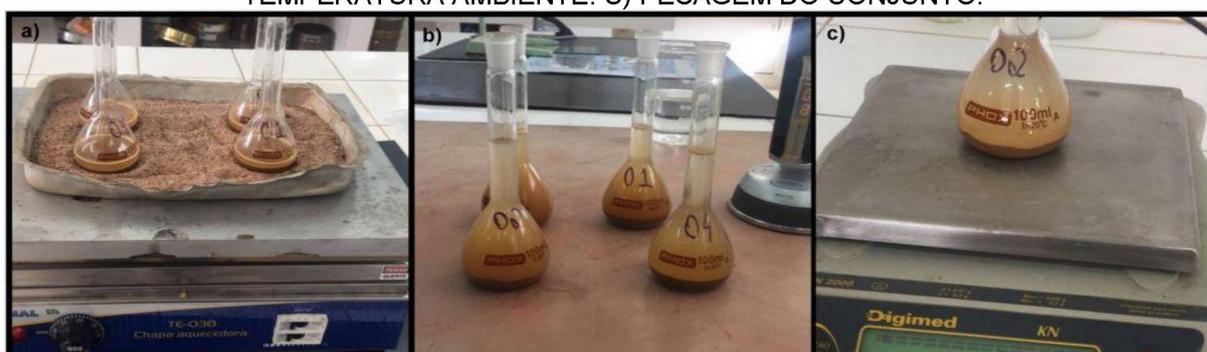
FONTE: a autora (2018).

Admitiram-se que as amostras retiradas em campo eram indeformadas e mantinham as características naturais do solo. Assim sendo, considerou-se que o peso específico encontrado correspondia ao peso específico natural do solo.

#### 4.1.1.3 Densidade relativa dos grãos

A densidade relativa dos grãos é dada pela relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume. Deste modo, foram realizados dois ensaios para cada amostra deformada a fim de determinar a densidade relativa dos grãos, sendo que o valor final desta grandeza foi alcançado pela média dos valores obtidos. O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da norma DNER-ME 093/94. O valor encontrado para cada determinação foi posteriormente corrigido através da razão entre a densidade relativa da água à temperatura  $t$  e a densidade relativa da água a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presente nesta norma. A FIGURA 20 ilustra alguns procedimentos do ensaio.

FIGURA 20 - DENSIDADE DOS GRÃOS: A) AQUECIMENTO DO CONJUNTO. B) RESFRIANDO EM TEMPERATURA AMBIENTE. C) PESAGEM DO CONJUNTO.



FONTE: a autora (2018).

#### 4.1.1.4 Composição granulométrica

As análises granulométricas foram executadas de acordo com os procedimentos da NBR 7181/1984 em todas as amostras deformadas. Esta análise consistiu na determinação da porcentagem de partículas constituintes do solo que se encaixavam em determinados limites de dimensão (abertura das peneiras e diâmetros equivalentes). A porcentagem da fração grossa do solo foi determinada pelo método do peneiramento, enquanto que a fração fina foi determinada pelo método da sedimentação, conforme FIGURA 21. A fração da amostra submetida a sedimentação permaneceu imersa em 125 cm<sup>3</sup> de solução defloculante por aproximadamente 60 horas antes de iniciarem-se as leituras do densímetro no meio dispersor e as respectivas temperaturas da solução. Posteriormente, verteu-se a solução na peneira com abertura de 0,075 mm e efetuou-se o peneiramento fino com o material resultante da sedimentação, seco em estufa até a constância da massa. Determinou-se o percentual de grãos de cada tipo de solo com base na faixa de tamanho de grãos adotada na NBR 6502/1995.

FIGURA 21 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: A) PENEIRAMENTO GROSSO. B) SEDIMENTAÇÃO.



FONTE: a autora (2018).

Com base nos resultados da caracterização física, classificaram-se os solos estudados utilizando-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos que considera, além da granulometria, os índices de consistência como elementos qualificadores. Para fins de comparação os solos foram classificados, também, através do sistema

HBR (*Highway Research Board*) que se baseia na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade dos solos.

#### 4.1.1.5 Limites de Atterberg

A plasticidade do solo está diretamente ligada ao comportamento da fração fina do solo e pode ser determinada a partir dos limites de consistência. O material das quatro amostras deformadas foi previamente seco ao ar e passado na peneira com abertura de 0,42 mm para realização dos ensaios.

A determinação do limite de liquidez seguiu os procedimentos da NBR 6459/2016, que prevê a utilização do aparelho de Casagrande e considera o limite de plasticidade como o teor de umidade necessário para que as bordas da ranhura se unissem 13 mm ao longo do comprimento. Utilizou-se para a determinação deste limite o aparelho Casagrande elétrico, com contador de golpes, da marca Viatest.

O limite de plasticidade corresponde à umidade necessária para o solo passar do estado semissólido para o estado plástico. A determinação do limite de plasticidade seguiu os procedimentos da NBR 7180/2016 que prevê a utilização de uma tábua dessecadora a fim de obter-se um cilindro de solo com diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm. O limite de plasticidade foi dado pela média de, no mínimo, três determinações de umidade obtidas quando o cilindro fragmentou com as dimensões indicadas.

A diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade corresponde ao índice de plasticidade do solo. Os resultados finais destes ensaios foram expressos em porcentagens. A FIGURA 22 ilustra os ensaios realizados para determinação dos limites de Atterberg.

Segundo Pinto (2006), os limites de Atterberg indicam a influência da fração de argila no comportamento do solo. Quando deseja-se avaliar a atividade da fração argilosa, deve-se comparar os índices de Atterberg com a fração de argila presente. Utiliza-se a Equação 11 para a determinação da atividade das argilas.

FIGURA 22 - LIMITES DE ATTERBERG. A) LIMITE DE PLASTICIDADE; B) LIMITE DE LIQUIDEZ



FONTE: a autora (2018).

$$IA = \frac{IP}{\text{fração de argila (\%)}} \quad (9)$$

Onde:

IA – índice de atividade da argila;

IP – índice de plasticidade.

Quando o índice é menor que 0,75, considera-se a argila como inativa; entre 0,75 e 1,25, considera-se influência normal; e, acima de 1,25 ela é considerada ativa (PINTO, 2006).

#### 4.1.2 Sucção pelo método do papel filtro

Segundo Marinho *et al.* (2015), esta técnica quantifica indiretamente a sucção matricial e/ou total do solo através da utilização de papeis filtro. Isso porque, quando um solo entra em contato com um material poroso capaz de absorver água, esta passará do solo para o papel até que se alcance o equilíbrio. Assim, mede-se a sucção matricial quando o fluxo ocorre por capilaridade por meio do contato direto através das partículas do solo e o papel, visto que apenas tensões capilares são vencidas nesse processo.

Os ensaios realizados seguiram os procedimentos previstos na norma ASTM D5298: *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper* (2003) que prevê os seguintes procedimentos:

1. Moldaram-se as amostras de solo em anéis metálicos circulares (diâmetro aproximado de 4,8 cm e altura de 2 cm), sendo que cada amostra apresentava diferentes teores de umidade entre si;
2. Colocou-se o papel filtro Whatman 42 diretamente sobre a superfície da amostra. Salienta-se que o tamanho do papel deve ser o maior possível de modo a maximizar a precisão das medições de umidade do papel;
3. Embrulharam-se os conjuntos solo-papel filtro em filme de PVC, seguidos de filme de alumínio, a fim de se evitar variação no teor de umidade;
4. Armazenaram-se as amostras em uma caixa de isopor hermeticamente fechada e armazenada em câmara seca (aprox. 19°C) até que se atingisse o tempo de equilíbrio para as medições de sucção matricial, ou seja, 7 dias, independentemente do nível de sucção a ser medido;
5. Após o tempo de equilíbrio, pesou-se o papel filtro em balança com resolução de 0,0001g (transferido em menos de 4 segundos para o plástico hermeticamente fechado) e a amostra de solo com o anel;
6. Colocou-se o papel filtro e a mostra em estufa (aprox. 105°C) por 24 horas;
7. Após esse período, pesou-se novamente o papel filtro (transferido rapidamente para plástico hermeticamente fechado, com a sua respectiva tara previamente determinada) e o conjunto solo+anel para aferição da umidade gravimétrica;
8. Tomaram-se as dimensões específicas de cada anel para aferição da umidade volumétrica;
9. Obteve-se a sucção a partir da umidade gravimétrica do papel filtro por meio da relação de calibração estabelecida por Chandler *et al.* (1992 apud Marinho *et al.*, 2015):

$$\begin{aligned}
 \text{Para } w_{\text{papel}} \leq 47\%, \quad \text{Sucção [kPa]} &= 10^{4,84-0,06222w} [\%] \\
 \text{Para } w_{\text{papel}} > 47\%, \quad \text{Sucção [kPa]} &= 10^{6,05-2,48 \log(w)} [\%]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Executou-se o ensaio para 20 amostras de cada um dos quatro tipos de solo, totalizando 80 amostras. Contudo, somente 70 destas amostras puderam ser utilizadas para a obtenção da curva de retenção, pois foram descartadas as amostras com papéis filtros demasiadamente contaminados com partículas de solo. Devido à quantidade relativamente baixa de pontos, optou-se por elaborar somente uma curva de retenção os solos sedimentares e uma para os solos residuais da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado. Assim, utilizou-se o *software* LABFIT para o ajuste de curva de retenção por meio de regressão não-linear.

#### 4.1.3 Parâmetros de resistência

O ensaio de cisalhamento direto consiste na aplicação de uma tensão normal em um plano, medindo-se a respectiva tensão cisalhante na ruptura. Assim, determina-se a envoltória de Mohr-Coulomb para solo ensaiado, a partir de pontos de tensão normal e cisalhante obtidos do ensaio. Os ensaios realizados seguiram os procedimentos previstos na norma BS 1377 – Part 7: *Shear strength tests (total stress)* (1990) do *British Standard Institution*, utilizando uma prensa de cisalhamento da marca Solotest, conforme FIGURA 23.

FIGURA 23 - PRENSA DE CISALHAMENTO DIRETO SOLOTEST



FONTE: a autora (2018).

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em duas etapas, na primeira etapa buscou-se determinar os parâmetros de resistência de pico das amostras

indeformadas de solo, através de procedimento padrão de ensaio. Na segunda etapa buscou-se determinar os parâmetros de resistência residual, através do método da interface lisa (KANJI, 1997 *apud* GONZÁLEZ, 2017). Em ambas as etapas, os ensaios foram realizados com amostras moldadas a partir dos blocos indeformados em moldes metálicos de 10 x 10 x 2 cm, conforme FIGURA 24.

FIGURA 24 - MOLDAGEM DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.



FONTE: a autora (2018).

O procedimento padrão de ensaio consistiu na colocação do corpo de prova do solo em uma caixa de cisalhamento, com sua metade superior dentro de um anel rígido. Acima e abaixo da amostra, existem duas pedras porosas que permitem o fluxo de água no corpo de prova. A FIGURA 25 ilustra os procedimentos para montagem do corpo de prova na caixa bipartida.

FIGURA 25 - MONTAGEM CÉLULA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE PICO



FONTE: a autora (2018).

O procedimento para determinação dos parâmetros de resistência residual consistiu na colocação de uma peça metálica com dimensões de 10 cm de lado e 15 cm de altura, com superfície lisa abaixo da amostra, conforme recomendado por Kanji (1997 *apud* GONZÁLEZ, 2017). A FIGURA 26 ilustra os procedimentos para montagem do corpo de prova na caixa bipartida.

FIGURA 26 - MONTAGEM DA CÉLULA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO RESIDUAL



FONTE: a autora (2018).

Foram executados três ensaios de cisalhamento direto, para cada uma das etapas, com tensões normais de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. As amostras de solo encontravam-se com o teor de umidade natural quando foram inundadas no início da fase de adensamento do corpo de prova. As amostras foram adensadas por um período mínimo de 24 horas sob a tensão normal a fim de eliminar os efeitos da poropressão sobre a amostra.

Posteriormente efetuou-se o cisalhamento dos corpos de prova com velocidade de 0,18 mm/min para as amostras 01 e 04 e de 0,19 mm/min para as amostras 02 e 03. As velocidades de cisalhamento foram determinadas a partir da norma ASTM D3080 (2011) com base no método de Taylor, para a maior tensão normal aplicada na amostra. Os corpos de prova foram submetidos ao cisalhamento até 12 mm de deslocamento horizontal, valor superior aos 10% do deslocamento lateral relativo especificado na norma da ASTM.

#### 4.1.4 Espessura da camada de solo e modelo de declividade

As espessuras das profundidades das superfícies de ruptura nos MGMs presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado foram estimadas a partir de sobrevoo de helicóptero realizado em 29 de agosto de 2017. As cicatrizes de MGMs visíveis foram fotografadas (Câmera FujiFilm, modelo FinePix S4500 com 14 megapixels), georreferenciadas (GPS Garmin, modelo Montana 650) e descritas a fim de integrar o banco de dados pré-existente.

O mapa de declividade da Bacia do Rio Sagrado foi elaborado a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo, fornecido pelo ITCG e obtido através de levantamento por radar efetuado pela empresa Bradar Indústria S.A. em 2015. Este levantamento objetivou a elaboração de ortoimagens, modelos e feições cartográficas em áreas susceptíveis a desastres na região litorânea paranaense, para uma área de 2.134,56 km<sup>2</sup>, na escala de 1:10.000, utilizando de dados interferométricos de radar de abertura sintética aerotransportado operando nas bandas X e P. Para isso, utilizou-se um radar instalado em uma plataforma aerotransportada (avião) para a produção de imagens SAR (*Syntetic Aperture Radar*) através da emissão e captação de radiação refletida. Assim, o avião segue uma direção de voo e o sinal é emitido na direção perpendicular, em intervalos regulares de tempo (BRADAR, 2015). A Bradar S.A. trabalha com duas frequências de ondas diferentes: Banda X (comprimento de onda menor) e Banda P (comprimento de onda maior). Os sinais de banda X são refletidos na altura da copa das arvores, gerando o Modelo Digital de Elevação, enquanto a banda P possui sinal de maior poder de penetração podendo chegar ao nível do solo gerando o MDT. Uma vantagem deste método é que se trata de sensor ativo, ou seja, ele próprio gera a sua fonte de radiação, característica que possibilita ao radar realizar imagens durante a noite. Além disso, a presença de nuvens nesta faixa de comprimento de onda não influencia o imageamento.

O Modelo Digital do Terreno utilizado neste trabalho possui uma resolução espacial de 2,5 metros e resolução radiométrica de 32 bits. Os rasters recebidos consistiam em pequenas áreas de um mosaico que precisaram ser reunidas a fim de obter-se um único raster do MDT da região litorânea do estado do Paraná. Após a junção das imagens, efetuou-se o corte das mesmas com base na área da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado. Utilizou-se a ferramenta “*slope*” para geração do raster

de declividade em graus e posteriormente utilizou-se o comando “*raster calculator*” a fim de obter-se o raster final de declividade em radianos.

Utilizou-se as classes de declividade presentes no

QUADRO 4 para classificar o mapa de declividades (após a conversão das unidades de percentual para radianos) a fim de verificar a influência da declividade na distribuição de suscetibilidade.

QUADRO 4 - CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO

Classe de relevo	Declividade (%)
Plano	0 – 3
Suave ondulado	3 – 8
Ondulado	8 – 20
Forte ondulado	20 – 45
Montanhoso	45 – 75
Escarpado	> 75

FONTE: EMBRAPA (2006).

## 4.2 ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE

A distribuição de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa se deu a partir de um algoritmo desenvolvido em Python pelo Grupo de Pesquisa Geotecnia e Materiais Ambientais da UFPR e inserido em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Este algoritmo gera os arquivos necessários para o cálculo do fator de segurança a estabilidade de encostas com base no método determinístico de equilíbrio limite de talude infinito apresentado no subitem 2.1.3. Os arquivos gerados são guardados num *File Geodatabase (\*.gdb)* do ArcGis e a partir deste \*.gdb inicia-se o cálculo da probabilidade de ocorrência de áreas instáveis a partir dos cenários gerados através das simulações de Monte Carlo. Os parâmetros de entrada variáveis, utilizados para geração dos cenários, são estimados a partir de através de números aleatórios dentro da faixa de valores pré-estabelecida. Sendo que os parâmetros de entrada são independentes, ou seja, que o valor de um parâmetro não influencia no valor assumido para o outro.

Para obter-se a distribuição de suscetibilidade através de Monte Carlo são necessárias várias iterações, que conduzem ao êxito dentro de um nível específico de confiança, ou seja, quanto mais iterações, mais acurada será a solução. Neste trabalho o número de iterações foi baseado em uma análise de sensibilidade do raster de saída, visto que é inviável realizar o número de iterações dado pela Equação 10 para um grau de confiança de 95% com pelo menos três variáveis aleatórias.

O algoritmo desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa Geotecnia e Materiais Ambientais da UFPR é dividido em três etapas, sendo elas: criação de rasters a partir dos parâmetros iniciais, ou seja, a partir do raster de declividade é inserido um valor único para os parâmetros que compreende toda a área estudada; variação dos parâmetros de entrada e cálculo do fator de segurança, gera os parâmetros variáveis e calcula os cenários de estabilidade com estes valores; cálculo da probabilidade de ruptura das encostas.

O algoritmo desenvolvido pelo grupo de estudos foi alterado neste trabalho a fim de permitir a inserção de diferentes parâmetros de entrada para a área de estudo com base no mapa de solos, ou seja, deixou-se de ter um único valor para toda a área e considerou-se a distribuição dos solos para determinação dos valores mais apropriados. A metodologia de análise probabilística proposta nesta dissertação pode ser dividida nas etapas a seguir:

**Criação de raster a partir dos parâmetros iniciais:** a média dos valores dos parâmetros de pesos específicos, coesão e ângulo de atrito obtidos para uma determinada coordenada dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado através de ensaios de laboratório foram espacializados através de uma simplificação do mapa de substrato rochoso e material inconsolidado apresentado FIGURA 14. Tal mapa foi modificado para apresentar somente três tipos de solo, a fim de obter-se parâmetros de entrada mais significativos e facilitar o processamento do modelo. Os solos foram classificados de acordo com a sua origem em sedimentar ou residual, porém o grupo de solos residuais foi subdividido com base na rocha mãe devido a diferença significativa nas propriedades dos solos resultantes. Deste modo obteve-se a seguinte divisão: solo sedimentar, solo residual de granito e solo residual de diabásio. Para definição dos parâmetros no solo residual de diabásio, onde não houve coleta de amostras, basearam-se os parâmetros em dados da literatura. A FIGURA 27 apresenta o mapa utilizado para espacialização dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito e pesos específicos.

O valor do parâmetro de sucção foi determinado a partir da média de dados presentes na literatura para um tensiômetro instalado a 3 metros de profundidade, no Morro do Boi em Balneário Camboriú – SC, para um solo residual apresenta na mesma formação que a Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, ou seja, na Serra do Mar (KORMANN e SESTREM, 2013; KORMANN, SESTREM e PRETTO, 2013; KORMANN *et al.*, 2014; SESTREM *et al.*, 2015; SESTREM, KORMANN e MARINHO,

2016; GONZÁLEZ, PASSINI e KORMANN, 2017). Tal simplificação foi adotada pois representa a situação da sucção matricial *in loco*, fornecendo assim parâmetros mais precisos.

Utilizaram-se valores fixos de profundidade do solo, peso específico da água e sucção para todos os solos presentes na bacia hidrográfica. Estes rasters foram gerados pelo algoritmo com base no raster de declividade (radianos) inserido no início do modelo.

**Variação dos parâmetros de entrada e cálculo do fator de segurança:** as faixas de variação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito foram dadas a partir de análise estatística dos dados obtidos em laboratório, dados pré-existentes dos solos da bacia hidrográfica e dados de literatura de solos semelhantes através da média. Obtiveram-se os desvios padrões para cada uma das classes de solo consideradas, posteriormente verificou-se a quantidade de pixels presentes em cada uma das classes e efetuou-se uma ponderada dos desvios padrões a fim de obter-se uma única faixa de variação para todos os solos.

A faixa de variação do parâmetro de sucção foi determinada a partir dos estudos desenvolvidos no Morro do Boi em Balneário Camboriú – SC, para o tensiômetro n°4 e validados pela curva de retenção obtida para as amostras da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado. A FIGURA 28 ilustra a variação da sucção ao longo do tempo onde podemos observar os valores referentes ao tensiômetro n° 4.

Doravante a definição da faixa de variação de cada um dos parâmetros de entrada, o *software* calculou o fator de segurança (Equação 1) para cada pixel a partir de variáveis aleatórias dentro da faixa de valores pré estabelecida. Quando o fator de segurança do pixel foi menor que 1 somou-se 1, quando o valor do fator de segurança foi maior ou igual a 1 somou-se 0, ou seja, fatores de segurança considerados estáveis não compuseram o somatório para a determinação da probabilidade de ruptura. Repetiu-se o processo até obter-se o número de iterações estabelecido.

**Probabilidade de ruptura:** ao final das iterações, cada pixel apresentou uma probabilidade de ruptura dada por:

$$P = \frac{n_i}{n} \quad (11)$$

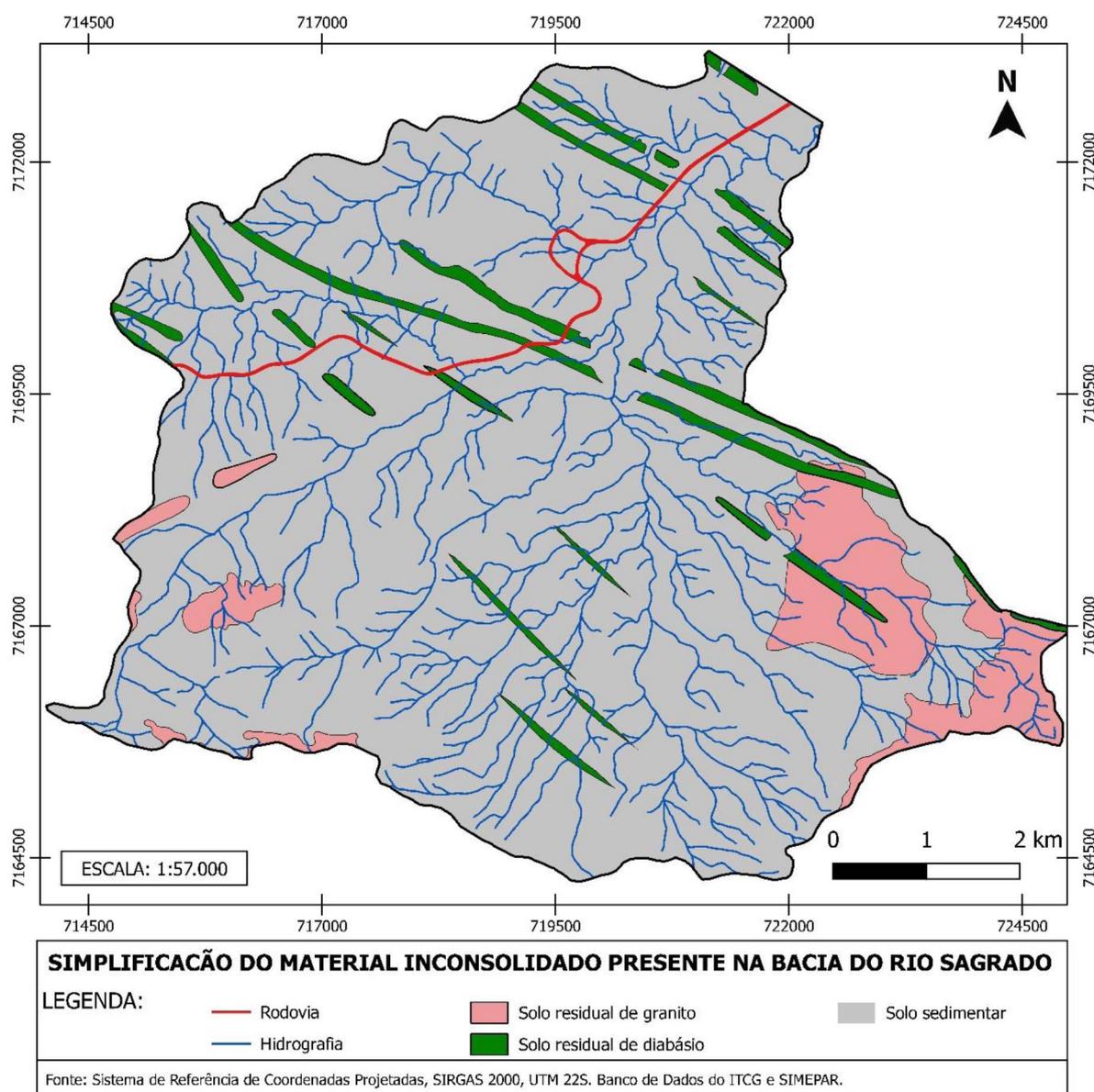
Onde:

P – probabilidade de ruptura;

$n_i$  – probabilidade de ocorrer o evento, ou seja, soma do número fatores de segurança instáveis;

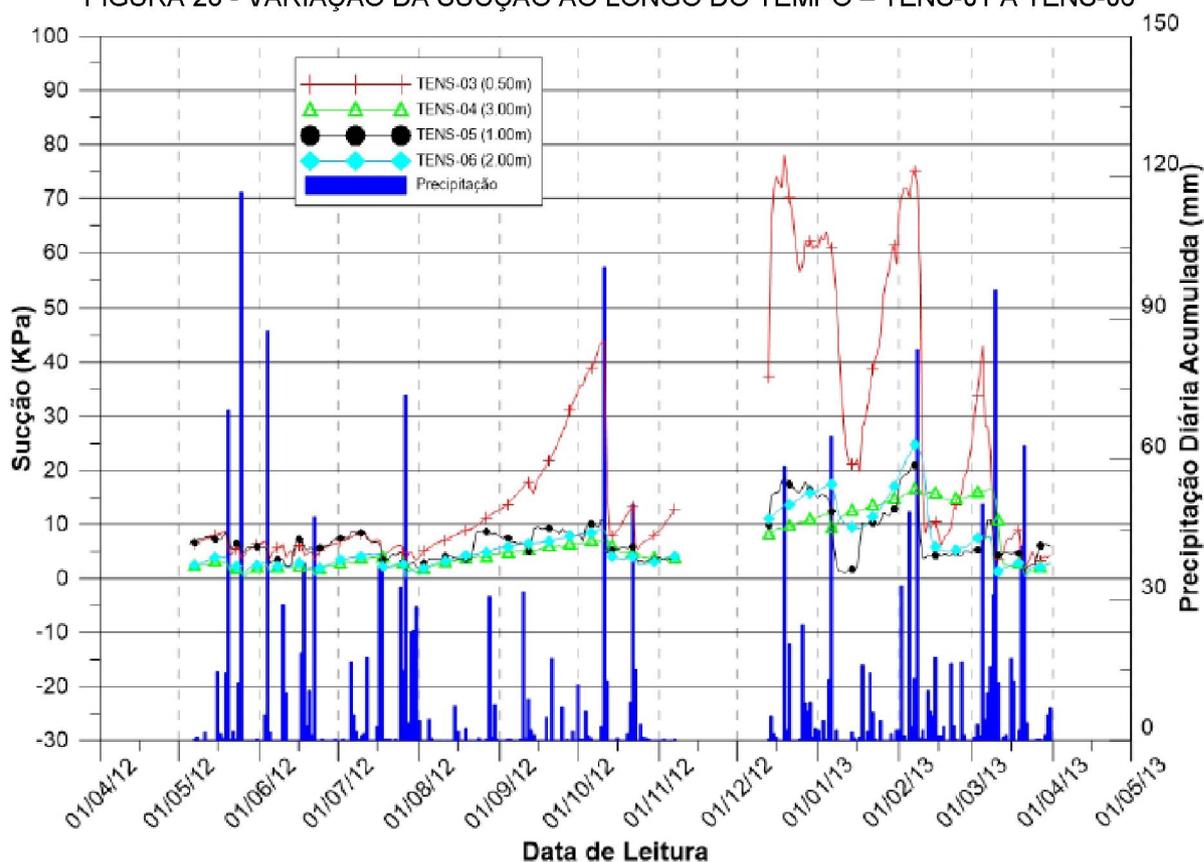
$n$  – número de elementos do evento, ou seja, número de iterações.

FIGURA 27 - MAPA SIMPLIFICADO DO MATERIAL INCONSOLIDADO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 28 - VARIAÇÃO DA SUCÇÃO AO LONGO DO TEMPO – TENS-01 A TENS-06



FONTE: Kormann, Sestrem e Pretto (2013).

O resultado da simulação consistiu em um raster de probabilidades à ruptura que foi classificado de acordo com o QUADRO 5 a fim de obter-se a carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.

QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A PARTIR DO NÍVEL DE CONFIABILIDADE

Probabilidade de desempenho insatisfatório	Grau de suscetibilidade
0 – 0,000003	Nulo
0,000003 – 0,00003	Baixíssimo
0,00003 – 0,001	Muito baixo
0,001 – 0,006	Baixo
0,006 – 0,023	Moderado
0,023 – 0,07	Alto
0,07 – 0,16	Muito alto
0,16 – 1,0	Altíssimo

Nota: A probabilidade de desempenho insatisfatório é a probabilidade de que o valor da função de desempenho se aproxime do estado limite ou que um evento insatisfatório ocorrerá.

FONTE: adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (1997).

Foram geradas duas cartas de suscetibilidade, pois considerou-se os cenários de solo saturado e não saturado. Para a criação da carta de suscetibilidade com solo saturado utilizou-se como parâmetros de entrada a coesão, ângulo de atrito interno,

peso específico saturado, espessura do solo e inclinação da vertente. Enquanto que para a carta de suscetibilidade com solo não saturado utilizou-se como parâmetros de entrada a coesão, ângulo de atrito interno, peso específico natural, espessura da camada de solo, inclinação da vertente e sucção matricial líquida. Estes parâmetros foram classificados em parâmetros fixos e parâmetros variáveis. Optou-se por utilizar variáveis aleatórias quando os dados eram escassos ou ausentes, baseadas na função de distribuição normal (Gauss). Assim, definiram-se como parâmetros variáveis a coesão, ângulo de atrito e sucção e parâmetros fixos a inclinação das vertentes, espessura da camada de solo e peso específico do solo, visto que os parâmetros de resistência e sucção matricial obtidos em laboratório são afetados pela variabilidade espacial.

#### 4.2.1 Validação da distribuição probabilística de suscetibilidade

A validação da distribuição de suscetibilidade resultante das iterações obtidas a partir do método probabilístico de Monte Carlo foi executada a partir de registros de movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.

Os registros de MGM utilizados foram obtidos a partir do banco de dados da Mineropar e de visitas *in loco*. Os dados fornecidos pela Mineropar são resultado do mapeamento de áreas de risco associado a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado elaborado em 2014 e do mapeamento geológico-geotécnico da porção leste da Serra do Mar elaborado pela empresa Geoplanejamento em 2011.

Efetuararam-se diversas visitas a campo com o intuito de visualizar cicatrizes de movimentos gravitacionais de massa. Inicialmente, as visitas foram executadas por meio terrestre, contudo, devido à variação altimétrica da bacia e à vegetação, não foi possível localizar as mesmas. Posteriormente, realizou-se um voo com um drone DJI Phantom 4 Pro com câmera de 20 megapixels onde foi possível registrar fotograficamente alguns MGMs constantes no banco de dados disponibilizados porém, diversos deles já haviam sido recobertos por vegetação, impossibilitando a visualização. Finalmente, em 29 de agosto de 2017 a defesa civil estadual disponibilizou um helicóptero para realização de um sobrevoo sobre a Bacia do Rio Sagrado.

Os dados fornecidos pela Mineropar referentes ao mapeamento executado em 2014 foram obtidos através da mesma metodologia de sobrevoo de helicóptero sobre a bacia hidrográfica em questão.

Já os polígonos referentes aos movimentos gravitacionais de massa obtidos pela empresa Geoplanejamento foram identificados e digitalizados através de imagem de satélite WordView1 e Rapideye no *software* ArcGIS versões 9.3 e 10 (ESRI, 2010). O tratamento das imagens de satélite foi realizado no *software* Envi 4.8, onde executou-se a ortorretificação, correção geométrica e aplicação de realce para melhor caracterização das ocorrências. Os polígonos resultantes foram categorizados em depósitos e movimentos gravitacionais de massa.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados desta dissertação, que inclui os ensaios de caracterização e cisalhamento direto das amostras coletadas na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, bem como as cartas de suscetibilidade para a condição de solo saturado e não saturado.

### 5.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios realizados correspondem a caracterização do solo, sucção pelo método do papel filtro e a determinação dos parâmetros de resistência.

#### 5.1.1 Caracterização

Os resultados foram validados com base nos resultados obtidos pela Mineropar em pontos próximos (conforme FIGURA 13). Assim os dados do tálus, colúvio 1, colúvio 2 e residual de granito foram comparados aos pontos AM 16, AM 04, AM 05 e AM 18 (Anexo A), respectivamente.

##### 5.1.1.1 Índices físicos

A TABELA 4 apresenta os resultados obtidos para os índices de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade), densidade relativa dos grãos e teor de umidade natural.

TABELA 4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Amostra	Teor de umidade (%) <sup>(1)</sup>	Densidade relativa dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)			Índice de atividade
			Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	
TÁLUS	49,51	2,830	83	66	17	0,24
COLÚVIO 1	49,93	2,696	66	48	18	0,40
COLÚVIO 2	38,14	2,684	54	44	10	0,35
RESIDUAL DE GRANITO	34,15	2,558	84	55	29	0,48

<sup>(1)</sup> Umidade natural obtida após a chegada do solo em laboratório no mesmo dia da coleta.

FONTE: a autora (2018).

Os limites de liquidez variaram de 54,22% a 84,21%. O maior valor de limite de liquidez foi observado na amostra residual de granito que apresentou também maior valor de índice de plasticidade (29,17%). A amostra colúvio 2 apresentou o menor valor de limite de liquidez (54,22%) e de índice de plasticidade (10,17%), este último sendo o principal responsável pela classificação deste solo siltoso de acordo com a AASHTO.

Ao comparar-se os resultados não observou-se variação discrepante no teor de umidade das amostras, excetuando-se a amostra colúvio 1, contudo vale salientar que havia chovido no dia em que amostra foi coletada, o que pode explicar tal variação. A densidade relativa dos grãos apresentou pouca variação se comparada aos valor obtido pela Mineropar (2014), contudo os valores de limites de liquidez e plasticidade obtidos em laboratório foram maiores que os obtidos em 2014, provavelmente devido à dificuldade na precisão das medidas de água e solo e o manuseio do aparelho de Casagrande. Além disso, as dispersões encontradas nos resultados obtidos em laboratório e os dados da Mineropar (2014) podem ter ocorrido devido à variação espacial dos parâmetros geotécnicos, bem como a diferença na profundidade de coleta das amostras. De acordo com a classificação da atividade das argilas apresentada no subitem 4.1.1.5, todas as amostras apresentam argilas inativas.

#### 5.1.1.2 Análise granulométrica

A TABELA 5 apresenta os dados do ensaio de caracterização granulométrica.

TABELA 5 - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO COM AS FRAÇÕES DOS SOLOS ENQUADRADAS SEGUNDO A ESCALA DA ABNT

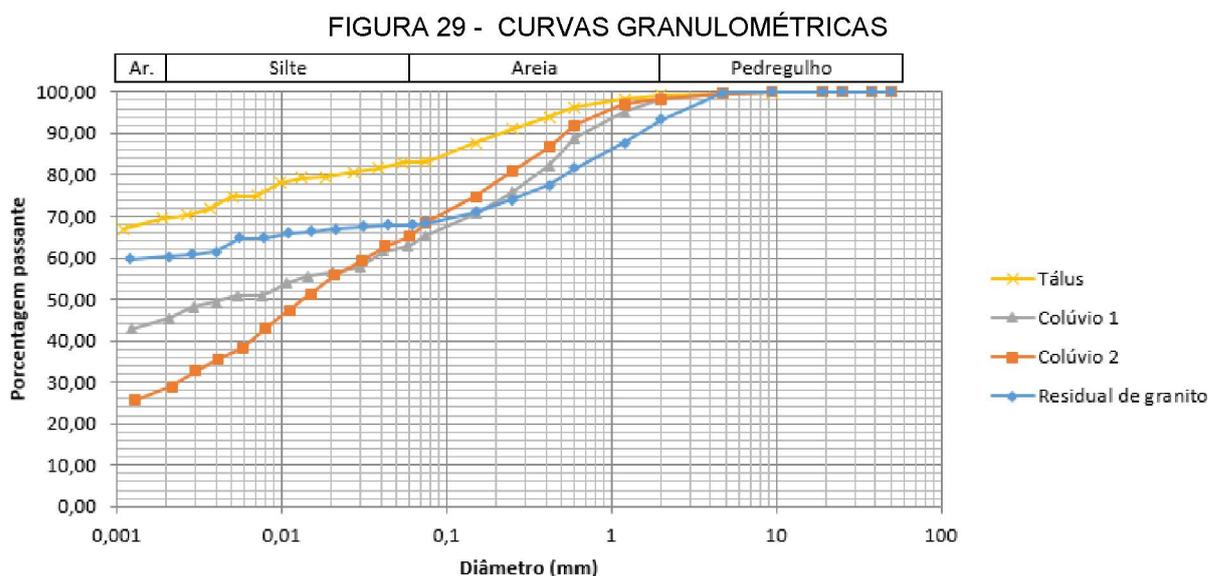
Amostra		Tálus	Colúvio 1	Colúvio 2	Residual de granito
Composição granulométrica (%)	Argila	69,92	45,06	28,39	60,78
	Silte	13,14	18,10	36,80	7,16
	Areia	16,28	35,21	33,06	25,35
	Pedregulho	0,66	1,63	1,75	6,71

FONTE: a autora (2018).

Os resultados da análise granulométrica das amostras dos solos tálus, colúvio 1 e residual de granito mostraram uma predominância da fração de argila, seguida de areia e silte. A amostra colúvio 2 apresenta predominância da fração de silte, seguida

de areia e por uma menor quantidade de argila. Sendo que somente a amostra 04 apresentou quantidade significativa de pedregulho.

Os solos da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado apresentaram granulometria predominantemente fina, com mais de 50% dos grãos passando na peneira nº 200, como pode ser observado na FIGURA 29 que apresenta os resultados dos ensaios de granulometria em conjunto, para todas as amostras ensaiadas.



Ar. - Argila

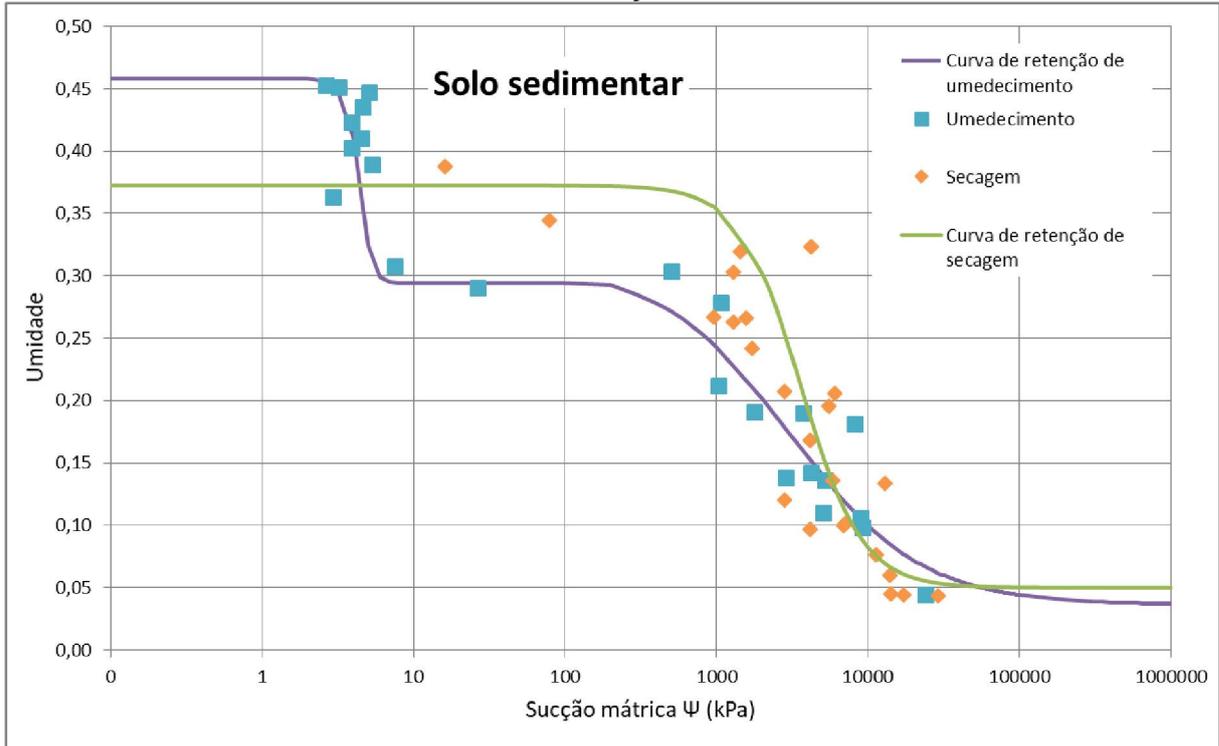
FONTE: a autora (2018).

Segundo a Classificação Unificada (SUCS), os solos da Bacia do Rio Sagrado são classificados no grupo MH como silte elástico. Contudo, de acordo com a HBR (*Highway Research Board*) somente a amostra 03 encontra-se na classificação de solo siltoso, sendo as demais classificadas como solo argiloso.

### 5.1.2 Sucção pelo método do papel filtro

As curvas de retenção para as amostras de solo sedimentar da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado obtida por meio do ensaio de papel filtro são apresentadas na FIGURA 30, onde pode-se observar o efeito da histerese, fenômeno apresentado pelo solo cujas propriedades dependem de sua história precedente de umedecimento e secagem. Observa-se que a curva de retenção obtida com amostras umedecidas apresenta distribuição bimodal dos poros, enquanto que a curva de retenção obtida com amostras secas apresentou uma distribuição uni-modal. Deste modo utilizou-se o *software* LABFIT para sua adequação das curvas.

FIGURA 30 - CURVA DE RETENÇÃO DO SOLO SEDIMENTAR



FONTE: a autora (2018).

Assim, a curva de retenção de umedecimento é definida matematicamente por duas equações, divididas nos intervalos de patamares de sucção de 0 a 100 kPa e maior que 100 kPa, sendo os parâmetros de ajuste obtidos com o auxílio do *software* LAB Fit, desenvolvido por Silva *et al.* (2004).

Na primeira parte (0 a 100 kPa), tem-se a Equação 12:

$$Y = \frac{1}{6,1 + 8,70 \times 10^{-7} X^{10,7}} + 0,294 \quad (12)$$

Na segunda parte (>100 kPa), tem-se a Equação 13:

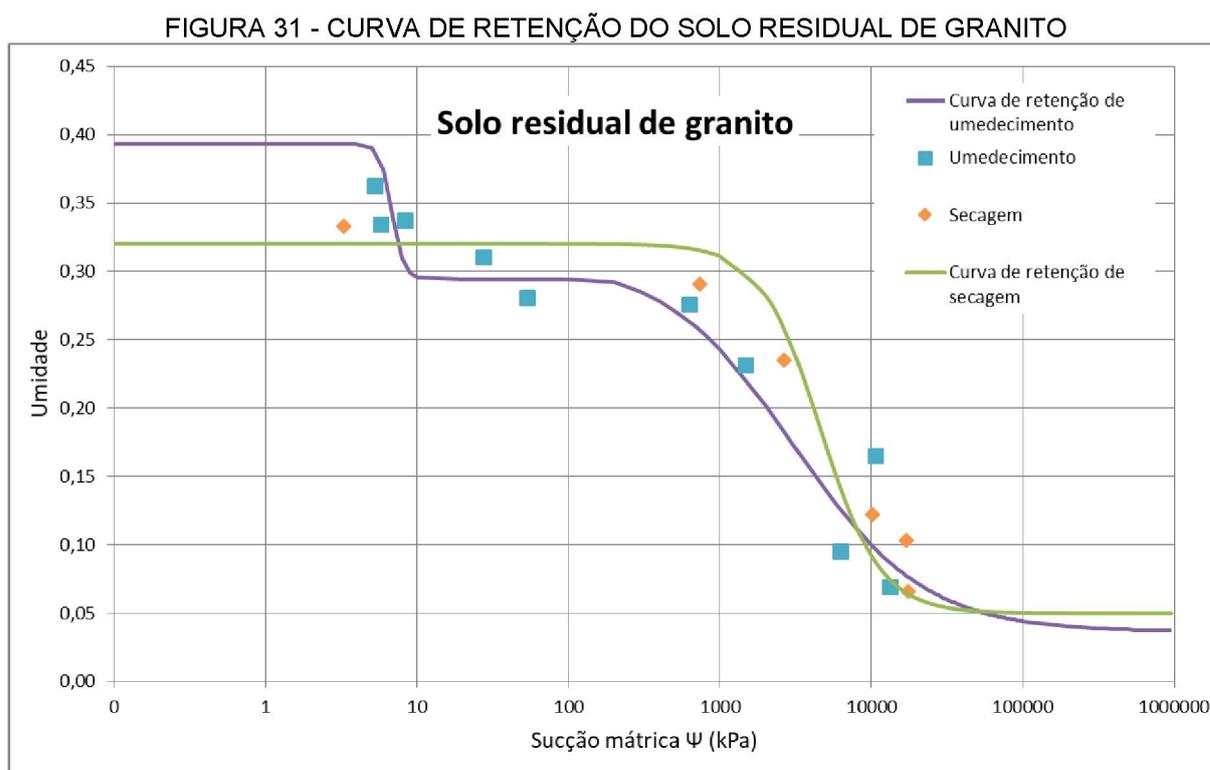
$$Y = \frac{1}{3,68 + 1,05 \times 10^{-3} X^{1,02}} + 0,036 \quad (13)$$

Já a curva de retenção de secagem é definida matematicamente pela Equação 14:

$$Y = \frac{1}{3,1 + 7 \times 10^{-8} X^{2,15}} + 0,05 \quad (14)$$

Assim, substituindo-se o valor médio de umidade das amostras de solo sedimentar na Equação 12, têm-se uma sucção na ordem de 3 kPa. Ao substituir esta umidade na Equação 14, têm-se uma inconsistência visto que os pontos resultantes deste ensaio não atingiram o valor de umidade de campo.

A curva de retenção para as amostras do solo residual de granito da Bacia hidrográfica do Rio Sagrado obtida por meio do ensaio de papel filtro é apresentada na FIGURA 31.



FONTE: a autora (2018).

A curva de retenção de umedecimento é definida matematicamente por duas equações, divididas nos intervalos de patamares de sucção de 0 a 100 kPa e maior que 100 kPa. Na primeira parte (0 a 100 kPa), tem-se a Equação 15:

$$Y = \frac{1}{10,1 + 1,07 \times 10^{-8} X^{1,07}} + 0,294 \quad (15)$$

Na segunda parte (>100 kPa), tem-se a Equação 16:

$$Y = \frac{1}{3,68 + 1,05 \times 10^3 X^{1,02}} + 0,036 \quad (16)$$

Já a curva de retenção de secagem, uni-modal, é definida matematicamente pela Equação 17:

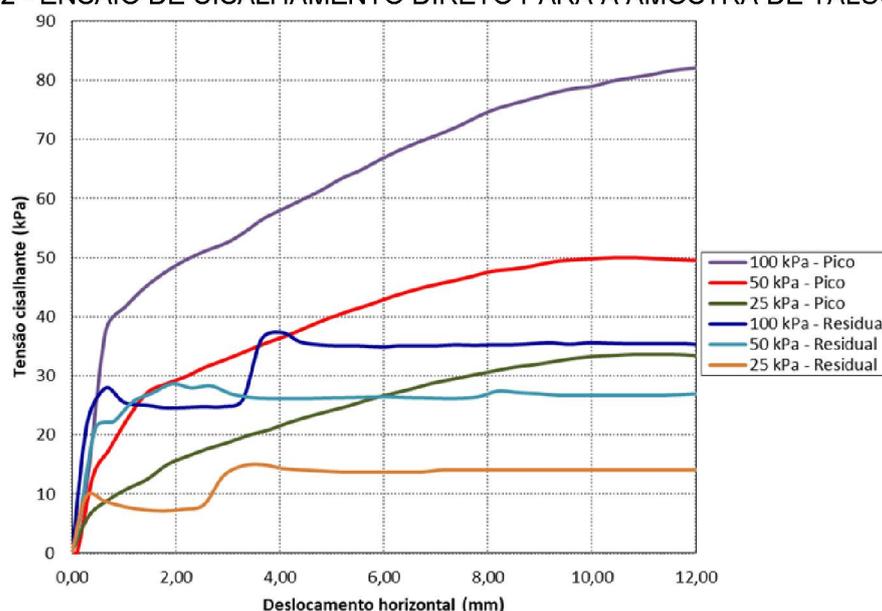
$$Y = \frac{1}{3,7 + 3,84 \times 10^{-8} X^{2,18}} + 0,05 \quad (17)$$

Assim, substituindo-se o valor umidade da amostra de solo sedimentar na Equação 15, têm-se uma sucção na ordem de 7 kPa. Ao substituir está umidade na Equação 17, a fim de verificar a sucção através da curva de retenção de secagem, têm-se uma inconsistência visto que os pontos resultantes deste ensaio não atingiram a umidade média. Deste modo, faz-se necessário o melhoramento das curvas de retenção com relação a quantidade de pontos ensaiados fim de aumentar a faixa de umidade obtida.

### 5.1.3 Parâmetros de resistência

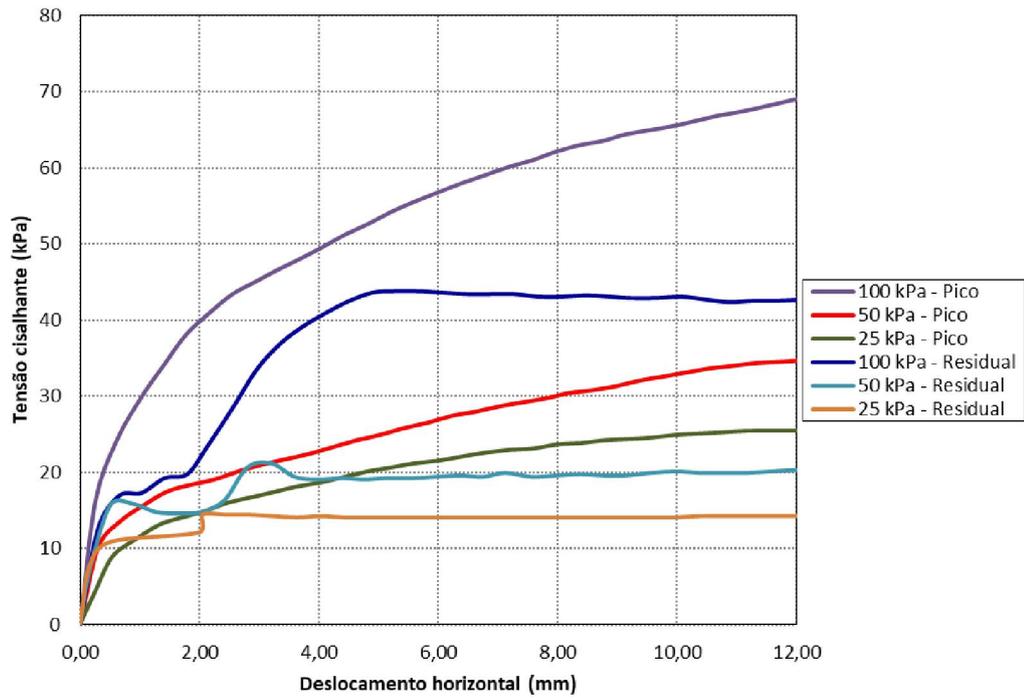
As FIGURAS 31 a 34 apresentam os gráficos obtidos de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, em que se pode identificar a tensão cisalhante máxima em cada um dos ensaios. As curvas denominadas “pico” representam os dados obtidos através do método convencional de ensaio, enquanto que as curvas denominadas “residual” apresentam os resultados obtidos através do método da interface lisa.

FIGURA 32 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA DE TÁLUS.



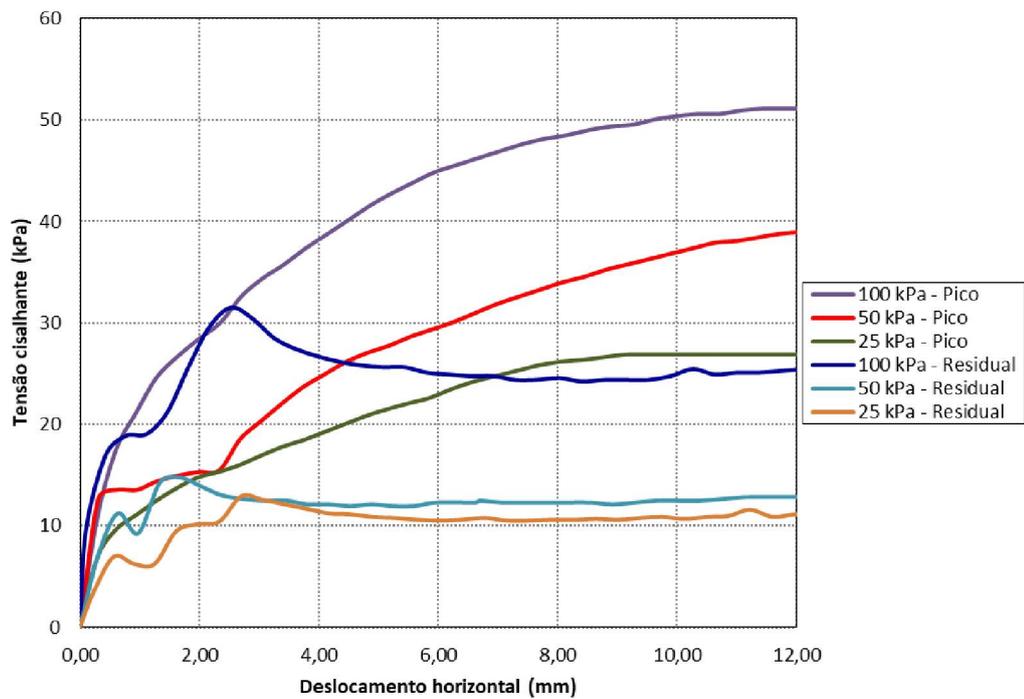
FONTE: a autora (2018).

FIGURA 33 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA DE COLÚVIO 1.



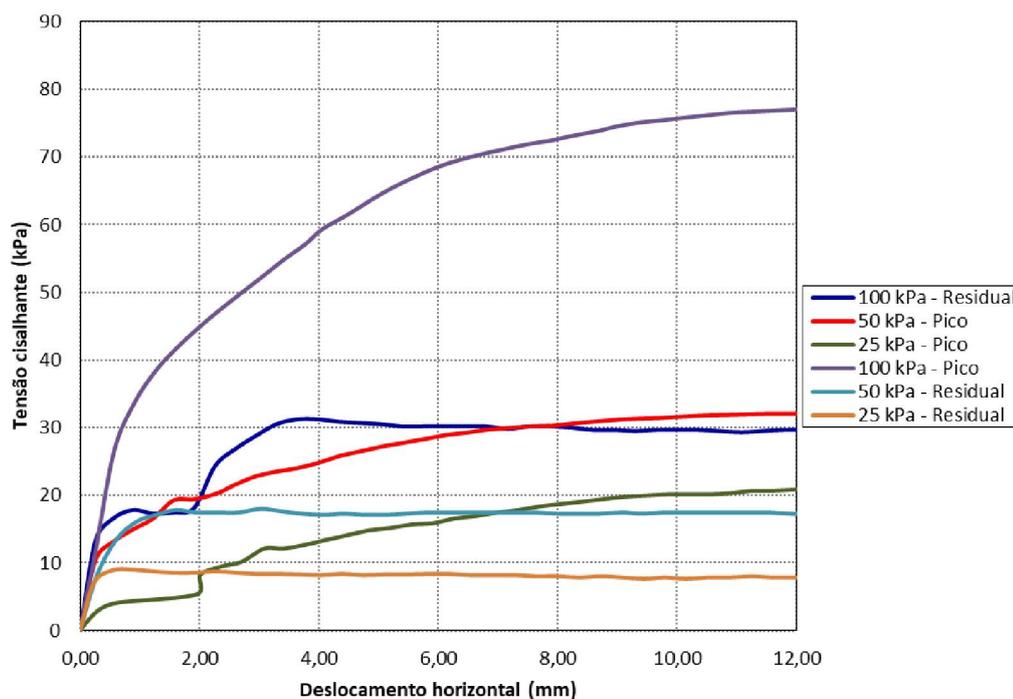
FONTE: a autora (2018).

FIGURA 34 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA COLÚVIO 2.



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 35 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO PARA A AMOSTRA RESIDUAL DE GRANITO.



FONTE: a autora (2018).

Todas as amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto convencional apresentaram ruptura dúctil, independentemente da tensão normal aplicada e do tipo de solo. Observa-se, ainda, que a amostra de solo residual de granito submetida a tensão normal de 100 KPA não seguiu o comportamento padrão da amostra. Ainda assim o coeficiente de determinação da envoltória de resistência deste solo (FIGURA 39) foi de aproximadamente 98%.

Nas amostras tálus e colúvio 2 para a tensão normal de 100 kPa, colúvio 1 colúvio 2 para a tensão normal de 50 kPa e tálus para a tensão normal de 25 kPa, submetidas ao ensaio de cisalhamento direto através do método da interface lisa, observa-se a ocorrência de um pico de tensão que configura uma ruptura frágil. Porém acredita-se que este pico seja decorrente de falha no método de ensaio utilizado e não da ruptura do solo, visto que a amostra de solo deve deslizar sobre a superfície lisa, mas aparentemente ela encontrava-se presa a superfície até que aplicou-se uma tensão tal que fizesse com que ela se deslocasse abruptamente.

A TABELA 6 resume as tensões máximas obtidas no ensaio convencional para um deslocamento de 10 mm (valores considerados de pico), grau de saturação e a umidade inicial e final das amostras.

TABELA 6 - RESUMO DAS TENSÕES MÁXIMAS DE PICO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Amostra	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)	Teor de umidade (%)		Grau de saturação final (%)
			Moldagem	Final	
TÁLUS	100	82,19	41,0	41,9	95,6
	50	50,00	44,9	48,6	99,8
	25	33,63	41,0	46,1	100,0
COLÚVIO 1	100	69,56	34,9	37,4	76,1
	50	34,70	32,7	34,4	76,8
	25	25,45	31,3	41,1	88,6
COLÚVIO 2	100	51,10	44,4	46,7	93,8
	50	38,97	45,3	51,6	96,5
	25	26,87	42,8	50,1	92,9
RESIDUAL DE GRANITO	100	77,03	32,2	35,4	100,0
	50	32,12	30,5	44,0	100,0
	25	20,83	31,6	43,1	100,0

FONTE: a autora (2018).

A TABELA 7 resume as tensões máximas obtidas no ensaio de cisalhamento direto com a interface lisa (valores considerados residuais), grau de saturação e a umidade inicial e final das amostras.

TABELA 7 - RESUMO DAS TENSÕES RESIDUAIS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

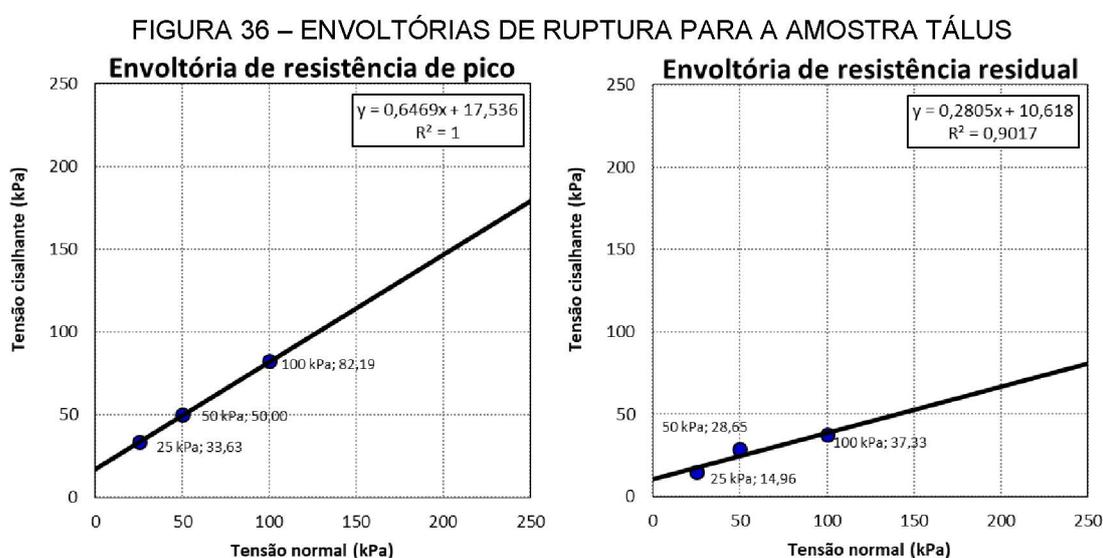
Amostra	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)	Teor de umidade (%)		Grau de saturação final (%)
			Moldagem	Final	
TÁLUS	100	37,33	40,8	44,9	97,7
	50	28,65	44,0	51,8	94,2
	25	14,96	42,6	57,4	97,2
COLÚVIO 1	100	43,77	31,6	35,1	82,3
	50	21,18	42,0	45,9	93,0
	25	14,42	32,3	48,2	100,0
COLÚVIO 2	100	31,50	42,8	55,2	100,0
	50	14,78	39,2	44,2	92,5
	25	12,91	39,1	42,9	84,9
RESIDUAL DE GRANITO	100	31,23	32,5	40,3	98,1
	50	17,98	32,3	40,6	100,0
	25	9,00	30,8	39,6	98,8

FONTE: a autora (2018).

Pode-se observar que a amostra indeformada não conservou o teor de umidade de campo, visto que houve uma diminuição no teor de umidade de moldagem se comparado aos valores apresentados na TABELA 4. A exceção está na amostra 03 que apresentou um aumento no teor de umidade se comparado aos dados da amostra deformada.

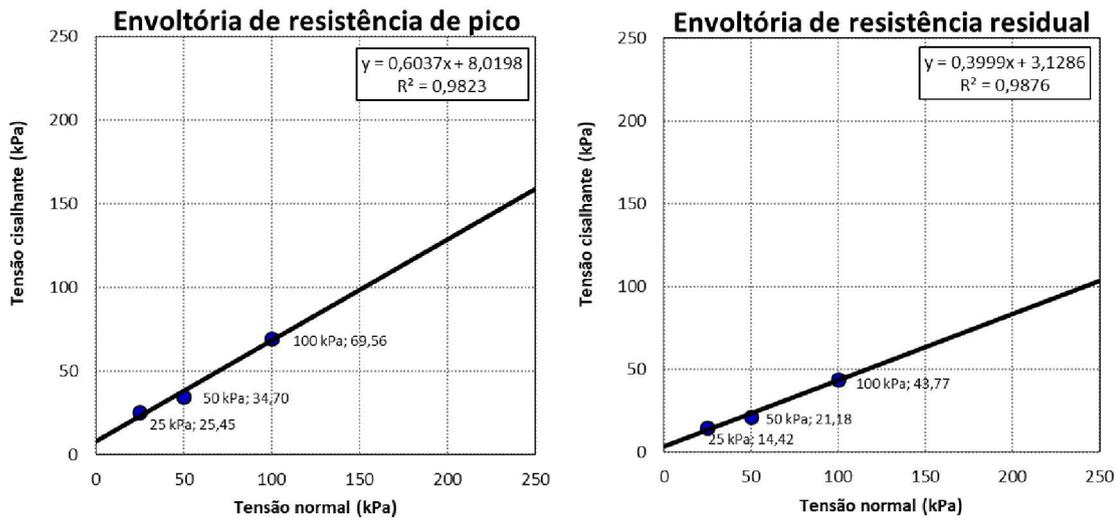
Segundo Fredlund e Rahardjo (1993 apud BOSZCZOWSKI, 2008), a formulação para mecânica de solos saturados pode ser aplicada quando o grau de saturação é superior a 85%. Neste caso, este método não deveria ter sido empregado na determinação dos parâmetros de resistência de pico da amostra colúvio 1 para as tensões normais de 100 kPa e 50 kPa. Contudo, para fins de simplificação, serão utilizados os valores apresentados.

A partir dos dados apresentados nas TABELAS 7 e 8, obtiveram-se as envoltórias de ruptura apresentadas nas FIGURAS 35 a 38.



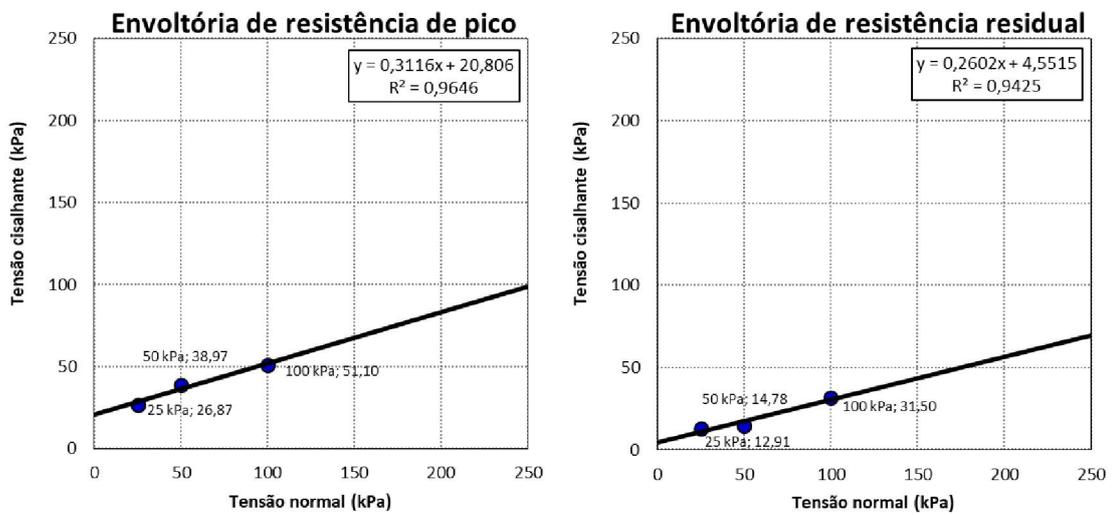
FONTE: a autora (2018).

FIGURA 37 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA COLÚVIO 1



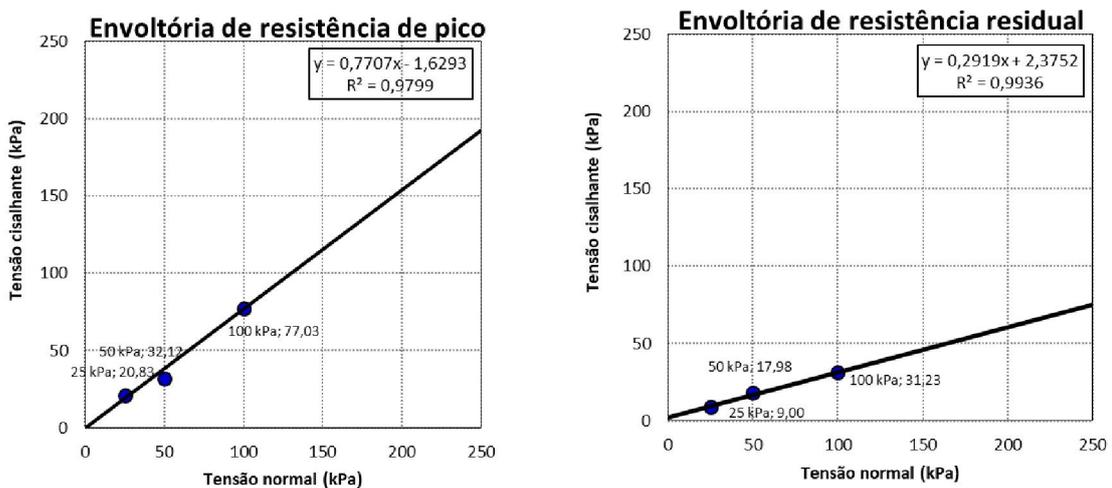
FONTE: a autora (2018).

FIGURA 38 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA COLÚVIO 2



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 39 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA A AMOSTRA RESIDUAL DE GRANITO



FONTE: a autora (2018).

A TABELA 8 apresenta o resumo dos parâmetros de resistência obtidos em cada uma das amostras.

TABELA 8 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Amostra	Parâmetros de pico		Parâmetros residuais	
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)
TÁLUS	17,5	32,9	10,6	15,7
COLÚVIO 1	8,0	31,1	3,1	21,8
COLÚVIO 2	20,8	17,3	4,6	14,6
RESIDUAL DE GRANITO	0,0	37,6	2,4	16,3

FONTE: a autora (2018).

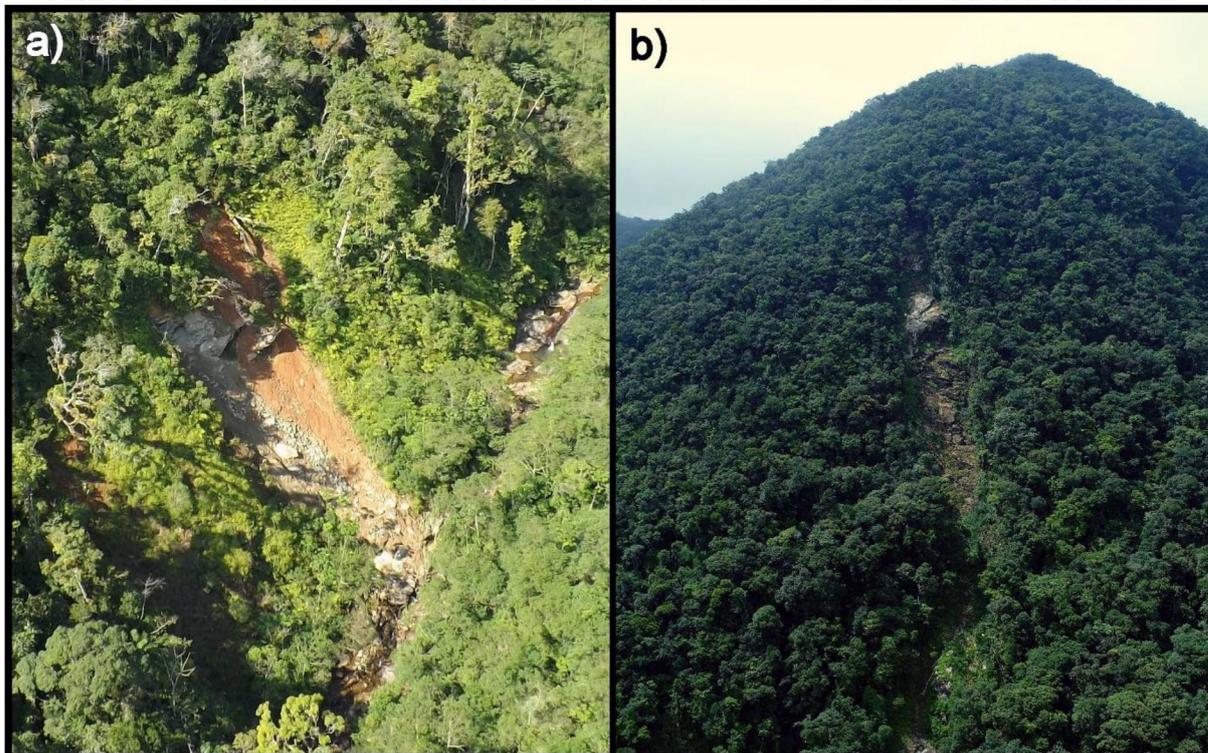
A amostra COLÚVIO 2 apesar de ser classificada como siltosa apresentou o maior intercepto coesivo se comparado às outras amostras. As amostras TÁLUS e COLÚVIO 1 apresentaram relações entre os parâmetros de resistência e os dados de granulometria satisfatória se comparado aos obtidos na literatura. A amostra RESIDUAL DE GRANITO apresentou intercepto coesivo nulo e elevado ângulo de atrito, característica de solos arenosos, fato que não se aplica ao solo do local. De modo geral, os ensaios realizados conseguiram caracterizar satisfatoriamente os solos da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado.

## 5.2 LEVANTAMENTO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

O método de equilíbrio limite de talude infinito é recomendado para modelagem de escorregamentos translacionais rasos (GEO-RIO, 2000 *apud* DUEÑAS ZAMBRANA, 2014). Deste modo, a identificação dos movimentos gravitacionais de massa na Bacia do Rio Sagrado, em sua maioria, como movimento planar de solo, valida a utilização deste método determinístico como base para a análise probabilística. A FIGURA 40 ilustra os MGMs observados a partir das visitas a campo. A FIGURA 40A foi obtida por meio do sobrevoo de helicóptero sobre a bacia hidrográfica, enquanto que a FIGURA 40B foi obtida com o auxílio do drone DJI Phantom 4 Pro. Os movimentos gravitacionais de massa identificados na Bacia

Hidrográfica do Rio Sagrado a partir do sobrevoo de helicóptero encontram-se discretizados no QUADRO 6.

FIGURA 40 – MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS PRESENTES NA BACIA DO RIO SAGRADO



FONTE: a autora (2018).

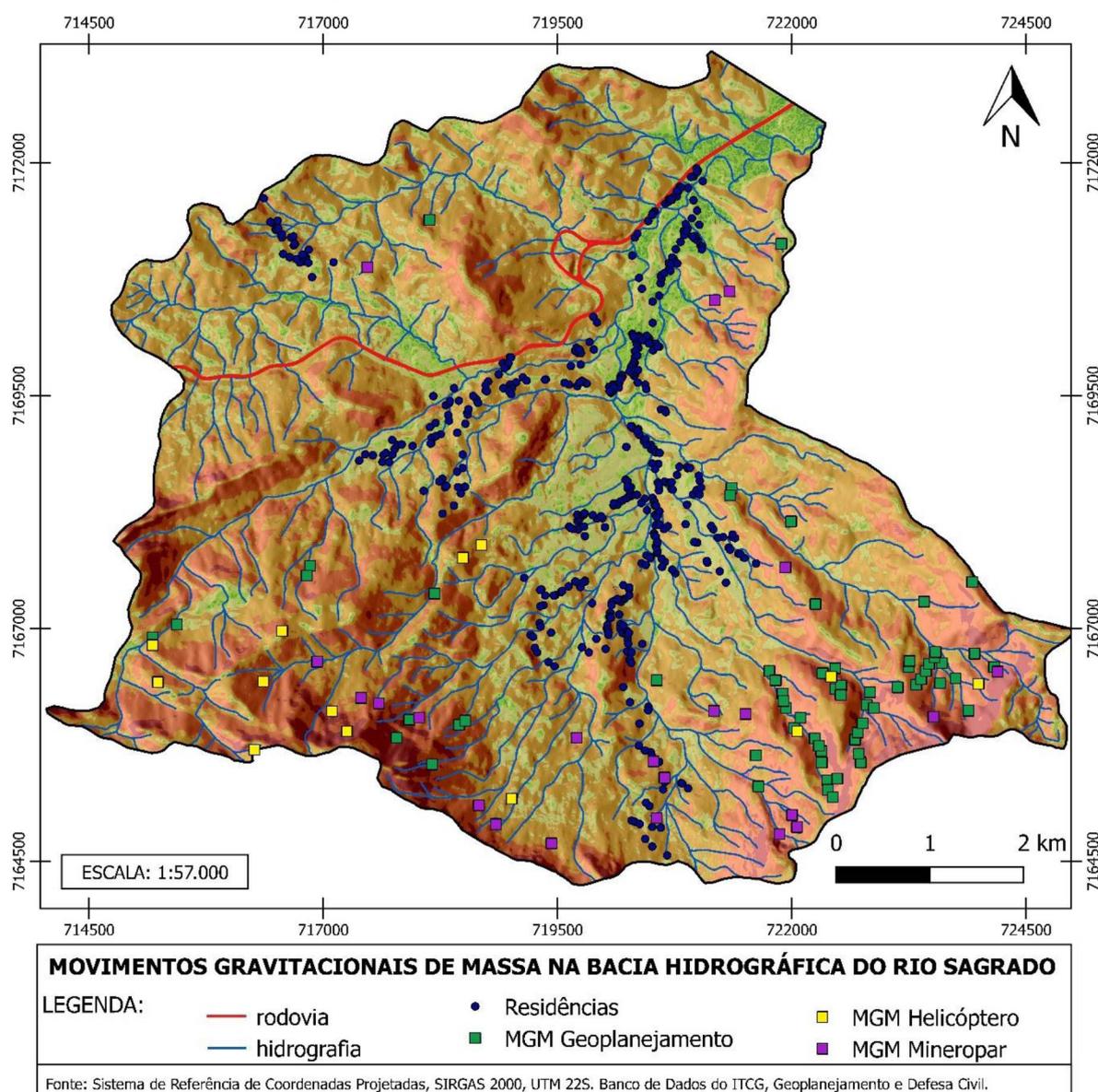
A partir dos registros de movimentos gravitacionais de massa disponibilizados pela Mineropar e do levantamento *in situ* utilizou-se o *software* QGIS 2.18.15 para a elaboração do mapa presente na FIGURA 41 que é utilizado na validação da distribuição de suscetibilidade.

QUADRO 6 – INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA – 29/08/2017

Código	Coordenada		Rocha	Solo	Drenagem	Vegetação	Ocupação	MGM				
								Tipo	Estágio	Dimensões da escarpa (m)		
	UTM E	UTM N								A	L	C
RS-01	723.991	7.166.403	Granito	Colúvio	Córrego com MGM no eixo	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Jovem	2	10	100
RS-13	722.421	7.166.479	Granito	Colúvio	MGM no flanco do vale com córrego	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Maduro em recuperação	3	10	100
RS-17	722.058	7.165.893	Granito	Colúvio	Cabeceira com MGM	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Jovem	5	15	80
RS-29	717.251	7.165.894	Granito	Colúvio	Ausente	Mata atlântica secundária	Agricultura nas proximidades	Planar de solo	Maduro em recuperação	10	30	100
RS-30	715.176	7.166.820	Granito	Colúvio	Córrego com MGM no eixo	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Jovem	3	20	50
RS-31	715.234	7.166.423	Granito gnáissico	Colúvio	Ausente	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Jovem	5	15	50
RS-34	717.090	7.166.108	Granito	Colúvio com blocos	Vale seco sem água corrente	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo e rocha	Jovem	2	10	30
RS-35	716.262	7.165.697	Granito	Colúvio	Ausente	Mata atlântica secundária com desmatamento localizado	Ausente	Planar de solo	Maduro inativo	2-5	20	80
RS-36	716.560	7.166.972	Granito gnáissico	Colúvio	Córrego com MGM no eixo	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Maduro em recuperação	5	15	50
RS-37	716.358	7.166.429	Granito	Colúvio	Córrego junto ao MGM	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Maduro inativo	5	20	60
RS-39	719.009	7.165.169	Granito gnáissico	Colúvio	Ausente	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo e rocha	Jovem	5	20	100
RS-44	718.686	7.167.895	Granito gnáissico	Colúvio	Ausente	Mata atlântica secundária	Ausente	Planar de solo	Maduro em recuperação	2	15	60
RS-45	718.490	7.167.759	Granito gnáissico	Colúvio	Córrego com MGM no eixo	Mata atlântica secundária com desmat. Disperso	Sítios na encosta	Fluxo de detritos	Maduro em recuperação	3	5	200

FONTE: a autora (2018).

FIGURA 41 – ESPACIALIZAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA DO RIO SAGRADO



FONTE: a autora (2018).

Tal mapa engloba os registros de movimentos gravitacionais de massa e as residências presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, evidenciando o risco associado a MGMs nesta região. Vale destacar a porção leste da bacia, onde encontra-se o rio Ribeirão Grande, que possui planície restrita e um vale encaixado em “V”, local onde deslizamentos podem fornecer material para fluxo de detritos que atingiriam os moradores locais.

### 5.3 ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE

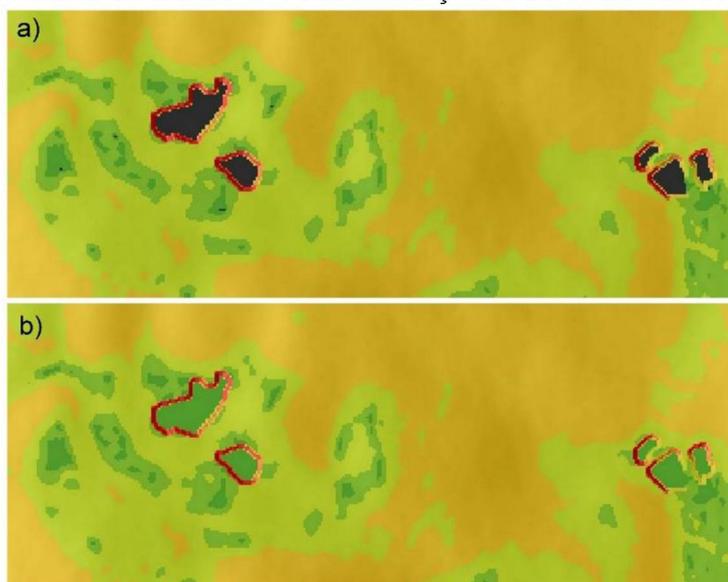
A análise de suscetibilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado a movimentos gravitacionais de massa se deu através da criação de cartas de suscetibilidade para as condições de solo saturado e não saturado.

Para a determinação probabilística da distribuição de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado fez-se necessário a consistência dos dados de declividade obtidos através do mosaico de imagens do MDT. Para isso utilizou-se a função condicional apresentada na Equação 18, por meio do “*raster calculator*”, para realizar a substituição de pixels através de uma avaliação booleana.

$$\text{Con}(\text{"sloperad"} < 0.003, 0.003, \text{"sloperad"}) \quad (18)$$

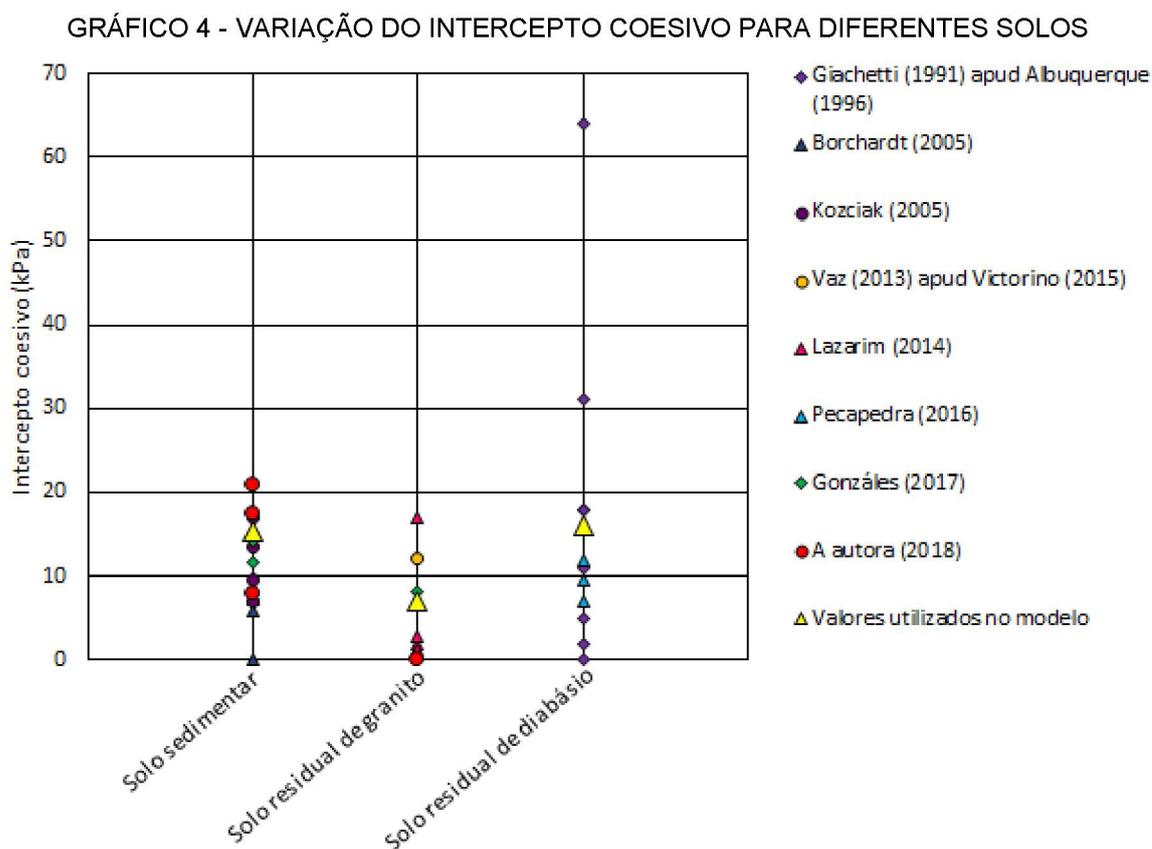
Assim, pixels com valor de declividade (radianos) inferior a 0,003 (majoritariamente massas d’água) foram substituídos por 0,003, enquanto que os pixels com valor superior ou igual a 0,003 preservaram o valor do raster de declividade original, conforme ilustra a FIGURA 42. Tal procedimento mostrou-se necessário ao analisarmos a Equação 1, visto que ao substituirmos o valor de pixels 0 na declividade, se obtinha um denominador com valor também 0, o que ocasionava erro na geração do raster de probabilidade.

FIGURA 42 – RASTER DE DECLIVIDADE. A) RASTER ORIGINAL COM VALOR DE PIXEL IGUAL A ZERO; B) RASTER CONSISTIDO COM A SUBSTITUIÇÃO DOS VALORES INFERIORES A 0,003



FONTE: a autora (2018).

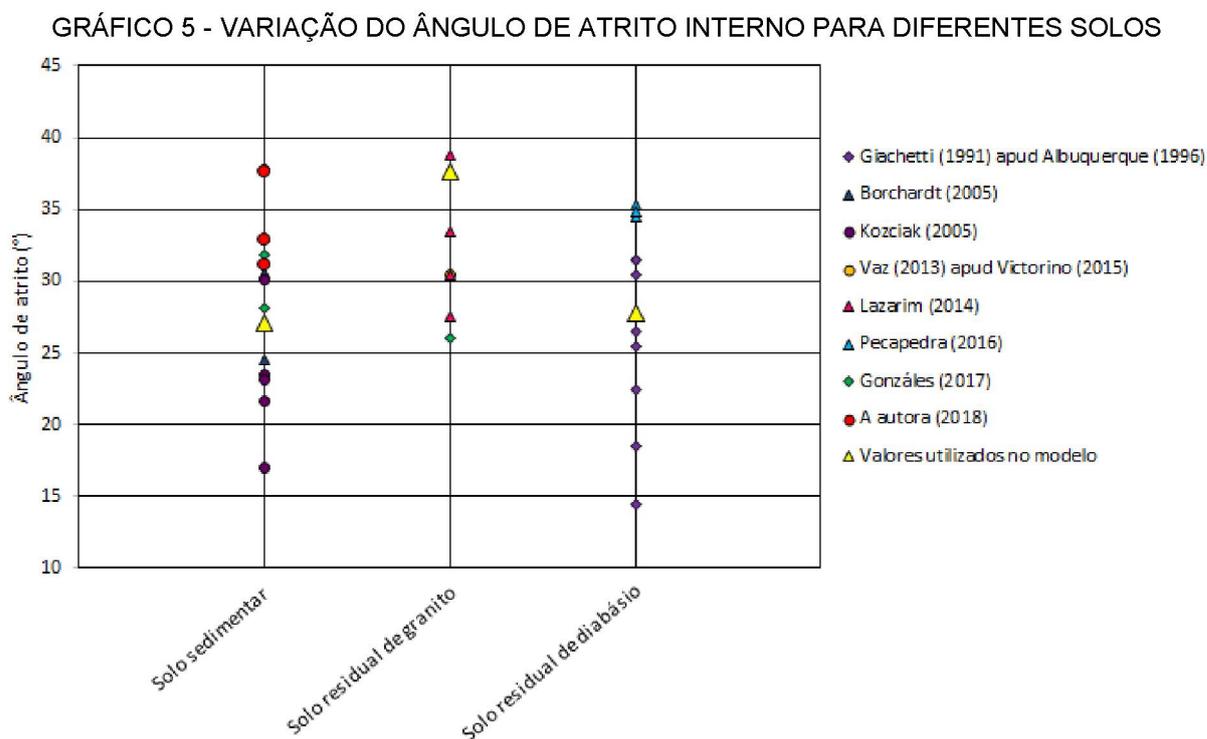
Para a determinação do desvio padrão dos parâmetros de entrada de intercepto coesivo e ângulo de atrito utilizou-se dados da literatura de solos com as mesmas características dos estudados na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado (ALBUQUERQUE, 1996; KOZCIK, 2005; BORCHARDT, 2005; LAZARIM, KORMANN e SESTREM, 2014; VICTORINO, 2015; PECAPEDRA, 2016; GONZÁLEZ, 2017). Os GRÁFICO 4 a 7 apresentam a variação dos dados utilizados para determinação dos desvios padrões.



FONTE: a autora (2018).

O solo residual de diabásio apresentou maior dispersão entre os resultados, deste modo excluiu-se o valor extremo de coesão apresentado no GRÁFICO 4 para determinação da média e desvio padrão da amostra. Os valores utilizados no modelo corresponderam ao intercepto coesivo médio (de pico) das amostras para os solos residuais, isso porque não houve coleta de amostra em solo residual de diabásio e porque o intercepto coesivo encontrado em laboratório para o solo residual de granito foi de 0 kPa, o que inviabiliza a utilização do algoritmo para geração de números aleatórios devido a ocorrência de valores negativos de intercepto coesivo. Contudo,

para o solo sedimentar utilizou-se a média ponderada dos resultados dos ensaios de laboratório. O desvio padrão utilizado correspondeu a média ponderada do desvio padrão para cada tipo de solo.



FONTE: a autora (2018).

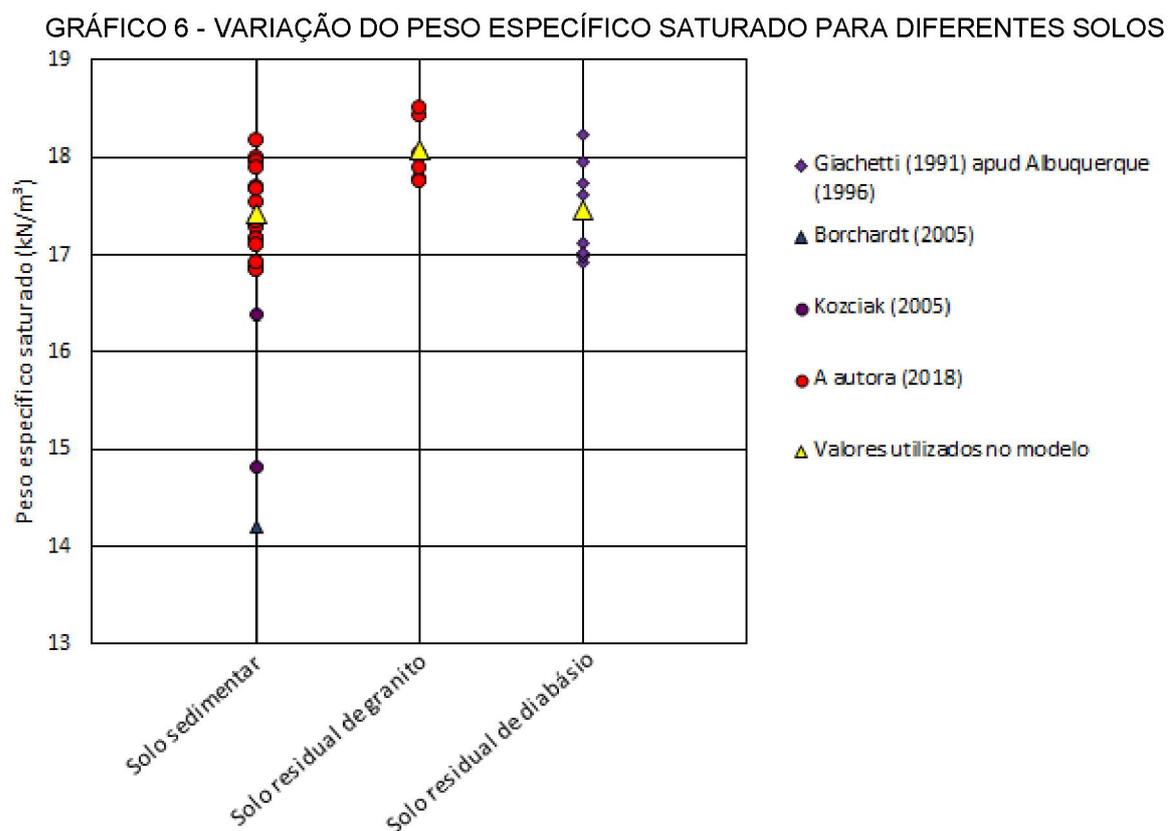
Os valores utilizados no modelo corresponderam a média das amostras para o solo residual de diabásio em decorrência da ausência de ensaios de laboratório. Já para os solos sedimentar e residual de granito, utilizou-se a média ponderada dos resultados dos ensaios de laboratório executados com as amostras obtidas em campo. Assim como no caso anterior, o desvio padrão utilizado correspondeu a média ponderada do desvio padrão para cada tipo de solo.

Os valores de peso específico saturado e natural utilizados no modelo corresponderam aos pesos específicos médios obtidos a partir dos ensaios de laboratório. Contudo, novamente utilizou-se a média dos dados da literatura para a determinação dos valores dos parâmetros para o solo residual de diabásio.

O valor de profundidade da camada de solo utilizado no modelo foi de 4 metros, tanto para condição de solo saturado quando para a de solo não saturado. Este valor foi determinado com base na média das profundidades estimadas no inventário de movimentos gravitacionais de massa da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado (QUADRO

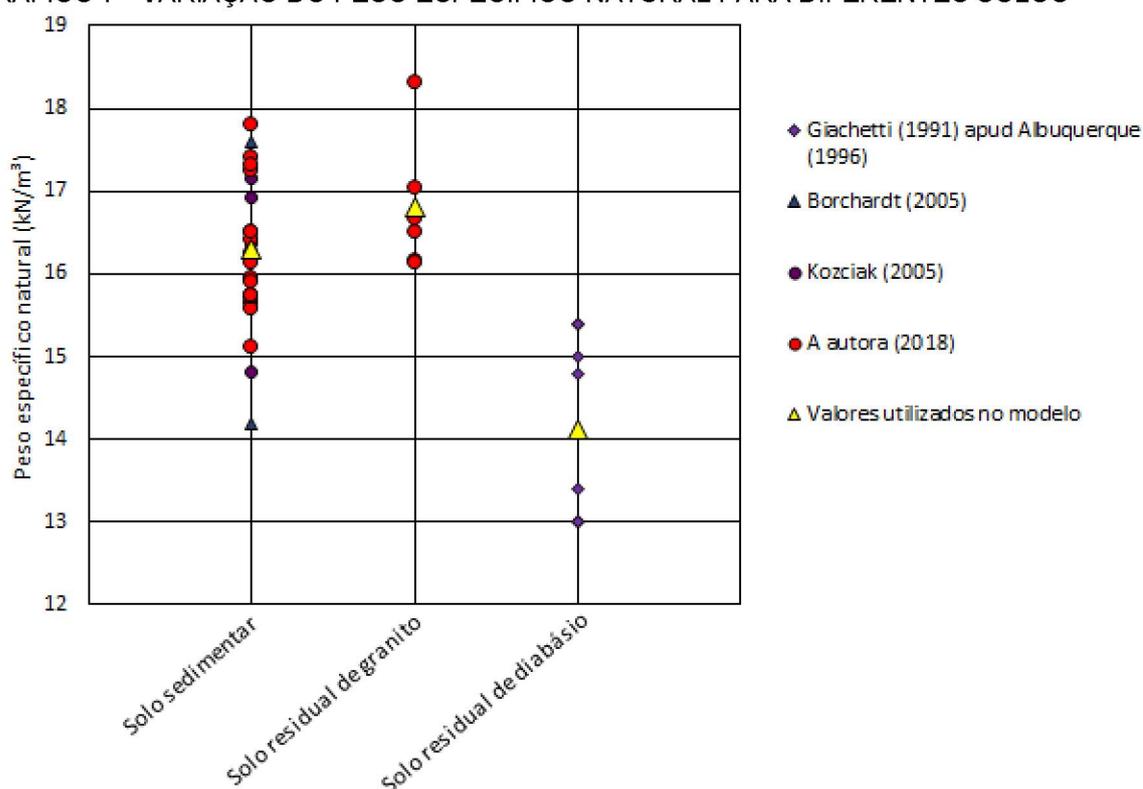
6) e validados por dados da literatura para deslizamentos translacionais, como o estudo de Silva *et al.* (2018) que apresentaram o caso de ruptura de um talude rodoviário localizado na Serra do Mar Paranaense com profundidade de ruptura em torno de 4 metros.

As cartas de suscetibilidade foram geradas a partir de 385 iterações, valor a partir do qual considerou-se que não havia variação significativa no mapa de suscetibilidade com base na análise de sensibilidade.



FONTE: a autora (2018).

GRÁFICO 7 - VARIAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO NATURAL PARA DIFERENTES SOLOS



FONTE: a autora (2018).

### 5.3.1.1 Condição de solo saturado

A TABELA 9 apresenta o resumo dos parâmetros de entrada do modelo, resultante dos ensaios de laboratório e revisão bibliográfica, para a condição de solo saturado.

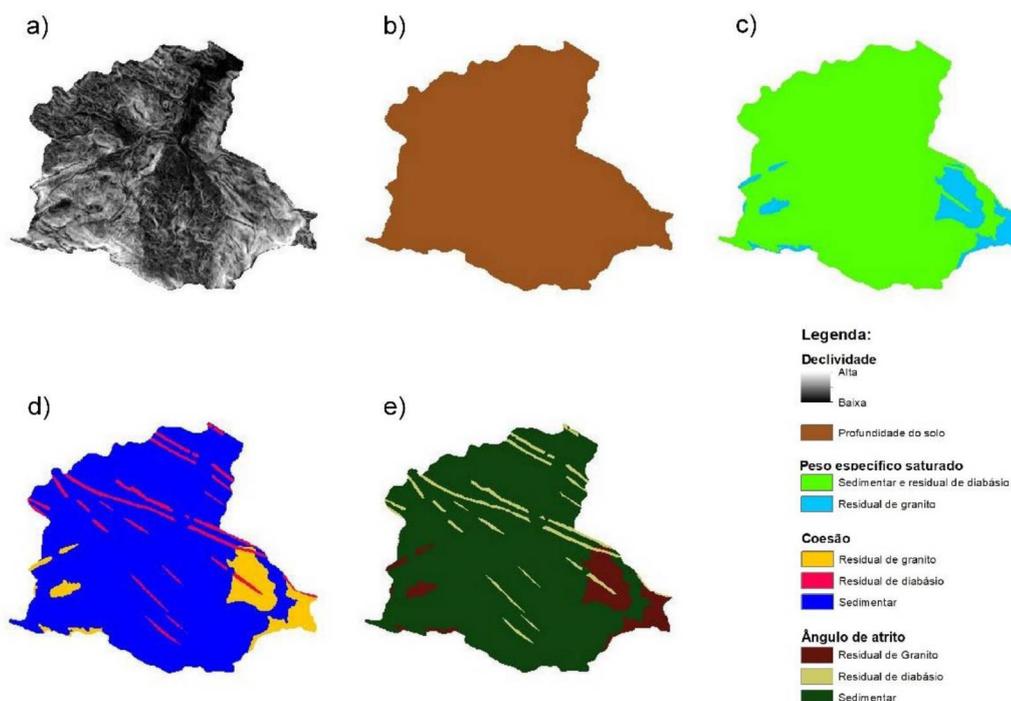
TABELA 9 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO

Tipo de material inconsolidado	Parâmetros de entrada		
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Peso específico saturado (kN/m³)
Solo sedimentar	15 ± 6,0	27 ± 6,0	17,4
Solo residual de granito	7,0 ± 6,0	38 ± 6,0	18,1
Solo residual de diabásio	11 ± 6,0	28 ± 6,0	17,4

FONTE: a autora (2018).

A FIGURA 43 apresenta os rasters gerados para determinação da distribuição probabilística de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, no município de Morretes (PR), para a condição de solo saturado juntamente com pontos de MGM's presentes na bacia hidrográfica, ilustrada na FIGURA 44.

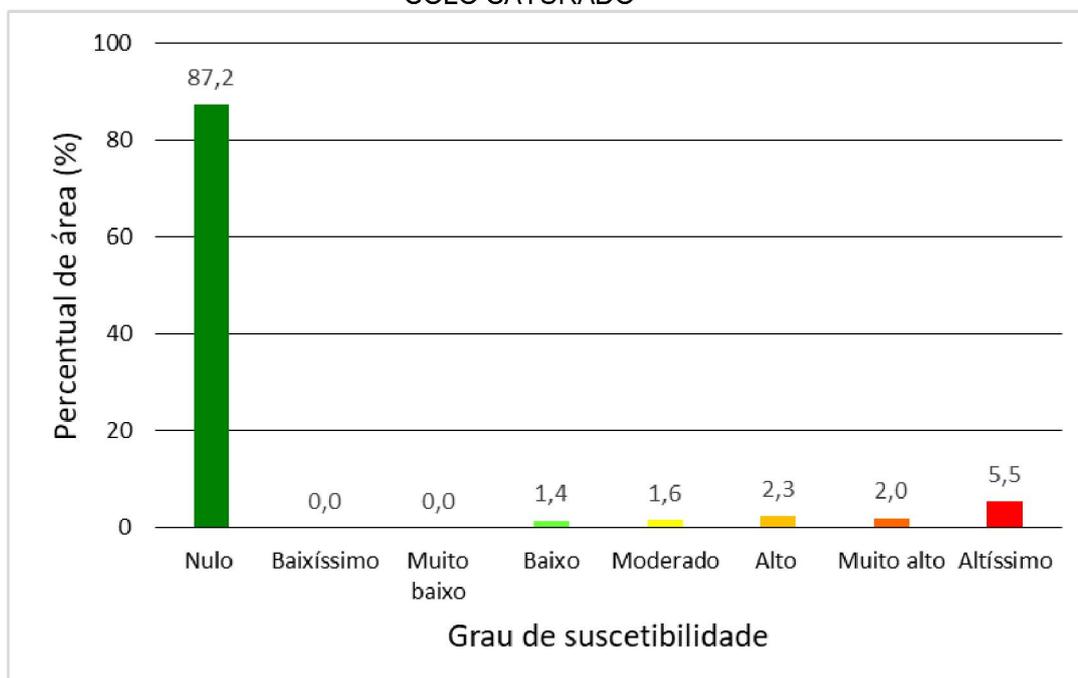
FIGURA 43 - RASTERS DE ENTRADA NO MODELO - A) DECLIVIDADE; B) PROFUNDIDADE DO SOLO; C) PESO ESPECÍFICO SATURADO; D) COESÃO; E) ÂNGULO DE ATRITO;



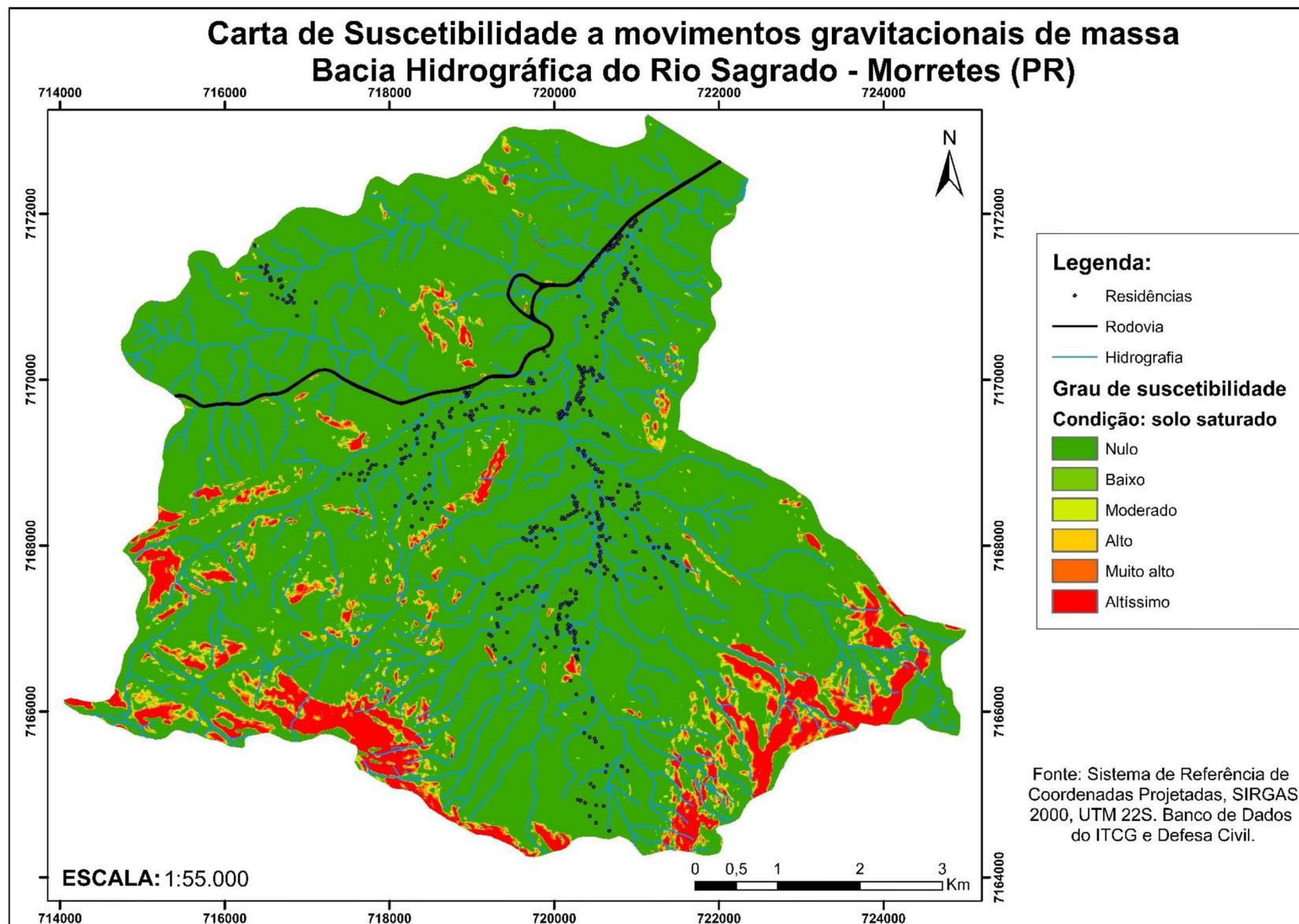
FONTE: a autora (2018).

O GRÁFICO 8 apresenta os resultados das análises quantitativas de ocorrência de cada uma das classes de suscetibilidade em percentual de área.

GRÁFICO 8 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO



FONTE: a autora (2018).



FONTE: a autora (2018).

A TABELA 10 -apresenta os resultados das análises quantitativas de ocorrência dos graus de suscetibilidade em relação às classes de declividade estabelecidas pelas EMBRAPA (2006), em percentual de área, onde a soma total das linhas e colunas da tabela resultam em 100% da área da bacia hidrográfica.

TABELA 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE EM RELAÇÃO ÀS CLASSES DE DECLIVIDADE

Relevo	Grau de suscetibilidade					
	Nula	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	Altíssima
Plano	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suave Ondulado	5,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ondulado	22,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forte Ondulado	47,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Montanhoso	10,36	1,40	1,56	2,33	1,88	2,32
Escarpado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	3,14
<b>Total</b>	<b>87,23</b>	<b>1,40</b>	<b>1,56</b>	<b>2,33</b>	<b>2,01</b>	<b>5,46</b>

FONTE: a autora (2018).

Ao comparar-se os resultados obtidos para a carta de suscetibilidade com a declividade do terreno classificada de acordo com a EMBRAPA (2006), nota-se que as áreas com suscetibilidade muito alta e altíssima ocorreram somente em relevos considerados montanhosos e escarpados. Observa-se ainda que as classes de suscetibilidade baixa, moderada e alta ocorrem somente em relevo montanhoso. Relevos com declividade inferiores a 45% não influenciaram na determinação da suscetibilidade, visto que apresentaram suscetibilidades nulas.

Utilizou-se, ainda, a ferramenta “*Buffer*” dentro do Ambiente SIG para determinar um raio de significância de 10 metros para as coordenadas MGMs e das residências, a fim de classificar os valores de suscetibilidade dos pixels destes *buffers*.

Ao confrontar os pontos de MGMs com a carta de suscetibilidade gerada, observa-se que 40,3% dos movimentos gravitacionais de massa ocorreram em áreas instáveis, sendo: 3,7% em área de baixa suscetibilidade, 6,9% em áreas moderadas, 6,7% em áreas de suscetibilidade alta, 4,6% em muito alta e 18,4% em áreas de altíssima suscetibilidade. Assim sendo, 59,7% dos movimentos de massa foram plotados em áreas com suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa considerada nula.

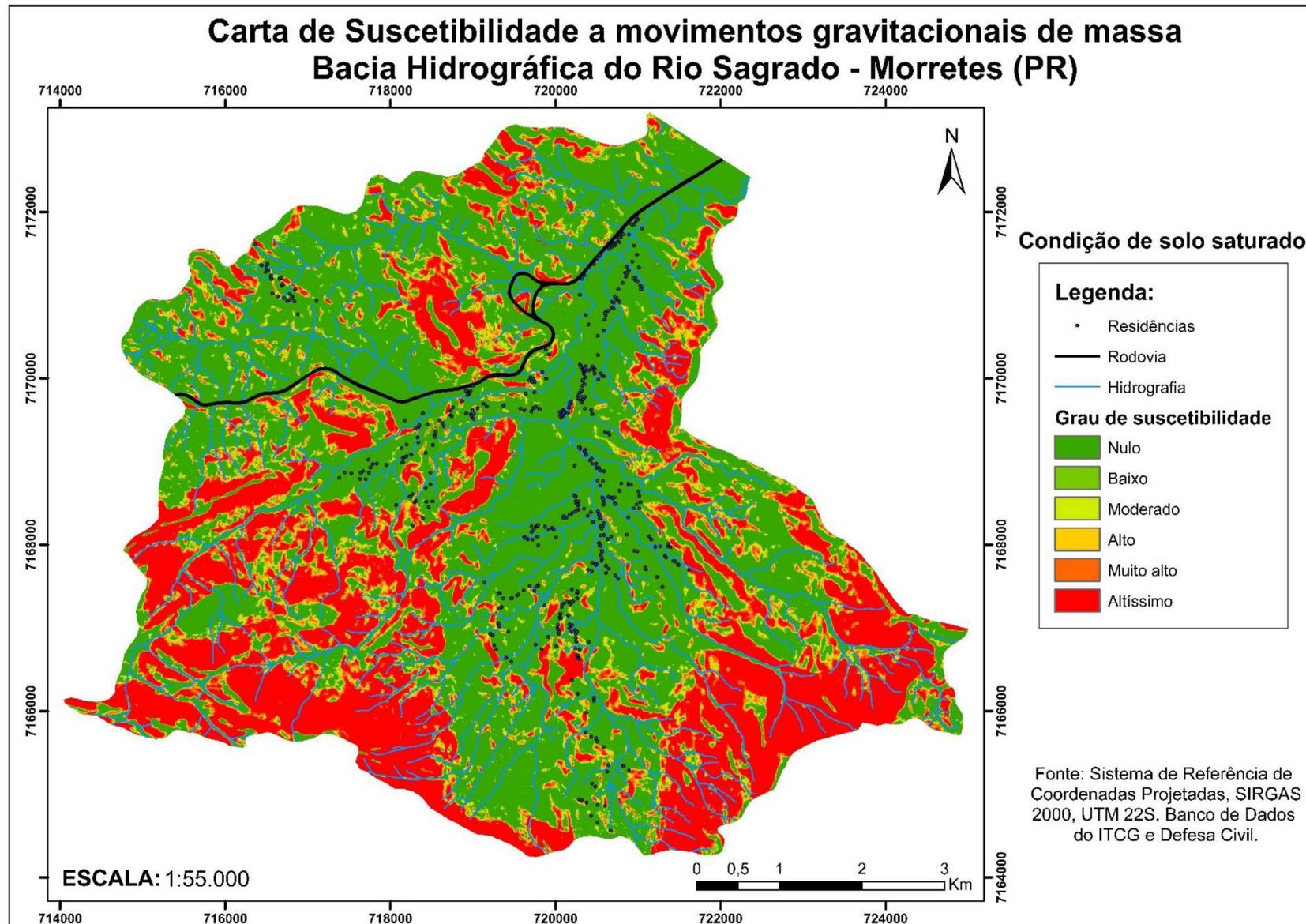
Ao considerar para a validação somente os polígonos resultantes do mapeamento de cicatrizes do evento de 11/03/2011, desconsiderando as coordenadas de eventos fornecidas pela Mineropar e obtidas pelo sobrevoo de helicóptero, verifica-se que o percentual de área nula atingida por MGM diminui para

46,8%. Deste modo, a distribuição de suscetibilidade em áreas instáveis passa a ser de: 4,0% em área de baixa suscetibilidade, 7,1% em áreas moderadas, 7,6% em áreas de suscetibilidade alta, 7,3% em muito alta e 27,2% em áreas de altíssima suscetibilidade. As residências constantes na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado estão localizadas em áreas de suscetibilidade nula. Tal fato mostra que a utilização das coordenadas das ocorrências para validação dos movimentos gravitacionais de massa não apresenta boa aderência. Evidenciando assim a necessidade de obter-se um mapeamento detalhado das cicatrizes dos movimentos gravitacionais de massa, identificando, se possível, as zonas de ruptura, trânsito e deposição, a fim de obter-se uma validação efetiva da distribuição de suscetibilidade.

Evidencia-se ainda a falta de representatividade da carta de suscetibilidade gerada a partir dos ensaios de laboratório, visto que grande parte das cicatrizes dos movimentos gravitacionais de massa encontram-se em áreas de suscetibilidade nula o que não representa a realidade do local. Deste modo, optou-se por executar uma retroanálise dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) a fim de obter-se parâmetros representativos das condições de campo e uma carta de suscetibilidade com boa aderência aos dados de entrada.

### **Retroanálise da condição de solo saturado**

Elaborou-se novas cartas de suscetibilidade com diminuição de 5% dos valores dos parâmetros a cada simulação, mantendo-se os mesmo valores utilizados anteriormente para as faixas de variação e os demais parâmetros. As cartas de suscetibilidade foram analisadas da mesma forma que as obtidas com os parâmetros de resistência resultantes dos ensaios de laboratório. Considerou-se o resultado da retroanálise satisfatório quando obteve-se aproximadamente 85% a 90% da porcentagem de pixels das cicatrizes mapeadas pela empresa Geoplanejamento em áreas consideradas instáveis. A FIGURA 45 ilustra a carta de suscetibilidade obtida como resultado da retroanálise com redução de 30%\* nos parâmetros de resistência, onde é visível o aumento de áreas instáveis ao longo da bacia hidrográfica.



FONTE: a autora (2018).

A TABELA 11 apresenta o resumo dos parâmetros de entrada utilizados na retroanálise para a elaboração desta carta.

TABELA 11 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DA RETROANÁLISE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO

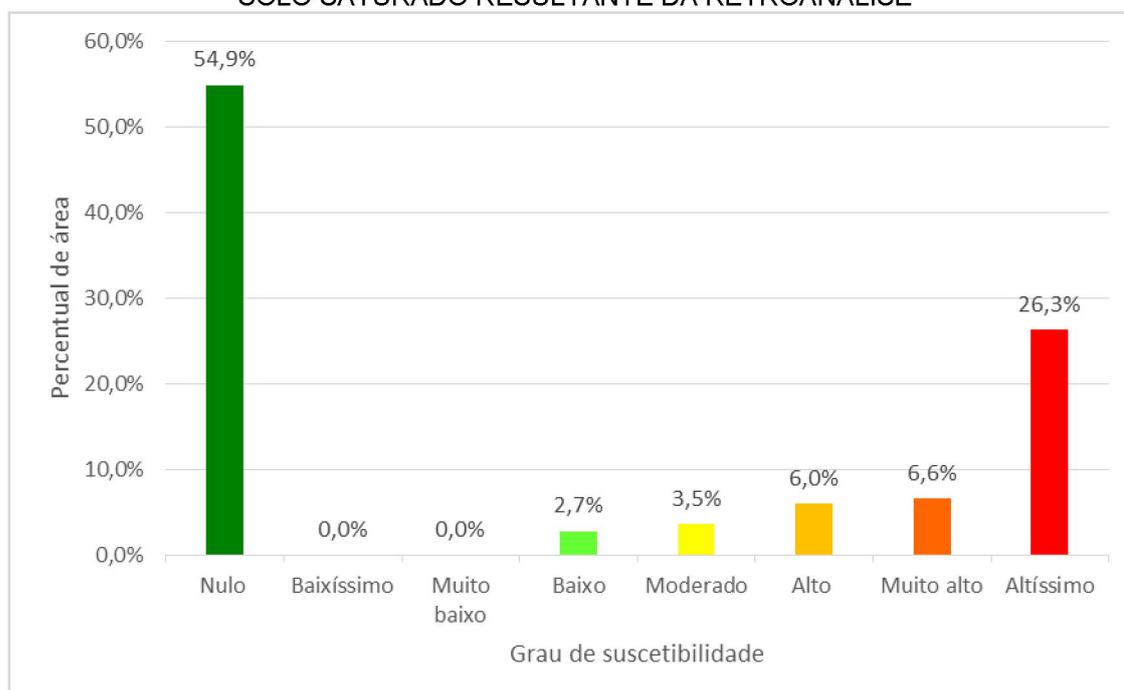
Tipo de material inconsolidado	Parâmetros de entrada		
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Peso específico saturado (kN/m <sup>3</sup> )
Solo sedimentar	10,5 ± 6,0	18,9 ± 6,0	17,4
Solo residual de granito	6,0* ± 6,0	26,6 ± 6,0	18,1
Solo residual de diabásio	7,7 ± 6,0	19,6 ± 6,0	17,4

\* A redução do parâmetro de coesão do solo residual de granito foi restringida a 25% do valor inicial devido a limitação de coesão nula.

FONTE: a autora (2018).

O GRÁFICO 10 apresenta os resultados das análises quantitativas de ocorrência de cada uma das classes de suscetibilidade em percentual de área para a carta de suscetibilidade resultante da redução de 30% nos valores dos parâmetros de resistência. Ao comparar-se estes valores com as porcentagens obtidas com os parâmetros originais, vemos uma redução de 32% na área que era considerada de suscetibilidade nula e um aumento de aproximadamente 21% na área de suscetibilidade altíssima, o que evidencia o fato de que os parâmetros obtidos em laboratório provavelmente não refletem as características de campo.

GRÁFICO 9 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO RESULTANTE DA RETROANÁLISE



FONTE: a autora (2018).

Ao confrontar os pontos de MGMs com a carta de suscetibilidade resultante da retroanálise, observa-se que 88,1% dos movimentos gravitacionais de massa ocorreram em áreas instáveis, um aumento significativo de aderência quando comparado à carta gerada com os parâmetros obtidos em ensaio de cisalhamento direto. Deste modo, a distribuição de suscetibilidade nas cicatrizes dos MGMs passou a ser de: 11,9% em área de suscetibilidade nula, 1,3% baixa suscetibilidade, 2,1% em áreas moderadas, 4,7% em áreas de suscetibilidade alta, 6,8% em muito alta e 73,2% em áreas de altíssima suscetibilidade.

Com relação os “*buffers*” de 10 metros em torno das residências cadastradas na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, verificamos que 5,4% desta área encontra-se em locais com algum grau de instabilidade, sendo que obtivemos a seguinte distribuição de suscetibilidade: 94,6% da área em local de suscetibilidade nula, 1,1% em áreas de baixa suscetibilidade, 1,1% em locais de suscetibilidade moderada, 1,2% em suscetibilidade alta, 0,7% em suscetibilidade muito alta e 1,3% em áreas de altíssima suscetibilidade. Assim sendo, estas áreas devem ser monitoradas pelas autorizadas a fim de elaborar diretrizes para minimização dos riscos associados a movimentos gravitacionais de massa.

### 5.3.1.2 Condição de solo não saturado

A TABELA 12 apresenta o resumo dos parâmetros de entrada do modelo, resultante dos ensaios de laboratório e revisão bibliográfica, para a condição de solo não saturado. Nesta condição de solo em particular, inclui-se a sucção obtida para o solo sedimentar e a faixa de variação obtida graficamente do estudo de Kormann, Sestrem e Pretto (2013) desenvolvidos no Morro do Boi em Balneário Camboriú – SC, para um tensiômetro instalado a 3 metros de profundidade.

TABELA 12 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O SOLO NÃO SATURADO

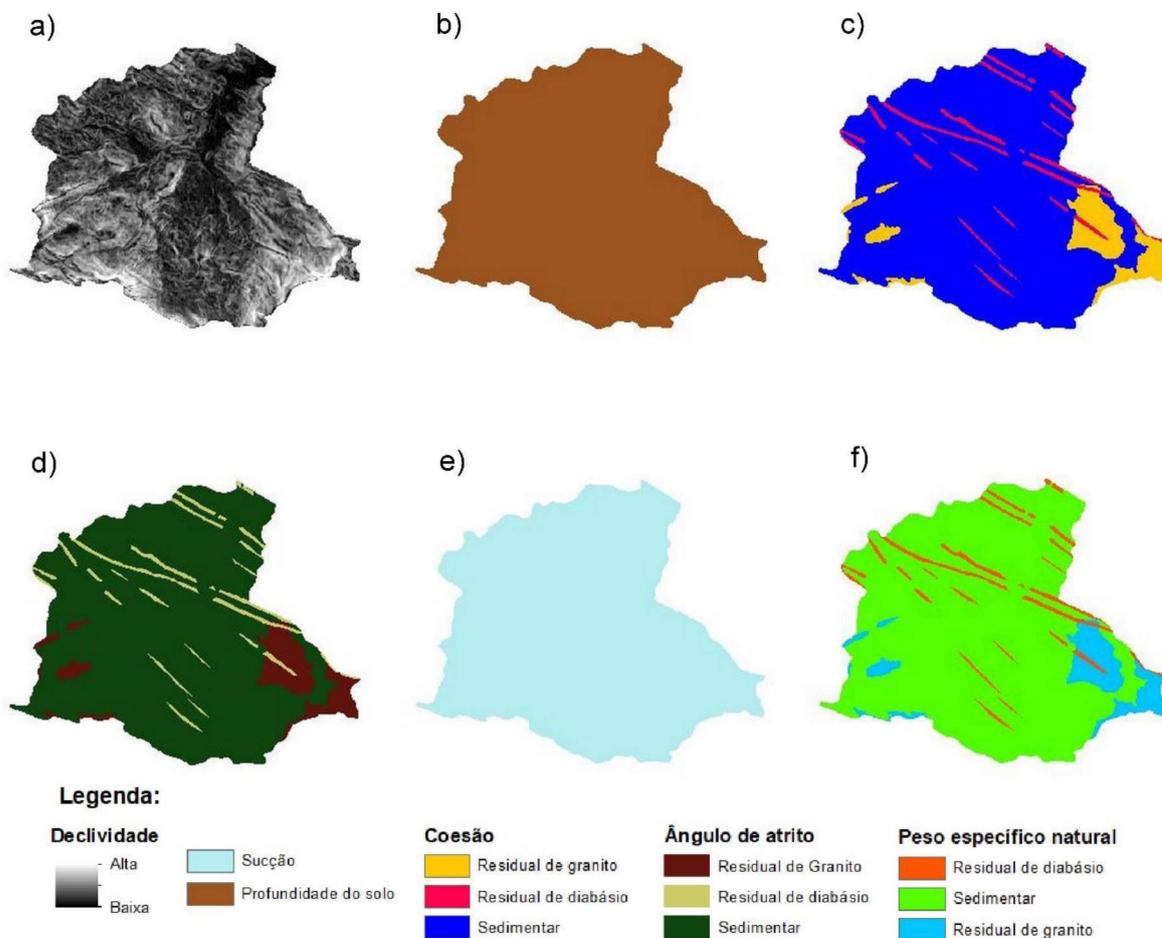
Tipo de material inconsolidado	Parâmetros de entrada			
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	Sucção (kPa)
Solo sedimentar	15 ± 6,0	27 ± 6,0	16,3	9,0 ± 7,0
Solo residual de granito	7,0 ± 6,0	38 ± 6,0	16,8	9,0 ± 7,0
Solo residual de diabásio	11 ± 6,0	28 ± 6,0	14,1	9,0 ± 7,0

FONTE: a autora (2018).

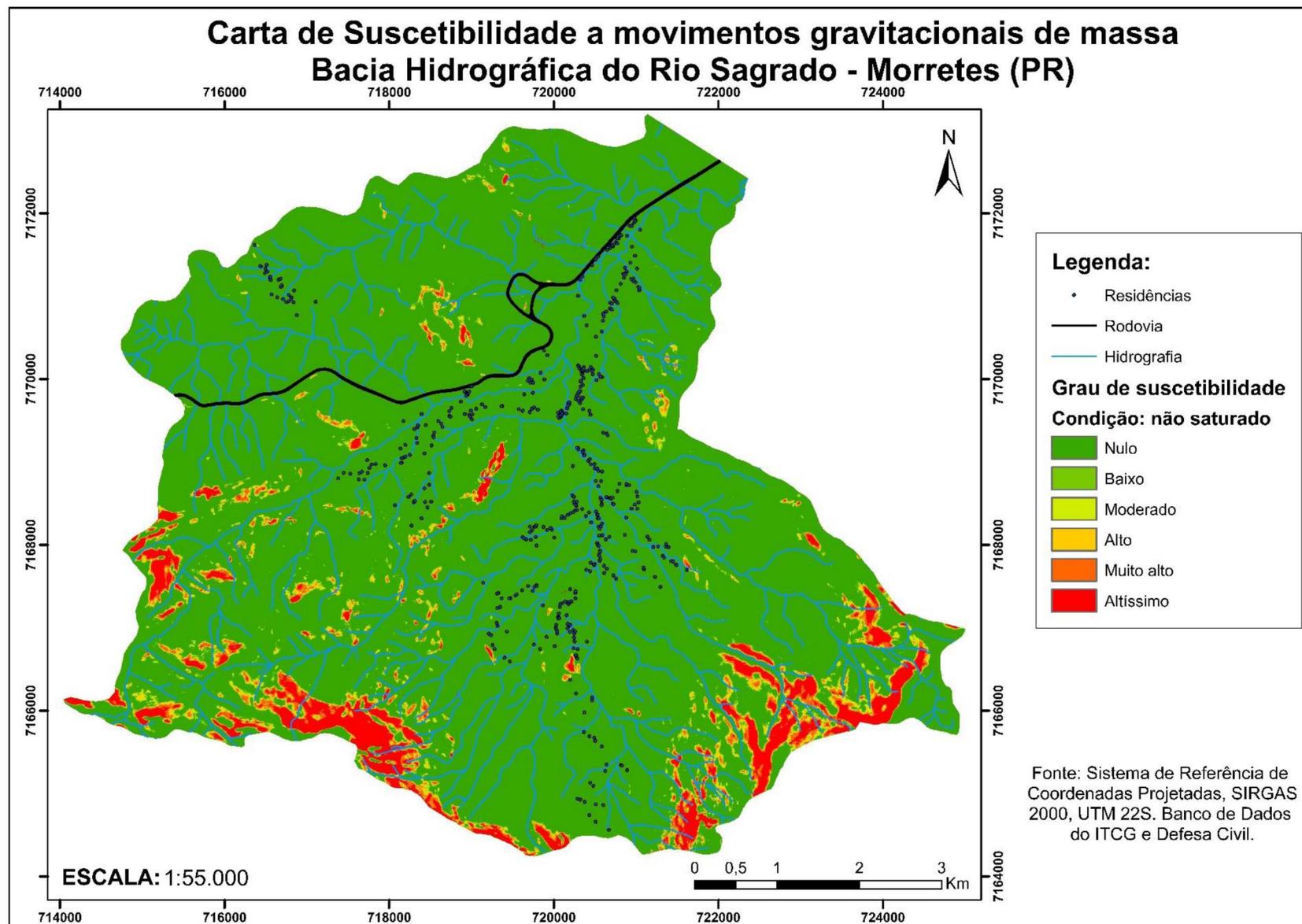
A FIGURA 46 apresenta os rasters de entrada gerados para o modelo de determinação da distribuição probabilística de suscetibilidade a movimentos

gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, para a condição de solo não saturado, ilustrada na FIGURA 47.

FIGURA 46 - RASTERS DE ENTRADA. A) DECLIVIDADE; B) PROFUNDIDADE DO SOLO; C) COESÃO; D) ÂNGULO DE ATRITO; E) SUCCÃO MATRICIAL; F) PESO ESPECÍFICO NATURAL



FONTE: a autora (2018).



FONTE: a autora, 2018

A TABELA 13 apresenta os resultados das análises quantitativas de ocorrência dos graus de suscetibilidade em relação às classes de declividade, em percentual de área, onde a soma total das linhas e colunas da tabela resultam em 100% da área da bacia hidrográfica.

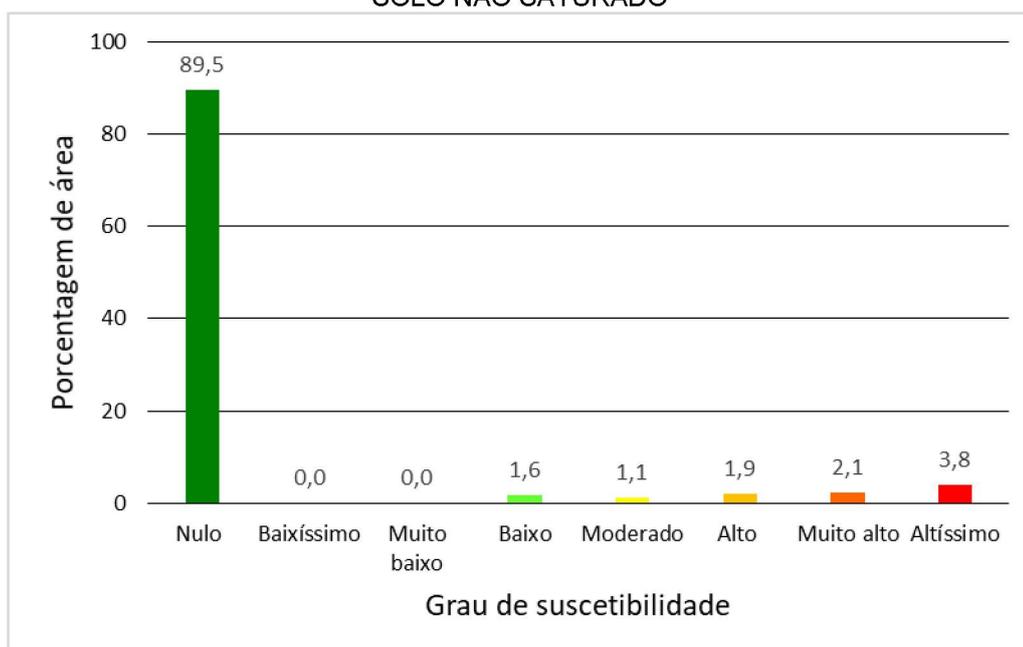
TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE EM RELAÇÃO ÀS CLASSES DE DECLIVIDADE

Relevo	Grau de suscetibilidade					
	Nula	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	Altíssima
Plano	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suave Ondulado	5,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ondulado	22,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forte Ondulado	47,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Montanhoso	12,66	1,57	1,13	1,76	1,91	0,83
Escarpado	0,00	0,00	0,00	0,10	0,21	2,97
<b>Total</b>	<b>89,53</b>	<b>1,57</b>	<b>1,13</b>	<b>1,86</b>	<b>2,11</b>	<b>3,80</b>

FONTE: a autora (2018).

O GRÁFICO 10 apresenta os resultados das análises quantitativas de ocorrência de cada uma das classes de suscetibilidade em percentual de área.

GRÁFICO 10 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO NÃO SATURADO



FONTE: a autora (2018).

Ao comparar-se os resultados obtidos para a carta de suscetibilidade com a declividade do terreno nota-se, assim como na condição de solo saturado, que as áreas com suscetibilidade muito alta e altíssima ocorreram somente em relevos

considerados montanhosos e escarpados. Observa-se ainda que as classes de suscetibilidade baixa, moderada e alta ocorrem, praticamente, somente em relevo montanhoso, visto que há a ocorrência de 0,1% da área de relevo escarpado classificada com alta suscetibilidade. Novamente, relevos com declividade inferiores a 45% não influenciaram na determinação da suscetibilidade, visto que apresentaram suscetibilidades nulas.

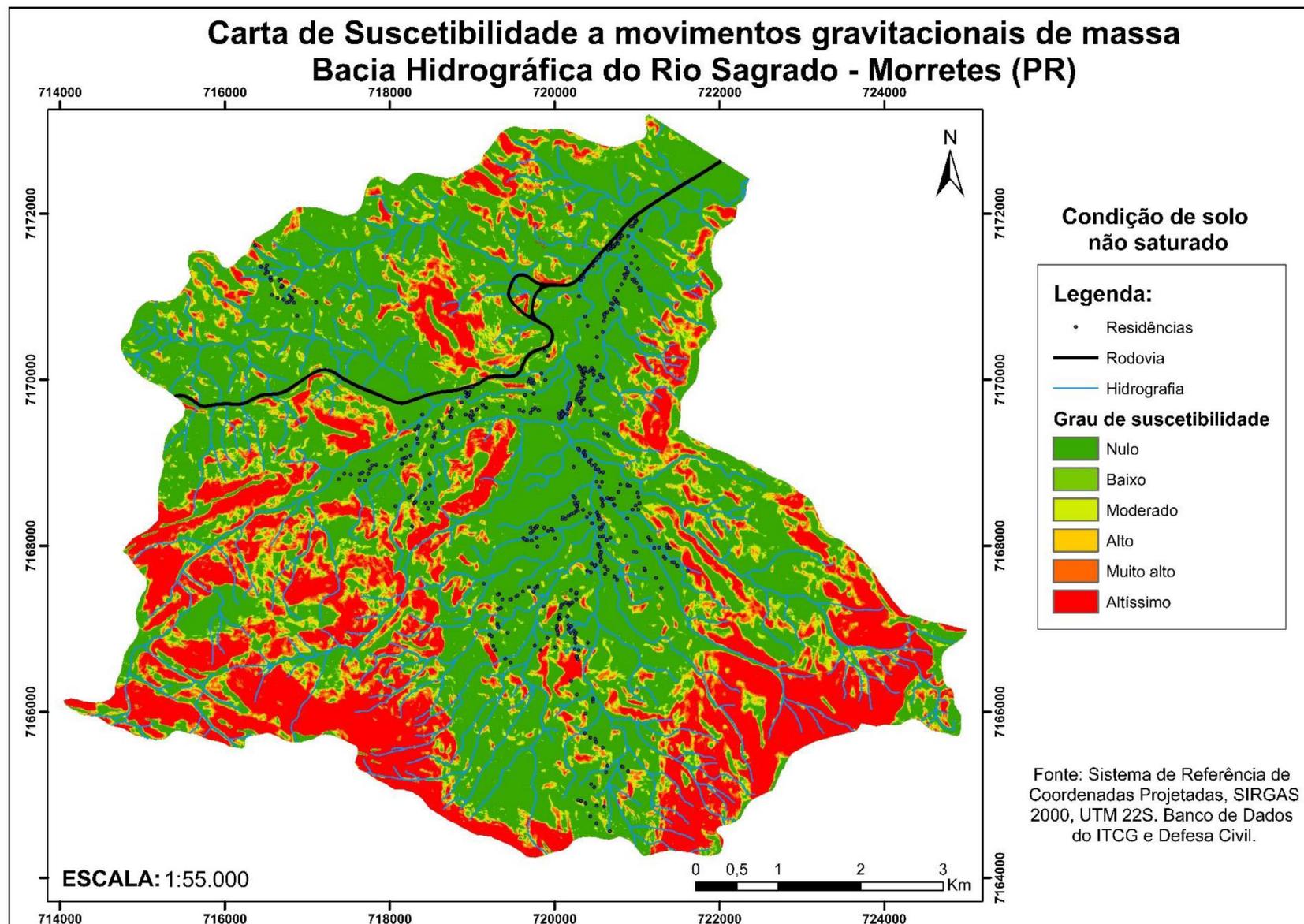
Posteriormente utilizou-se a ferramenta “*Buffer*” para análise dos MGMs e das residências. Ao confrontar os pontos de MGMs com a carta de suscetibilidade gerada para o solo não saturado, observa-se que somente 34,5% dos movimentos ocorreram em áreas instáveis, sendo: 5,6% em área de baixa suscetibilidade, 3,0% em áreas moderadas, 4,3% em áreas de suscetibilidade alta, 7,3% em muito alta e 14,3% em áreas de altíssima suscetibilidade. Assim sendo, 65,5% dos movimentos de massa ficam na área com suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa considerado nula.

Como na condição de solo saturado, ao considerar para a validação somente os polígonos resultantes do mapeamento de cicatrizes do evento de 11/03/2011, verifica-se que o percentual de área nula atingida por MGM diminui para 55,1%. Deste modo, a distribuição de suscetibilidade em áreas instáveis passa a ser de: 6,3% em área de baixa suscetibilidade, 3,2% em áreas moderadas, 6,3% em áreas de suscetibilidade alta, 10,8% em muito alta e 18,3% em áreas de altíssima suscetibilidade. E as residências constantes na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado estão localizadas em áreas de suscetibilidade nula, também para a condição de solo não saturado.

### **Retroanálise da condição de solo não saturado**

Em decorrência da baixa representatividade da carta gerada para a Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado para a condição de solo não saturado, realizou-se também a retroanálise dos parâmetros de resistência para esta condição de saturação do solo, considerando-se os mesmos critérios citados no subitem anterior. A FIGURA 48 ilustra a carta de suscetibilidade obtida como resultado da retroanálise com redução de 30%\* nos parâmetros de resistência.

FIGURA 48 – CARTA DE SUSCETIBILIDADE A MGM OBTIDA A PARTIR DE RETROANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA



FONTE: a autora (2018).

A TABELA 14 apresenta o resumo dos parâmetros de entrada utilizados na retroanálise para a elaboração desta carta.

TABELA 14 – RESUMO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DA RETROANÁLISE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO SATURADO

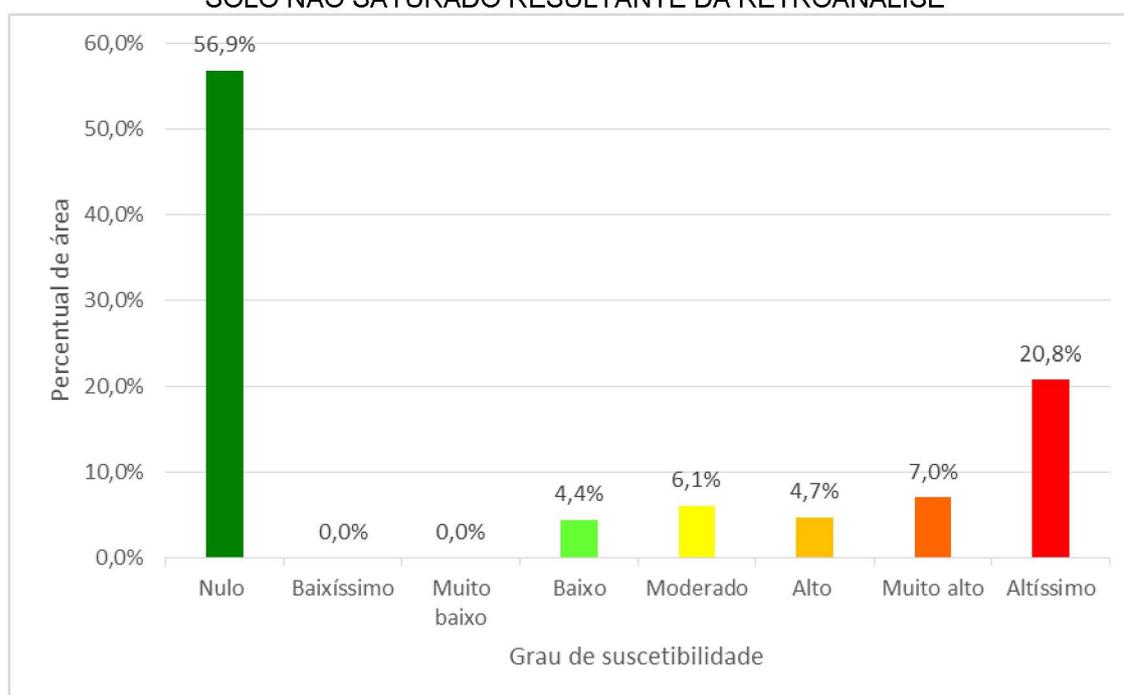
Tipo de material inconsolidado	Parâmetros de entrada			
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	Sucção (kPa)
Solo sedimentar	10,5 ± 6,0	18,9 ± 6,0	16,3	9,0 ± 7,0
Solo residual de granito	6,0* ± 6,0	26,6 ± 6,0	16,8	9,0 ± 7,0
Solo residual de diabásio	7,7 ± 6,0	19,6 ± 6,0	14,1	9,0 ± 7,0

\* A redução do parâmetro de coesão do solo residual de granito foi restringida a 25% do valor inicial devido a limitação de coesão nula.

FONTE: a autora (2018).

O GRÁFICO 11 apresenta os resultados das análises quantitativas de ocorrência de cada uma das classes de suscetibilidade em percentual de área para a carta de suscetibilidade resultante da retroanálise. Ao comparar-se estes valores com as porcentagens obtidas com os parâmetros originais, vemos a mesma redução de 32% na área que era considerada de suscetibilidade nula que no caso de solo saturado, porém o aumento na área de suscetibilidade altíssima foi de aproximadamente 17%, o que evidência o fato de que os parâmetros obtidos em laboratório não refletem as características de campo e a sucção influenciar significativamente na suscetibilidade da região, visto que ela aumenta a resistência do solo ao cisalhamento.

GRÁFICO 11 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PARA A CONDIÇÃO DE SOLO NÃO SATURADO RESULTANTE DA RETROANÁLISE



FONTE: a autora (2018).

Ao confrontar os pontos de MGMs com a carta de suscetibilidade gerada com redução de 30% nos valores dos parâmetros de resistência, observa-se que a distribuição de suscetibilidade nas cicatrizes dos MGMs passou a ser de: 12,8% em área de suscetibilidade nula, 2,8% baixa suscetibilidade, 4,6% em áreas moderadas, 4,9% em áreas de suscetibilidade alta, 8,7% em muito alta e 66,2% em áreas de altíssima suscetibilidade. Ou seja, 87,2% dos movimentos gravitacionais de massa ocorreram em áreas instáveis, um aumento significativo de aderência quando comparado à carta gerada com os parâmetros obtidos em ensaio.

Ao analisar-se as áreas em torno das residências cadastradas na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, verificamos que 95,4% da área em local de suscetibilidade nula, 1,4% em áreas de baixa suscetibilidade, 1,2% em locais de suscetibilidade moderada, 0,5% em suscetibilidade alta, 0,6% em suscetibilidade muito alta e 0,8% em áreas de altíssima suscetibilidade, ou seja, 4,6% desta área encontra-se em locais com algum grau de instabilidade, mostrando a real necessidade de monitoramento das residências presentes neste local, visto que as residências que se encontram em áreas estáveis podem ser atingidas por depósitos de sedimentos.

#### 5.3.1.3 Considerações sobre as cartas de suscetibilidade

Ao compara-se as cartas de suscetibilidade geradas, com os parâmetros obtidos em laboratório, para diferentes condições de saturação do solo, percebe-se que a carta resultante da condição de solo saturado mostrou-se mais conservadora, apresentando 2,5% a menos de pixels em áreas com grau de suscetibilidade nulo. Sendo que ao comparar-se as cartas obtidas com os parâmetros resultantes da retroanálise, esta diferença diminuiu para 2% contudo a condição de solo saturado continua sendo a mais conservadora. Tal fato comprova a influência da sucção matricial na determinação do fator de segurança da encosta, visto que este parâmetro aumenta o fator de segurança e conseqüentemente diminuiu a probabilidade de ruptura. Sendo assim, o cenário de proposto para solo a condição de solo saturado apresenta a carta de suscetibilidade resultante para a condição mais crítica de suscetibilidade.

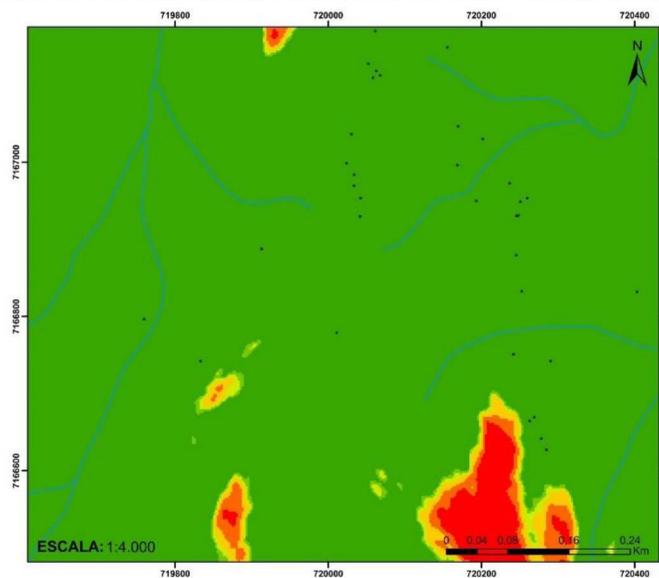
A partir da retroanálise dos parâmetros de resistência dos solos foi possível observar que a coesão e o ângulo de atrito obtidos em laboratório estão superestimados. Isso porque o ensaio de cisalhamento direto foi executado de

maneira lenta a fim de permitir a dissipação das poropressões existentes na amostra, porém *in situ*, no momento da ocorrência de um movimento gravitacional de massa, o cisalhamento ocorre de maneira abrupta. Ou seja, os parâmetros de resistência obtidos consistem em um valor obtido para carregamento lento, enquanto em campo ocorre um mecanismo de ruptura rápido, o que conseqüentemente não reflete a realidade do local. Deste modo, os parâmetros de resistência obtidos em laboratório para a Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado podem ser utilizados na determinação da suscetibilidade do local desde que haja uma redução de 30% no seu valor original, valor este que se mostrou significativo através da retroanálise.

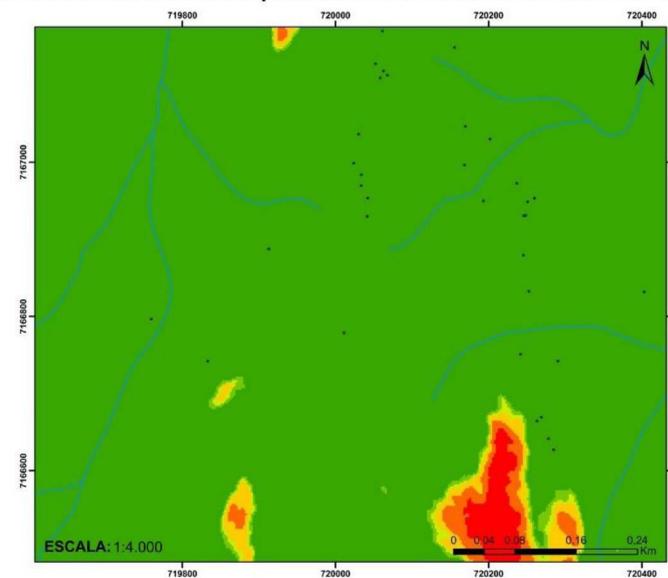
A FIGURA 49 apresenta uma comparação de ampliações das cartas de suscetibilidade obtidas nesse trabalho. Para comparação da variação de suscetibilidade utilizou-se a mesma área de cada uma das cartas de suscetibilidade, a escala utilizada foi de 1:4.000, o que permite a visualização da alternância dos pixels nas diferentes classes de suscetibilidade e conseqüentemente a verificação de áreas mais instáveis nas cartas resultante dos parâmetros obtidos através da retroanálise.

FIGURA 49 – COMPARATIVO DAS CARTAS DE SUSCETIBILIDADE OBTIDAS

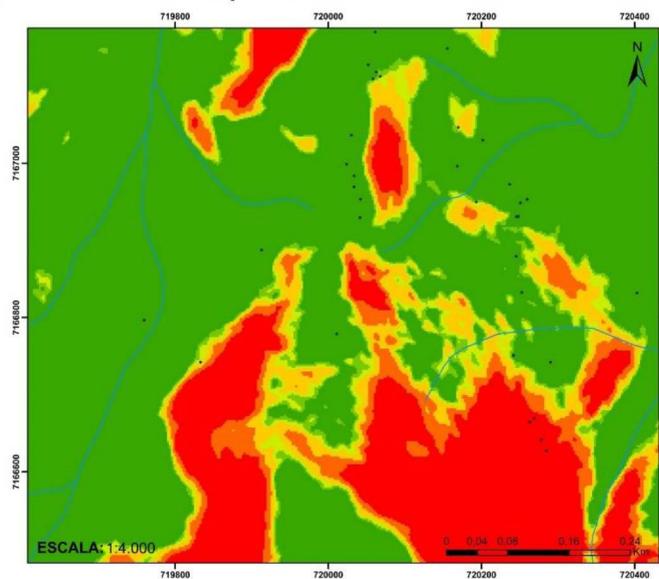
Condição de solo saturado e parâmetros de resistência obtidos em laboratório



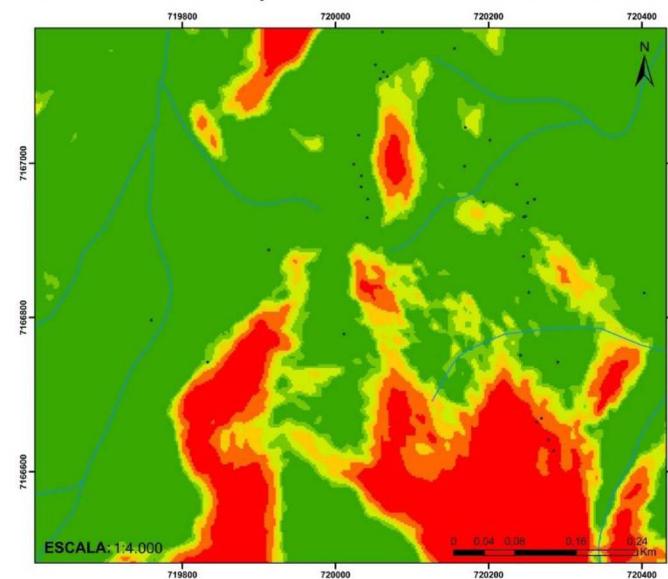
Condição de solo não saturado e parâmetros de resistência obtidos em laboratório



Condição de solo saturado e parâmetros de resistência obtidos na retroanálise



Condição de solo não saturado e parâmetros de resistência obtidos na retroanálise



FONTE: a autora (2018).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação contemplou a caracterização de 4 amostras dos solos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado e elaboração de cenários de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa da área de estudo.

Os resultados da análise granulométrica das amostras dos solos tálus, colúvio 1 e residual de granito mostraram uma predominância da fração de argila, enquanto que a amostra colúvio 2 apresenta predominância da fração de silte. De acordo com a classificação da atividade das argilas, todas as amostras apresentam argilas inativas.

Para fins de simplificação, optou-se por elaborar uma curva de retenção os solos sedimentares (tálus, colúvio 1 e colúvio 2) e uma para o solo residual de granito, considerando-se para este agrupamento de dados a origem dos solos. As curvas de retenção obtidas representaram significativamente os solos ensaios. Contudo, recomenda-se a elaboração de novos ensaios de sucção a fim de densificar os dados e obter-se uma curva que englobe uma maior variação de umidade.

As amostras apresentaram, de modo geral, relações entre os parâmetros de resistência e os dados de granulometria satisfatória se comparado aos obtidos na literatura. Excetuando-se a amostra residual de granito, que apresentou intercepto coesivo nulo e elevado ângulo de atrito, característica de solos arenosos, fato que não se aplica ao solo do local.

A etapa de elaboração cenários de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na bacia hidrográfica do rio sagrado consistiu no principal desafio deste trabalho, tendo em mente que o algoritmo utilizado para a determinação da probabilidade de ruptura precisou ser constantemente alterado a fim de atender às necessidades do trabalho. Por fim, esbarrou-se, ainda, na capacidade computacional dos equipamentos utilizados, fato que limitou os parâmetros variáveis em coesão, ângulo de atrito e sucção, bem como o número de iterações em 385.

Apesar das dificuldades encontradas para determinação da distribuição de suscetibilidade, considera-se satisfatórios os resultados obtidos através da retroanálise dos parâmetros de resistência do solo. Isto porque obteve-se, tanto para a condição de solo saturado quanto para a condição de solo não saturado, obteve-se aproximadamente 87,5% da porcentagem de pixels das cicatrizes mapeadas pela empresa Geoplanejamento em áreas que possuem algum grau de instabilidade.

A elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa para as condições de solo saturado e não saturado evidenciou a necessidade de obter-se um mapeamento detalhado das cicatrizes dos movimentos gravitacionais, visto que a porcentagem de área instável variou consideravelmente quando se considerou o “buffer” das coordenadas dos MGMs em vez da espacialização da cicatriz para validação da distribuição de suscetibilidade. Assim, mostra-se necessário a realização de um levantamento detalhado que ilustre as zonas de ruptura, trânsito e depósito nos movimentos gravitacionais de massa.

A comparação entre as cartas de suscetibilidade geradas para diferentes condições de saturação do solo, tanto com os parâmetros obtidos em laboratório quanto com os parâmetros resultantes da retroanálise, comprovou a influência da sucção matricial na determinação do fator de segurança da encosta, uma vez que a carta resultante da condição de solo saturado (sem sucção) mostrou-se mais conservadora, apresentando menor área com grau de suscetibilidade nulo.

A retroanálise dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo permitiu corrigir os valores utilizados para a terminação das áreas suscetíveis a MGMs. Além de evidenciar a necessidade da consideração das características de campo na realização de ensaios de laboratório, uma vez que os ensaios de cisalhamento direto foram executados com uma velocidade de cisalhamento baixa, enquanto que *in loco* o mecanismo de ruptura do solo é rápido. Deste modo, os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de laboratório puderam ser utilizados, desde que reduzido 30% de seu valor original.

Por fim, conclui-se que o algoritmo desenvolvido para a elaboração de cartas de suscetibilidade a partir do método probabilístico de Monte Carlo, inserido diretamente no SIG, consiste em uma ferramenta pioneira de análise. Isto porque este algoritmo considera a variabilidade intrínseca dos parâmetros geotécnicas do solo, além de possuir um alto potencial de desenvolvimento e aprimoramento pois, com o recurso computacional correto, há possibilidade de inserir variabilidade nos demais parâmetros de entrada e conseqüentemente refinar cada vez mais as análises de suscetibilidade.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foi possível determinar probabilisticamente a distribuição de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado variando os parâmetros de intercepto coesivo, ângulo de atrito e sucção do solo independentemente. Assim, sugere-se determinar tal distribuição considerando a interdependência dos parâmetros de entrada, bem como considerar a profundidade da superfície de ruptura e peso específico do solo como parâmetro variável. Além disso, recomenda-se a execução de ensaios de campo para determinação exata do nível d'água a fim de validar as hipóteses desta dissertação.

Para o cálculo do fator de segurança, desconsiderou-se as parcelas de pressão do peso da vegetação sobre as vertentes, pressão exercida pelo vento sobre a cobertura vegetal e a altura da zona de solo, seria interessante acrescentar esses parâmetros na análise a fim de se verificar a real influência dos mesmos.

Recomenda-se ainda, a coleta de mais amostras ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, a fim de caracterizar os solos que não foram contemplados nos ensaios de laboratório deste trabalho.

Finalmente, sugere-se que seja executado um levantamento das variáveis monetárias presentes na bacia hidrológica, a fim de se gerar uma carta de risco a partir de dados de uso e ocupação do solo e localização das residências.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502: Rochas e solo**. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

ALBUQUERQUE, P. J. R. **Análise do comportamento de estacas pré-moldadas de pequeno diâmetro, instrumentada, em solo residual de diabásio da região de Campinas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas, 1996.

APAZA, M. A. F.; BARROS, J. M. C. **Análise probabilística de estabilidade de taludes pelo método Monte Carlo**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia, 2014.

ASSIS, A. P. **Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia**. Apostila: Publicação G.AP-002/01. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Brasília, 2002.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **D5298: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. 2003.

BENEVELI, R. M.; CARVALHO, M. O. M.; TOLEDO, F. G. L.; CARVALHO, J. C. **Sensor térmico para a medição da sucção matricial do solo**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo. Volume 2, p. 15-25. São Carlos, 2004.

BENEVELI, R. M.; de CAMPOS, T. M. P. **Efeitos da secagem seguida da saturação na resistência de um solo compactado em laboratório**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo. Volume 2, p. 9-13. São Carlos, 2004.

BIGARELLA, J.J.; BECKER R.D.; MATOS D.J.; WERNER, A. A. **Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná**. Curitiba: Secretaria de Estado do Planejamento, Governo do Paraná, 1978, 248 p.

BIGARELLA, J.J.; BECKER R.D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994.

BORCHARDT, N. **Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade das vertentes do alto e médio curso da Bacia do Rio Sagrado, PR**. Dissertação (Mestre em Geologia Ambiental) – Curso de Pós-Graduação em Geologia. UFPR, Curitiba, 2005.

BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL (2012). **Lei Federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Disponível: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm)>. Acesso em: 31 mai 2018.

BUENO, K.E.M.; SANTOS, I.; SCHULTZ, G.B.; **Análise da Sensibilidade do modelo SINMAP à resolução do MDT na simulação de deslizamentos na bacia do Rio Sagrado – Serra do Mar Paranaense**. IX Simpósio Nacional de Geomorfologia – IX SINAGEO. Rio de Janeiro, 2012.

CÂMARA, G. *et al.* **Anatomia de sistemas de Informações Geográficas**. Unicamp, Campinas, 1996.

CAMPOS, T. M. P.; MOTTA, M. F. B. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados**. In: CARVALHO, J. C. *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 17., p. 465-497. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CARVALHO, C. S. **Risco geotécnico em favelas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., COBRAMSEG, Brasília, 1998. Anais... Brasília, 1998, v.4, p.123-141.

CEMADEM. **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais**. 2012. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/cemadenarquivos/IIIrtdocemaden/III%20RT%20-%20Cemaden%20%2002-04-2012.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à engenharia**. 2 ed. São Paulo: Gremio Politécnico, 1979.

COSTA, Eli Antônio da. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2005.

DEFESA CIVIL PARANAENSE. **Cadastramento de residências na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado**. 23/05/2018. (Arquivos Internos).

DEFESA CIVIL PARANAENSE. **Banco de dados de ocorrências - GEODC**. 2018. (Arquivos Internos).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 094: Solos – determinação da densidade real**. 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de implantação básica de rodovia**. 3. ed. - Rio de Janeiro, 2010. 617p.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; e SILVA, M. F. **O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012.

DUEÑAS ZAMBRANA, V. **Análise numérica da influência de chuvas extremas na estabilidade de taludes**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2014.

EL-RAMLY, H. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. 2001. 391p. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering). Faculty of Graduate Studies and Research. Department of Civil and Environmental Engineering. Edmonton, Alberta, Canada, 2001.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006.

FARIAS, M.M.; ASSIS, A. **Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11 COBRAMSEG, v.2, p.1305 - 1313. Brasília, 1998.

FERNANDES, E. M. G. P. **Estatística aplicada**. Universidade do Minho. Braga, 1999.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada a agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991.

FERREIRA, N.C. **Apostila de Sistema de Informações Geográficas**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás – Sistemas de Informações Geográficas. Goiânia, 2006.

FIORI, A. P.; CARMIGNIANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes**. 2da edição. Curitiba: Editora UFPR, 2009.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LACERDA, W. A. **Resistência ao cisalhamento de solos tropicais não-saturados**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados -

Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

**GEOPLANEJAMENTO. Mapeamento geológico-geotécnico da porção leste da Serra do Mar, Paraná.** Curitiba: MINEROPAR. 2011.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GITIRANA Jr., G. F. N., MARINHO, F. A. M. e SOTO, M. A. A. **A curva de retenção de água de materiais porosos.** In: CARVALHO, J. C. *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 9., p. 205-229. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

GONÇALVES, Y.D.C. **Estudo de Movimento de Massa do tipo Rastejo (*Creeping*) no Morro do Benjamin, em São José – SC.** Monografia (Bacharel em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

GONZÁLEZ A., A. M. **Simulação geológico-geotécnica para avaliação de estabilidade de taludes a partir de técnicas de geoprocessamento.** Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2017.

GONZÁLEZ, A.A.M.; PASSINI, L.B.; KORMANN, A.C.M. **Rainfall Effects on Pore Pressure Changes in a Coastal Slope of the Serra do Mar in Santa Catarina.** Soils and Rocks, v. 40, p. 263-278. São Paulo, 2017.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** 2a ed. São Paulo: E. Blucher, 1984. 194p.

**INFRAESTRUTURA URBANA. Movimento de terra.** INFRAESTRUTURA URBANA: Fundações e Contensões, n.10, Dezembro, 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/10/artigo243465-1.aspx>>. Acesso em: 03 jun 2018.

JOSEPH, J. **Vector and Raster data model images.** 2014. Disponível em: [http://www.newdesignfile.com/post\\_vector-and-raster-data-model\\_15523/](http://www.newdesignfile.com/post_vector-and-raster-data-model_15523/). Acesso em: 19 dez 2018.

KORMANN, A. C. M. *et al.* **Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea.** IX Workshop sobre os Recursos de Desenvolvimento Tecnológico, 2014.

KORMANN, A. C. M.; SESTREM, L. P.; PRETTO, J. H. F. **Comportamento de Encostas no Estado de Santa Catarina: Revisão de Mecanismos Geológico-Geotécnicos e Estudo de Caso.** IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul. Criciúma, 2013.

KOZCIAK, S. **Análise determinística da estabilidade de vertentes na Bacia do Rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná.** Tese (Doutorado em Geologia Ambiental). Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York: J. Wile, 1969.

LAZARIM, T. P.; KORMANN, A. C. M.; SESTREM, L. P. **Caracterização geotécnica e retroanálise da ruptura de uma encosta litorânea situada na BR-101, Santa Catarina.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia, 2014.

LISTO, F. L. R. **Propriedades geotécnicas dos solos e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos.** Tese (Doutorado Geografia Física). Departamento de Geografia. USP. São Paulo, 2015.

LOPES, E. S. S. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da serra do mar paulista, na escala de 1:10.000.** Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. Rio Claro, 2006.

LOPES, F. C. A. **Avaliação da influência da distribuição espacial da espessura do solo e do nível freático na estabilidade de encosta.** Dissertação (Mestrado em Geografia). Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MACEDO E. S.; MARTINS P. P. D. **Análise do Banco de Dados de Mortes por Deslizamentos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).** 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Bento Gonçalves, 2015.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. **Potenciais da água no solo**. In: CARVALHO, J. C. *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 4., p. 79-96. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

MARÉS MIKOSIK, A. P. *et al.* **Análise integrada das ocorrências dos escorregamentos translacionais rasos na bacia hidrográfica do Rio Sagrado**. 7º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. Maringá, 2010.

MARÉS MIKOSIK, A. P. **Influência da topografia nas ocorrências dos escorregamentos na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado**. Monografia (Bacharelado em Geografia) – UFPR, Curitiba, 2011.

MARINHO, F. A. M. **Medição da sucção em solos**. 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, volume 2, p. 373-398. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1997.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; GITIRANA JR., G. F. N. **Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção**. In: CARVALHO, J. C. *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 10., p. 231-256. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

MASSAD, F. **Obras de Terra**. 216 p. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Vulnerabilidade Ambiental**. 192 p. Brasília, 2007.

MINEROPAR. Serviço Geológico do Paraná. **Mapeamento de áreas de risco associado a movimentos gravitacionais de massa na bacia hidrográfica do Rio Sagrado, município de Morretes (PR)**. Curitiba: Mineropar, 2014.

NASSER, R. B. **McCloud service framework: arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na simulação de Monte Carlo na Cloud**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática, 2012.

NICHEL, A. **Diagnóstico, monitoramento e concepção de medidas de estabilização do colúvio do km 23+400 da Rodovia RS/115**. Dissertação

(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

OKA-FIORI; SANTOS, L.J.C.; CANALI, N. E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000**. 59 p. Minerais do Paraná – MINEROPAR, Curitiba, 2006.

OLIVEIRA, D. M. **Algoritmo em MATLAB**. Comunicação interna. 2018.

ONU BR – Nações Unidas no Brasil. **Desastres naturais custam R\$ 800 milhões ao Brasil por mês**. 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/desastres-naturais-custam-r-800-milhoes-ao-brasil-por-mes/>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

PARIZZI, M. G. *et al.* **Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG**. Geografias (UFMG), v. 6, n. 2, p. 49-68, 2010.

PECAPEDRA, L. L. **Estudo da resistência ao cisalhamento não saturada de solos residuais de granito e diabásio de Florianópolis/SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PROJETO APOEMA. **Movimentos gravitacionais de massa**. Editora do Brasil. Disponível em: <[http://editoradobrasil.com.br/porta\\_educacional/fundamental2/projeto\\_apoema/oed/geografia/geografia6\\_objeto3/index.html](http://editoradobrasil.com.br/porta_educacional/fundamental2/projeto_apoema/oed/geografia/geografia6_objeto3/index.html)>. Acesso em 03 jun 2018.

SIMEPAR. Dados pluviométricos da estação cód.: 25344849. 18/09/2017. (Arquivos Internos).

SILVA, W.P. *et al.* **“LAB Fit Ajuste de Curvas”**: Um software em português para tratamento de dados experimentais. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 4, p. 419 - 427, (2004).

SILVEIRA, R. M. **Comportamento geotécnico de um solo coluvionar de São Vendelino (RS)**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil / Geotecnia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

SAMPAIO, C. A. C.; ALVES, F. K. **Arranjo socioprodutivo de base comunitária (apl.com)**: um projeto piloto na comunidade do entorno da microbacia do rio sagrado (Morretes/PR). Organizações Rurais & Agroindustriais, Lavras, v. 15, n. 1, p. 30-42, 2013.

SESTREM, L. P. *et al.* **Precipitation Influence on the Distribution of Pore Pressure and Suction on a Coastal Hillside**. Soils and Rocks, v. 38, p. 81-92. São Paulo, 2015.

SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M. **Implantação de um sistema de monitoramento automatizado para monitoramento de uma encosta litorânea rodoviária**. 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Santos, 2013.

SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M. MARINHO, F. A. M. **A field study on the influence of rainfall intensity, suction and load distribution, in a reinforced unsaturated slope in Brazil**. 12th International Symposium on Landslides. Naples - Italy, 2016.

SILVA, M. A. *et al.* **Caracterização Geológico-Geotécnica e Análise de Estabilidade de um Talude na BR-376 – Serra do Mar/PR**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano COBRAMSEG. Salvador, 2018

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 206 f. Tese (Doutor em Geotecnia). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2004.

SWANSTON, D. N.; SCHUSTER, R. L. **Long term landslide hazard mitigation programs: structure and experience from other countries**. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. v.26, n.1, p.109 - 133. 1989. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/xxvi/1/109/137372/long-term-landslide-hazard-mitigation-programs>>. Acesso em: 27 mai 2018.

TERLIEN, M. T. J. **Hydrological landslides triggering in ash-covered slopes os Manizales (Colombia)**. Geomorphology 20: 165-175. 1997.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering**. Engineering and Design, Department of the Army. Washington, DC, 1997.

VARGAS, M. **Mecânica dos solos**. São Paulo: USP, Escola Politécnica, 1974. 203p.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes**. In S. KRIZEK (ed) Slope movement types and processes. Washington: p. 11-33. 1978.

VICTORINO, M. M. **Influência da chuva nas poropressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR 376 na serra do mar paranaense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). UFPR, Curitiba 2015.

VILAR, O. M. *et al.* **Solos não saturados**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. L. **Eventos perigosos geológico-geotécnicos no Brasil**. I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis, 2004.

## ANEXO A – TABELA RESUMO DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS

(continua)

N° da amostra	UTMs	Espess. camada (m)	Classif.	Cota (m)	Sedimento			Classe textural	Umidade na coleta (%)	Índice de campo					LL e LP	Permeab. (K) (cm/s)	
					Ag %	Si %	Ar %			$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$e_o$	n %	S %			
AM 01	720.200 E 7.169.607 N	3 a 5	Aluvião	82	62	17	21	Muito argiloso	40,9	2,758	1,28	1,16	53,6	97,5	60,1	41,2	3x10-4
AM 02	720.652 E 7.168.636 N	> 3	Colúvio	133	21	25	54	Franco argiloso arenoso	21,5	2,723	1,32	1,07	51,6	54,9	32,2	26,7	1x10-3
AM 03	720.282 E 7.169.354 N	3 a 5	Aluvião	92	34	23	43	Franco argiloso	24,3	2,758	1,41	0,96	48,9	70,2	54,8	44,5	1x10-3
AM 04	720.439 E 7.167.735 N	< 3	Colúvio	168	39	40	21	Franco argiloso	32	2,766	1,39	0,99	49,7	89,5	49,9	40,5	2x10-4
AM 05	720.516 E 7.165.042 N	2	Colúvio	480	16	56	28	Franco siltsoso	33,8	2,87	1,15	1,5	60	64,7	46	44,4	9x10-4
AM 06	721.081 E 7.166.270 N	> 3	Colúvio	387	61	15	24	Muito argiloso	38,6	2,82	1,2	1,34	57,3	81,1	71	42,2	5x10-4
AM 07	720.374 E 7.166.297 N	> 3	Colúvio	316	63	31	6	Muito argiloso	48,2	2,959	1,12	1,65	62,3	86,3	71,2	46,5	4x10-4
AM 08	720.334 E 7.166.252 N	6	Colúvio	332	41	27	32	Argila	35,9	2,79	1,24	1,25	55,6	79,7	45,5	30,9	1x10-3
AM 09	720.333 E 7.166.887 N	> 8	Colúvio	285	51	37	12	Argila	36,2	2,871	1,12	1,56	61,9	66,6	56,8	40,5	9x10-4

(continuação)

Nº da amostra	UTMs	Espess. camada (m)	Classif.	Cota (m)	Sedimento			Classe textural	Umidade na coleta (%)	Índice de campo					LL e LP	Permeab. (K) (cm/s)	
					Ag %	Si %	Ar %			$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$e_o$	n %	S %			
AM 10	720.045 E 7.166.971 N	< 3	Colúvio	331	57	24	19	Argila	34,5	2,725	1,24	1,2	54,6	78,3	60,1	40,5	4x10-4
AM 11	720.321 E 7.167.452 N	8	Colúvio	249	59	20	21	Argila	36,4	2,798	1,32	1,12	52,9	90,9	54,7	42,2	9x10-4
AM 12	719.394 E 7.167.291 N	> 3	Colúvio	326	59	19	22	Argila	33,4	2,828	1,25	1,26	55,8	74,8	54,5	42,2	6x10-4
AM 13	719.192 E 7.167.692 N	5	Colúvio	301	67	13	20	Muito argiloso	37,9	2,841	1,25	1,27	55,9	85	68,6	41,4	3x10-4
AM 14	718.464 E 7.169.011 N	< 3	Colúvio	303	51	12	37	Argila	29,2	2,736	1,29	1,11	52,7	71,9	59,2	37,4	1x10-3
AM 15	719.171 E 7.169.428 N	> 3	Colúvio	196	60	12	28	Muito argiloso	26,9	2,811	1,22	1,31	56,6	58	59,3	38,3	-
AM 16	719.376 E 7.169.705 N	< 3	Colúvio	156	0	17	13	Muito argiloso	45	3,052	1,13	1,71	63,1	80,2	72	48,8	8x10-4
AM 17	721.471 E 7.167.292 N	< 2	Colúvio	321	64	13	23	Muito argiloso	41,3	2,806	1,11	1,52	60,3	76,4	61,2	39,8	9x10-4
AM 18	722.033 E 7.167.752 N	< 2	Residual	407	61	17	22	Muito argiloso	35,1	2,864	0,97	1,97	66,3	51,1	61,8	42,7	7x10-4
AM 19	721.658 E 7.168.030 N	< 2	Colúvio	285	40	27	33	Franco argiloso	28,9	2,773	1,26	1,2	54,6	66,7	40	34,6	1x10-3

(conclusão)

N° da amostra	UTMs	Espess. camada (m)	Classif.	Cota (m)	Sedimento			Classe textural	Umidade na coleta (%)	Índice de campo					LL e LP	Permeab. (K) (cm/s)	
					Ag %	Si %	Ar %			$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$e_o$	n %	S %			
AM 20	721.180 E 7.168.431 N	5 a 6	Colúvio	227	47	30	23	Argila	34	2,802	1,24	1,26	55,7	75,9	53,2	35,4	8x10-4
AM 21	721.534 E 7.169.236 N	< 1	Colúvio	297	42	16	32	Argila	29,3	2,764	1,32	1,1	52,4	73,8	51,5	32,9	1x10-3

Ag - argila

Si - silte

Ar - areia

 $\rho_s$  - massa específica dos sólidos $\rho_d$  - massa específica seca de campo $e_o$  - índice de vazios

n - porosidade

S - grau de saturação

K - Permeabilidade

FONTE: Mineropar (2014).