

Diogo Marcelo Zimmermann

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A
DESLIZAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
CACHOEIRA E DO RIO DA PRATA – JOINVILLE/SC**

Dissertação submetido(a) ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Zimmermann, Diogo Marcelo

MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA E DO RIO DA PRATA – JOINVILLE/SC / Diogo Marcelo Zimmermann, orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2019.

177 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Mapeamento Geotécnico. 3. Borehole Shear Test. 4. Áreas Suscetíveis à Deslizamento. 5. Deslizamento Translacional e Rotacional. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Diogo Marcelo Zimmermann

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A
DESLIZAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
CACHOEIRA E DO RIO DA PRATA – JOINVILLE/SC**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Florianópolis, 02 de maio de 2019.

Prof. Norberto Hochheim, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Everton da Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Juan Antonio Altamirano Flores, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus avós Adélia Cabral da Cunha e José Geraldo da Cunha (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

A Édina Karine Liebel por toda sua paciência, companheirismo e compreensão ao longo desta jornada e de outras que virão.

Aos meus pais Osni Zimmermann e Gicelia da Graça Zimmermann, por me dar a dádiva da vida ensinando-me os devidos valores.

Aos meus irmãos, Claiton Leandro Zimmermann e Vagner Augusto Zimmermann por oferecerem sempre a mais honesta amizade.

Aos meus avós Adélia Cabral da Cunha e José Geraldo da Cunha (*in memoriam*) por todo o carinho oferecido.

Ao Professor Doutor Rafael Augusto dos Reis Higashi, por sua dedicação, paciência e humildade oferecida ao longo do curso; por sua orientação e participação efetiva na elaboração deste trabalho.

A Professor Doutor Marcelo Heidemann, por prestar todo o suporte necessário para a realização dos ensaios de caracterização dos solos e acompanhar presencialmente a realização dos mesmos.

A Defesa Civil do Município de Joinville/SC, em especial ao Engenheiro Ambiental Maiko Alexander Bindemann que prontamente atendeu a todas as solicitações de dados necessárias para realização deste trabalho.

Aos Professores membros da Banca de Qualificação Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola e Prof. Dr Orlando Martini de Oliveira, por apresentar novos olhares ao trabalho e levantar preocupações a serem tomadas pelo autor no momento das análises de dados.

Professores membros da Banca Final, Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira, Prof. Dr. Everton da Silva e Prof. Dr. Juan Antonio Altamirano Flores por aceitar o convite e apresentar contribuições indispensáveis para a melhora do presente trabalho.

Aos colegas, mestrando Matheus Klein Flash, doutoranda Gisele Reginatto e doutoranda Regiane Sbroglia por todo o suporte e companheirismo oferecido ao longo do curso.

Ao corpo docente do curso de mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial por compartilhar o seu conhecimento e experiência.

A todos que participaram direta ou indiretamente desta formação acadêmica deixo registrado o mais humilde e sincero muito obrigado.

O Homem não é nada mais do que aquilo que
faz de si próprio. (Jean Paul Sartre)

RESUMO

Desde os períodos mais remotos da história da humanidade, os Homens procuram aglomerar sua ocupação em áreas próximas à grandes corpos hídricos, contudo, tal herança histórica/cultural, resulta em ocupações que podem expor as pessoas a movimentos naturais do relevo contidos na abrangência das Bacias Hidrográficas, portanto, é de extrema importância reconhecer os locais mais suscetíveis aos deslizamentos para ordenar a ocupação urbana e/ou dimensionar os riscos associados a cada ocupação. O presente trabalho tem como objetivo mapear as áreas suscetíveis a deslizamentos da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, uma vez que estas, apresentam grande importância econômica e social para o município Joinville/SC. Esta pesquisa pode ser caracterizada quanto a sua natureza como sendo aplicada e foi desenvolvida de forma exploratória. Para composição final deste trabalho, foi elaborado o mapa geotécnico preliminar em ambiente SIG (*software* ArcGis versão 10.3), com o emprego da metodologia de Davison Dias (1995), que doutrina a interação entre as bases cartográficas de pedologia, litologia, modelo digital de terreno/curvas de nível/declividade. As bases cartográficas utilizadas, foram obtidas através plataforma SimGeo com escalas variada de 1:1.000 e 1:5.000, sendo estas, confeccionadas pela Aeroimagem no ano de 2007 e atualizadas em 2010. Este trabalho, também apresenta o número total ocorrências de deslizamentos registrados pela Defesa Civil de Joinville/SC, desde o ano de 2008, onde, tornou-se viável a interação qualitativa com os mapas de declividade e geotécnico, para locação dos pontos de coleta das amostras de solo a serem ensaiadas. Os resultados apontaram: que as unidades geotécnicas com maior suscetibilidade aos deslizamentos foram o Neossolo Litólico com Subtrato de Gnaiss, o Argissolo Amarelo com Subtrato de Gnaiss e o Cambissolo Háptico com Subtrato de Gnaiss; que o relevo e a ocupação urbana são aspectos de grande relevância para ocorrência de deslizamentos e que as áreas com elevada urbanização não apresentaram bom desempenho na previsão dos eventos de deslizamentos, entretanto, o que se buscou foi uma ferramenta auxiliar de orientação do direcionamento das possíveis áreas de expansão urbana. Para tal verificou-se que a metodologia aplicada neste trabalho apontou bons resultados, uma vez que, as porções de terreno com relevo natural (com baixa influência de urbanização) apresentaram bons resultados e se mostraram úteis para integrar as ferramentas de planejamento urbano da cidade Joinville/SC, visto que reconhecer a fragilidade de cada unidade geotécnica é fundamental para fomentar políticas públicas de uso e ocupação do solo.

Palavras-chave: Mapeamento Geotécnico, Áreas Suscetíveis à Deslizamento, Modelo SHALSTAB, Deslizamento Rotacional e Translacional,, *Borehole Shear Test*.

ABSTRACT

From the earliest periods of human history, Men seek to cluster their occupation in areas close to large water bodies, however, such a historical/cultural heritage, results in occupations that can people expose to the natural movements of relief contained in the coverage of the Basins Hydrographic, therefore, it is of extreme importance to recognize the places most susceptible to landslides to order the urban occupation and size the risks associated with each occupation. The present work aims to area's map the susceptible to landslides of the Cachoeira River Basin and the River Plate Basin, since these are of great economic and social importance for the city of Joinville/SC. This research can be characterized as to its nature as being applied and was developed in an exploratory way. For the final composition of this work, the preliminary geotechnical map was elaborated in a GIS environment (ArcGis software version 10.3), using the methodology of Davison Dias (1995), which teaches the interaction between the cartographic bases of pedology, lithology, digital model of terrain / contours / slope. The cartographic bases used were obtained through the SimGeo platform with varied scales of 1: 1,000 and 1: 5,000, these being made by Aeroimagem in the year of 2007 and updated in 2010. This work also shows the total number of occurrences of landslides recorded by Civil Defense of Joinville / SC, since the year 2008, where qualitative interaction with the slope and geotechnical maps became possible, in order to lease the collection points of the soil samples to be tested. The results indicated that the geotechnical units with the greatest susceptibility to landslides were the Gnaisse Substratum, the Yellow Argisol with Gnaisse Substrate and the Hapless Cambisol with Gnaisse Substrate; that the relief and urban occupation are aspects of great relevance for the occurrence of landslides and that the areas with high urbanization did not present a good performance in the prediction of landslide events, however, what was sought was an auxiliary tool guiding the direction of the possible areas of urban expansion. For this, it was verified that the methodology applied in this work indicated good results, since the portions of land with natural relief (with low influence of urbanization) presented good results and were useful to integrate the tools of urban planning of the city Joinville / SC, since recognizing the fragility of each geotechnical unit is fundamental to foment public policies of land use and occupation.

Keywords: *Geotechnical Mapping, Sliding Susceptible Areas, SHALSTAB Model, Rotational and Translational Sliding, Borehole Shear Test.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Classificação dos Movimentos Gravitacionais de Massa segundo Carson e Kirkby (1975)..... | 33 |
| Figura 2 – Superfície de Ruptura para o Deslizamento Rotacional..... | 37 |
| Figura 3 – Superfície de Ruptura do Deslizamento Translacional..... | 38 |
| Figura 4 – Exemplo de Envoltória Morh-Coulomb | 39 |
| Figura 5 – Ensaio <i>Borehole Shear Test</i> | 44 |
| Figura 6 – Inteiração entre o Solo e as Placas do BST..... | 45 |
| Figura 7 – Envoltória de Cisalhamento do Solo Inundado através dos Ensaios BST e CD..... | 46 |
| Figura 8 – Comparação entre Mapas de Suscetibilidade à Deslizamentos realizados através dos Ensaios BST e CD em condição inundada..... | 47 |
| Figura 9 – Representação do Modelo Hidrológico de Estado Uniforme | 56 |
| Figura 10 – Modelo de Estabilidade de Talude..... | 58 |
| Figura 11 – Esquema de Cálculo de Morgenstern, Price (1965)..... | 63 |
| Figura 12 – Fluxograma de Atividades Desenvolvidas neste Trabalho | 66 |
| Figura 13 – Layout da Plataforma SIMGEO Joinville/SC..... | 67 |
| Figura 14 – Metodologia para Gerar Mapa Geotécnico..... | 70 |
| Figura 15 – Classificação dos Polígonos para o Mapa Geotécnico..... | 71 |
| Figura 16 – Ajuste das Unidades Geotécnicas | 74 |
| Figura 17 – Ensaios Realizados | 74 |
| Figura 18 – Característica dos Locais de Ensaio..... | 75 |
| Figura 19 – Localização das Amostras Utilizadas nos Ensaios de Laboratório e Coleta de Amostras Indeformadas | 76 |
| Figura 20 – Localização dos Ensaios de Resistência (BST) | 80 |
| Figura 21 – Fluxograma de Atividades para Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos Rotacionais..... | 84 |
| Figura 22 – Diferentes Inclinações Simuladas nos Taludes Infinitos.... | 85 |
| Figura 23 – Composição do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos | 87 |
| Figura 24 – Composição das Classes de Estabilidade do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos | 87 |
| Figura 25 – Cicatriz no mesmo local da BHRP em datas diferentes.... | 88 |
| Figura 26 – Plataforma SimGeo para <i>download</i> de Ortofotos | 89 |
| Figura 27 – Cicatriz identificada na Ortofoto..... | 89 |
| Figura 28 – Localização Geográfica da Área de Estudo | 91 |
| Figura 29 – Mapa Litológico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira | 93 |
| Figura 30 – Mapa Litológico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata... | 94 |
| Figura 31 – Mapa Pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32 – Mapa Pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata . | 96 |
| Figura 33 – Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira | 100 |
| Figura 34 – Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata | 101 |
| Figura 35 – Imagem Landsat da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira | 102 |
| Figura 36 – Imagem Landsat da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata. | 103 |
| Figura 37 – Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira sem e com Edificações..... | 106 |
| Figura 38 – Distribuição das Unidades Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira | 107 |
| Figura 39 – Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata sem e com Edificações..... | 110 |
| Figura 40 – Distribuição das Unidades Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata | 111 |
| Figura 41 – Classificação Textural das Unidades Geotécnicas de acordo com o Diagrama de Shepard (1954)..... | 114 |
| Figura 42 – Distribuição Granulométrica das Unidades Geotécnicas. | 115 |
| Figura 43 – Curva Granulométrica das Unidades Geotécnicas..... | 117 |
| Figura 44 – Ábaco de Casagrande da Unidades Geotécnicas | 118 |
| Figura 45 – Reabsorção de água pelas amostras de solo no ensaio MCT | 119 |
| Figura 46 – Envoltória de Ruptura das Unidades Geotécnicas | 121 |
| Figura 47 – Ocorrência de Queda de Muro..... | 125 |
| Figura 48 – Ocorrências Atendidas pela Defesa Civil | 126 |
| Figura 49 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade Geotécnica da BHRC..... | 128 |
| Figura 50 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade de Relevo da BHRC..... | 130 |
| Figura 51 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade Geotécnica da BHRP | 131 |
| Figura 52 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade de Relevo da BHRP | 133 |
| Figura 53 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRC | 134 |
| Figura 54 – Mapa Shalstab para $z = 5,7,10,12,15$ e $20m$ da BHRC ... | 135 |
| Figura 55 – Curva de Validação para o Mapa Shalstab com $z = 10m$ da BHRC..... | 137 |
| Figura 56 – Mapa Shalstab para $z = 10m$ da BHRC | 138 |

| | |
|--|-----|
| Figura 57 – Mapa Shalstab para $z = 10m$ da BHRC com Urbanização | 140 |
| Figura 58 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Deslizamentos Atendidas pela Defesa Civil de Joinville na Área da BHRC para o Mapa Shalstab com $z = 10m$ da BHRC | 142 |
| Figura 59 – Mapa Shalstab para $z = 10m$ com as Edificações e Registro de Ocorrências Atendidas pela Defesa Civil de Joinville na Área da BHRC | 143 |
| Figura 60 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRP | 144 |
| Figura 61 – Mapa Shalstab para $z = 3,5,7,10,12,$ e $15m$ da BHRC..... | 145 |
| Figura 62 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Deslizamentos na Área da BHRP para o Mapa Shalstab com $z = 3m$ | 147 |
| Figura 63 – Mapa Shalstab para $z = 3m$ da BHRP..... | 147 |
| Figura 64 – Mapa Shalstab para $z = 3m$ com as Edificações e Cicatrizes de Deslizamento na Área da BHRP | 148 |
| Figura 65 – Superfície de Ruptura para cada Unidade Geotécnica com Inclinação de 20° | 150 |
| Figura 66 – Correlação entre Fator de Segurança e Inclinação do Relevo para cada Unidade Geotécnica | 151 |
| Figura 67 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais Identificadas na BHRC..... | 152 |
| Figura 68 – Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos Rotacionais da BHRC | 153 |
| Figura 69 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Deslizamentos Rotacionais Mapeadas na Área da BHRC | 155 |
| Figura 70 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Atendidas pela Defesa Civil Correlacionada com o Mapeamento de Deslizamentos Rotacionais da Área da BHRC | 156 |
| Figura 71 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais Identificadas na BHRP | 157 |
| Figura 72 – Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos Rotacionais da BHRP | 158 |
| Figura 73 – Curva de Validação para Número de Cicatrizes Correlacionadas com o Mapeamento de Deslizamentos Rotacionais da Área da BHRP | 159 |
| Figura 74 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=10m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRC | 161 |
| Figura 75 – Mapa de Suscetibilidade à deslizamentos Rotacional e Translacional da BHRC com a Projeção das Cicatrizes..... | 162 |

| | |
|---|-----|
| Figura 76 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=3m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRP | 166 |
| Figura 77 – Mapa de Suscetibilidade à deslizamentos Rotacional e Translacional da BHRP com a Projeção das Cicatrizes | 167 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 – Classificação de Movimentos Gravitacionais de Massa Proposta por Augusto Filho (1994)..... | 35 |
| Quadro 2 – Deslizamento Rotacional e Translacional segundo Highland e Bobrowsky (2008) | 36 |
| Quadro 3 – Parâmetros de Resistência de Cisalhamento do Solo Inundado através dos Ensaios BST e CD..... | 46 |
| Quadro 4 – Parâmetros de Resistência do solo Através dos Ensaios BST e Triaxial - CIU | 48 |
| Quadro 5 – Trabalhos que utilizam o SIG no seu desenvolvimento | 49 |
| Quadro 6 – Principais trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento do mapeamento geotécnico | 52 |
| Quadro 7 – Metodologias de Mapeamento Geotécnico | 53 |
| Quadro 8 – Características dos Métodos de Equilíbrio Limite | 62 |
| Quadro 9 – Comparação entre os Modelos de Equilíbrio Limite de Taludes realizado por Sun et al. (2016)..... | 64 |
| Quadro 10 – Reclassificação da Classes de Estabilidade do Mapa de Deslizamentos Translacionais | 88 |
| Quadro 11 – Resumo de Caracterização da Área de Estudo | 104 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Classes de Estabilidade..... | 59 |
| Tabela 2 – Condições para as Classes de Estabilidade..... | 60 |
| Tabela 3 – Classes de Relevo segundo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos | 69 |
| Tabela 4 – Simbologia Simplificada das Classes Pedológicas..... | 71 |
| Tabela 5 – Simbologia Simplificada das Classes Litológicas | 72 |
| Tabela 6 – Simbologia das Classes Pedológicas segundo IBGE..... | 73 |
| Tabela 7 – Coordenadas do Pontos de Coletas de Solo..... | 77 |
| Tabela 8 – Coordenadas do Pontos de Realização dos Ensaios de Campo | 79 |
| Tabela 9 – Distribuição das Classes Pedológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira..... | 94 |
| Tabela 10 – Distribuição das Classes Pedológicas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata | 96 |
| Tabela 11 – Distribuição das Classes de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira..... | 99 |
| Tabela 12 – Distribuição das Classes de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata | 101 |
| Tabela 13 – Distribuição das Unidade Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira..... | 107 |
| Tabela 14 – Distribuição das Unidade Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata..... | 111 |
| Tabela 15 – Resultado dos Ensaios para as Unidade Geotécnicas | 113 |
| Tabela 16 – Registro de Ocorrências de Deslizamento atendidos pela Defesa Civil de Joinville/SC, entre os anos de 2008 e 2018 na área da BHRC..... | 124 |
| Tabela 17 – Registro de Ocorrências de Deslizamento atendidos pela Defesa Civil de Joinville/SC entre os anos de 2008 e 2018 na área da BHRC distribuídos por Unidade Geotécnica e Unidade do Relevo.... | 124 |
| Tabela 18 – Número de Edificações por Unidade Geotécnica..... | 127 |
| Tabela 19 – Relevo por Unidade Geotécnica..... | 127 |
| Tabela 20 – Cicatrizes Mapeadas na BHRC de acordo com Relevo e Unidade Geotécnica | 129 |
| Tabela 21 – Cicatrizes Mapeadas na BHRP de acordo com Relevo e Unidade Geotécnica | 131 |
| Tabela 22 – Classificação do Relevo para cada Unidade Geotécnica da BHRP | 132 |
| Tabela 23 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRC | 136 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 24 – Análise do Número de Deslizamentos Translacionais da BHRC para $z = 10m$ | 137 |
| Tabela 25 – Participação de cada Unidade Geotécnica em cada uma das Classes de Estabilidade do Modelo Shalstab para $z = 10m$ da BHRC | 141 |
| Tabela 26 – Análise do Número de Ocorrências de Deslizamentos Atendidas pela Defesa Civil de Joinville na Área da BHRC com o Modelo Shalstab para $z = 10m$ | 142 |
| Tabela 27 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRP..... | 144 |
| Tabela 28 – Análise do Número de Deslizamentos Translacionais da BHRP para $z = 3m$ | 146 |
| Tabela 29 – Participação de cada Unidade Geotécnica em cada uma das Classes de Estabilidade do Modelo Shalstab para $z = 3m$ da BHRP.. | 149 |
| Tabela 30 – Correlação entre Fator de Segurança e Inclinação do Relevo para cada Unidade Geotécnica..... | 151 |
| Tabela 31 – Inclinação Crítica do Relevo de acordo com o Fator de Segurança para cada Unidade Geotécnica | 152 |
| Tabela 32 – Estabilidade ao Deslizamento Rotacional de cada Unidade Geotécnica da BHRC em Porcentagem de Representação | 154 |
| Tabela 33 – Análise do Número de Deslizamentos Rotacionais para a BHRC..... | 155 |
| Tabela 34 – Análise do Número de Ocorrências Atendidas pela Defesa Civil Correlacionadas com o Mapeamento de Deslizamentos Rotacionais da BHRC | 156 |
| Tabela 35 – Análise do Número de Deslizamentos Rotacionais para a BHRP..... | 158 |
| Tabela 36 – Estabilidade ao Deslizamento Rotacional de cada Unidade Geotécnica da BHRP | 159 |
| Tabela 37 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=10m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRC..... | 160 |
| Tabela 38 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e os Mapas de Suscetibilidade à Deslizamentos, à Deslizamentos Rotacionais e à Deslizamentos Translacionais ($z=10m$) para a BHRC..... | 163 |
| Tabela 39 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e o Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRC | 163 |
| Tabela 40 – Análise do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRC | 164 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 41 – Comparação entre o Número de Ocorrências atendidas pela Defesa Civil de Joinville/SC e o Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRC ... | 164 |
| Tabela 42 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional (z=3m) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRP | 165 |
| Tabela 43 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e os Mapas de Suscetibilidade à Deslizamentos, à Deslizamentos Rotacionais e à Deslizamentos Translacionais (z=3m) para a BHRP | 166 |
| Tabela 44 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e o Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRP | 167 |
| Tabela 45 – Análise do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRP | 168 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BHRC – Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

BHRP – Bacia Hidrográfica do Rio da Prata

BST – *Borehole Shear Test*

CD – Cisalhamento Direto

CH – Argila Inorgânica de Alta Plasticidade

CID – Ensaio Consolidado Drenado

CIU – Ensaio Consolidado não Drenado

CPTU – *Piezocone Penetration Test*

CXgn – Cambissolo Háplico com substrato de Gnaisse

CXsq – Cambissolo Háplico com substrato de Sedimentos do Quaternário

CYsq – Cambissolo Flúvico com substrato de Sedimentos do Quaternário

DMT – *Dilatometer Test*

DNER -Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

E – Estável

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias

FS -Fator de Segurança

GPS – Sistema de Posicionamento Global

GXsq – Gleissolo Háplico com substrato de Sedimentos do Quaternário

I – Instável

IAEG – *International Association for Engineering Geology and the Environment*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LG' – Argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT - Miniatura, Compactado, Tropical
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDT – Modelo Digital do Terreno
ME – Mediamente Estável
MH – Siltes de alta plasticidade
MI – Mediamente Instável
ML – Siltes de baixa plasticidade
MPM – Ensaio Pressiométrico tipo Ménard
NBR – Norma Brasileira
NS' – Siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos
PVC - Policloreto de polivinila
PVgn – Argissolo Amarelo com substrato de Gnaisse
RLgn – Neossolo Litólico com substrato de Gnaisse
SHALSTAB - *Shallow Landsliding Stability Model*
SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SimGeo - Sistema de Informações Municipais Georreferenciadas
SIRGAS 2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPT – *Standart Penetration Test*
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFSC -Universidade Federal de Santa Catarina
UU – Ensaio não Consolidado e não Drenado
VNT – *Vane test*
ZERMOS – *Zones exposed to risks of soil movements*

LISTA DE SÍMBOLOS

kPa – Quilopascal

km – Quilometros

km² - Quilometros Quadrados

m – metros

σ – Tensão Normal Total.

u – Poro pressão

τ - Tensão de Cisalhamento;

σ' - Tensão Efetiva do Solo;

c' - Coesão efetiva;

ϕ' - Ângulo de Atrito Interno

w – Índice de umidade

h – Altura da coluna de água

z – Espessura de solo

Q – Intensidade da chuva

T – Transmissividade de solo

a – Área de contribuição

b – Comprimento de contorno

θ – Declividade em graus

g – Aceleração da gravidade

ρ_s – Massa específica do solo

ρ_w – Massa específica da água

F_s – Fator de Segurança em relação à resistência

τ_f – Resistência média ao cisalhamento do solo

τ_d – Tensão de Cisalhamento média desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 27 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 29 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 31 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 31 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 31 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 33 |
| 2.1 | MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA | 33 |
| 2.2 | RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO..... | 38 |
| 2.2.1 | Ensaio Borehole Shear Test | 42 |
| 2.3 | SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS..... | 48 |
| 2.4 | MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À DESLIZAMENTO | 50 |
| 2.4.1 | Mapeamento Geotécnico | 51 |
| 2.4.2 | Modelo de Deslizamentos Translacionais – SHALSTAB ... | 54 |
| 2.4.3 | Modelo de Deslizamentos Rotacionais | 61 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODO..... | 65 |
| 3.1 | CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA | 65 |
| 3.2 | DESCRIÇÃO DA PESQUISA | 67 |
| 3.2.1 | Pesquisa Bibliográfica e Documental | 67 |
| 3.2.1.1 | Dados Topográficos..... | 68 |
| 3.2.1.2 | Dados Litológicos e Pedológicos | 69 |
| 3.2.2 | Composição do Mapa Geotécnico Preliminar | 70 |
| 3.2.3 | Realização dos Ensaios | 74 |
| 3.2.3.1 | Coleta das Amostras do Solo | 75 |
| 3.2.3.2 | Ensaios de Laboratório..... | 77 |
| 3.2.3.3 | Ensaios de Campo..... | 78 |
| 3.2.4 | Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos Translacionais..... | 81 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.2.5 | Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos Rotacionais | 83 |
| 3.2.6 | Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos | 86 |
| 3.2.7 | Mapeamento de Cicatrizes de Deslizamento | 88 |
| 4 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 91 |
| 5 | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 105 |
| 5.1 | MAPEAMENTO GEOTÉCNICO..... | 105 |
| 5.1.1 | Mapeamento Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira..... | 105 |
| 5.1.2 | Mapeamento Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata | 109 |
| 5.2 | CARACTERIZAÇÃO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS | 112 |
| 5.3 | ANÁLISE DO HISTÓRICO DE DESLIZAMENTOS ATENDIDOS PELA DEFESA CIVIL DE JOINVILLE NA BHRC . | 123 |
| 5.4 | MAPEAMENTO DAS CICATRIZES DA BHRC E BHRP . | 128 |
| 5.5 | MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL DA BHRC E BHRP | 133 |
| 5.6 | MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO ROTACIONAL DA BHRC E BHRP | 149 |
| 5.7 | MAPEAMENTOS DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO ROTACIONAL E TRANSLACIONAL DA BHRC E BHRP..... | 160 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 169 |
| | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 173 |
| | REFERÊNCIAS..... | 175 |

1 INTRODUÇÃO

O ligeiro processo de adensamento populacional e a inevitabilidade de expansão das áreas urbanas têm ocorrido na pluralidade das cidades brasileiras, sendo que estas vivenciam as consequências da deterioração do meio ambiente em função de atividades específicas e impróprias nelas desenvolvidas (SOUZA, 2015).

Recentemente o número de pessoas vivendo em áreas de risco de deslizamentos, enchentes e inundações tem sido uma das características negativas do processo de urbanização e crescente das cidades brasileiras (IPT, 2007). Em diversos municípios brasileiros, o planejamento não é julgado como uma das etapas iniciais para futuras tomadas de decisão, ou quando considerado não é realizado de forma condizente, levando a ocorrência de diversos problemas que conseqüentemente afetam direta ou indiretamente o equilíbrio dinâmico da área, em curto, médio ou longo prazo (ROSEMBERG e AMARO, 2005).

Planejar o uso e ocupação do solo é uma das responsabilidades compartilhadas entre a Federação, Estados e a Gestão Municipal, sendo que, a partir da Constituição Federal de 1988, “a política de desenvolvimento urbana executada pelo Poder Público municipal, (...) tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes”.

Um dos instrumentos básicos da política de desenvolvimento urbano usado para o Planejamento e Gestão municipal é o Plano Diretor, sendo que, a primeira etapa para a elaboração de um Plano Diretor inclui a realização de diagnóstico da situação atual, envolvendo a caracterização dos aspectos dos meios físico, biótico e antrópico que compõem o quadro local e regional. Dentre a caracterização dos aspectos dos meios físicos, o mapeamento geotécnico é uma das ferramentas para a composição deste quadro diagnóstico (de ABREU, 2007).

Sbroglia (2015) destaca que o mapeamento geotécnico é uma ferramenta preliminar que propicia subsídios para a identificação dos fatores de segurança e processos envolvidos na instabilização de encostas. Estes mapas, conexos a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e ensaios laboratoriais, propiciam a caracterização do meio físico fornecendo conhecimento prévio do comportamento geomecânico dos solos e sua distribuição espacial, ou seja, da origem ao mapa de suscetibilidade à deslizamentos.

Os deslizamentos são fenômenos naturais e/ou induzidos pela ação humana recorrentes nas encostas, uma vez que estas, constituem uma conformação natural do terreno, originadas pela ação de forças exógenas e endógenas por meio de agentes geológicos, climáticos, biológicos e humanos, os quais, através dos tempos esculpem a superfície da Terra e podem causar prejuízos econômicos para órgãos público e/ou privados, além de expor diversas pessoas à risco de morte (IPT, 2007).

No Brasil, a frequente ocorrência de desastres levou a promulgação da Lei N° 12.608 em 10 de março de 2012 que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e estabelece diretrizes para reduzir tais fenômenos, envolvendo esforços da União, Estados e Municípios. A supracitada lei, prioriza medidas preventivas para os desastres naturais, sendo esta a função do mapeamento de áreas suscetíveis à deslizamentos, onde seu conhecimento é indispensável para a elaboração do mapeamento de aptidão urbana.

Em Santa Catarina há inúmeros registros de desastres naturais, dentre eles pode-se elencar o ocorrido em 2008 como sendo o de maior relevância. Segundo os dados oficiais da Defesa Civil, esta tragédia registrou aproximadamente 4 mil deslizamentos espalhados pelo estado, deixando 78 mil pessoas desabrigadas e ocasionando 135 mortes, além de 2 desaparecimentos provocados por deslizamentos e enchentes ocorridos neste Estado.

No município de Joinville (ponto em que está localizada a área de estudos) foram registradas mais de 800 ocorrências de deslizamentos no ano de 2008, porém nenhuma resultou em fatalidade (ODEBRECHT et al., 2017). Este número preocupa e chama a atenção para o devido reconhecimento das áreas suscetíveis a deslizamentos existentes no município.

Eventos como o de 2008, podem ter seus impactos (econômicos e à vida) minimizados quando conhecido os aspectos físicos da região, sendo que, os mapas de suscetibilidade a deslizamentos, podem contribuir de maneira significativa para tal, uma vez que ele identifica e classifica os graus de risco envolvidos no relevo.

O mapa de suscetibilidade é imprescindível para as atividades de planejamento rural e urbano. Através deste, o espaço poderá ser explorado de acordo com os graus de suscetibilidade, proporcionando uma maior segurança à população na medida em que se conhecem as áreas instáveis aos movimentos gravitacionais de massa (LIMA, 2013).

É evidente que mapear as áreas suscetíveis a deslizamentos não é uma tarefa fácil, porém, recentemente diversas metodologias para elaboração deste mapeamento estão em constantes estudos, dentre estes, a proposta por Davison Dias em 1995 (para o mapeamento geotécnico), complementada por modelagem matemática, associada a um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), em bacias hidrográficas com usos múltiplos como SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) é a mais utilizada no sul do Brasil e vem apresentando ótimos resultados, pois integra o modelo de estabilidade de encosta a um modelo hidrológico.

Contudo, os resultados deste trabalho apontaram que as áreas com elevada urbanização não apresentaram bom desempenho na previsão dos eventos de deslizamentos, entretanto, a principal preocupação deste trabalho esteve pautada na identificação das áreas suscetíveis a deslizamentos, como uma ferramenta auxiliar de orientação do direcionamento das possíveis áreas de expansão urbana, e para tal verificou-se que a metodologia aplicada neste trabalho apontou bons resultados, uma vez que, as porções de terreno com relevo natural (com baixa influência de urbanização) apresentaram bons resultados.

1.1 JUSTIFICATIVA

A ocupação desordenada, pode apresentar inúmeros problemas decorrentes do uso inadequado do solo, onde, as intervenções no ambiente sempre representam algum impacto, e muitas vezes, até por desconhecimento, não se avalia o risco geotécnico das obras de engenharia. Desta forma, a busca do conhecimento pelas características geotécnicas se faz extremamente necessária e o planejamento urbano das grandes cidades não pode ser elaborado sem considerar os aspectos de mecânica dos solos como sendo uma das condicionantes mais importantes (HIGASHI, 2006).

Não é possível planejar a ocupação de um determinado espaço e garantir a integridade física dos habitantes sem o devido conhecimento das condicionantes físicas que integram o seu espaço. Segundo Lima (2013) os órgãos públicos responsáveis pelo ordenamento do espaço carecem de base científica para tornar o ambiente ocupado menos vulnerável a riscos geoambientais.

A má ocupação do espaço é uma herança histórica das cidades brasileiras, que após a segunda metade do século XX sofreu com o inchaço dos centros urbanos e não se preparou para tal. A prova disto

está na aprovação tardia da lei 10.257 (Estatuto da Cidade) que só fora ocorrer em 10 de julho de 2001, ou seja, somente a partir desta data os municípios com mais de 20 mil habitantes tornaram-se obrigados a elaborar o Plano Diretor.

Dentre os estudos envolvidos no Plano Diretor Municipal, destaca-se a aquisição de dados referente a caracterização física espacial, como por exemplo os mapas geotécnicos e de áreas suscetíveis a deslizamentos.

Ambos mapas trazem informações extremamente importantes com referência as características físicas e de comportamento dos solos que compõe o espaço em análise. Estes mapas são fundamentais para a composição das informações geradas no mapeamento de aptidão urbana.

Os deslizamentos são fenômenos considerados naturais que podem ser acelerados através da má utilização do espaço. Portanto o devido reconhecimento das limitações das encostas pode assegurar a população de prejuízos econômicos, da própria vida, além de, garantir informações necessárias para a melhor utilização de cada ambiente.

Contudo é indispensável que haja uma política de planejamento territorial do meio físico, que recorra ao uso de mapas e possibilitem o auxílio e a interpretação de dados para posteriormente serem utilizados como subsídios ao planejamento regional e urbano, pois, a falta de conhecimento espacial pode prejudicar a veracidade do citado planejamento, contumaz expondo em riscos a população que reside em áreas que apresentam riscos a eventos geotécnicos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Mapear as áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais e rotacionais da bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e do Rio da Prata.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar a aplicação do modelo SHALSTAB entre Bacias Hidrográficas que apresentam elevado e baixo índice de urbanização (Bacia Hidrográfica do Rio Cahoeira e Bacia Hidrográfica do Rio da Prata; respectivamente);
- Reconhecer as unidades geotécnicas com maior suscetibilidade à deslizamentos translacionais e rotacionais da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata;
- Validar o modelo de mapeamento das áreas suscetíveis à deslizamentos translacionais e rotacionais através das cicatrizes de deslizamentos e/ou registro de atendimentos realizados pela Defesa Civil de Joinville/SC;
- Apontar áreas consideradas instáveis aos eventos de deslizamentos rotacionais e translacionais, que por precaução devem ter a ocupação humana limitada pelo plano diretor municipal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

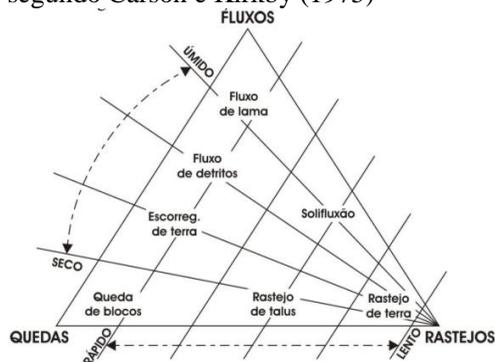
Este capítulo contém a descrição de uma série de conceitos comumente utilizados nos estudos de mapeamento geotécnico. Tais conceitos tem a finalidade de contextualizar o presente trabalho, além de propor o devido suporte para as discussões nele desenvolvidas.

2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

As áreas densamente ocupadas tendem a sofrer de forma mais abrupta com os impactos sociais e econômicos provocados pelos movimentos gravitacionais de massa, uma vez que, estes podem provocar mais perdas de vidas do que os que ocorrem em locais com menores taxas de ocupação do solo. É justamente nas áreas urbanas que as ações antrópicas proporcionam as maiores influencias na estabilidade do relevo e por isso se faz de extrema importância o constante reconhecimento dos diferentes tipos de movimentos gravitacionais de massa (BIM, 2015).

Os movimentos gravitacionais de massa são fenômenos que ocorrem rotineiramente nas encostas (naturais ou não), estas rupturas ocorrentes em taludes são classificadas conforme “o material, o conteúdo de água no subsolo, a velocidade de deslocamento, o mecanismo e o próprio modo como a massa se desloca”, Figura 1 (LIMA, 2013).

Figura 1 – Classificação dos Movimentos gravitacionais de Massa segundo Carson e Kirkby (1975)



Fonte: (LIMA, 2013)

Segundo Bim (2015), as principais classificações de movimentos em massa propostas foram as de Guidicini e Nieble (1976), Varnes (1978) e Augusto Filho (1994), sendo que, dentre estas, a proposta por Varnes (1978) é a mais completa e difundida, pois classifica os movimentos em 6 tipos principais, sendo: Quedas, tombamentos, escorregamentos, expansões laterais, corridas/escoamentos e movimentos combinados/complexos. Cabe ainda salientar que, esta proposta é aceita pela IAEG (*International Association for Engineering Geology and the Environment*), no qual detalha seus processos e mecanismos, associando a fenômenos naturais e antrópicos.

No Brasil destacam-se como principais classificações de movimentos gravitacionais de massa, as desenvolvidas por Freire (1965), Guidicini e Neible (1984), Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT (1991) e Augusto Filho (1994). Dentre estas classificações, o presente trabalho abordará com maior ênfase as desenvolvidas por Augusto Filho (1994), onde os movimentos gravitacionais de massa são classificados como: rastejo (*creep*), queda de bloco (*rock fall*), fluxo (*flow*) e deslizamento (*landslide*), conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação de Movimentos Gravitacionais de Massa Proposta por Augusto Filho (1994).

| Processo | Característica do movimento, material e geometria |
|---------------------------------|---|
| Rastejo (<i>Creep</i>) | <ul style="list-style-type: none"> vários planos de deslocamento (internos); velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade; movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; geometria indefinida |
| Deslizamentos (<i>Slides</i>) | <ul style="list-style-type: none"> tem como característica poucos planos de deslocamento (externos) velocidades médias (m/h) a altas (m/s) pequenos a grandes volumes de material geometria e materiais variáveis; Planares: solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza; |
| Quedas (<i>Falls</i>) | <ul style="list-style-type: none"> sem planos de deslocamento; movimento tipo queda livre ou em plano inclinado velocidades muito altas (vários m/s) material rochoso; pequenos a médios volumes; geometria variável: lascas, placas, blocos, etc; Rolamento de matacão; Tombamento; |
| Corridas (<i>Flows</i>) | <ul style="list-style-type: none"> muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); movimento semelhante ao de um líquido viscoso desenvolvimento ao longo das drenagens velocidades médias a altas; mobilização de solo, rocha, detritos e água grandes volumes de material; extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas. |

Fonte: adaptado de (AUGUSTO FILHO, 1994)

O Quadro 1 apresenta 4 principais processos envolvidos para os movimentos gravitacionais de massa, entretanto nesta seção dar-se-á ênfase para os deslizamentos, uma vez que identificar áreas suscetíveis a tais movimentos é o principal objetivo do presente trabalho.

Dentre os tipos de deslizamentos apresentados no Quadro 1, Prieto *et al.* (2017) afirma que os deslizamentos translacionais e

rotacionais, são os principais e mais comuns movimentos gravitacionais de massa nos solos brasileiros.

Highland e Bobrowsky (2008) apresentam uma série de características envolvidas nos deslizamentos translacionais e rotacionais, tais características podem ser observadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Deslizamento Rotacional e Translacional segundo Highland e Bobrowsky (2008) .

| Descrição Geral | |
|---|--|
| Deslizamento Rotacional | Deslizamento Translacional |
| <ul style="list-style-type: none"> •A superfície da ruptura é curvada apresentando forma côncava (em forma de colher) e o movimento ocorre principalmente de maneira rotatória em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude. •Associa-se a taludes (naturais e artificiais) que tem inclinação entre 20 e 40 graus. | <ul style="list-style-type: none"> •A superfície de ruptura ocorre sobre uma superfície predominantemente plana; •Ao contrário dos deslizamentos rotacionais, estes podem progredir por extensa distância, pois apresentam maior dificuldade para restaurar o equilíbrio; •Ocorrem ao longo de descontinuidades geológicas tais como falhas, junções, superfícies, estratificações, ou o ponto de contato entre rocha e solo; •São mais rasos e apresentam maior velocidade que o deslizamento rotacional. |
| Ocorrência | |
| Deslizamento Rotacional | Deslizamento Translacional |
| <ul style="list-style-type: none"> •Ocorre frequentemente em materiais homogêneos, sendo o tipo mais comum para áreas de aterro. | <ul style="list-style-type: none"> •É o movimento gravitacional de massa mais encontrados no planeta Terra, sendo que, este ocorre em todos os tipos de ambientes e em todas as condições. |
| Mecanismos de desencadeamento | |
| Deslizamento Rotacional | Deslizamento Translacional |
| <ul style="list-style-type: none"> •Chuvas intensas e/ou contínuas podem saturar o solo; •Aumento do nível do rio; •Elevação dos níveis do lençol freático; •Aumento do nível de água devido a irrigações, vazamentos de tubulações ou distúrbios relacionados | <ul style="list-style-type: none"> •Chuvas intensas e/ou contínuas podem saturar o solo; •Aumento do nível do rio; •Elevação dos níveis do lençol freático; •Aumento do nível de água devido a irrigações, vazamentos de tubulações ou distúrbios relacionados |

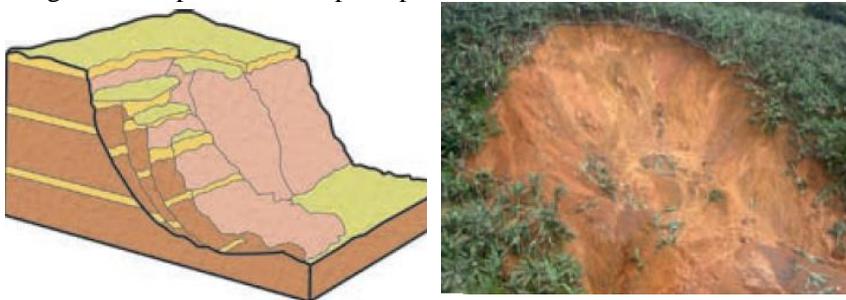
Continuação do Quadro 2

| | |
|--|---|
| à ação do homem, tais como erosão regressiva; •Eventos sísmicos. | à ação do homem, tais como erosão regressiva; •Eventos sísmicos.; |
| Efeitos | |
| Deslizamento Rotacional | Deslizamento Translacional |
| <ul style="list-style-type: none"> •Podem ser danosos para estruturas, rodovias e redes de abastecimento; •Geralmente não oferecem risco a vidas, principalmente se o movimento for lento ou detectado antecipadamente; •Podem alterar a margem de rios, represar rios e provocar inundações indesejadas em cidades; •Podem desestabilizar estruturas que estejam sobre o local em que está ocorrendo a movimentação | <ul style="list-style-type: none"> •Podem ser danosos para estruturas, rodovias e redes de abastecimento; •Representam perigo para vida, principalmente quando há elevada velocidade; •Alta probabilidade de ocorrerem repetitivamente em áreas anteriormente afetadas |

Fonte: (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008)

Tominaga, Santoro e Amaral (2009) acrescentam que os deslizamentos rotacionais muitas vezes são provocados pela execução de cortes na base dos taludes para implantação de uma estrada, ou para construção de edificações, ou ainda pela erosão fluvial no sopé do mesmo. Este autor ainda apresenta a ilustração de um movimento rotacional típico através da Figura 2.

Figura 2 – Superfície de Ruptura para o Deslizamento Rotacional



Fonte: (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009)

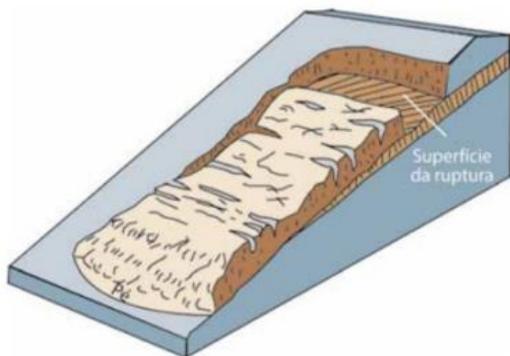
Lima (2013) afirma que, os deslizamentos translacionais estão intrinsecamente relacionados com os eventos pluviométricos de curta ou longa duração, concomitantes a relevos com alta declividade. As

cicatrices produzidas normalmente representam formas geométricas alongadas, onde, o comprimento rotineiramente é maior do que a largura e o plano de ruptura varia entre 0,5 à 5 metros de profundidade.

Sobre os deslizamentos translacionais, Tominaga, Santoro e Amaral (2009) afirmam que estes são os movimentos gravitacionais de massa mais frequentes no Brasil, principalmente na Serra do Mar, e cita o exemplo dos ocorridos nas Serras de Caraguatatuba e das Araras em 1967. Em perfis de alteração como os da Serra do Mar, estes movimentos não transportam apenas materiais terrosos, mas envolvem também blocos rochosos mais ou menos alterados

Sobre a superfície de ruptura dos deslizamentos translacionais, Souza (2015) apresenta uma ilustração para melhor exemplificar o desenvolvimento da mesma (Figura 3)

Figura 3 – Superfície de ruptura do Deslizamento Translacional



Fonte: Highland; Bobrowsky, (2008) apud Souza (2015)

Em ambos tipos de deslizamentos, as causas constituem uma relação direta com o aumento do peso do talude e a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo, sendo que, tais fatores estão conexos com diferentes períodos de chuvas, onde, a saturação do solo eleva seu peso específico e reduz a resistência ao cisalhamento devido ao aumento da pressão neutra (CAPUTO, 1987).

2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

A máxima força aplicada em uma determinada unidade de solo responsável por causar o movimento entre duas partículas é definida como resistência ao cisalhamento do solo, sendo que, a força de atração

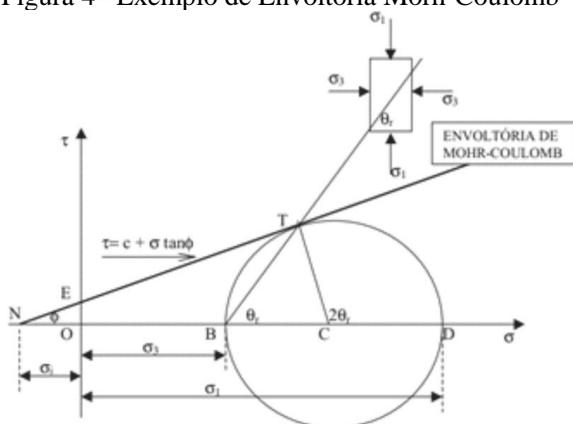
superficial entre os átomos das partículas do solo levam à formação de ligações químicas em pontos de contato das superfícies. Assim, a resistência de fricção entre duas partículas é fundamentalmente da mesma natureza que a resistência ao cisalhamento de um bloco de material sólido, intacto, como o aço (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Ferraz *et al.* (2017) afirma que, conhecer a resistência ao cisalhamento do solo desempenha um papel fundamental no processo de concepção das estruturas geotécnicas, sendo que, segundo Higashi (2006) os parâmetros c e φ correspondentes, respectivamente, a coesão entre as partículas do solo e o ângulo de atrito entre as mesmas, são características inerentes do solo, e dependem de outras propriedades e atributos, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e conteúdo de água.

Bora. (2015) concorda com Calle (2000) quando afirma que o parâmetro de resistência ao cisalhamento do solo é a propriedade de maior importância para os cálculos de fator de segurança das encostas. Sakamoto *et al.* (2015) concordam com estes autores e complementam que tais parâmetros objetivam identificar grandezas como o ângulo de atrito e coesão dos solos, os quais auxiliam na previsão de rupturas de barragens, aterros sobre solos moles, ou movimento gravitacional de massa para encostas.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, c e φ , são definidos através da envoltória de resistência ao cisalhamento do solo de Mohr-Coulomb (Figura 4).

Figura 4– Exemplo de Envoltória Mohr-Coulomb



Fonte: Adaptado de (MARQUES *et al.*, 2016)

Segundo Marques et al. (2016), a teoria de reconhecimento da resistência ao cisalhamento do solo utiliza a reta que tangente (Coulomb) a envoltória do círculo de Mohr para traçar a os parâmetros geomecânicos do solo. A envoltória Mohr-Coulomb, delimita duas regiões distintas no gráfico: a primeira são os pontos situados abaixo da reta, que correspondem a estados de tensão antes da ruptura do solo, ou seja, tensões que são suportadas pelo material; e o segundo são os pontos situados acima, que representam as tensões do material rompido e que não são suportadas pelo material.

Para os solos saturados, a resistência ao cisalhamento é expressa como função direta da tensão efetiva (σ'), pois, “todos os efeitos mensuráveis decorrentes de uma variação de tensões (compressão e resistência ao cisalhamento, por exemplo) são devidos exclusivamente às alterações das tensões efetivas” (BENESSIUTI, 2011).

Em 1925 Terzaghi concluiu que para a condição saturada do solo, as tensões totais (σ) são compostas por duas frações, sendo: a) uma a poro-pressão (u), tensão transmitida pela água existente nos vazios da massa de solo; b) e a outra fração é a tensão suportada pela parte sólida, sendo ela, a diferença entre a tensão total e a poro-pressão, definida como tensão efetiva (σ') explicita através da Equação 1.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

Sendo:

σ' – Tensão Efetiva do Solo.

σ – Tensão Normal Total.

u – Poro-pressão.

Terzaghi (1925) associou a Equação 1 com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e desenvolveu a Equação 2, relacionando desta forma a tensão de cisalhamento.

$$\tau = c' + \sigma' tg\varphi \quad (2)$$

Sendo:

τ - Tensão de Cisalhamento;

σ' - Tensão Efetiva do Solo;

c' - Coesão efetiva;

φ - Ângulo de Atrito Interno.

A determinação dos parâmetros necessários para composição gráfica de Mohr-Coulomb (resistência do solo), podem ser reconhecidas através de ensaio de campo e/ou laboratório, por meio de amostras deformadas e/ou indeformadas. Dentre os ensaios de laboratório, os mais difundidos são os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e o de Compressão Triaxial, sendo que, o último apresenta os melhores resultados (CARAMEZ, 2017).

Os ensaios de laboratório caracterizam-se por testar elementos (corpo de prova) dos materiais deformados ou indeformados em diversas condições de saturação e/ou inundação, fora do ambiente de campo (laboratório) (GUEDES; COUTINHO; DA FONSECA, 2016), já os ensaios de campo, são aqueles desenvolvidos com o solo *in loco*. Existem diversos ensaios que podem ser aplicados *in loco*, porém dentre as práticas brasileiras os mais comuns segundo Santos (2016), são o *DilatoMeter Test* (DMT), o *Standart Penetration Test* (SPT), o *Piezcone Penetration Test* (CPTU), o Ensaio Pressiométrico tipo Ménard (MPM) e o *Vane Test* (VNT).

Quanto a interpretação dos resultados apresentados nestes ensaios, eles podem ser obtidos de maneira direta ou indireta, sendo que, os de maneira direta utilizam os resultados dos ensaios na previsão de parâmetros construtivos que representam o comportamento do solo, já para os que apresentam o resultado de maneira indireta, os parâmetros são obtidos através de fundamentação estatística (por métodos empíricos ou semiempíricos), a partir da qual, as medidas de ensaios são correlacionadas diretamente a outras variáveis de interesse geotécnico (SANTOS, 2016).

Outro ensaio de cisalhamento dos solos realizado em campo é o *Borehole Shear Test* (BST), porém, este ainda é pouco utilizado no Brasil. Tal ensaio possui bastante praticidade e resultados similares ao ensaio de cisalhamento direto (SAKAMOTO et al., 2015).

Segundo Marques *et al.* (2016), os ensaios de cisalhamento dos solos dependem diretamente das condições de drenagem e consolidação, podendo ser classificados em três tipos:

Ensaio Consolidado Drenado (CD e CID) – neste ensaio a drenagem é mantida aberta, permitindo que a amostra seja adensada para o nível de tensão efetiva desejado (antes do cisalhamento) e que a variação volumétrica seja monitorada;

Ensaio Consolidado Não Drenado (CU e CIU) – neste ensaio, a drenagem pode ser mantida aberta apenas no primeiro momento (adensamento do solo), logo após a fase de adensamento a drenagem é

fechada, sendo este ensaio empregado na análise de resistência ao cisalhamento dos solos de baixa permeabilidade adensados;

Ensaio Não Consolidado e Não Drenado (UU) – neste ensaio, a drenagem não é permitida em nenhuma das etapas e o teor de umidade das amostras permanecem constantes, sendo que, para este ensaio os parâmetros de resistência são obtidos através das Tensões Totais e as tensões neutras podem ser medidas; este é comumente empregado na análise de resistência ao cisalhamento dos solos de baixa permeabilidade não adensados.

Na continuidade desta seção será abordado aspectos referentes ao ensaio de campo *Borehole Shear Test* (BST), uma vez que, o mesmo será aplicado no presente trabalho devido aos bons resultados apresentados nos mapeamentos de áreas suscetíveis realizados no sul do Brasil.

2.2.1 Ensaio Borehole Shear Test

O ensaio de cisalhamento do solo realizado pelo método do *Borehole Shear Test* (BST), consiste em determinar a resistência ao cisalhamento do solo através de um furo, que pressiona duas placas com ranhuras horizontais contra os lados do furo sob uma pressão controlada (tensão normal) e, em seguida, é puxada para cima no dispositivo de cisalhamento a uma taxa constante até que a tensão máxima de resistência ao cisalhamento do solo seja atingida (LAMBRECHTS; RIXNER, 1981).

Segundo Carames (2017) este ensaio consiste no reconhecimento direto (*in loco*) da máxima tensão cisalhante de um determinado solo à uma determinada profundidade pré-estabelecida por um furo realizado em campo.

Com relação ao equipamento atual do BST, Lutenecker e Hallberg (1981) afirmam que tal equipamento é leve e portátil, sendo que, o mesmo não requer energia externa para operar e um teste completo geralmente pode ser realizado em cerca de uma hora.

Este ensaio ainda não está muito difundido no Brasil, porém, recentemente vem sendo utilizado com maior frequência por pesquisadores e empresas, pois oferece elevada facilidade e rapidez de execução, além de apresentar baixa variabilidade dos resultados (LUTENEGGER e TIMUAN 1987) apud (SAKAMOTO et al., 2015).

Segundo Abreu *et al.*, (2015), ainda não há uma norma específica para sua utilização em território nacional, porém, este autor descreve em

seu trabalho, o procedimento recomendado pelo fabricante para realização do ensaio BST, onde, primeiramente deve-se realizar um furo com o trado helicoidal de 65mm de diâmetro para averiguação tátil visual do solo, e em seguida o furo deve ser alargado com o trado de 82mm de diâmetro, sendo que, a profundidade do furo deve ser de acordo com o horizonte pedológico pré-estabelecido para a análise; por conseguinte, insere-se a sonda no furo, na profundidade desejada e com o auxílio de um manômetro manual aplica-se uma tensão de confinamento, sendo recomendado aguardar no mínimo 15 minutos antes de avançar para o próximo passo, no entanto, ao final dos 15 minutos deve-se verificar se houve diminuição da tensão confinante e quando necessário pode-se fazer um incremento desta tensão, porém, deve-se aguardar 5 minutos para que se possa avançar para o próximo passo; após a consolidação, deve-se girar a manivela no sentido horário mantendo a constância de 2 giros por segundo, e o manômetro acoplado na base registrará a tensão de cisalhamento do solo, sendo que, o maior valor registrado por este manômetro indicará a resistência máxima de cisalhamento do solo, (Figura 5).

Figura 5 - Ensaio *Borehole Shear Test*



(a) Tradagem e análise tátil visual



(b) Alocação da sonda no solo



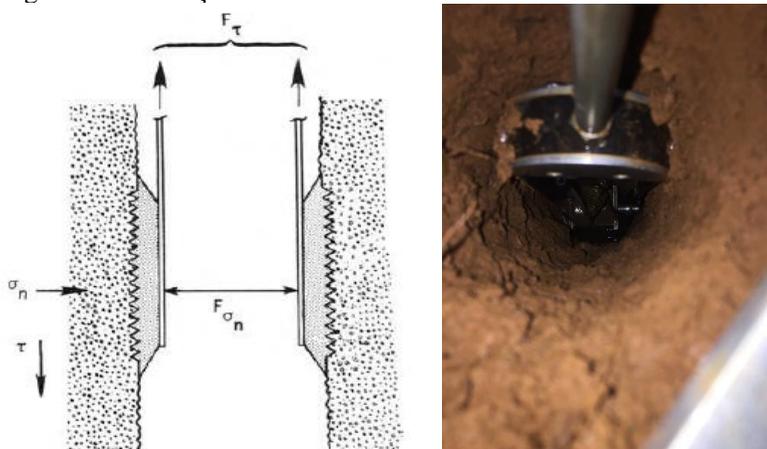
(b) Aplicação da tensão confinante e inundação do solo



(c) Após 15 minutos, verificar se houve variação na tensão confinante e realizar o giro da manivela para cisalhar o solo. Neste passo deve-se ficar atento aos valores registrados pelo manômetro, uma vez que, ele registrará a tensão cisalhante.

Lutenegger, Hallberg (1981) concordam com o procedimento descrito por Abreu *et al.*, (2015) e ilustram a Figura 6 em seu trabalho, onde é possível observar a inteiração entre o equipamento do ensaio e o solo analisado.

Figura 6 – Inteiração entre o Solo e as Placas do BST



Fonte: adaptado de Lutenegger; Hallberg (1981)

Lambrechts; Rixner (1981) afirmam que, tal ensaio deve ser repetido no mesmo local aumentando a pressão nas placas e puxando novamente o dispositivo de cisalhamento. O autor reforça que, o tempo de consolidação deve ser rigorosamente respeitado, permitido que ambos lados do furo se consolidem aos devidos níveis de tensão normal antes que a força de cisalhamento seja aplicada; e que os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e φ') são determinados traçando a tensão de cisalhamento versus a tensão normal e desenhando a linha de falha de Mohr-Coulomb.

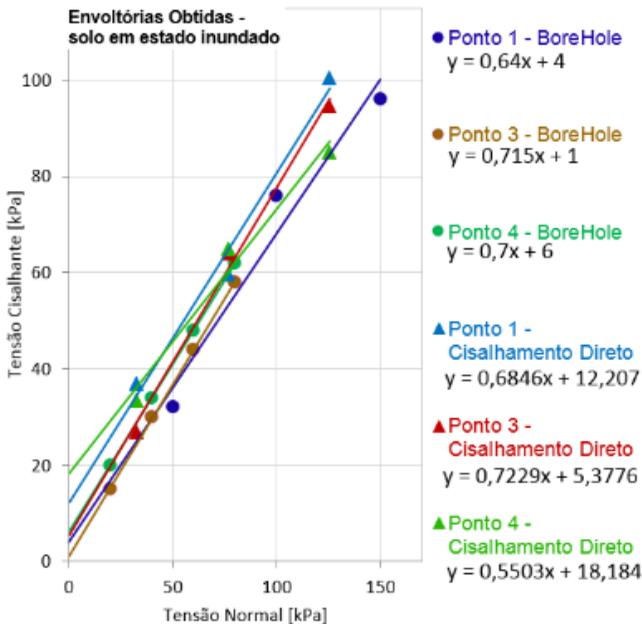
Sobre a confiabilidade dos dados obtidos por este ensaio, Sakamoto *et al.* (2015) realizaram um estudo que visava comparar este método, com o ensaio de cisalhamento direto aplicado em mapas geotécnicos de áreas de risco (gerados pelo modelo SHALSTAB). Ao realizar tal estudo, os autores concluíram que o BST apresenta resultados satisfatórios e retrata uma envoltória bastante próxima com aquelas obtidas pelo ensaio de cisalhamento direto, principalmente para a condição inundada (Quadro 3 e Figura 7).

Quadro 3 - Parâmetros de Resistência de Cisalhamento do Solo Inundado através dos Ensaios BST e CD

| Local | Ensaio | Condição | ϕ' (°) | c' (kPa) |
|-------|----------------------------|----------|-------------|------------|
| 1 | Cisalhamento Direto | Inundada | 34,4 | 3,83 |
| | <i>Borehole Shear Test</i> | Inundada | 32,6 | 4 |
| 3 | Cisalhamento Direto | Inundada | 35,8 | 5,38 |
| | <i>Borehole Shear Test</i> | Inundada | 35,6 | 1 |
| 4 | Cisalhamento Direto | Inundada | 28,8 | 18,2 |
| | <i>Borehole Shear Test</i> | Inundada | 35 | 6 |

Fonte: Sakamoto et al (2015)

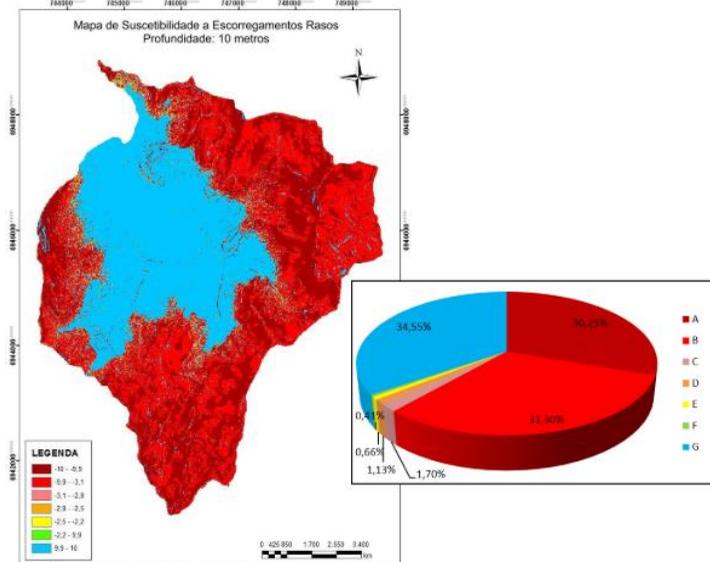
Figura 7 – Envoltória de Cisalhamento do Solo Inundado através dos Ensaios BST e CD



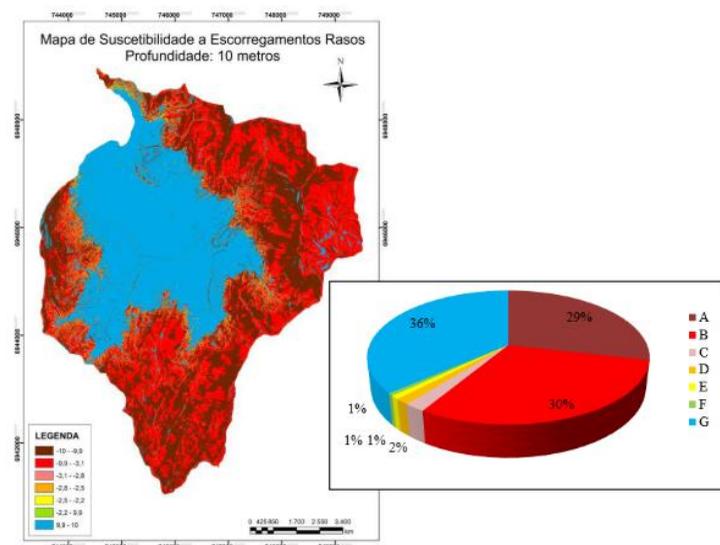
Fonte: Sakamoto et al (2015)

Quanto aos mapas de áreas instáveis, Sakamoto *et al* (2015) conclui que o método de ensaio (BST ou CD) quase não influenciou no resultado. As áreas instáveis foram semelhantes para estes dois ensaios, conforme pode-se analisar na Figura 8.

Figura 8 - Comparação entre Mapas de Suscetibilidade à Deslizamentos realizados através dos Ensaios BST e CD em condição inundada



(a) Mapa de Suscetibilidade Gerado através do ensaio BST



(b) Mapa de Suscetibilidade Gerado através do ensaio CD

Fonte: Sakamoto et al (2015)

Lambrechts; Rixner (1981) compararam os parâmetros de resistência dos solos de silte e silte variado através dos ensaios BST e triaxial em condições consolidada não drenada, onde através deste estudo, os autores afirmaram que os ambos ensaios apresentaram valores devidamente próximos, porém, os resultados do BST foram mais conservadores quanto ao ângulo de atrito que os apresentados pelo ensaio triaxial, (Quadro 4).

Quadro 4 - Parâmetros de Resistência do solo Através dos Ensaios BST e Triaxial - CIU

| | | Solo | | | |
|----------|----------|---------------|------------|-------------|------------|
| | | Silte Variado | | Silte | |
| Ensaio | Condição | ϕ' (°) | c' (kPa) | ϕ' (°) | c' (kPa) |
| Triaxial | CIU | 33 | 0 | 36 | 0 |
| BST | | 29 | 9,6 | 32 | 12,9 |

Fonte: Lambrechts; Rixner (1981)

Portanto, observa-se que o ensaio BST é uma metodologia confiável e que apresenta valores correlatos aos ensaios de Cisalhamento Direto (condição inundada) e Triaxiais em (condição consolidada e não drenada). Além disto, verifica-se que o ensaio BST é um ensaio de curta duração de tempo, e leva em média aproximadamente 1 hora para execução completa do ensaio.

Diferentemente do CD e do Triaxial, o BST não exige preocupações com o transporte de amostras indeformadas (que podem comprometer os resultados do ensaio), uma vez que o mesmo é executado *in loco*, assim como a obtenção dos seus resultados.

2.3 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Segundo Higashi (2006) este sistema permite uma série de aplicações em se tratando de mapeamento geotécnico, uma vez que, proporciona a elaboração de “mapas temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análise de risco, avaliação geotécnica, gerenciamento ambiental, além de, possibilitarem análises como um sistema de apoio à tomada de decisões”.

Lima (2013) concorda com Higashi (2006) quando diz que, “os sistemas de informação geográfica podem melhorar a qualidade da análise dos desastres naturais, orientar as atividades de planejamento,

definir medidas de mitigação e implementar ações de resposta em casos de emergência”.

Recentemente, os SIG's estão sendo muito utilizados para as análises de deslizamentos do solo, dentre suas aplicações o Quadro 5 apresenta alguns autores e a aplicações dadas por eles ao SIG:

Quadro 5 – Trabalhos que utilizam o SIG no seu desenvolvimento

| Autor | Aplicação |
|------------------|--|
| Lima (2013) | Utilizou o SIG para o processamento de informação cartográfica indireta em um modelo matemático, sendo que, através deste modelo o autor analisou quais variáveis tem maior ou menor probabilidade de promover a suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo; este autor ainda elaborou o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais do alto da bacia do Ribeirão Belchior, além do inventário de deslizamentos para a citada área de estudos. |
| Reginatto (2013) | Realizou um banco de dados das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais, onde, cadastrou: os dados das cicatrizes resultantes dos movimentos ocorridos na área de estudos; os ensaios de campo e laboratório dos parâmetros do solo (físicos, de resistência e espessura). O SIG também fora utilizado para elaboração de mapas temáticos, como: modelo digital de elevação e seus derivados (declividade e área de contribuição), mapa de uso e ocupação do solo e mapa geotécnico preliminar. Como resultado foi construído um mapa de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais para a bacia hidrográfica do Rio Cunha, através do modelo SHALSTAB gerado em ambiente SIG. |
| Bim (2015) | Realizou uma proposta baseada no mapeamento geotécnico, coleta de amostras para caracterização, uso de equipamentos de campo, geotecnologias, análise e monitoramento de eventos pluviométricos e manipulação de dados em ambiente SIG. O resultado deste trabalho promoveu o mapa de suscetibilidade a partir de solução analítica do modelo de estabilidade incorporado ao modelo hidrológico para a predição de deslizamentos da microbacia do Ribeirão das Pedras/SC. |
| Sbroglia (2015) | Este trabalho objetivou mapear e caracterizar as áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC. O método consistiu em realizar o mapeamento das unidades geotécnicas utilizando a metodologia desenvolvida por Davison Dias (1995), que posteriormente foram caracterizadas por meio de ensaios laboratoriais. O produto final deste trabalho produziu um mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais e rotacionais que foram confeccionados em ambiente SIG, sendo que, este mapa foi comparado com as cicatrizes de deslizamentos ocorridas na área de estudo, também através do ambiente SIG e os resultados apresentaram-se satisfatórios. |
| Caraméz (2017) | Desenvolveu de um banco de dados georreferenciado de ensaios geotécnicos e a confecção de mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos utilizando o modelo SHALSTAB, através do ambiente SIG. |

2.4 MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À DESLIZAMENTO

Para Sbroglia (2015) os deslizamentos podem ser considerados como um dos principais fenômenos recorrentes a evolução das encostas e pode ser elencado como um dos grandes causadores de prejuízos e mortes, portanto, há considerável importância em conhecer estes fenômenos, e identificar as áreas que apresentam maior suscetibilidade a ocorrência destes, uma vez que, através do devido mapeamento de suscetibilidade ações de planejamento podem ser tomadas.

Os mapas de suscetibilidade indicam a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em áreas de risco, sendo que, tal previsão é considerada essencial para elaborar medidas de prevenção e planejamento do uso e ocupação do solo (IPT, 2007).

Diversos países estão adotando políticas de mapeamento das áreas de risco à deslizamentos, no entanto, existe uma complexidade para realização destes, fazendo com que, muitos pesquisadores voltem seus estudos para fatores naturais que contribuem para desencadear tal fenômeno. Desta forma, os mapas de suscetibilidade à deslizamento expressarão a potencialidade de ocorrência em função das características do meio físico local, sem estimar um período (tempo) específico (LIMA, 2013).

Segundo Bim (2015) os mapas de áreas suscetíveis podem delimitar e identificar áreas que apresentam possíveis suscetibilidade a deslizamentos, sendo esta, uma ferramenta que pode ser empregada na mitigação dos eventos de deslizamentos, além de, contribuir para “adoção de políticas públicas de uso e ocupação do solo, ou ainda, no emprego de um plano de gerenciamento de risco, evitando perdas de vidas humanas, materiais ou ambientais”.

Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos, são capazes de quantificar a capacidade do relevo em desenvolver movimentos em massa, sendo que, a delimitação das áreas suscetíveis são construídas através do conhecimento dos mecanismos dos processos considerados, além das características do meio condicionantes e indutoras de seu desenvolvimento (SOUZA, 2015).

As análises e previsões referentes a instabilidade das encostas, evoluíram significativamente através do contínuo desenvolvimento dos SIG's, que torna possível correlacionar e sistematizar informações em diferentes escalas, obtendo mapas de suscetibilidade de acordo com o enfoque desejado (REGINATTO, 2013).

Os mapas de suscetibilidade a determinados tipos de movimentos de terra que visem grandes áreas, envolvem complexas relações não lineares entre a ocorrência de um deslizamento e a contribuição de um agente deflagrador, e que rotineiramente são elaborados através métodos numéricos e estatísticos (ARTERIS, 2015).

2.4.1 Mapeamento Geotécnico

Segundo a UNESCO (1976) o mapa geotécnico é “um tipo de mapa geológico que representa todos os componentes geológicos de significância para o planejamento do solo e para projetos, construções e manutenções quando aplicados a engenharia civil e de minas”.

Para Higashi (2006), os mapas geotécnicos representam as principais características geomecânicas do solo, sendo que, tais características podem ser aplicadas aos polígonos de solo, denominados de unidades geotécnicas.

O uso e ocupação do solo em áreas urbanas é um fator preocupante no Brasil, sendo que, as áreas críticas estão em processo de expansão, havendo necessidade de se conhecer as características do terreno ocupado e minimizar os impactos a estas ocupações. Para tal, a cartografia geotécnica define métodos nos quais procura enquadrar unidades territoriais homogêneas formulando orientações técnicas para a ocupação destas unidades (DAVISON DIAS, 1995).

Segundo Zuquette (1993) o mapeamento geotécnico tem como finalidade promover o levantamento, avaliação e análise de atributos que compõe o meio físico, representando em um meio cartográfico os componentes geológicos-geotécnicos significantes para uso e ocupação do solo e subsolo, projetos, construções e manutenções na engenharia civil, de minas e por problemas ambientais.

Diversas metodologias de mapeamento geotécnico foram desenvolvidas, cada qual, atendendo a objetivos específicos, no entanto, estas convergem para a atender a um objetivo em comum, que é o mapeamento geotécnico, visando auxiliar e organizar o uso e ocupação do solo por obras de engenharia (SAKAMOTO et al., 2015).

No âmbito das discussões proponentes aos diversos métodos de mapeamento geotécnico, Caraméz (2017) apresenta a evolução temporal destes discutido de maneira resumida através do Quadro 6.

Quadro 6 - Principais trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento do mapeamento geotécnico

| Metodologia | Ano | Descrição |
|------------------------|------|---|
| Método de Moldenhawer | 1919 | Embasou as técnicas modernas de mapeamento. Dividiu os terrenos em função da profundidade e apresentou o resultado em dois tipos de mapas (sondagens e geotécnico) |
| Método de Stremme | 1932 | Stremme publicou um conjunto de cartas produzidas por Ostendorff sobre geologia e geotecnia dos terrenos. As cartas geológicas obedeciam ao esquema de Moldenhawer e a geotécnicas estabeleciam, de forma natural, as taxas de trabalho admissível para as fundações e as possibilidades de escorregamento. |
| Esquema de Muller | 1938 | Muller publicou um mapa geológico de afloramentos, uma carta de terrenos adequados à construção (interpretativa) e uma carta de planificação, usando cores e sinais para diferenciar as unidades, suas características e seus componentes. |
| Método de Groschopf | 1951 | Tem como finalidade caracterizar um tipo de representação gráfica. O mapa geológico apresenta os materiais aflorantes, representados por cores e os do substrato rochosos por letras. |
| Metodologia de Gwinner | 1956 | Gwinner foi o primeiro a pensar em termos de unidade geotécnica, apoiando-se na proposta de Terzaghi de interação dos dados de propriedades físicas e comportamento mecânico dos solos com as condições geológicas. |
| Classificação de Benz | 1951 | Baseia-se na subdivisão das áreas em zonas, utilizando os princípios dos ensaios da Mecânica dos solos e examinando as camadas em função da capacidade de suporte para construção. |
| Método de Quadran | 1956 | Suas divisões referem-se às variações de diversas características do meio físico, tais como espessura ou profundidade do nível (quadrante) d'água, sendo proposto por Wawser, Rieger e Hille. |

Fonte: (CARAMEZ, 2017)

BIM (2015) desenvolveu uma pesquisa similar baseando-se em Kopenzinski (2000); Higashi (2006) e Zuquette (1987), onde, através do Quadro 7 é apresentado metodologias nacionais e internacionais, além da finalidade e utilização de cada uma das metodologias.

Quadro 7 – Metodologias de Mapeamento Geotécnico

| Metodologia | Finalidade | Utilização |
|--|----------------------------|---|
| Internacional | | |
| - IAEG | Específica Multifinalidade | Planejamento urbano e regional |
| - Francesa | Específica Regional | Planejamento urbano e regional |
| - PUCE (Austrália) | Específica Regional | Planejamento urbano e regional |
| - Britânica | Específica Multifinalidade | Planejamento urbano e regional |
| - Russa | Específica Regional | Planejamento urbano e regional |
| - Hinojosa e Leon | Específica | Planejamento e projeto de estradas |
| - ZERMOS | Específica | Movimento gravitacional de massa (planejamento) |
| - Espanhola | Específica Regional | Planejamento regional e territorial |
| - USA (Kiefer) | Específica Regional | Planejamento urbano e regional |
| - Canadá | Específica Multifinalidade | Planejamento urbano e regional |
| Nacional | | |
| - IPT | Prever e orientar ocupação | Planejamento urbano, erosões e escorregamentos |
| - Metodologia UNESP/Rio Claro | Específica Regional | Planejamento urbano e regional |
| - Metodologia EESC/USP – Zuquette (1987) | Específica | Zoneamento geotécnico e específico |
| - Metodologia da UFRGS - Davison Dias (1995) | Específica Regional | Zoneamento geotécnico e específico |
| - Higashi (2006) | Específica Regional | Zoneamento geotécnico e Planejamento Urbano |

Fonte: (BIM, 2015)

Segundo Caraméz (2017), “o desenvolvimento de um mapeamento geotécnico é conduzido conforme diretrizes e objetivos específicos para cada caso em estudo. Neste trabalho será dado maior ênfase para metodologia elaborada por Davison Dias (1995), que conforme Higashi (2006) os mapas geológico e pedológico são utilizados para a formulação de unidades geotécnicas com estimativas de comportamento geomecânico.

Sbroglia (2015) afirma que, a metodologia de Davison Dias (1995) surgiu a partir da necessidade de caracterizar áreas de solos tropicais, onde, não se tem a possibilidade de realizar um elevado volume de ensaios geotécnicos. A mesma busca estimar unidades geotécnicas de uma determinada área, ou seja, unidades de solos com comportamento geotécnico semelhante.

Para Davison Dias (1995) a estimativa das unidades geotécnicas, pode ser realizada utilizando a técnica de superposição de cartas geológicas, pedológicas, topográficas com objetivo de originar uma nova carta, denominada de mapa geotécnico. Cada unidade geotécnica permite inferir as características geológicas (litologia), além das características pedológicas que permitem inferir características dos horizontes superficiais dos perfis típicos. Cabe ainda, ressaltar que a autora, diz que a topografia tem papel fundamental na composição do mapeamento geotécnico, sendo que, a mesma auxilia na definição dos limites das unidades.

2.4.2 Modelo de Deslizamentos Translacionais – SHALSTAB

Segundo Souza (2015) um dos modelos que podem ser adotados para gerar mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos é o SHALSTAB, que por sua vez, promove uma classificação de fácil compreensão, análise, cálculo e representação, além de, apresentar elevada confiabilidade quando aplicado nos modelos de drenagem de bacias, ou seja, tem validade quanto a aplicação do problema proposto por este trabalho.

Em complemento ao mapeamento geotécnico, o modelo matemático em ambiente SIG denominado de SHALSTAB propõe a quantificação da estabilidade de uma encosta em relação ao movimento translacional, apresentando como resultado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos. Tal modelo considera em suas análises parâmetros climáticos, topográficos, bem como propriedades físicas e de resistência do solo (SBROGLIA, 2015).

O modelo SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*) correlaciona aspectos hidrológicos com a estabilidade das encostas, visando definir áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais através de valores atribuídos a cada *pixel*. Esta metodologia, consiste em uma modelagem digital do terreno, obtido através de dados físicos reais (CARAMEZ, 2017).

Segundo Sbroglia *et al.* (2017), a utilização do modelo matemático SHALSTAB como medida preventiva à ocorrência de desastres naturais causados por deslizamentos translacionais, vem sendo constantemente utilizado em todo o território nacional, uma vez que, este modelo utiliza parâmetros topográficos e geotécnicos para determinar as áreas suscetíveis a esse tipo de movimento gravitacional de massa.

Tal modelo matemático, visa determinar as áreas suscetíveis ao desenvolvimento de deslizamentos translacionais rasos, baseados na equação de talude infinito, e leva em consideração aspectos hidrológicos, pedológicos e topográficos da bacia hidrográfica (CORSI; PENHA; GUIMARÃES, 2017).

Reginatto (2013) concorda com os autores supracitados, e ainda afirma que, tal método considera uma extensão ilimitada de solo sobre uma superfície inclinada, bem como o fluxo de água paralelo a esta superfície. Assim, com base nestas considerações o método mostra-se coerente para a representação de escorregamentos translacionais.

O modelo SHALSTAB foi desenvolvido nos Estados Unidos da América por Montgomery e Dietrich em 1994, onde, sua fundamentação matemática é composta por dois modelos, sendo: i) um modelo hidrológico que considera estado uniforme de recarga e utiliza parâmetros geomorfológicos e hidrológicos na estimativa do grau de saturação do terreno, e ii) um modelo de estabilidade de encosta, que utiliza parâmetros geotécnicos e topográficos para calcular a estabilidade de uma determinada porção de solo sobre o afloramento rochoso com base na teoria de taludes infinitos (SBROGLIA *et al.*, 2017).

Sobre o modelo hidrológico ao qual Montgomery e Dietrich (1994) apoiam sua teoria, Reginatto (2013) afirma que tal modelo baseia-se nos princípios de Beven e Kirkby (1979), onde os mesmos, “demonstram que a saturação de um solo, em função da topografia, está relacionada com a área de drenagem (a) por unidade de contorno (b) dividida pela declividade da encosta”. Reginatto (2013) complementa que, a partir dos estudos de Beven e Kirkby (1979), O’Loughlin (1986) estabeleceu em função da precipitação, transmissividade do solo,

declividade e da área de contribuição a montante (área drenada por uma unidade de contorno) o índice que determina as condições de saturação de um solo, sendo este, o “responsável por definir os locais onde o fluxo de água recebido supera a capacidade do solo em transmiti-lo e ocorre a saturação do solo”, podendo ser expresso através da Equação 3.

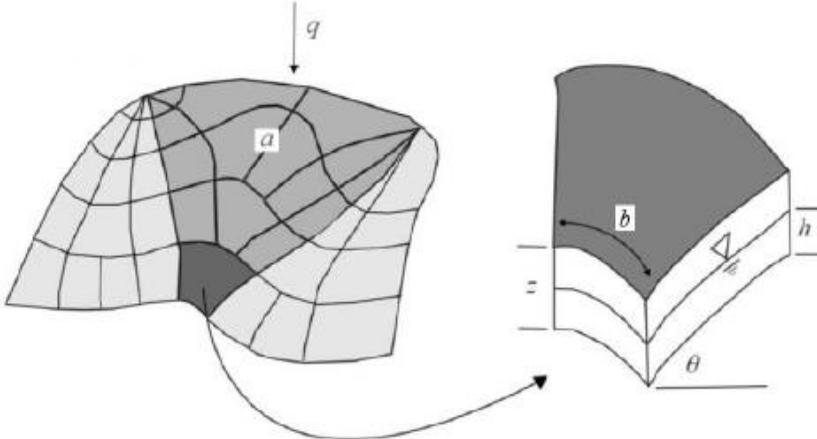
$$w = \frac{h}{z} = \frac{Q}{T} \times \frac{a}{b \times \text{sen}\theta} \quad (3)$$

Onde:

- w – índice de umidade (adimensional)
- h – altura da coluna de água (m)
- z – espessura de solo (m)
- Q – intensidade da chuva (mm)
- T – transmissividade de solo (m²/dia)
- a – área de contribuição (m²)
- b – comprimento de contorno (m)
- θ – declividade em graus

Sbroglia (2015) ilustra a representação das grandezas envolvidas na Equação 3 através da Figura 9, que expressa o modelo hidrológico do estado uniforme.

Figura 9 – Representação do Modelo Hidrológico de Estado Uniforme



Fonte: (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994 apud SBROGLIA, 2015)

Acerca do relevo, o modelo matemático SHALSTAB designa o grau de estabilidade da encosta para cada pixel considerando os critérios de estabilidade para taludes infinitos (SAKAMOTO et al., 2015). Referente a teoria dos taludes infinitos, é possível considerar que o atrito nas extremidades dos taludes são ignorados, cabendo considerar as tensões cisalhantes e normais para a base de uma coluna de solo e uma extensão ilimitada sobre uma superfície inclinada de solo (SBROGLIA, 2015).

Dietrich e Montgomery (1998) embasaram as análises de estabilidade para o modelo SHALSTAB baseando-se na Equação 4, uma vez que a mesma pode ser reescrita no formato apresentado pela Equação 5.

$$\tau = c' + (\sigma' - u) \cdot \tan\phi' \quad (4)$$

Onde:

τ – Tensão cisalhante (kPa)

c' – Intercepto coesivo (kPa)

σ' – Tensão normal (kPa)

u – Poro pressão (kPa)

ϕ' – Ângulo de atrito interno (em graus)

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta = (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\phi \quad (5)$$

Onde:

z – Espessura do solo (m)

h – Nível d'água acima do plano de ruptura (m)

ρ_s – Massa específica do solo (kg/m³)

ρ_w – Massa específica da água (kg/m³)

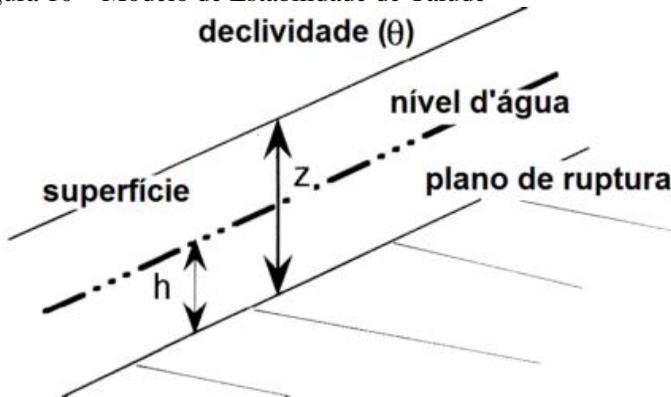
g – Aceleração da gravidade (m/s²)

θ – Ângulo do plano de ruptura (em graus)

ϕ – Ângulo de atrito interno (em graus)

Para elucidar a teoria supracitada, Caramez (2017) apresenta uma ilustração sobre as grandezas envolvidas nas equações acima, conforme apresentado pela Figura 10.

Figura 10 – Modelo de Estabilidade de Talude



Fonte: (CARAMEZ, 2017)

Dietrich e Montgomery (1998) afirma que a Equação 5, pode ser resolvida através da relação apresentada pela Equação 6.

$$\frac{h}{z} = \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \emptyset} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \emptyset}\right) \quad (6)$$

Onde:

z – Espessura do solo (m)

h – Nível d'água acima do plano de ruptura (m)

ρ_s – Massa específica do solo (kg/m^3)

ρ_w – Massa específica da água (kg/m^3)

θ – Ângulo do plano de ruptura (em graus)

\emptyset – Ângulo de atrito interno (em graus)

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

c' – Intercepto coesivo (kPa)

Por fim, os autores supracitados afirmam que o modelo SHALSTAB é calculado através da Equação 7, sendo a mesma, originada através da combinação entre os aspectos hidrológicos (Equação 3) e os aspectos de estabilidade (Equação 6).

$$\frac{Q}{T} = \frac{a}{b} \cdot \sin\theta \cdot \left[\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

z – Espessura do solo (m)

h – Nível d'água acima do plano de ruptura (m)

ρ_s – Massa específica do solo (kg/m³)

ρ_w – Massa específica da água (kg/m³)

θ – Ângulo do plano de ruptura (em graus)

ϕ – Ângulo de atrito interno (em graus)

g – Aceleração da gravidade (m/s²)

c' – Intercepto coesivo (kPa)

Q – Intensidade da chuva (mm)

T – Transmissividade de solo (m²/dia)

a – Área de contribuição (m²)

b – Comprimento de contorno (m)

A resolução da Equação 7, da origem a 7 classes de estabilidade (Tabela 1), sendo que, estas expressam a probabilidade de ocorrência de deslizamentos translacionais. Quanto menor o valor do Log de Q/T, maior a probabilidade de ruptura da encosta. As grandezas oriundas desta equação, podem apresentar valores negativos, todavia, tais valores (oriundos do modelo matemático apresentado pela Equação 7) visam avaliar a probabilidade da estabilidade à deslizamentos translacionais e não representam o rotineiro fator de segurança (Fs) definido pela Equação 8.

Tabela 1– Classes de Estabilidade

| Classes de Estabilidade | Condição |
|-----------------------------|-------------|
| Incondicionalmente estável | 10 – 9,9 |
| > -2,2 | -2,2 – 9,9 |
| -2,5 - -2,2 | -2,5 – -2,2 |
| -2,8 - -2,5 | -2,8 – -2,5 |
| -3,1 - -2,8 | -3,1 – -2,8 |
| < -3,1 | -9,9 – -3,1 |
| Incondicionalmente instável | -9,9 – -10 |

Fonte: (Dietrich; Montgomery, 1998) apud (Corsi; Penha; Guimarães, 2017)

Segundo Caraméz (2017) a relação apresentada pela resolução da Equação 7, origina sempre valores muito pequenos, por isso, Dietrich e Montgomery (1998) formaram sua análise através do Log de Q/T

(Tabela 1). Estes autores ainda apresentaram através da Tabela 2, condições inerentes a cada uma das classes de estabilidade.

Tabela 2– Condições para as Classes de Estabilidade

| Classes de Estabilidade | Valores $\text{Log } q/T$ |
|--|---|
| Incondicionalmente estável saturado | $\tan\theta \leq \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right); \frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta$ |
| Incondicionalmente estável não saturado | $\tan\theta \leq \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right); \frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta$ |
| Estável não saturado | $\frac{a}{b} \geq \frac{\rho s}{\rho w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right); \frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta; \tan\phi > \tan\theta^3 \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right)$ |
| Instável, não saturado | $\frac{a}{b} \geq \frac{\rho s}{\rho w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right); \frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta; \tan\phi > \tan\theta^3 \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right)$ |
| Instável saturado | $\frac{a}{b} < \frac{\rho s}{\rho w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right); \frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta; \tan\phi > \tan\theta^3 \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right)$ |
| Incondicionalmente instável não saturado | $\tan\theta > \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right); \frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta$ |
| Incondicionalmente instável saturado | $\tan\theta > \tan\phi \left(1 - \frac{\rho w}{\rho s}\right); \frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \sin\theta$ |

Fonte: (Dietrich; Montgomery, 1998) apud (Caramez, 2017)

2.4.3 Modelo de Deslizamentos Rotacionais

Este trabalho pautou-se na teoria de equilíbrio limite de taludes infinitos pelo método das fatias, sendo que esta teoria admite uma relação entre os esforços mobilizados e os esforços resistentes e a estabilidade dos taludes são quantificados através do fator de segurança (Equação 8).

$$F_S = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad . \quad (8)$$

Sendo:

F_S - Fator de Segurança em relação à resistência.

τ_f - Resistência média ao cisalhamento do solo.

τ_d - Tensão de Cisalhamento média desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura.

Valendo-se desta teoria, diversos autores apresentaram modelos matemáticos para quantificação do fator de segurança (FS). Dentre eles Freitas (2011) cita Fellenius (1936), Bishop (1955), Jumbu (1954) Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Correia (1988) como os modelos mais difundidos e aceitos no mundo.

Krahn (2001) appud Silva (2011) afirma que a principal diferença entre os modelos está nas considerações das equações de estática, força entre as fatias (normais e de corte) e na distribuição das forças de interação. Silva (2011) ainda apresenta uma comparação entre os principais modelos matemáticos de estabilidade de taludes (Quadro 8).

Quadro 8 – Características dos Métodos de Equilíbrio Limite

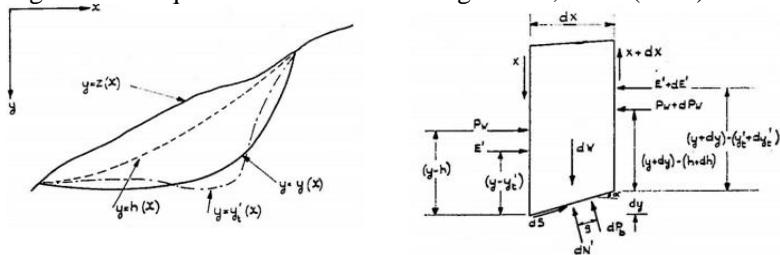
| Métodos | Superfície | $\sum M_o=0$ | $\sum F_h=0$ | $\sum F_v=0$ | Força E | Força X | Z |
|-------------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------|---------|------------|
| Fellenius | Circular | Sim | Não | Sim | Não | Não | Não existe |
| Bishop | Qualquer | Sim | Não | Sim | Sim | Não | Horiz. |
| Jumbu | Qualquer | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Horiz. |
| Spencer | Qualquer | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Constante. |
| Morgenstern Price | Qualquer | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Variavel. |
| Correia | Qualquer | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Variavel. |

Fonte: adaptado de Silva (2011)

Considerando os modelos expostos no Quadro 8, este trabalho dará mais ênfase naquele desenvolvido por Morgenstern Price, sendo que segundo Freitas (2011) o modelo desenvolvido por Morgenstern-Price consiste num método de análise de estabilidade de taludes no qual todas as condições de equilíbrio e de fronteira são satisfeitas e a superfície de ruptura poderá tomar qualquer forma.

Para Morgenstern, Price (1965) a superfície de ruptura do solo pode ocorrer em profundidades variáveis para quando as camadas de solo são heterogêneas. Este autor considera em suas operações de cálculo as equações de equilíbrio definidas através do modelo matemático para a superfície de escorregamento $y=y(x)$; da equação para a superfície do talude, assumida como conhecida $y=z(x)$; equação para a posição da ação dos impulsos efetivos horizontais $y=yt'(x)$; linha de impulso da pressão de água $y=h(x)$; além, das forças atuantes pelo impulso lateral na face da fatia em termos de tensões efetivas (E'); pela força vertical tangencial nas faces da fatia (X), pelo peso da fatia (dW), pela tensão normal efetiva (dN'), pela força tangencial atuante ao longo da base da fatia (dT) e pela inclinação que a fatia faz com a horizontal (α), (Figura 11).

Figura 11 - Esquema de Cálculo de Morgenstern, Price (1965)



Fonte: adaptado de Morgenstern, Price (1965)

O fator de segurança de Morgenstern, Price (1965) é definido através da equação pautada nos critérios de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas exibidos pela Equação 9.

$$FS = \frac{[c'.dx.\sec\alpha + (dN')\tan\phi']}{dT} \quad (9)$$

Sendo:

FS - Fator de Segurança em relação à resistência

c' - Coesão Efetiva do Solo

α - inclinação que a fatia faz com a horizontal

dN' - tensão normal efetiva

dT - força tangencial atuante ao longo da base da fatia

ϕ' - Ângulo de atrito efetivo.

dx - Comprimento da fatia

Para Bim (2015) o modelo de Morgenstern Price baseia-se no sistema de forças de Bishop, no entanto como Z é aceito como variável a superfície de ruptura pode assumir variadas formas de acordo com a variação das características do solo.

Sun et al. (2016) em seu trabalho apresenta um estudo comparativo entre os fatores de segurança calculados pelos métodos de Fellenius, Bishop, Jumbu, Spencer e Morgenstern Price. Tal estudo considerou dois casos sendo o 1º sem influência da linha piezométrica e o 2º com influência da linha piezométrica. Os resultados apontaram que as diferenças apresentadas entre os FS para os métodos de Spencer, Jumbu, Bishop e Morgenstern Price praticamente foram nulas quando aplicadas em solos homogêneos (Quadro 9).

Quadro 9 – Comparação entre os Modelos de Equilíbrio Limite de Taludes realizado por Sun et al. (2016)

| Método | Fellenius | Bishop | Jumbu | Spencer | Morgenstern Price |
|-------------|-----------|--------|-------|---------|-------------------|
| Caso 1 (FS) | 1,458 | 1,586 | 1,529 | 1,584 | 1,582 |
| Caso 2 (FS) | 1,185 | 1,273 | 1,248 | 1,274 | 1,275 |

Fonte: Sun et al. (2016)

Contudo, o que se destaca é a baixa variação nos resultados do FS para quando os solos são homogêneos. Vale destacar que a condição de homogeneidade é uma das características assumidas neste trabalho para o processo de mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rotacionais.

Segundo Cruz (2007), atualmente existem diversos *softwares* que incorporam os modelos de estabilidade de taludes e possibilitam a fácil resolução de tais problemas. Um dos *Softwares* que se destacam na atualidade é o SLOPE/W (utilizado por esta pesquisa). Este é comumente utilizado na prática da engenharia geotécnica e permite, por exemplo, a consideração de diferentes materiais, geometrias complexas, definição de superfícies de ruptura pelo próprio usuário, hipóteses de inclusão dos efeitos das poro-pressões nas análises, simulação de carregamentos, além de incorporar os modelos matemáticos de cálculo do equilíbrio limite de taludes infinitos desenvolvidos por Fellenius (1936), Bishop (1955), Jumbu (1954) Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Correia (1988).

A classificação da NBR 11682 revisada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 2009 define que as “áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas” são classificadas como sendo áreas de alto nível de segurança. Esta norma define que os taludes localizados nestas áreas devem exibir com FS maior que 1,5 para ser considerado com alto nível de segurança, FS maior que 1,4 para ser considerado com nível médio de segurança e FS maior que 1,3 para ser considerado com baixo nível de segurança.

Tal classificação possibilita a definição de classes de estabilidade para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rotacionais e vem sendo aplicada rotineiramente no sul do Brasil (Sbroglia, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODO

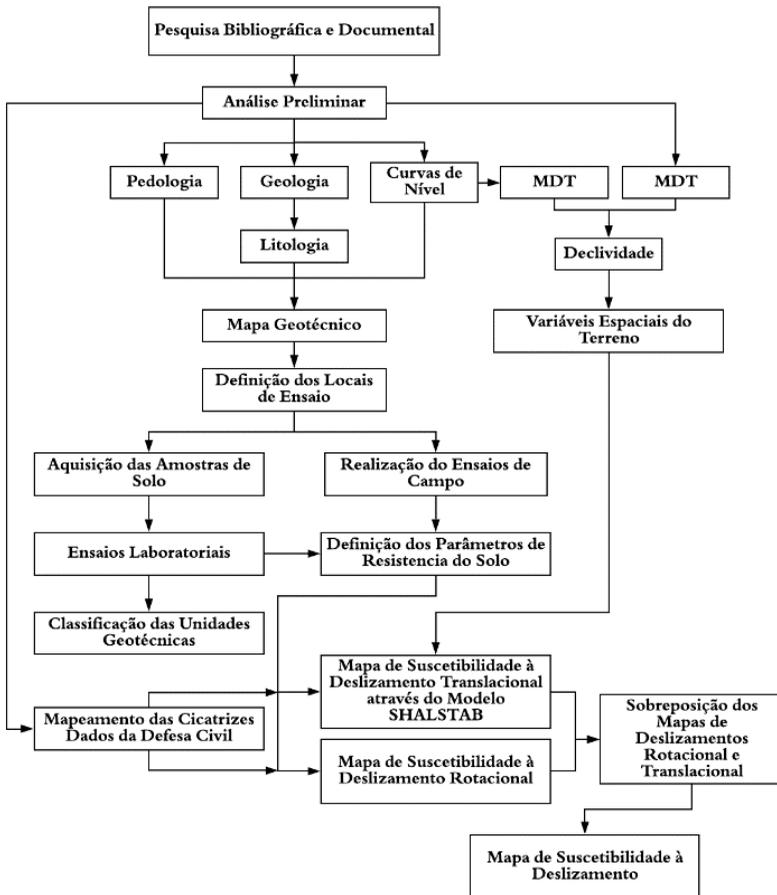
Neste capítulo está apresentado método desenvolvido no presente trabalho, descrevendo-se a caracterização da pesquisa, assim como, a descrição da mesma, além dos materiais e método para elaboração do presente trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa pode ser caracterizada quanto a sua natureza como sendo aplicada e foi desenvolvida de forma exploratória.

Os procedimentos seguidos por esta pesquisa, estão apresentados através do fluxograma ilustrado pela Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de Atividades Desenvolvidas neste Trabalho



Fonte: do autor (2019)

3.2 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

A realização desta pesquisa foi dividida em etapas bem definidas, onde cada etapa será abordada separadamente e podem ser analisadas no decorrer deste capítulo.

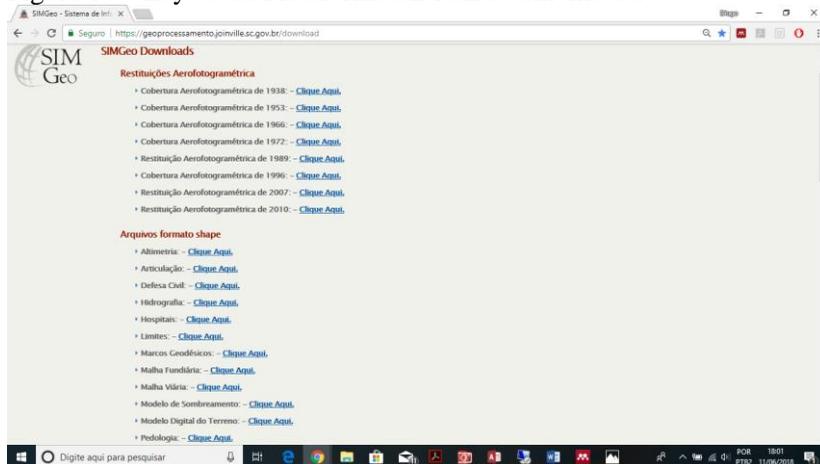
Cabe ainda salientar que os procedimentos expostos na Figura 12 foram aplicados a duas áreas, sendo elas a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e a Bacia Hidrográfica do Rio da Prata.

3.2.1 Pesquisa Bibliográfica e Documental

As pesquisas bibliográficas tiveram como objetivo contextualizar a problemática, além de identificar estudos e pesquisas similares que tenham sido desenvolvidos anteriormente, e ainda adequar o presente trabalho a linguagem técnica utilizada nesta área de estudo.

Em paralelo à atividade supracitada, foi realizada uma pesquisa documental para a aquisição das bases cartográficas necessárias para elaboração deste trabalho. Para tal, cabe salientar que a área de estudo apresenta uma série de dados disponíveis de forma gratuita no portal SimGeo (Figura 13) disponibilizado pela Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão da Prefeitura Municipal de Joinville/SC.

Figura 13 – Layout da Plataforma SIMGEO Joinville/SC



Fonte: do autor (2018)

Todos os dados ilustrados pela Figura 13 apresentam como referência geodésica o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e, portanto, está de acordo com a Resolução nº1/2005 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Ainda se tratando da pesquisa documental, cabe salientar que, foram levantadas 480 ocorrências relacionadas a eventos de deslizamentos dentro da área de estudo da BHRC, que foram registradas pela Defesa Civil de Joinville/SC. Tais ocorrências foram registradas desde o ano de 2008 até o mês de agosto de 2018 e todas referem-se a área da BHRC.

Com base nas pesquisas bibliográficas realizadas, tornou-se possível constatar que a utilização de mapas preexistentes para composição e interpretação dos mapas geotécnicos é uma prática comum. Rotineiramente estas bases cartográficas foram cruzadas para obtenção preliminar dos mapas geotécnicos, obviamente, que estas ações foram realizadas apenas para os dotados das melhores escalas.

3.2.1.1 Dados Topográficos

As bases topográficas tiveram finalidade de caracterizar a superfície do terreno e auxiliaram na composição da modelagem SHALSTAB. Tais bases são indispensáveis para composição do mapa de suscetibilidade à deslizamento translacional e ainda possui finalidade de auxiliar na composição dos mapas geotécnicos preliminares.

Cabe salientar que os dados planialtimétricos podem ser gerados através de levantamentos indiretos, como a aerofotogrametria combinada com técnicas específicas e dados coletados diretamente em campo, porém, para este trabalho, foram utilizadas bases cartográficas previamente elaboradas por entidades públicas. Dentre os dados planialtimétricos, foram utilizadas as bases de composição das curvas de nível, os pontos cotados, modelo digital do terreno (MDT) e o modelo sombreado do terreno.

Os dados cartográficos citados anteriormente estão disponíveis para *download* no *site* do SimGeo (Figura 13) e foram confeccionados através da restituição aerofotogramétrica realizada pela Empresa Aeroimagem.

Sobre as curvas de nível disponíveis, cabe discorrer que estas apresentam feições lineares espaçadas de 1 em 1 metro à uma escala de

1:1.000. Além das curvas de nível, os pontos cotados também estão disponíveis e apresentam a mesma escala.

Em relação aos arquivos em formato raster (MDT e modelo sombreado do terreno), as bases apresentam escala de 1:5.000, conforme descrito nos metadados dos mesmos.

Através do MDT, foi gerado por meio de geoprocessamento no ambiente SIG do *software* ArcMaps versão 10.3, o mapa de declividade em escala de 1:5.000 que obedeceu a classes propostas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) no ano de 2006, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de Relevo segundo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

| Classe de Relevo | Intervalos de Declividade (%) |
|------------------|-------------------------------|
| Plano | 0 a 3 |
| Suave Ondulado | 3 a 8 |
| Ondulado | 8 a 20 |
| Forte Ondulado | 20 a 45 |
| Montanhoso | 45 a 75 |
| Escarpado | > 75 |

Fonte: adaptado de (EMBRAPA, 2006)

Os mapas de declividade fizeram a composição das variáveis espaciais do terreno, onde, o direcionamento do fluxo hidrológico e a área de contribuição da bacia hidrográfica foram estabelecidos através destas bases cartográficas. Cabe salientar que estas variáveis são indispensáveis para a composição dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais.

3.2.1.2 Dados Litológicos e Pedológicos

As bases litológicas localizam os substratos da crosta terrestre, e auxiliam na caracterização física da formação dos solos. Estas bases resultam da interpretação dos mapas geológicos e representam a rocha predominante para cada região do espaço.

Os dados litológicos utilizados neste trabalho, foram confeccionados por Uberti (2012) na escala de 1:5.000 e encontram-se disponíveis no portal SimGeo (Figura 13) para *download* gratuito.

Em relação as bases pedológicas, é possível afirmar que as mesmas introduzem características de comportamento comum para uma

determinada região do espaço. A classificação pedológica utilizada por este trabalho, apoia-se naquela realizada pelo Sistema de Classificação dos Solos Brasileiros realizado pela EMBRAPA (2013).

Cabe ainda salientar que os dados pedológicos utilizados neste trabalho foram adquiridos de maneira semelhante aos litológicos e também apresentam escala de 1:5.000.

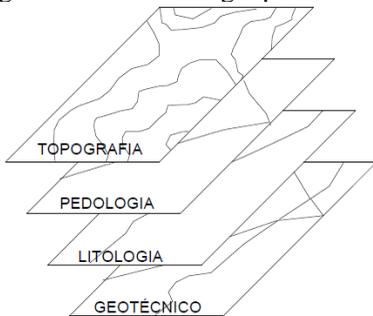
Ambas são ferramentas indispensáveis para composição do mapeamento geotécnico, e será melhor descrito nos tópicos a seguir.

3.2.2 Composição do Mapa Geotécnico Preliminar

Diversos autores brasileiros têm desenvolvido diferentes técnicas de mapeamento geotécnico, todavia, este trabalho seguirá a metodologia proposta por Davison Dias em 1995, sendo que tal metodologia tem sido utilizada de forma mais frequente no sul do Brasil e vem apresentando bons resultados em trabalhos similares a este.

Com uso desta metodologia, foi realizada a sobreposição da base cartográfica litológica, pedológica e topográfica (curvas de nível) com objetivo de conceber o mapa Geotécnico. Tal sobreposição foi realizada em ambiente SIG (ArcGis 10.3) e deu origem a polígonos de áreas que apresentam comportamento geomecânico similar, Figura 14.

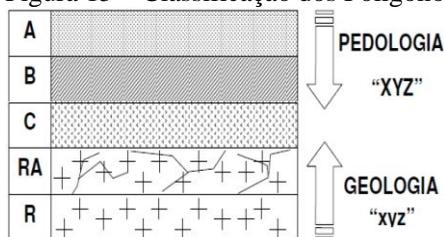
Figura 14 – Metodologia para Gerar Mapa Geotécnico



Fonte: do autor (2018)

A partir da Figura 14, é possível observar que este método correlaciona o comportamento do solo à sua gênese, sendo que, a partir das citadas bases foi realizada a classificação dos polígonos do mapa geotécnico conforme o método apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Classificação dos Polígonos para o Mapa Geotécnico



Fonte:Higashi (2006)

A Figura 15 apresenta que o mapa Geotécnico foi classificado utilizando a nomenclatura dos horizontes A e B da base pedológica (representado por letras maiúsculas) e a nomenclatura do horizonte C, RA e R da base litológica (representado por letras minúsculas).

Em 2001, Davison Dias definiu a classificação geotécnica baseando-se no método apresentado pela Figura 15, onde, a mesma pode ser observada através das Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Simbologia Simplificada das Classes Pedológicas

| SIGLA | CLASSIFICAÇÃO | SIGLA | CLASSIFICAÇÃO |
|-------|----------------------------|-------|----------------------------|
| A | Aluviais | P | Podzóis Indiscriminados |
| AQ | Areia Quartzosa | PB | Podzólico Bruno-Acidentado |
| B | Brunizém | PE | Podzólico Vermelho-Escuro |
| BV | Brunizém Vértico | PL | Planossolo |
| C | Cambissolo | PLV | Planossolo Vértico |
| CB | Cambissolo Bruno | PLP | Planossolo Plântico |
| GH | Glei | PT | Plintossolo |
| HO | Solo Orgânico | PV | Podzólico Vermelho-Amarelo |
| LA | Latossolo Amarelo | R | Litólico |
| LB | Latossolo Bruno | TR | Terra Roxa Estruturada |
| LBC | Latossolo Bruno Câmico | TB | Terra Bruna-Estruturada |
| LBR | Latossolo Bruno-Roxo | TBR | Terra Bruna-Roxa |
| LE | Latossolo Vermelho-Escuro | TBV | Terra Bruna Podzólica |
| LR | Latossolo Roxo | V | Vertissolo |
| LV | Latossolo Vermelho-Amarelo | | |

Fonte: Davison Dias (2001)

Tabela 5 – Simbologia Simplificada das Classes Litológicas

| SIGLA | CLASSIFICAÇÃO | SIGLA | CLASSIFICAÇÃO |
|-----------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------|
| a | Arenito | g | Granito |
| ag | Argilito | gl | Granulito |
| an | Andesito | gn | Gnaisse |
| ar | Ardósia | gd | Granitóide |
| b | Basalto | ma | Mármore |
| br | Brecha | p | Pelito |
| c | Conglomerado | q | Quartzito |
| cm ¹ | Complexo metamórfico ⁽¹⁾ | si | Sienito |
| cr | Carvão | s | Siltito |
| d | Diorito | sq | Sedimentos quaternários |
| da | Dacito | st | Sedimentos Terciários |
| f | Folhelho | x | Xisto |

Fonte: Davison Dias (2001)

Em relação a Tabela 4, cabe afirmar que a supracitada autora, desenvolveu a mesma baseando-se na antiga nomenclatura abordada pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solos (SiBCS), porém, o presente trabalho aborda a nova classificação dos solos e para tal, adotou as siglas desenvolvidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) exposta no Manual Técnico de Pedologia elaborado em 2007, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Simbologia das Classes Pedológicas segundo IBGE

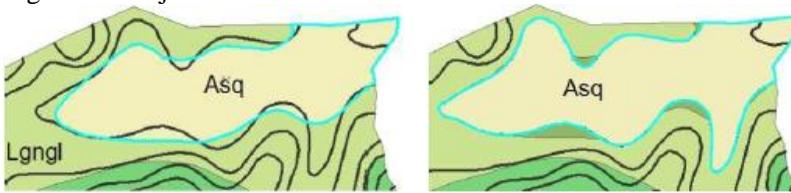
| SIGLA | CLASSIFICAÇÃO | SIGLA | CLASSIFICAÇÃO |
|--------------|-----------------------------|--------------|------------------------|
| PBA | Argissolo bruno-acinzentado | CH | Cambissolo húmico |
| PAC | Argissolo acinzentado | CY | Cambissolo flúvico |
| PA | Argissolo amarelo | CX | Cambissolo hálico |
| PV | Argissolo vermelho | MD | Chernossolo rëndzico |
| PVA | Argissolo vermelho-amarelo | ME | Chernossolo ebânico |
| EK | Espodossolo humilúvico | MT | Chernossolo argilúvico |
| ES | Espodossolo ferrilúvico | MX | Chernossolo háplico |
| ESK | Espodossolo ferrihumilúvico | GJ | Gleissolo tiomórfico |
| LB | Latossolo bruno | GZ | Gleissolo sálico |
| LA | Latossolo amarelo | GM | Gleissolo melânico |
| LV | Latossolo vermelho | GX | Gleissolo háplico |
| LVA | Latossolo vermelho amarelo | TC | Luvissolo crômico |
| RL | Neossolo litólico | TX | Luvissolo háplico |
| RY | Neossolo fluvico | NB | Nitossolo bruno |
| RR | Neossolo regolítico | NV | Nitossolo vermelho |
| RQ | Neossolo quartzarênico | NX | Nitossolo háplico |
| SN | Planossolo nátrico | OJ | Organossolo tiomórfico |
| SX | Planossolo háplico | OO | Organossolo fólico |
| VG | Vertissolo hidromórfico | OX | Organossolo háplico |
| VE | Vertissolo ebânico | FF | Plintossolo pétrico |
| VX | Vertissolo háplico | FT | Plintossolo argilúvico |
| | | FX | Plintossolo háplico |

Fonte: IBGE (2007)

As classes litológicas seguiram a nomenclatura apresentada pela Tabela 5, uma vez que esta não sofreu alteração desde a publicação da mesma.

Outro indicador de variação dos aspectos geotécnicos citado por Davison Dias, são os topográficos, uma vez que tais aspectos possibilitam ajustes aos mapas geotécnicos concebidos por possíveis incompatibilidades de escala entre as bases litológicas e pedológicas. Na realização destes ajustes, as cotas presentes nas curvas de nível assumem a transição entre os polígonos geotécnicos, especialmente nas zonas de transição entre solos residuais e sedimentares (Figura 16).

Figura 16 – Ajuste das Unidades Geotécnicas



Fonte: Reginatto (2013)

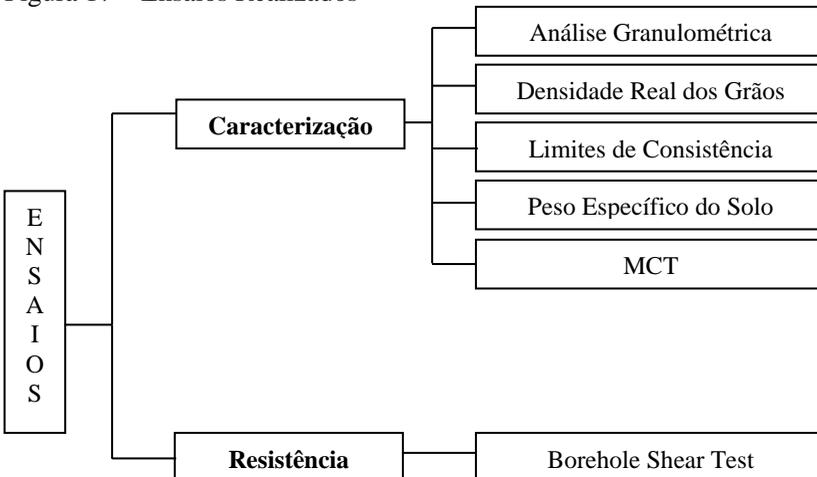
A qualidade da confecção deste mapa é de suma importância, pois foi através deste instrumento, que se definiu os pontos de coleta de amostra de solo utilizados subsequentemente na realização dos ensaios.

3.2.3 Realização dos Ensaios

A realização dos ensaios foi a etapa responsável pelo reconhecimento das características geomecânicas de cada unidade geotécnica. Para tal, foram realizadas coletas de amostras de solo deformadas e indeformadas (para os ensaios de laboratório), além de ensaios realizados em campo.

Os ensaios realizados neste trabalho, podem ser observados através da Figura 17.

Figura 17 – Ensaios Realizados



Fonte: do autor (2019)

Estes ensaios tiveram por objetivo promover a classificação das unidades geotécnicas, além de elucidar os parâmetros de resistência das mesmas.

Cabe ainda salientar que essa etapa do trabalho será explicitada nos tópicos subsequentes do mesmo, estando divididas da seguinte forma: i) coleta das amostras de solo; ii) ensaios de laboratório e iii) ensaios de campo.

3.2.3.1 Coleta das Amostras do Solo

A aquisição das amostras de solo (deformadas e indeformadas) para realização dos ensaios de caracterização das unidades geotécnicas ocorreram em meados dos meses de outubro e novembro e o procedimento para retirada destas amostras foi realizado na observância da NBR 9604 da ABNT (2016).

A escolha dos pontos ao qual foram coletadas as amostras, tiveram como características as ínfimas interferências antrópicas e situar-se próximo a locais com elevada inclinação do relevo conforme Figura 18.

Figura 18 – Característica dos Locais de Ensaio



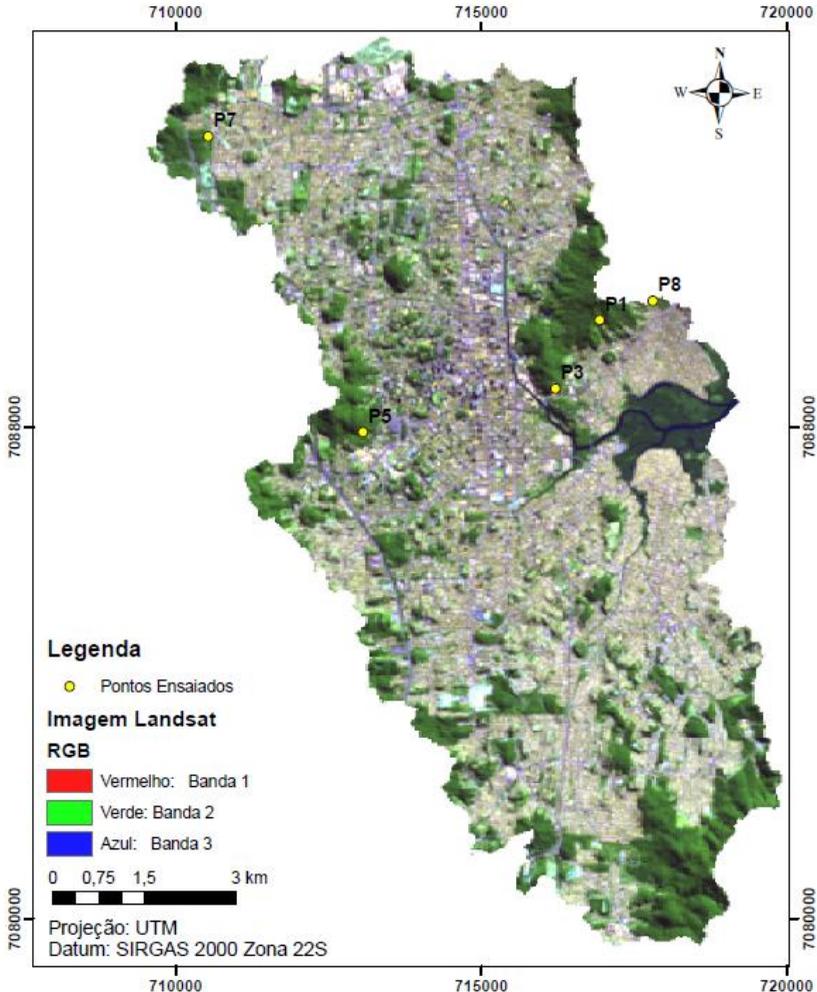
(a) Característica da Encosta
Fonte: o autor (2019)



(b) Corte para realização do ensaio

Todos os pontos de coleta tiveram suas coordenadas georreferenciadas pelo sistema *Universal Transversa de Mercator* (UTM) através do Sistema de Posicionamento Global (GPS), utilizando o equipamento de navegação conforme destacados na Figura 19 e Tabela 7.

Figura 19 – Localização das Amostras Utilizadas nos Ensaios de Laboratório e Coleta de Amostras Indeformadas



Fonte: do autor (2019)

Tabela 7 – Coordenadas do Pontos de Coletas de Solo

| Unidade Geotécnica | Ponto | E | N |
|---------------------------|--------------|----------|----------|
| RLgn | P1 | 716939 | 7089749 |
| PVgn | P3 | 716213 | 7088633 |
| CXgn | P5 | 713065 | 7087923 |
| CYsq | P7 | 710531 | 7092741 |
| CXsq | P8 | 717686 | 7090043 |

Fonte: do autor (2019)

As amostras deformadas destacadas na Figura 19, foram obtidas a profundidade de 1m com uso de um trado pedológico com diâmetro de 3 polegadas. Cabe ressaltar que estes pontos de coleta foram os mesmos em que foi executado o ensaio de cisalhamento com o BST.

As amostras indeformadas de solos foram coletadas diretamente nos moldes de PVC (com diâmetro interno de 4,73cm e altura de 5cm), sendo que, todas amostras foram envoltas por papel filme e alocadas cuidadosamente em uma caixa de isopor (que teve por finalidade preservar ao máximo as propriedades de campo destas amostras) conforme previsto pela NBR 9604 da ABNT (2016).

Cabe ressaltar que, de acordo com a metodologia de mapeamento geotécnico de Davison Dias (1995), pode-se utilizar um banco de dados para a caracterização geomecânica de cada uma das unidades geotécnicas contidas em uma determinada região de análise. Se valendo desta teoria, não foi necessário adquirir amostras de solo para as unidades contidas na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, uma vez que as unidades compõem esta bacia, são similares as contidas na BHRC. Portanto, para os dados referentes à caracterização do solo das unidades geotécnicas contidas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, foi arbitrado os mesmos das unidades geotécnicas da BHRC

3.2.3.2 Ensaio de Laboratório

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil de Infraestrutura localizado nas dependências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) campus de Joinville/SC.

Para a realização dos mesmos, amostras de solos deformadas e indeformadas foram utilizadas, cada qual para o respectivo ensaio, sendo que os ensaios elaborados neste trabalho estão descritos a seguir:

- Análise Granulométrica – este ensaio foi desenvolvido com a observância da NBR7181/2016, e teve por finalidade caracterizar através da curva granulométrica, cada uma das unidades geotécnicas;
- Determinação da densidade real dos grãos – tal ensaio foi executado de acordo com os procedimentos previstos na norma 093/1994 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), sendo válido para as partículas de solo menores que 2,0mm;
- Ensaio de consistência – neste ensaio foi-se observado os aspectos definidos pela NBR7180/2016 e NBR6459/2016 para o reconhecimento do LP e LL respectivamente, de cada uma das unidades geotécnicas;
- Ensaio de pastilhas da Miniatura Compactada Tropical (MCT) – este ensaio utilizará o sistema de classificação predefinido por Nogami e Villibor (1994; 1995), complementada pela classificação expedita por Godoy (1997).
- Peso Específico do Solo – para estes ensaios foi-se utilizado como referência técnica, a NBR 10838/88, onde através de corpos de provas indeformados envoltos a um tubo de PVC pode-se reconhecer o a massa específica de cada uma das unidades geotécnicas

Os 3 primeiros ensaios de laboratório, foram responsáveis por promover a classificação dos solos, que neste trabalho, foi realizada conforme os métodos convencionais da *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO*, pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS e o penúltimo ensaio classifica as unidades geotécnicas, de acordo com método expedito das pastilhas MCT.

O último ensaio descrito nesta seção, foi o único que usou amostras informadas do solo e teve como objetivo reconhecer o peso específico de cada unidade geotécnica, uma vez que, os modelos matemáticos de estabilidade dos taludes, apoiam-se nesta grandeza como sendo uma das principais.

3.2.3.3 Ensaios de Campo

Os ensaios de campo, caracterizam-se como sendo aqueles desenvolvidos *in loco*. Para a execução destes, foi importante que se

causassem as menores perturbações possíveis ao solo, uma vez que, os resultados originados dos ensaios de campo devem ser os mais similares aos apresentados em condições naturais.

As tradagens tiveram por objetivo fazer o reconhecimento das unidades geotécnicas através da observação tátil visual, além de recolher amostras de solo indeformada para a realização dos ensaios de caracterização.

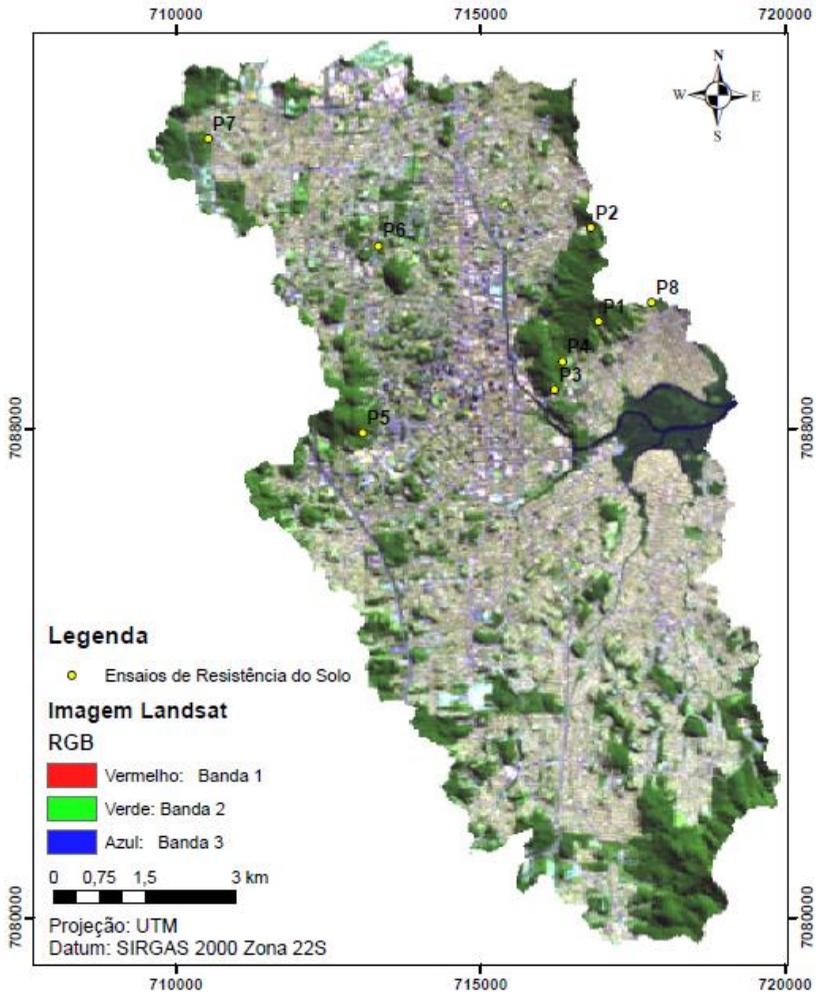
Os ensaios de cisalhamento do solo realizados em campo foram executados ao longo das diferentes unidades geotécnicas contidas na área da BHRC e foram executados a aproximadamente 1 metro de profundidade (Tabela 8 e Figura 20).

Tabela 8 – Coordenadas do Pontos de Realização dos Ensaios de Campo

| Unidade Geotécnica | Ponto | E | N |
|---------------------------|--------------|----------|----------|
| RLgn | P1 | 716939 | 7089749 |
| | P2 | 716810 | 7091282 |
| PVgn | P3 | 716213 | 7088633 |
| | P4 | 716347 | 7089091 |
| CXgn | P5 | 713065 | 7087923 |
| | P6 | 713323 | 7090983 |
| CYsq | P7 | 710531 | 7092741 |
| CXsq | P8 | 717686 | 7090043 |

Fonte: do autor (2019)

Figura 20 - Localização dos Ensaios de Resistência (BST)



Fonte: do autor (2019)

Conforme observado na Tabela 8, foram desenvolvidos 8 ensaios de cisalhamento do solo (BST), sendo 2 ensaios para cada unidade com substrato de rocha gnaiss e 1 ensaio para cada uma das unidades com substrato de sedimentos do quaternário. Para as duas últimas unidades, não foram executados 2 ensaios para cada unidade geotécnica, devido a dificuldade de encontrar áreas sem interferência humana, uma vez que, a BHRC exibe elevado índice urbano e tais unidades (CYSq e CXsq)

encontram-se nas áreas de relevo predominantemente plano e ocupado pela urbanização.

A execução do ensaio BST seguiu o procedimento descrito na fundamentação teórica. Para cada ensaio foram aplicadas três diferentes tensões de confinamento, com o objetivo de se traçar envoltória de resistência ao cisalhamento do solo. Estes ensaios tiveram por objetivo reconhecer os parâmetros de resistência de cada uma das unidades geotécnicas.

Cabe ressaltar que, de acordo com a metodologia de mapeamento geotécnico de Davison Dias (1995), pode-se utilizar um banco de dados para a caracterização geomecânica de cada uma das unidades geotécnicas contidas em uma determinada região de análise. Se valendo desta teoria, não se realizou ensaios de cisalhamento para as unidades contidas na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, uma vez que as unidades contidas nesta bacia, são similares as contidas na BHRC. Portanto, para os dados referentes ao ângulo de atrito e coesão do solo das unidades geotécnicas pertencentes na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, foram arbitrados os mesmos valores das unidades geotécnicas da BHRC

3.2.4 Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos

Translacionais

Os deslizamentos translacionais, também denominados de planares ocorrem próximos à superfície do relevo, sendo que, Fernandes e Amaral (1996) *apud* Reginato (2013) se referem aos deslizamentos translacionais como movimentos rasos por apresentarem superfície de ruptura normalmente entre 0,5 e 5,0m de profundidade. No entanto para este trabalho a superfície de ruptura foi investigada a profundidades que variaram entre 5 e 20 metros para todo o relevo analisado, uma vez que, os solos da região são considerados profundos; e para validação e análise dos resultados dos deslizamentos translacionais, optou-se pela profundidade que apresentou os melhores resultados. Cabe ressaltar que a utilização de profundidades superiores a 5m para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais vem sendo uma prática comum no sul do Brasil e para esta região vem apresentando bons resultados.

Para realizar o mapeamento de suscetibilidade à deslizamento translacional, aplicou-se o modelo matemático desenvolvido através

da álgebra de mapas denominado modelo SHALSTAB em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), elaborado por Dietrich e Montgomery (1998). Segundo Reginato (2013) “o SHALSTAB compõe um modelo eficiente na previsão e simulação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, incorporando, em suas análises, parâmetros topográficos, hidrológicos e propriedades do solo”.

Após a espacialização dos dados geotécnicos (mapa geotécnico), resolveu-se a equação do SHALSTAB através da ferramenta *Raster Calculation*, disponível no *software* ArcGis versão 10.3. Tal ferramenta foi modelada a partir de dois parâmetros hidrológicos q e T , conforme apresentado na Equação 10.

$$\text{Log} \frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin\theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad (10)$$

Onde:

q - Intensidade da chuva (mm)

T - Transmissividade do solo (m²/dia)

a - Área de contribuição ou área drenada a montante dada (m²)

b - Comprimento de contorno unitário (resolução do *grid* dado em m)

c - Coesão efetiva do solo (kPa)

g - Aceleração da gravidade (m/s²)

z - Espessura do solo (m)

ρ_s - Peso específico do solo (kg/m³)

ρ_w - Peso específico da água (kg/m³)

ϕ - Ângulo de atrito do solo dado em graus

θ - Declividade medida em graus

A resolução da Equação 10, deu origem a 7 classes de estabilidade (conforme apresentado na página 57 deste trabalho; Tabela 1 e 2) as quais a área da BHRC e BHRP foram classificadas.

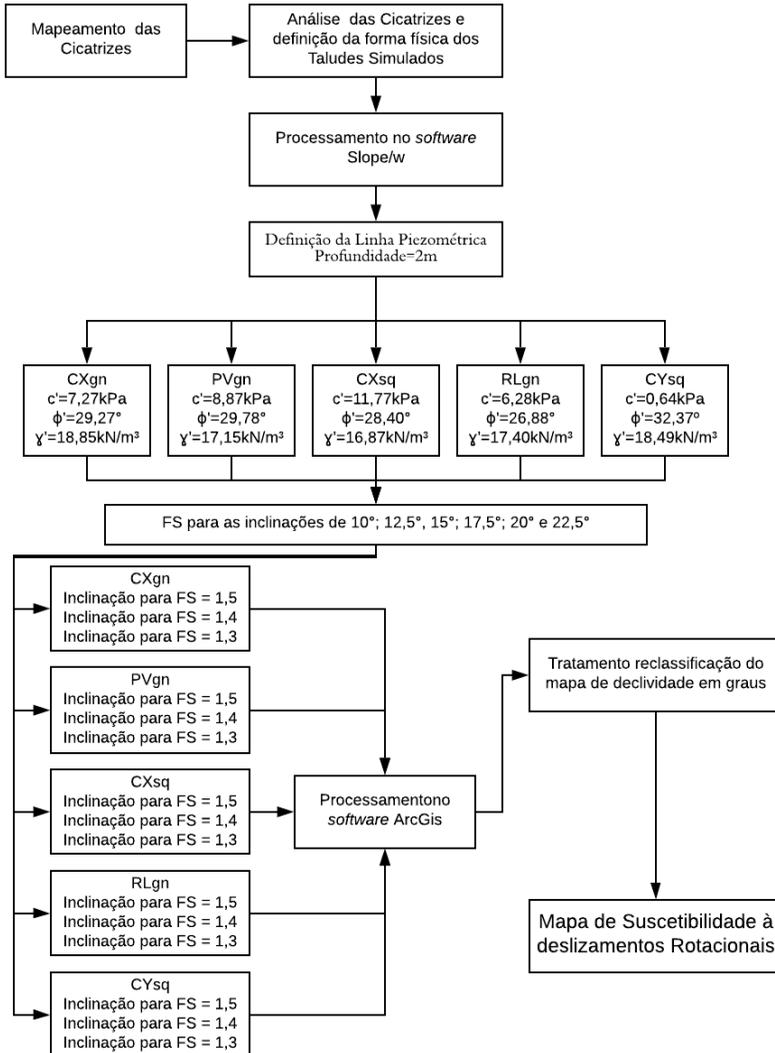
A Tabela 1 apresenta as classes de estabilidade a deslizamentos translacionais das encostas oriundos do SHALSTAB, sendo estes, classificados entre 10 para o ambiente mais seguros e -10 para os ambientes com maior probabilidade a deslizamento, ou seja, as áreas que apresentem valores negativos, são os ambientes mais perigosos e devem ser evitados quanto a sua ocupação urbana.

3.2.5 Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos Rotacionais

Para realizar o mapeamento de suscetibilidade à deslizamentos rotacionais, foram simulados através do *software* Slope/W (Geoslope da Geostudio - 2018) versão estudante uma série de taludes com características físicas similares aquelas identificadas em campo pelo mapeamento das cicatrizes.

As simulações objetivaram o reconhecimento do fator de segurança para diversas inclinações que pudessem ser encontradas no relevo da área de estudo. A geração do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rotacionais seguiu os procedimentos apresentados na Figura 21.

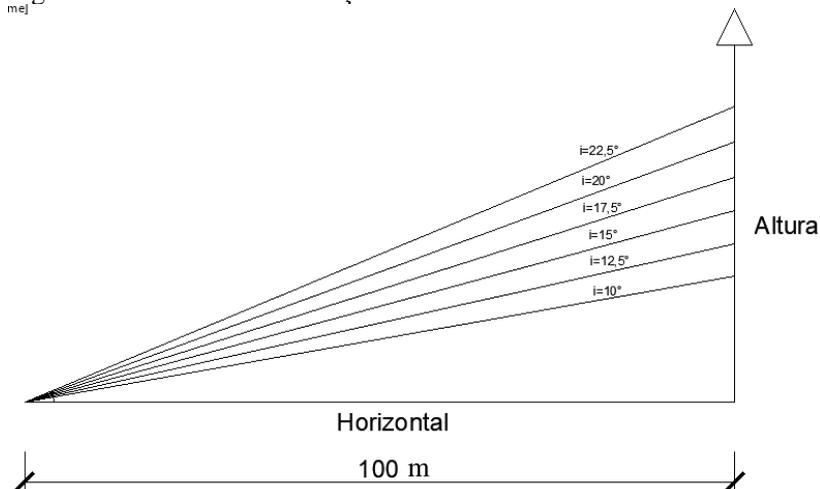
Figura 21 - Fluxograma de Atividades para Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos Rotacionais



Fonte: do autor (2019)

Sobre a forma física das cicatrizes, cabe salientar que as mesmas apresentaram como característica comum, comprimento de aproximadamente 100 metros em plano. Portanto, a partir destas dimensões em plano (eixo x - horizontal), foi variada a inclinação do talude para se reconhecer a inclinação crítica do mesmo, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Diferentes Inclinações Simuladas nos Taludes Infinitos



Fonte: do autor (2019)

A linha piezométrica foi definida com uma profundidade de 2 metros. Tal profundidade objetivou aplicar aos taludes a condição mais crítica quanto à este parâmetro. Convém destacar que nas tradagens realizadas em campo (na profundidade de 1m) não foi identificado o lençol freático e por isso, a linha piezométrica foi admitida apenas no metro seguinte.

Os fatores de segurança de 1,5, 1,4 e 1,3 foram utilizados por este trabalho como indicadores de classes de estabilidade. As áreas que apresentaram FS superior a 1,5 foram consideradas estáveis; as que apresentaram FS inferior à 1,5 e superior a 1,4 foram consideradas como mediamente estáveis, já as áreas que apresentaram FS inferior à 1,4 e superior a 1,3 foram consideradas como mediamente instáveis e as áreas que apresentaram FS inferior à 1,3 foram consideradas como instáveis.

Esta classificação foi adaptada da NBR 11682 de 2009, onde segundo a mesma as “áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas” são classificadas como sendo áreas de alto nível de segurança. Esta norma define que os taludes localizados nestas áreas devem exibir o FS maior que 1,5 para ser considerado com alto nível de segurança, FS maior que 1,4 para ser considerado com nível médio de segurança e FS maior que 1,3 para ser considerado com baixo nível de segurança.

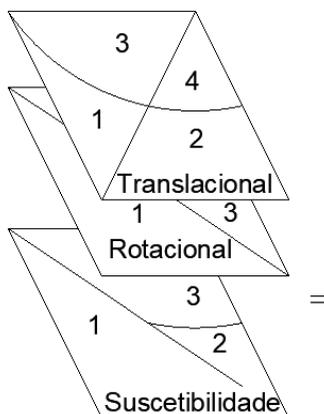
Existem diversos teóricos envolvidos com o procedimento matemático de quantificação do fator de segurança dos taludes, no entanto para este trabalho foi aplicado o desenvolvido por Morgenstern e Price, uma vez que, de acordo com Freitas (2011), neste modelo a superfície de ruptura poderá apresentar qualquer forma.

3.2.6 Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Deslizamentos

O primeiro procedimento realizado nesta etapa foi a definição das classes de estabilidade, que para este trabalho foi-se assumida como sendo estável, mediamente estável, mediamente instável e instável.

A partir de tal definição fora realizada a composição do mapeamento de áreas suscetíveis à deslizamentos através da sobreposição dos mapas de suscetibilidade à deslizamentos translacionais e o de suscetibilidade à deslizamentos rotacionais (Figura 23).

Figura 23 – Composição do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos



Fonte: do autor (2019)

O procedimento para classificação das áreas contidas no mapa de suscetibilidade obedeceu a hierarquia da situação mais crítica encontrada no mapa de suscetibilidade a deslizamento translacional ou rotacional (Figura 24).

Figura 24 – Composição das Classes de Estabilidade do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos

| | | Translacional | | | |
|------------|--------------------|---------------|-------------------|--------------------|--------------|
| | | Estável (E) | Med. Estável (ME) | Med. Instável (MI) | Instável (I) |
| Rotacional | Instável (I) | I | I | I | I |
| | Med. Instável (MI) | MI | MI | MI | I |
| | Med. Estável (ME) | ME | ME | MI | I |
| | Estável (E) | E | ME | MI | I |

Fonte: do autor (2019)

Para tal, o mapa de suscetibilidade à deslizamento translacional teve que ser reclassificado, para que ambos (mapa rotacional e mapa translacional) tivessem o mesmo número de classes de estabilidade e usassem a mesma linguagem. Nesta etapa, as classes de estabilidade do mapa de deslizamentos translacionais foram readequadas conforme o Quadro 10.

Quadro 10 – Reclassificação da Classes de Estabilidade do Mapa de Deslizamentos Translacionais

| Classe de Estabilidade Antiga | Classe de Estabilidade Nova |
|---|-----------------------------|
| Incond. Instável e Sat. Incond. Instável e Não Sat.) | Instável |
| Instável e Sat. Instável e Não Sat. | Mediamente Instável |
| Estável e Não Sat. | Mediamente Estável |
| Incond. Estável e Sat. Incond. Estável e Não Sat. | Estável |

Fonte: do autor (2019)

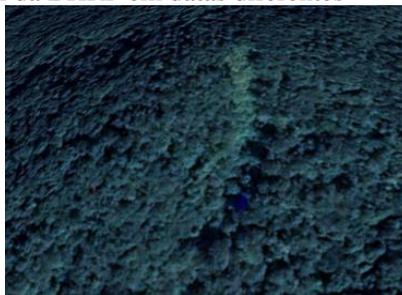
3.2.7 Mapeamento de Cicatrizes de Deslizamento

As ocorrências de deslizamentos deixam marcas no terreno e podem ser identificadas através de alteração na morfologia do terreno, na cobertura vegetal e na drenagem (Figura 25).

Figura 25 – Cicatriz no mesmo local da BHRP em datas diferentes



(a) Fonte: Google Earth 2010



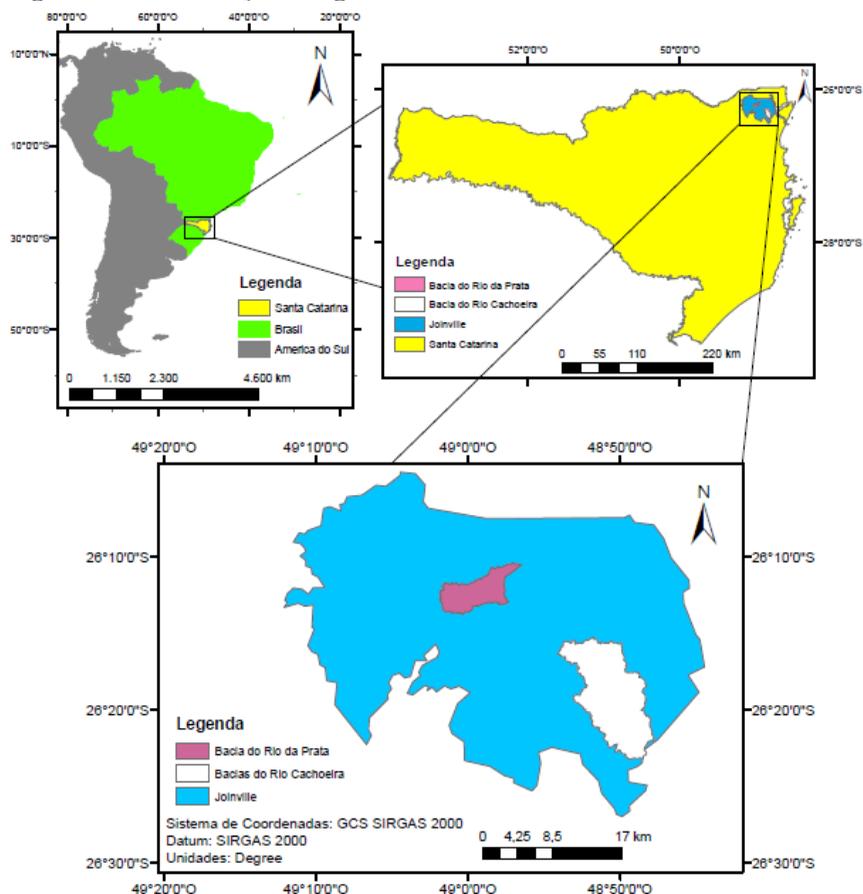
(b) Fonte: Google Earth 2016

Portanto para a identificação das cicatrizes existentes na área de estudo, foram realizadas análises multitemporais do relevo através da ferramenta Google Earth Pro. As cicatrizes identificadas nesta ferramenta foram cruzadas com as ortofotos de 2010, disponíveis gratuitamente pela Prefeitura Municipal de Joinville na Plataforma SimGeo (Figura 26). Além do procedimento de fotointerpretação, cabe destacar que as cicatrizes identificadas foram analisadas através das

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As Bacias Hidrográficas do Rio Cachoeira (BHRC) e do Rio da Prata (BHRP) estão localizadas no município de Joinville (entre a Latitude $25^{\circ} 00'00''$ S, Longitude $49^{\circ} 13' 00''$ O e a Latitude $26^{\circ} 28'00''$ S e Longitude $48^{\circ} 30'00''$ O) e este encontra-se no estado de Santa Catarina, que está situado na Região Sul do Brasil, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Localização Geográfica da Área de Estudo



Fonte: do Autor (2019)

A BHRC apresenta área aproximada de 80km² e drena cerca de 7,3% do território joinvillense, sendo que, seu rio principal tem extensão aproximada de 14,9 km. Cabe ainda ressaltar que, tal bacia recebe a contribuição de 11 sub-bacias conforme apresentado por Conorath (2012).

Müller (2011) concorda com Conorath (2012) e ainda complementa que esta bacia tem alta densidade de drenagem e fisiograficamente apresenta forma larga e curta, orientando-se na direção Oeste-Leste podendo ser classificada como exógena. A nascente desta bacia encontra-se na porção noroeste da mesma, e o exultório se faz na Lagoa do Saguacú, à qual é considerado um ambiente estuarino.

A BHRP apresenta área de drenagem inferior ao da BHRC, sendo 26,55 km² e é um dos principais afluentes da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte (Joinville-SC). Seu rio principal apresenta extensão aproximada de 11,4km e quedas de água consideradas abruptas, uma vez que o desnível entre a nascente e a jusante exhibe cerca de 917 metros de altitude (OLIVEIRA et al., 2017).

Segundo Gonçalves (1993), o município de Joinville e suas adjacências apresentam embasamento geológico cristalino correspondente à Serra do Mar (Escudo Catarinense) formados na era do pré-cambriano combinados com sedimentos recentes, sendo que, a porção urbanizada de Joinville/SC é composta por uma predominância litológica de gnaiss granulítico, gnaiss bandado e depósitos sedimentares recentes.

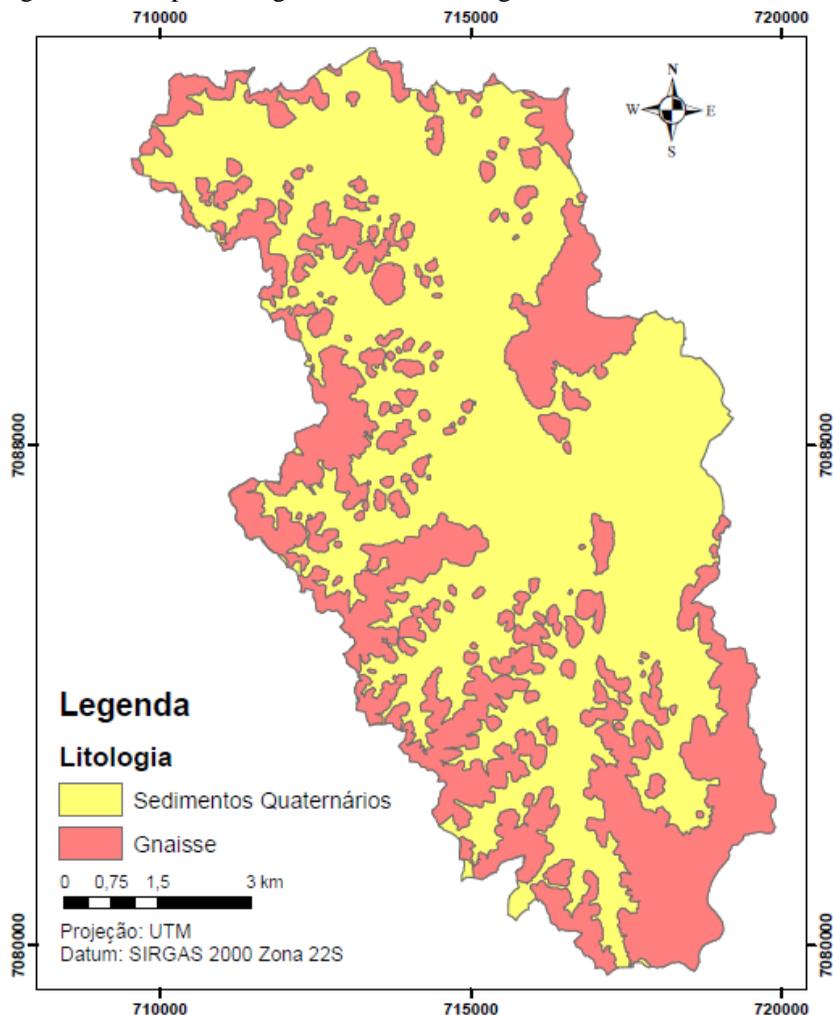
Sobre os depósitos sedimentares recentes é possível afirmar que os mesmos ocorrem principalmente nas áreas urbanizadas de Joinville, representados por areias e argilas, recorrentes do período do quaternário (BAGGIO, 1997), já nas porções mais altas do relevo que envolve a BHRC, o embasamento geológico encontra-se num avançado estágio de intemperismo, gerando um solo com características argilosas, impermeáveis e vulnerável à processos erosivos expostos à ação pluviométrica (CONORATH, 2012).

Os gnaisses encontrados em Joinville/SC estão ligados ao Complexo Luís Alves (MELLO; SIMM; VIEIRA, 2017), sendo que, tal complexo “trata-se de uma assembleia petrotectônica de rochas metamórficas principalmente da fácies granulito de composição básica intermediária” (SANTA CATARINA, 1986).

A base cartográfica de litologia da área de estudo (disponível na plataforma SIMGeo com escala de 1:5.000) realizada pela Prefeitura Municipal de Joinville no ano de 2012, aponta que a BHRC apresenta 63,82% da sua área composta por sedimentos do quaternário e 36,18%

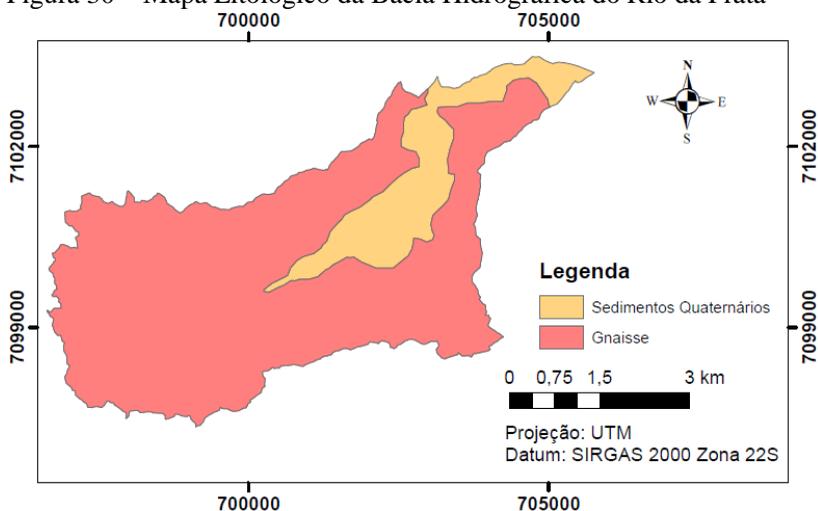
composta por gnaiss (Figura 29); já para BHRP esta situação se inverte e a composição litológica de gnaiss é mais representativo, onde 84,26% da área desta bacia é composta pela citada litologia e apenas 15,74% da sua área é composta por sedimentos do quaternário (Figura 30).

Figura 29 – Mapa Litológico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira



Fonte: do autor (2019)

Figura 30 – Mapa Litológico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata



Fonte: do autor (2019)

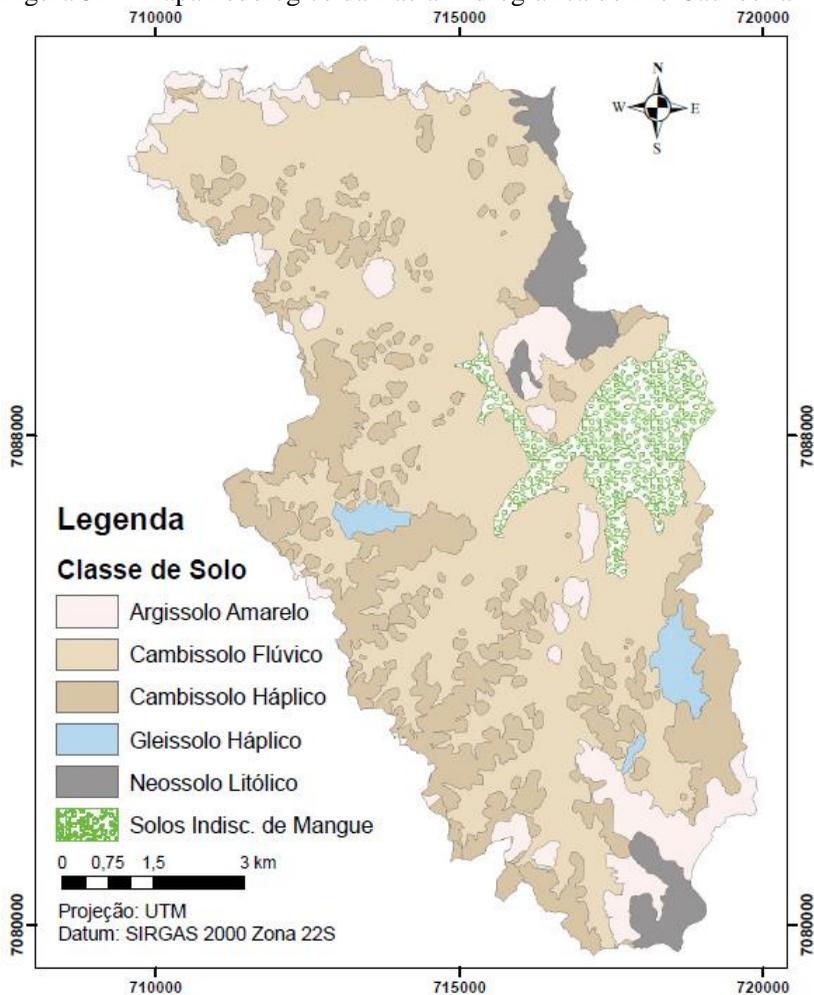
Em relação a pedologia da BHRC, é possível observar (através da Tabela 9) que as principais classes de solo ocorrentes na mesma, são o Argissolo Amarelo, Cambissolo Flúvico, Cambissolo Háplico, Gleissolo Háplico, Neossolo Litólico e Solos Indiscriminados de Mangue.

Tabela 9 - Distribuição das Classes Pedológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

| Classe de Solo | Área (km ²) | Área (%) |
|---------------------------------|-------------------------|------------|
| Argissolo Amarelo | 7,324 | 8,85 |
| Cambissolo Flúvico | 44,152 | 53,32 |
| Cambissolo Háplico | 20,274 | 24,49 |
| Gleissolo Háplico | 1,506 | 1,82 |
| Neossolo Litólico | 3,545 | 4,28 |
| Solos Indiscriminados de Mangue | 5,997 | 7,24 |
| Total | 82,798 | 100 |

O mapa pedológico com a distribuição espacial das classes pedológicas da BHRC está exposto na Figura 31 e foi construído com uso da base cartográfica realizada pela Prefeitura Municipal de Joinville no ano de 2012, com escala de 1:5.000.

Figura 31 – Mapa Pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira



Fonte: do autor (2019)

Segundo Müller (2012) dentre os solos presentes na BHRC, o Cambissolo Flúvico e o Cambissolo Háptico, são os que predominam a área da mesma, no entanto, estes ocorrem principalmente nas áreas urbanizadas e com menor altitude, já os Argissolos Amarelos e Neossolo Litólicos ocorrem principalmente nas áreas de relevo mais acentuados.

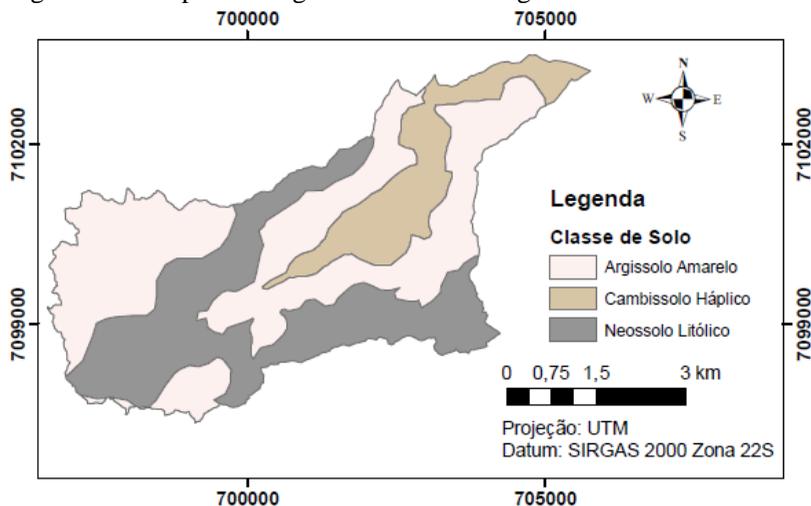
A pedologia contida Bacia Hidrográfica do Rio da Prata apresenta menos classes de solo que a apresentada pela Bacia Hidrográfica do Rio Cahoeira, no entanto, pode-se observar através da Tabela 10, que as classes de solo são similares para estas bacias,

Tabela 10 - Distribuição das Classes Pedológicas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata

| Classe de Solo | Área (km ²) | Área % |
|--------------------|-------------------------|----------------|
| Argissolo Amarelo | 13,11 | 49,38% |
| Cambissolo Háplico | 4,18 | 15,74% |
| Neossolo Litólico | 9,26 | 34,88% |
| Total | 26,55 | 100,00% |

O mapa pedológico com a distribuição espacial das classes pedológicas da BHRP está exposto na Figura 32 e foi construído com uso da base cartográfica realizada pela Prefeitura Municipal de Joinville no ano de 2012, com escala de 1:5.000.

Figura 32 – Mapa Pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata



Fonte: do autor (2019)

Na BHRP é possível observar que a maior parte da sua área é composta por Argissolo Amarelo que representa quase 50% e situa-se

nas áreas em que o relevo varia entre fortemente ondulado à montanhoso. Diferente do que ocorre com os Cambissolos Háplicos que cobrem cerca de 16% da área e são encontrados próximos a jusante desta bacia em que o relevo varia entre suavemente ondulado à plano.

As áreas com maior declividade (Terrenos Escarpados) são os locais em que se encontram os Neossolos Litólicos, que por sua vez, ocupam aproximadamente 35% da área total da BHRP.

Ao correlacionar as classes do solo da Cidade de Joinville com eventos de deslizamentos, Richter (2011) e Demartino (2016) apud Mello; Simm; Vieira (2017) afirmam que as zonas de ocorrência de Neossolo Litólico e Argissolo Amarelo são as que apresentam maior suscetibilidade a deslizamentos, principalmente quando associados à declividades superiores a 20% e com manejo inadequado do solo como os cortes em taludes.

Sobre as características de cada um dos solos existentes na BHRC e BHRP, Uberti (2011) fez um estudo detalhado destacando as características de cada um, onde:

- O Argissolo Amarelo: apresenta acentuadas profundidades (indiferente da inclinação do relevo), sendo que, o mesmo ocorre mais frequentemente nas áreas de relevo fortemente ondulado (20 a 45% de inclinação) e com texturas argilosas/muito argilosas com situação favorável para ótima retenção de umidade;
- O Cambissolo Háplico: é a classe de solo que mais ocorre no município de Joinville, sendo estes, solos jovens e com desenvolvimento pedogenético em processo de evolução. Este solo é profundo e apresenta textura argilosa e tem ótima capacidade de armazenamento de umidade combinado a boa drenagem.
- O Cambissolo Flúvico: são solos que estão diretamente relacionados com materiais de origem aluvionar e apresenta a sequência completa dos horizontes A, B e C, onde o horizonte A é considerado espesso e o horizonte B muito espesso. As classes texturais franco argilosiltosa, argilosiltosa e francos arenosas combinadas com o relevo plano favorecem a condição de drenagem e baixa erosão do mesmo;
- O Gleissolo Háplico: apresentam sequência de horizontes incompletas, onde, o horizonte A é do tipo moderado, cor bruno acinzentado escuro com transição clara para o horizonte Cg.

Este solo apresenta textura argilosa (com consistência plástica e pegajosa) e tem má condição de drenagem, onde, o lençol freático encontra-se sempre muito próximo da superfície, uma vez que, o mesmo ocupa regiões de relevo plano (0 à 3% de inclinação);

- O Neossolo Litólico: são solos que apresentam baixo desenvolvimento pendogenético, influenciados pelo relevo acidentado e/ou diaclasamento horizontal da rocha, onde, o mesmo apresenta uma sequência incompleta dos horizontes, sendo que, o horizonte A apresenta pequena espessura, textura argilosa, e a transição para o horizonte C ocorre de forma abrupta. Estes solos somente são encontrados nas áreas de relevo montanhoso ou escarpado do relevo de Joinville;
- Os Solos Indiscriminados de Mangue: são os ambientes de transição entre o ambiente terrestre e o marinho, ocupando relevo plano e em condições de péssima drenagem. Este solo ocupa a região de exultório da BHRC, onde há o encontro entre a Lagoa do Saguacú que faz parte do estuário da Baía da Babitonga e a BHRC.

O relevo da BHRC apresenta-se predominantemente plano e com baixas altitudes, sendo que, os pontos mais altos do relevo encontram-se no Morro do Boa Vista e do Iriirú, ambos localizados na porção nordeste desta bacia e compostos por rochas metamórficas (Gnaíse) e pedologia predominantemente de Neossolo Litólico. Nestes pontos o relevo pode variar entre Forte Ondulado à Montanhoso, sendo estas, as regiões que causam maior preocupação quando se trata de deslizamentos rasos.

A Tabela 11 apresenta as devidas quantificações do relevo da BHRC, usando o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos como referência.

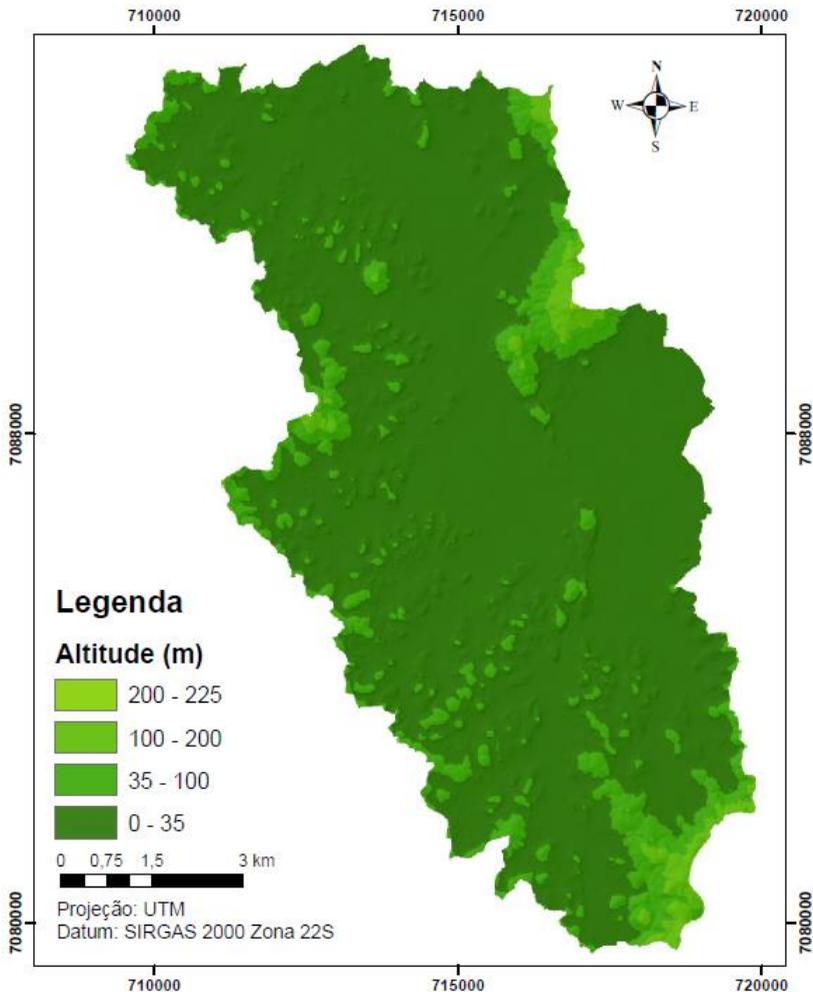
Tabela 11 - Distribuição das Classes de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

| Relevo | Área (km ²) | % |
|---------------------|-------------------------|-------|
| Montanhoso | 3,545 | 4,28 |
| Fortemente Ondulado | 7,063 | 8,53 |
| Ondulado | 19,255 | 23,28 |
| Suavemente Ondulado | 1,248 | 1,52 |
| Plano | 51,687 | 62,40 |
| Total | 82,798 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

As características físicas do relevo da BHRC, encontram-se espacializadas na Figura 33, através do mapa hipsométrico.

Figura 33 – Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira



Fonte: do autor (2019)

Na BHRP o relevo predominantemente varia entre forte ondulado à escarpado, e as áreas com relevo que variam entre plano e ondulado atingem cerca de 26,5% da área desta bacia (Tabela12).

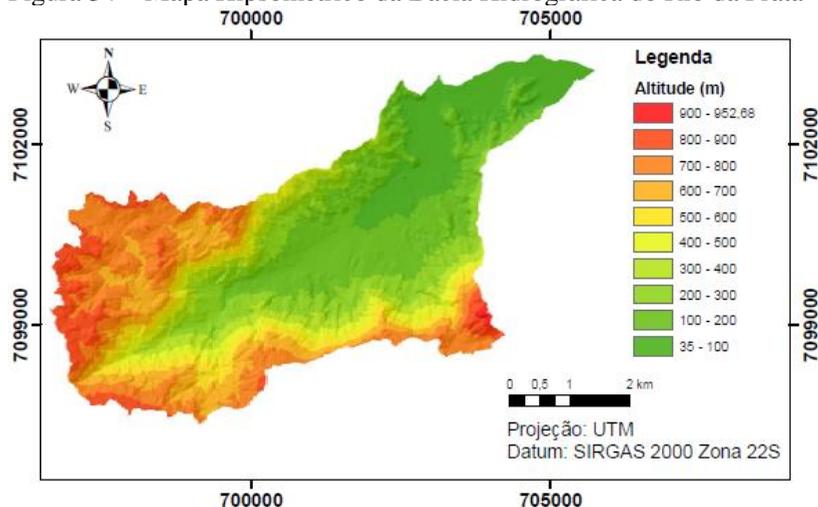
Tabela 12 - Distribuição das Classes de Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata

| Relevo | Área (km ²) | Área (%) |
|---------------------|-------------------------|----------------|
| Escarpado | 5,13 | 19,32 |
| Montanhoso | 7,7 | 29,00 |
| Forte Ondulado | 6,69 | 25,20 |
| Ondulado | 3,36 | 12,66 |
| Suavemente Ondulado | 1,73 | 6,52 |
| Plano | 1,94 | 7,31 |
| Total | 26,55 | 100,00% |

Fonte: do autor (2019)

Em relação a altimetria, a BHRP exibe cotas que variam ente 35 e 952,68 metros. O culme desta bacia fica localizado na porção sudeste e a porção mais baixa do terreno, encontra-se nas imediações da jusante onde a altitude varia entre 35 e 100 metros. As escarpas contêm elevações que variam entre 300 e 800 metros, podendo em alguns pontos específicos ultrapassar esta margem de variação (Figura 34).

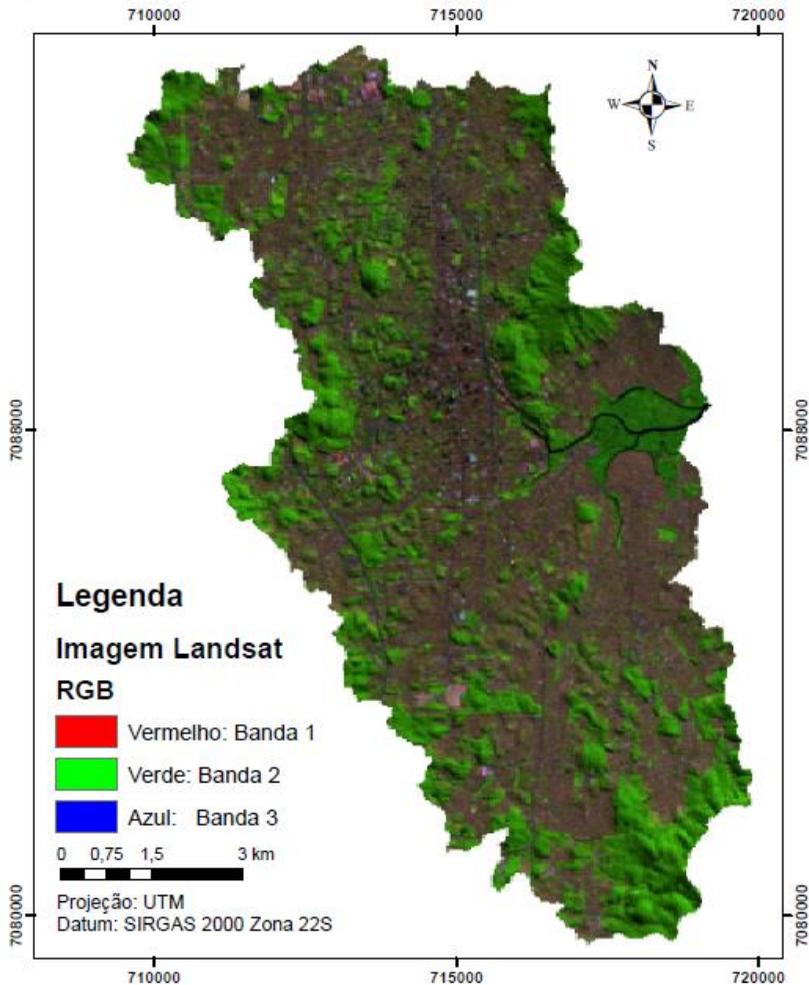
Figura 34 – Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata



Fonte: do autor (2019)

Quanto a ocupação humana, a BHRC apresenta elevado índice de urbanização distribuído ao longo de toda a sua área (Figura 35). Segundo Müller (2011) o uso do solo predominante nesta bacia é o residencial e comercial.

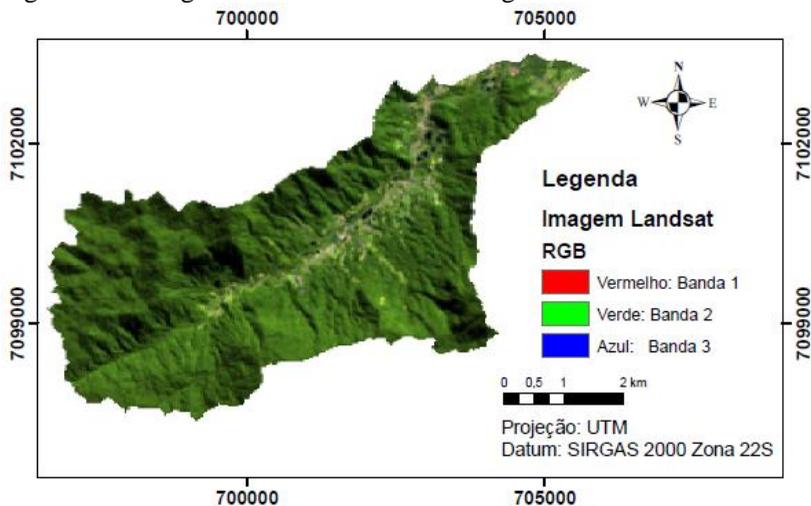
Figura 35 – Imagem Landsat da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira



Fonte: SimGeo (2019)

Já na BHRP a ocupação é caracterizada com rural e ocorre nas áreas mais baixas e planas do relevo, com destaque para as regiões próximas da margem do Rio da Prata e jusante do mesmo (Figura 36).

Figura 36 – Imagem Landsat da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata



Fonte: SimGeo (2019)

Assim em resumo se pode observar as características da BHRC e BHRP, através do Quadro 11 que expõe uma comparação entre as duas áreas de estudo abordadas por este trabalho.

Por fim, verificou-se que a pedologia e litologia da BHRC e a da BHRP são consideradas similares, no entanto, estas bacias apresentam características diferentes quanto a caracterização do relevo, hidrografia e ocupação humana.

Quadro 11 - Resumo de Caracterização da Área de Estudo

| Litologia | BHRC | | BHRP | |
|---|-------------------------|-------|-------------------------|--------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Gnaisse | 52,84 | 63,82 | 4,18 | 15,74 |
| Sedimentos do Quaternário | 29,96 | 36,18 | 22,37 | 84,26 |
| Total | 82,798 | 100 | 26,55 | 100 |
| Pedologia | BHRC | | BHRP | |
| | Área | % | Área | % |
| Argissolo Amarelo | 7,32 | 8,85 | 13,11 | 49,38 |
| Cambissolo Flúvico | 44,15 | 53,32 | X | X |
| Cambissolo Háptico | 20,27 | 24,49 | 4,18 | 15,74 |
| Gleissolo Háptico | 1,51 | 1,82 | X | X |
| Neossolo Litólico | 3,55 | 4,28 | 9,26 | 34,88 |
| Solo Indiscriminado de Mangue | 6,00 | 7,24 | X | X |
| Total | 82,798 | 100 | 26,55 | 100,00 |
| Classes de Relevô | BHRC | | BHRP | |
| | Área | % | Área | % |
| Escarpado | 0 | 0,00 | 5,13 | 19,32 |
| Montanhoso | 3,545 | 4,28 | 7,7 | 29,00 |
| Forte Ondulado | 7,063 | 8,53 | 6,69 | 25,20 |
| Ondulado | 19,255 | 23,26 | 3,36 | 12,66 |
| Suavemente Ondulado | 1,248 | 1,51 | 1,73 | 6,52 |
| Plano | 51,687 | 62,43 | 1,94 | 7,31 |
| Total | 82,798 | 100 | 26,55 | 100 |
| Edificações | BHRC | | BHRP | |
| Número de Edificações | 113918 | | 367 | |
| Número de Edificações por Área (km ²) | 1375,85 | | 13,82 | |

Fonte: do Autor (2019)

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados referentes ao mapeamento geotécnico, os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização e resistência de cada uma das amostras de solo, o mapa de deslizamentos translacionais através do modelo SHALSTAB, o mapa de deslizamentos translacionais, e uma análise de quais áreas que contém elevados índices de suscetibilidade a deslizamento translacional e rotacional, além de apontar áreas em que a ocupação humana deve ser evitada.

5.1 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

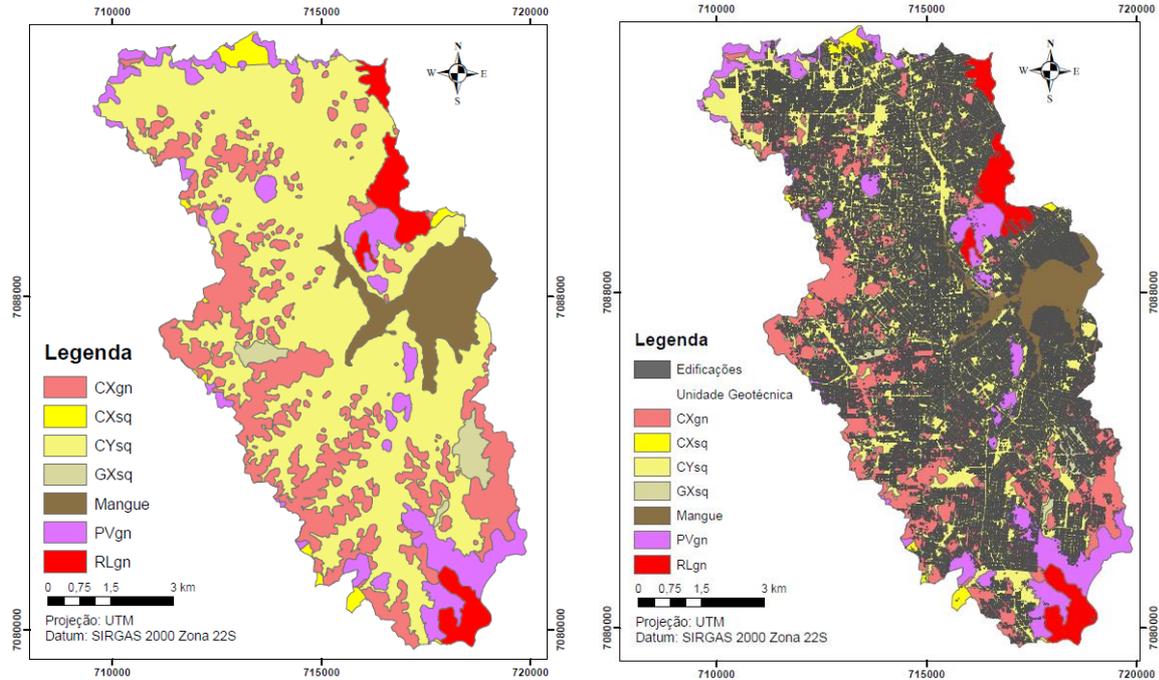
A abordagem do mapeamento geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata serão apresentadas separadamente ao longo deste capítulo.

Cabe adiantar que devido a escala das bases cartográficas de litologia, pedologia e topografia serem consideradas com alto nível de detalhamento e as tradagens e caracterização tátil visual não apresentarem divergência com as bases, não foi necessário realizar ajustes no mapa geotécnico.

5.1.1 Mapeamento Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

A composição do mapa geotécnico (Figura 37), apontou a existência de 7 unidades geotécnicas para Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira.

Figura 37 – Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira sem e com Edificações



(a) Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira sem Edificações

Fonte: do autor (2019)

(b) Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira com Edificações

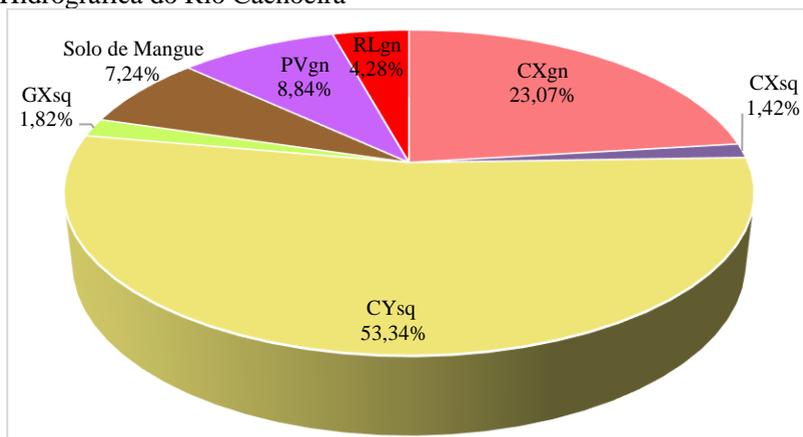
Estas unidades estão quantificadas na Tabela 13 e Figura 38 e apontam quais unidades são as mais comuns na área desta bacia.

Tabela 13 - Distribuição das Unidade Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira

| Classe de Solo | Litologia | Unidade Geotécnica | Área (km ²) | % |
|------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------|
| Cambissolo Háplico | Gnaisse | CXgn | 19,11 | 23,06 |
| Cambissolo Háplico | Sedimentos Quaternários | CXsq | 1,18 | 1,42 |
| Cambissolo Flúvico | Sedimentos Quaternários | CYsq | 44,12 | 53,34 |
| Gleissolo Háplico | Sedimentos Quaternários | GXsq | 1,51 | 1,82 |
| Solos Indis. de Mangue | | Mangue | 6,00 | 7,24 |
| Argissolo Amarelo | Gnaisse | PVgn | 7,32 | 8,84 |
| Neossolo Litólico | Gnaisse | RLgn | 3,55 | 4,28 |
| | | Total | 82,79 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Figura 38 – Distribuição das Unidades Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira



Fonte: do autor (2019)

Dentre as unidades contidas na BHRC, a unidade que mais ocorre é o Cambissolo Flúvico com substrato de Sedimentos do Quaternário (CYsq), ocupando aproximadamente 53% de cobertura da bacia, no

entanto, esta unidade tem como característica localizar-se numa área de relevo predominantemente plano, onde a declividade encontrada nesta unidade geralmente é de 3%. Outro fator que pode ser destacado sobre esta unidade, é o fato de a mesma localizar-se na área urbanizada da Cidade de Joinville, sendo sobre esta unidade geotécnica que estão localizadas a maior parte das construções joinvillenses.

Os Cambissolos Háplico com substrato de Gnaisse cobrem aproximadamente $\frac{1}{4}$ da área da BHRC e estão localizados na porção oeste e sudeste do relevo da BHRC. O relevo varia entre ondulado e fortemente ondulado. Esta unidade geotécnica, apresenta elevada interferência antrópica, onde, em muitos casos a declividade do relevo é alterada.

Quanto aos Argissolos Amarelos com substrato de Gnaisse, é possível afirmar que esta unidade geotécnica cobre aproximadamente 9% da superfície da BHRC. O relevo onde encontra-se tal unidade varia entre ondulado a fortemente ondulado.

A unidade geotécnica que apresenta maior altitude na composição do relevo da BHRC é o Neossolo com substrato de Gnaisse. Tal unidade ocorre na porção Leste (Morro do Boa Vista), Nordeste (Morro do Finder) e Sul (Morros do Itinga). A declividade desta unidade varia entre fortemente ondulado à montanhoso. Esta é a unidade que apresenta menor interferência antrópica, uma vez que, desde a década de 70, as áreas que apresentam elevação superior a cota de 40 metros, são proibidas de serem ocupadas em razão da lei número 1410/75.

Os Cambissolos Háplicos com substrato de sedimentos do Quaternário localizam em regiões caracterizadas como coluvionares. Estas unidades também foram identificadas por França Junior (2002) que em seu trabalho descreveu as mesmas como Cambissolos com substrato de Depósitos de Encosta e, segundo o autor o material tem comportamento variável e dependente do seu nível de desenvolvimento. Nas unidades CXsq, são encontrados relevo predominantemente suave ondulado, características estas que também foram descritas por França Junior (2002). Quanto à ocupação humana, pode-se verificar que tal unidade apresenta forte influência, uma vez que a mesma apresenta baixa elevação (cotas inferiores à 50 m).

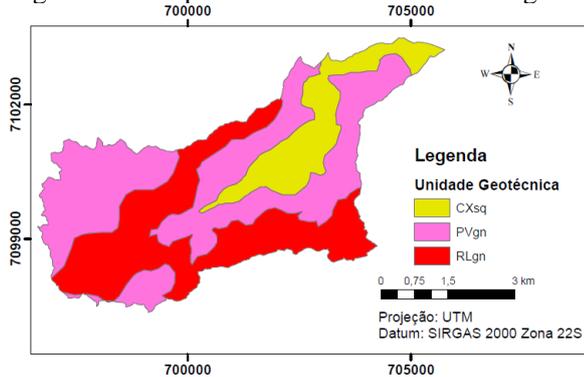
Dentre as 7 unidades geotécnicas destacadas no mapeamento, os solos indiscriminados de mangue e o Gleissolo Háplico com substrato de sedimentos do quaternário apresentam regiões totalmente planas, onde, em nenhum ponto a declividade ultrapassa a 3%. Outra característica comum destas unidades é a baixa elevação do relevo, que para os solos indiscriminados de mangue são muito próximas de zero e

para o Gleissolo Háplico com substrato de sedimentos do quaternário são inferiores a cota de 10 metros. Além disto, o mapeamento geotécnico apontou dificuldades para aquisição de amostras e realização dos ensaios de campo, uma vez que, a unidade Gleissolo Háplico com substrato de sedimentos do quaternário apresenta-se 100% urbanizada e os solos indiscriminados de mangue apresenta baixa resistência para a realização de ensaios (inviabilizando a realização do BST). Portanto, para estas unidades, foi-se descartada a investigação geotécnica do solo.

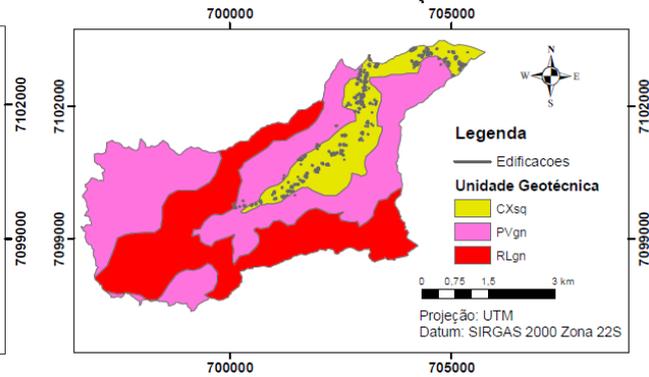
5.1.2 Mapeamento Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata

A composição do mapa geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata (Figura 39) apontou que nesta área ocorrem apenas 3 unidades geotécnicas.

Figura 39 – Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata sem e com Edificações



(a) Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata sem Edificações



(b) Mapa Geotécnico da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata com Edificações

Fonte: do autor (2019)

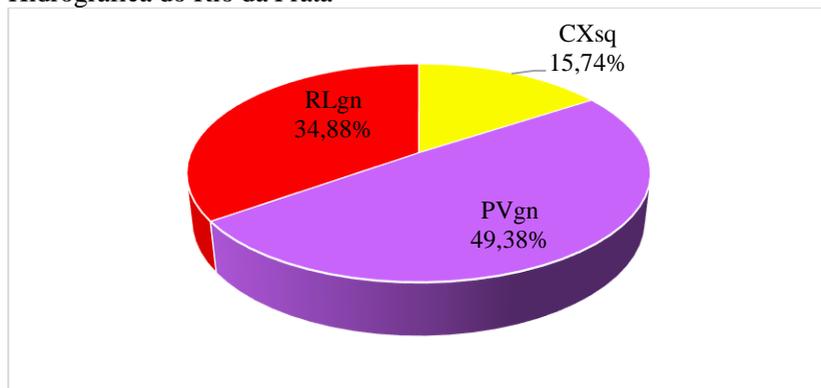
Dentre as unidades existentes nesta bacia, o Argissolo Amarelo com substrato de Gnaisse (PVgn) é a unidade geotécnica mais encontrada, tendo uma taxa de aproximadamente 50% de recobrir do terreno. As outras duas unidades de Neossolo Litólico com Substrato de Gnaisse e Cambissolo Háptico com substrato de Sedimentos do Quaternário representam respectivamente 34,88% e 15,74% de composição da área desta bacia. A quantificação destas unidades geotécnicas está apresentada em detalhes pela Tabela 14 e Figura 40.

Tabela 14 - Distribuição das Unidade Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata

| Classe de Solo | Litologia | Unidade Geotécnica | Área (km ²) | Área (%) |
|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|----------|
| Cambissolo Háptico | Sedimentos Quaternários | CXsq | 4,18 | 15,74% |
| Argissolo Amarelo | Gnaisse | PVgn | 13,11 | 49,38% |
| Neossolo Litólico | Gnaisse | RLgn | 9,26 | 34,88% |
| Total | | | 26,55 | 100,00% |

Fonte: do autor (2019)

Figura 40 – Distribuição das Unidades Geotécnicas da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata



Fonte: do autor (2019)

Os Argissolos com substrato de Gnaisse são encontrados nas áreas em que o relevo se caracteriza como fortemente ondulado e montanhoso. Esta unidade ocorre em dois pontos específicos do terreno, onde a altitude varia de 100 à 400 metros e de 600 à 900 metros. Na

região em que se desenvolvem as menores altitudes, encontram-se pequenas interferências humanas relacionadas a atividades agrícolas, enquanto que nas regiões de maior altitude não há registro de interferência humana.

As áreas em que o relevo da BHRP se comporta como escarpados, ocorre a Unidade Geotécnica de Neossolo Litólico com Substrato de Gnaisse. Esta unidade faz um “cordão” responsável por separar os Argissolos Amarelos com Substrato de Gnaisse. O Neossolo Litólico é encontrado é a unidade contida no culme desta bacia. As elevações do relevo para esta unidade variam entre 300 e 952,68 metros de altura e devido à forte inclinação não sofre interferência humana.

O Cambissolo Háptico com substrato de Sedimentos do Quaternário (CXsq) se desenvolve na região próxima à jusante da BHRP e as margens do Rio da Prata, onde a altitude não ultrapassa a cota de 175 metros. Esta unidade é a que apresenta maior interferência humana, uma vez que ocorre nas áreas em que o relevo varia entre plano e ondulado. As principais atividades humanas desenvolvidas nesta unidade também estão relacionadas as atividades agrícolas e se concentram ao longo da margem do Rio da Prata e na jusante do mesmo.

5.2 CARACTERIZAÇÃO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS

O mapeamento geotécnico definiu as áreas que apresentam comportamento geomecânicos similares, e a partir destas realizou-se os ensaios para a caracterização e resistência para cada uma destas unidades, conforme já registrado no capítulo 3 deste trabalho. O resumo dos resultados obtidos pelos ensaios de caracterização e resistência dos solos, podem ser observados na Tabela 15.

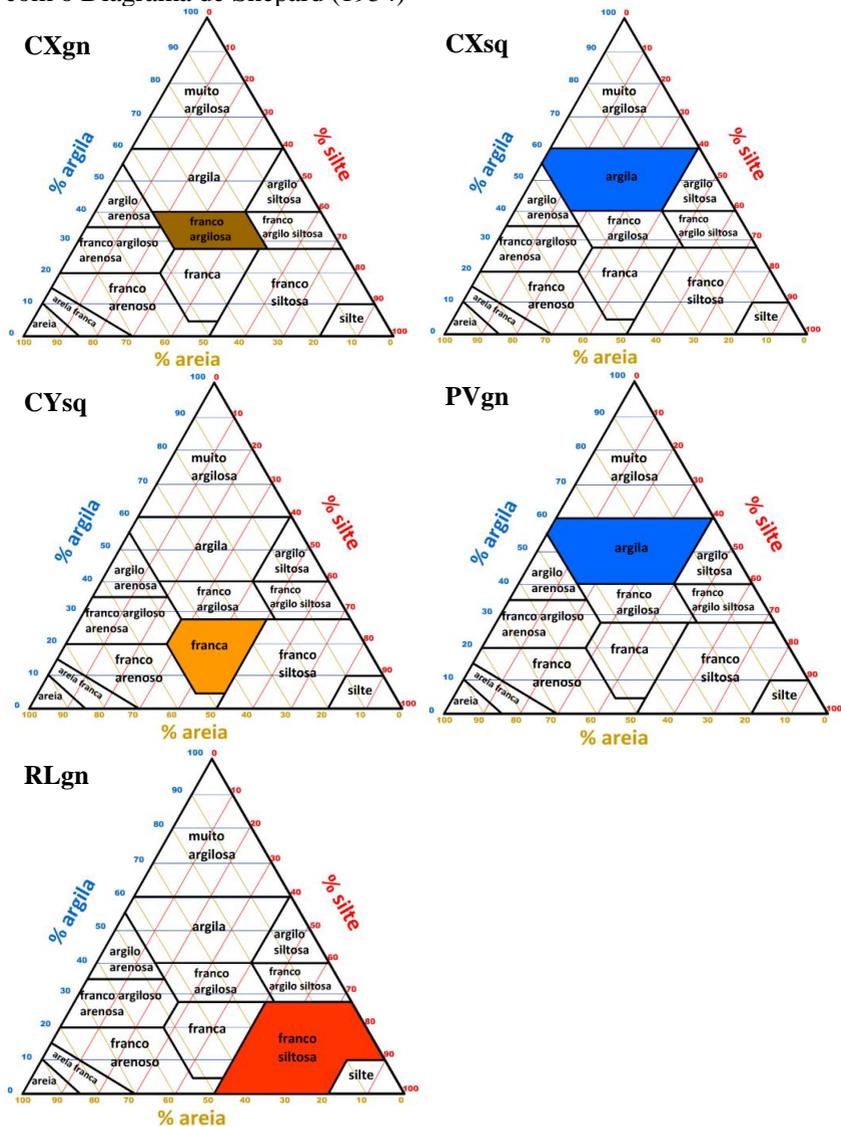
As classes texturais de cada unidade geotécnica foram definidas a partir diagrama triangular de Shepard (1954). Os resultados desta classificação apontaram que os solos estudados apresentaram granulometria fina, sendo que 2 unidades exibiram textura argilosa, 1 unidade exibiu textura franco argilosa, 1 com textura franca e 1 com textura franco siltosa (Figura 41)

Tabela 15 – Resultado dos Ensaio para as Unidade Geotécnicas

| Granulometria | | Solo | | | | |
|---|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| | | RLgn | PVgn | CYsq | CXsq | CXgn |
| Pedregulho | | 6% | 0% | 0% | 5% | 8% |
| Areia | | 18% | 21% | 38% | 27% | 40% |
| Silte | | 56% | 31% | 40% | 22% | 26% |
| Argila | | 20% | 48% | 22% | 46% | 26% |
| Soma Acumulada | | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| Coesão (kPa) | | 6,28 | 8,87 | 0,64 | 11,77 | 7,27 |
| Ângulo de Atrito (°) | | 26,88 | 29,78 | 32,37 | 28,4 | 29,97 |
| Peso Especifico Nat (kN/m ³) | | 15,25 | 14,85 | 17,26 | 14,61 | 17,83 |
| Peso Especifico Sat (kN/m ³) | | 17,4 | 17,15 | 18,49 | 16,87 | 18,85 |
| Densidade Real dos Grãos (g/cm ³) | | 2,854 | 2,908 | 2,723 | 2,755 | 2,877 |
| Umidade Natural | | 34% | 36% | 29% | 35% | 32% |
| Limite de Liquidez | | 57% | 57% | 40% | 59% | 54% |
| Limite de Plasticidade | | 47% | 40% | 28% | 38% | 30% |
| Índice de Plasticidade | | 10% | 17% | 12% | 21% | 24% |
| Classificação Método SUCS | | MH | MH | ML | MH | MH |
| | | Silte de Alta Plasticidade | Silte de Alta Plasticidade | Silte de Baixa Plasticidade | Silte de Alta Plasticidade | Silte de Alta Plasticidade |
| Classificação MCT | | NS' | LG' | NS' | LG' | LA'-LG' |
| | | Solo Siltoso não Laterítico | Solo Argiloso Laterítico | Solo Siltoso não Laterítico | Solo Argiloso Laterítico | Solo Arenoso /Argiloso Laterítico |
| Classificação AASHTO | IG | 11,5 | 14,78 | 6,08 | 14,48 | 10,04 |
| | Classificação | A-5 | A-7-6 | A-4 | A-7-5 | A-7-6 |
| | Descrição | Solo Siltoso | Solo Argiloso | Solo Siltoso | Solo Argiloso | Solo Argiloso |
| Classe Textural | | Franco Siltoso | Argila | Franco | Argiloso | Franco Argilosa |

Fonte: do autor (2019)

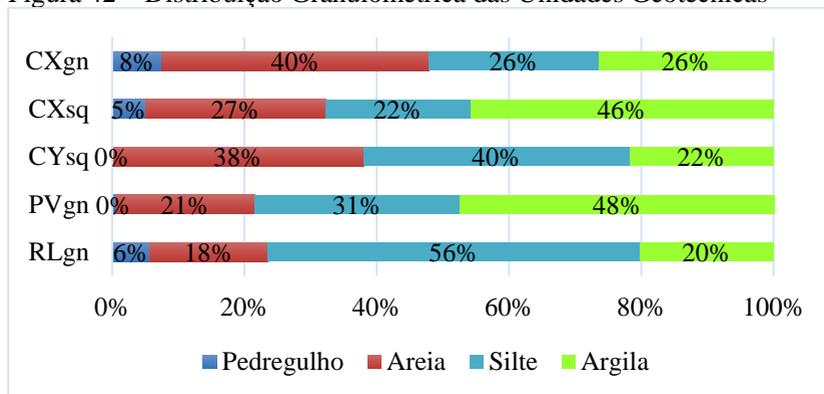
Figura 41 – Classificação Textural das Unidades Geotécnicas de acordo com o Diagrama de Shepard (1954)



Fonte: do autor (2019)

Ao se analisar a composição granulométrica dos solos, observou-se que todas as unidades geotécnicas exibiram um elevado índice de partículas com tamanho inferior à 0,06mm de diâmetro (Figura 42).

Figura 42 – Distribuição Granulométrica das Unidades Geotécnicas



Fonte: do autor (2019)

Dentre todas as unidades geotécnicas investigadas em laboratório, o Argissolo Amarelo com substrato de Gnaiss (PVgn) foi a que registrou maior composição de partículas finas com aproximadamente 79% de granulometria inferior a 0,06mm. Este solo exibiu 48% de partículas correspondentes a argilas, 31 e 21% de partículas classificadas como argilas e areias respectivamente. França Junior (2002) investigou uma unidade geotécnica por ele denominada como Podzólico Vermelho-Amarelo com substrato de Gnaiss (PVg) e na ocasião trabalhou com a antiga nomenclatura pedológica. No entanto segundo Klinger (2008) após a reformulação do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos ocorrida em 2006, os solos Podzólicos Vermelho Amarelo passaram a ser classificados como Argissolos Amarelo. Cabe ainda salientar que ao se plotar os pontos investigados por França Junior (2002) e cruzar estes dados com a coordenada geográfica do mapa geotécnico realizado por este trabalho, verifica-se que tal unidade está localizada sobre a área de PVgn. O autor destacou a característica de elevado índice de finos presentes neste solo apresentando como classificação SUCS argilas inorgânicas de alta plasticidade (CH), classificação MCT como sendo LG' e classificação AASHTO com IG 14,06% e grupo A-7-6. Dentre todas as classificações dos solos apresentadas por França Junior (2002), a única divergência apresentada foi na classificação SUCS, que neste trabalho (Tabela 15) foi classificado como silte de alta plasticidade.

O elevado índice de finos compondo os solos, foi uma característica comum entre as unidades geotécnicas, uma vez que todas as amostras de solo apresentaram elevado teor de finos. A unidade com menor índice de finos foi o Cambissolo com substrato de Gnaiss (CXgn) que conteve 52% de partículas com tamanho inferior a 0,06mm. Este solo também é o que contém maior índice de areias e pedregulhos e representaram 40% e 8% respectivamente. Nos ensaios realizados por França Junior (2002), esta unidade foi classificada pelo método MCT como sendo LG' e pelo método da AASHTO como condizente a solos argilosos do grupo A-7-5. Para esta unidade verifica-se que os resultados apresentados na Tabela 15 apresentaram similaridade aos encontrados pelo citado autor.

O Neossolo com substrato de Gnaiss (RLgn) foi a unidade que apresentou o maior índice de siltes com 56%. Esta unidade geotécnica apresenta baixo desenvolvimento pedogenético. Devido impossibilidade de avançar com o trado a profundidade de 100cm, a amostra de solo teve de ser coletada a profundidade de 70cm. No entanto, pouco material grosseiro (areias e pedregulhos) foi recolhido pela tradagem. Uberti (2011) investigou uma unidade de solo em Joinville que se enquadra na classificação geotécnica deste trabalho (RLgn) e destacou as características de granulometria fina apresentadas por esta unidade, além de destacar o baixo desenvolvimento dos solos, onde, há ausência do horizonte B e a matriz da rocha geralmente encontra-se próxima da superfície.

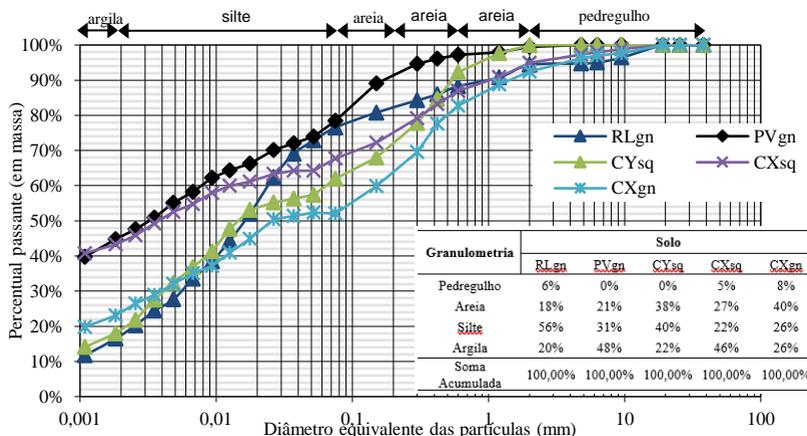
Os Cambissolos com substrato de Sedimentos do Quaternário (CXsq) apontaram uma composição granulométrica com elevado índice de finos, sendo estes divididos com 22% de siltes e 46% de argilas. Tal característica argilosa já havia sido destacada por França Junior (2002) em seu trabalho.

A unidade geotécnica com maior representatividade na área da BHRC é o Cambissolo Flúvico com substrato de Sedimentos do Quaternário (CYsq) que apresentou 62% de finos de solo distribuídos em 40% de siltes e 22% de argilas. As areias representam o restante dos 38% das partículas de solo. Este solo associa-se aos depósitos aluvionares e por ocupam as áreas mais planas do relevo joinvillense. Segundo Uberti (2011) é comum encontrar elevada diferenciação na granulometria entre os horizontes desta unidade e o mesmo apresenta coloração bruno amarelado (matriz 10YR), além de apresentar textura franco siltosa.

Quanto a desenvoltura das curvas granulométricas, as unidades RLgn, PVgn e CXsq se comportaram de maneira contínua e com

granulometria bem distribuída. No entanto, as unidades CYsq e CXgn apontaram comportamento descontínuo com abertura granulométrica na transição entre as areias e os siltes (Figura 43).

Figura 43 – Curva Granulométrica das Unidades Geotécnicas



Fonte: do autor (2019)

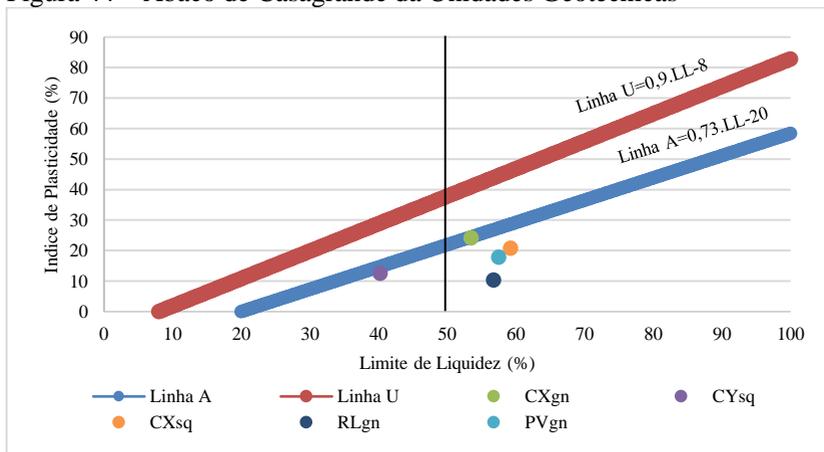
A densidade real dos grãos dos solos analisados, variaram entre 2,908 e 2,723 g/cm³, sendo o maior valor registrado para o PVgn e o menor valor para o CYsq. Os Cambissolos variaram entre 2,723 e 2,877g/cm³ e se mostraram acima do intervalo de 2,58 a 2,72 g/cm³ descrito por Higashi et al. (2012) como sendo o mais comum para os Cambissolos e os Podzólicos Vermelho-Amarelos do sul do Brasil. No entanto, Reginatto (2013) e Sbroglia (2015) já haviam achado valores de 2,76 e 2,87 g/cm³, respectivamente, para Cambissolos. Estes valores elevados, apontam a presença de hidróxido de ferro contido nas amostras.

Quanto aos limites de liquidez (LL), os solos residuais de gnaiss apresentaram valores próximos aos limites definidos por Pinto (2000) como típico (45 à 55%). No entanto, o solo RLgn divergiu dos valores típicos definidos por Pinto (2000) quanto ao índice de plasticidade (IP) (20 à 25%) e apresentou IP igual à 10%. Valores inferiores aos definidos pelo citado autor (solos residuais de Gnaiss) também foram registrados nos trabalhos de Reginatto (2013), onde o IP para Cambissolos com substrato de Gnaiss apresentaram 4%.

Os solos sedimentares apresentaram cenários opostos em relação à consistência. O CYsq exibiu comportamento de média plasticidade, sendo que o seu LL foi de 40% e o IP de 12%. Já o CXsq apresentou alta plasticidade com LL de 53% e IP de 24%. Cabe ressaltar que o CXsq, foi o que apresentou maior IP dentre todos os solos investigados por este trabalho, e que Reginatto (2013) já havia registrado valor elevado desse índice como 32%.

Contudo, com exceção dos CYsq, todas outras unidades geotécnicas apresentaram alta plasticidade e registram valores superiores a 53% de LL, com destaque para o CXsq que apresentou 59% de LL. Entretanto, cabe analisar que a unidade RLgn apresentou alto LL (57%) mas o IP ficou em 10%, sendo este menor índice de plasticidade registrado pelos solos ensaiados (Figura 44).

Figura 44 – Ábaco de Casagrande da Unidades Geotécnicas



Fonte: do autor (2019)

Entretanto segundo Godoi (2014) “diversos autores vêm constatando as limitações e inadequações da classificação SUCS para solos residuais e principalmente para solos tropicais”. Diante disto o presente trabalho classificou as unidades geotécnicas por outras metodologias como a da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e *Miniatura Compactada Tropical MCT*, onde os resultados podem ser observados na Tabela 15.

Durante a execução do ensaio MCT, observou-se que os solos RLgn e CYsq apresentaram características expansivas, uma vez que no processo de reabsorção de água as citadas amostras, expandiram além

do anel metálico e registraram um sobressalto vertical. Já os solos CXgn, CXsq e PVgn expandiram apenas até ocupar toda a área do anel metálico, ou seja, não apresentaram o sobressalto (Figura 45).

Figura 45 – Reabsorção de água pelas amostras de solo no ensaio MCT



(a) Solo CYsq

(b) Solo CXgn

Fonte: do autor (2019)

Os solos CXsq e PVgn foram os que exibiram os maiores valores de contração (1,99 e 1,8 mm) durante o processo de secagem das amostras em estufa. As unidades CXgn, RLgn e CYsq apresentaram contrações que não ultrapassaram 1 mm, sendo o RLgn com o menor índice (0,42 mm).

Em relação a penetração da agulha do ensaio de MCT, o RLgn e o CYsq foram os que registraram maior índice (5mm). Os solos CXgn e PVgn apresentaram a penetração com valores próximos a 1 mm e o CXsq foi o mais resistente a penetração, uma vez que o valor registrado para esta amostra foi 0,2mm.

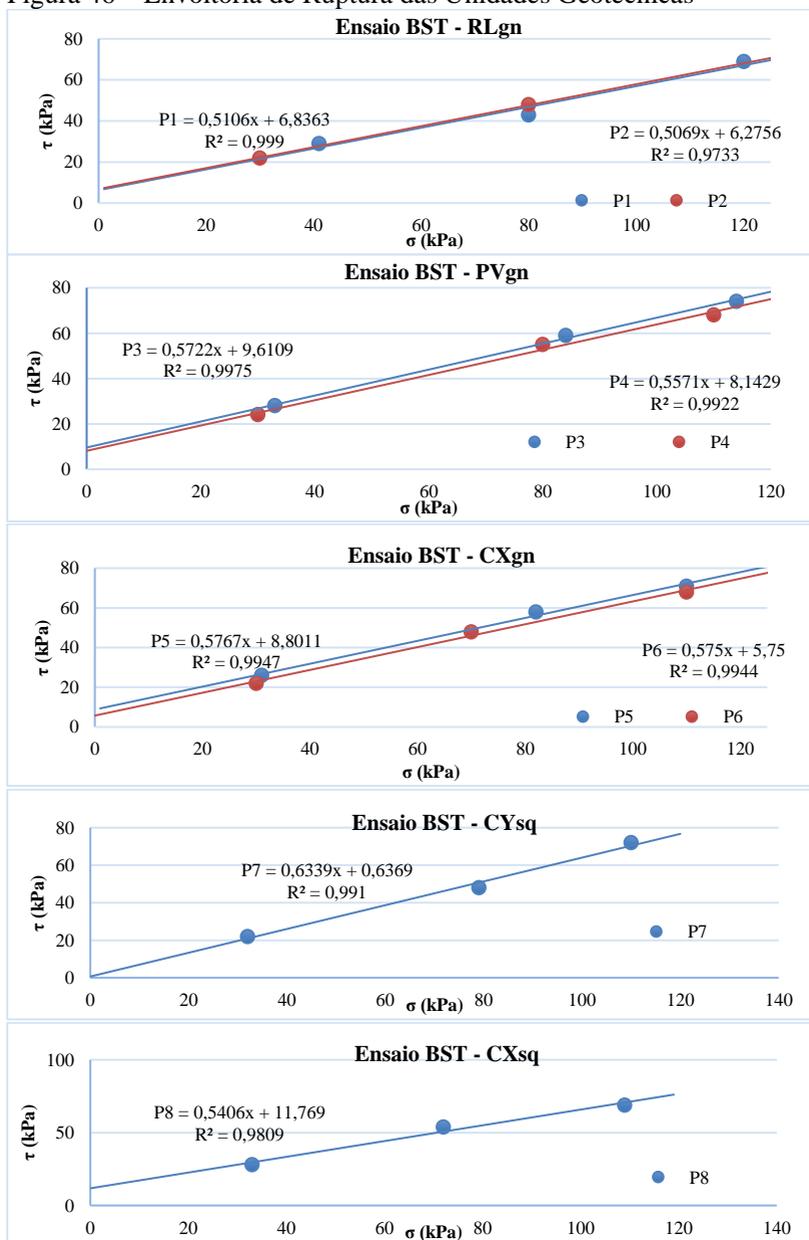
Quanto ao rompimento das esferas moldadas, cabe ressaltar que para as amostras de CXgn e CYsq, foram desestruturadas com a pressão do dedo polegar e o dedo indicador. Esta característica, relaciona-se com o elevado índice de areias e pedregulhos existentes nestas amostras. Diferente destas, para romper as esferas dos solos RLgn, PVgn e CXsq foi necessário aplicar uma pressão entre o dedo polegar e a mesa para que houvesse o rompimento das mesmas, sendo que, a granulometria destes materiais, apresentaram o maior índice de siltes e argilas e desta forma podem apresentar maior coesão a seco.

O comportamento das unidades geotécnicas, apontaram que a maior parte dos solos investigados tem comportamento coesivo, uma

vez que, com exceção do CYSq todas as outras unidades apresentaram valor de coesão para condição inundada (Figura 46).

Cabe destacar que todos os resultados apresentados na Figura 46, referem-se à condição inundada e que os solos residuais foram investigados em dois pontos distintos para cada unidade geotécnica da BHRC, conforme apresentado no capítulo 3 através da Figura 20 e Tabela 8.

Figura 46 – Envolvória de Ruptura das Unidades Geotécnicas



Fonte: do Autor (2019)

Dentre todas as unidades investigadas neste trabalho, a CXsq foi a que apresentou maior coesão (11,77kPa). Este resultado apresentou-se análogo aos obtidos por Reginatto (2013) que realizou um banco de dados da ocorrência de CXsq da Bacia do Rio do Cunha (Rio dos Cedros/SC) e os valores variaram entre 11 e 18 kPa. Cabe ainda salientar que o resultado destacado na Tabela 15 compuseram-se conexos com as classificações apresentadas neste trabalho, uma vez que foram classificados como plásticos e segundo a classificação MCT como LA'-LG', onde segundo Nogami e Villibor (1995) são solos constituintes de argilas e argilas arenosas, muito plásticas e muito coesivas. O ângulo de atrito desta unidade também esteve dentro do intervalo pesquisado por Reginatto (2013) que registrou variação entre 27 e 32°.

A unidade PVgn assim como CXsq, apresentou textura argilosa dentro da classificação de Shepard (1954) e classificação MCT como sendo LG'. Estas duas unidades foram as que apresentaram maiores limite de liquidez (LL) com 57 e 59%, respectivamente, e também foram as que apresentaram maior coesão dos solos demonstrando conexão entre o sistema de classificação dos solos e os ensaios de resistência ao cisalhamento realizado para ambas unidades.

Os valores de coesão obtidos por este trabalho para o PVgn foi de 8,14 e 9,61 kPa e se mostraram superiores aos valores obtidos por Demartino (2016) que pesquisou a Sub-bacia do Rio Comprido em Joinville/SC e registrou coesão de 1,38 kPa para condição inundada. No entanto, analisando os resultados de caracterização das unidades, ficou evidente que os valores encontrados no presente trabalho se demonstraram conexos com os mesmos.

A baixa coesão registrada no ensaio de cisalhamento do solo CYsq apresentou-se conexo com a estrutura deste material, uma vez que, a mesma apresenta baixa presença de argila e moderada presença de siltes e areias sendo classificada com textura franca no diagrama triangular de Shepard (1954), além de apresentar baixa plasticidade. Ao analisar-se a classificação MCT, observa-se que esta unidade se trata de um solo siltoso não laterítico que segundo Nogami e Villibor (1995) apresentam características pouco coesivas e pouco plásticas.

Em relação ao ângulo de atrito interno, com exceção do CYsq que apresentou 32°, as demais unidades mostraram valores abaixo de 30°, sendo o menor valor registrado para o RLgn com 26,88°.

O ângulo de atrito da unidade geotécnica RLgn (26,88°) exibiu resultado similar ao investigado por Demartino (2016) que em seu trabalho considerou que tal unidade apresentava 27,4° de ângulo de

atrito. Quanto ao valor referente a coesão, o RLgn apresentou divergência com os resultados obtidos pelo citado autor uma vez que as análises do presente trabalho apontaram coesão de 6,28 e 6,83 kPa e as análises de Demartino (2016) exibiram 0,1 kPa de coesão. O aparecimento de coesão nesta unidade, faz sentido a partir do momento em que se faz o cruzamento com a alta plasticidade definida no ábaco de Casagrande (Figura 44) entretanto quando analisado a classificação MCT, os dados obtidos pelo trabalho de Demartino (2016) passa a fazer maior sentido.

Para unidade CXgn os valores de coesão apresentaram-se análogos aos resultados obtidos pela pesquisa de Reginatto (2013) que identificou valores que variando entre 4,7 e 15,2 kPa para os CXgn's da Bacia do Rio do Cunha (Rio dos Cedros/SC). Esta unidade, também se demonstrou análoga aos estudos desenvolvidos por Sbroglia (2015) na Bacia do Rio Baú (Ilhota/SC), onde fora registrado uma coesão de 6,95 kPa. No entanto ficou razoavelmente distante do valor obtido por Demartino (2016) que pesquisou os solos da Sub-Bacia do Rio Comprido (Joinville/SC) e identificou coesão igual à 2,23kPa. Contudo, o resultado destacado por este trabalho através da Tabela 15 compuseram-se conexos com as classificações apresentadas neste trabalho, uma vez que foram classificados como plásticos e segundo a classificação MCT como LA'-LG', onde segundo Nogami e Villibor (1995) são solos constituintes de argilas e argilas arenosas, muito plásticas e muito coesivas.

No tocante ao ângulo de atrito, observou-se que os resultados obtidos para unidade CXgn apresenta conexo com os trabalhos de Reginato (2013) que identificou variação entre 29,1 e 34,2°, com o de Sbroglia (2015) que identificou 31,8°, e com o de Demartino (2016) que identificou 28,1°.

5.3 ANÁLISE DO HISTÓRICO DE DESLIZAMENTOS ATENDIDOS PELA DEFESA CIVIL DE JOINVILLE NA BHRC

O levantamento realizado junto à Defesa Civil de Joinville/SC, apontou que aproximadamente 85% dos eventos de deslizamentos registrados na BHRC, ocorreram sobre o Cambissolo com substrato de Gnaisse e Cambissolo Flúvico com substrato de Sedimentos do Quaternário, conforme destacado na Tabela 16.

Tabela 16 – Registro de Ocorrências de Deslizamento atendidos pela Defesa Civil de Joinville/SC, entre os anos de 2008 e 2018 na área da BHRC

| Pedologia | Litologia | Unidades Geotécnicas | Número de Ocorrências | % |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|-------|
| Cambissolo Háptico | Gnaisse | CXgn | 239 | 49,79 |
| Cambissolo Háptico | Sedimentos Quaternários | CXsq | 2 | 0,42 |
| Cambissolo Flúvico | Sedimentos Quaternários | CYsq | 170 | 35,41 |
| Gleissolo Háptico | Sedimentos Quaternários | GXsq | 0 | 0,00 |
| Solos Indisc. Mangue | | Mangue | 0 | 0,00 |
| Argissolo Amarelo | Gnaisse | PVgn | 48 | 10,00 |
| Neossolo Litólico | Gnaisse | RLgn | 21 | 4,38 |

Fonte: do autor (2019)

Cabe ressaltar que estas duas unidades também são as que mais ocupam área na BHRC e juntas cobrem mais de 76% da superfície da mesma, conforme já destacado na Tabela 13 e Figura 38 deste capítulo.

Ao se analisar o relevo concomitante ao número de ocorrências registradas em cada uma das unidades geotécnicas, é possível observar que a maior parte delas foram deflagradas nos locais onde relevo comporta-se como ondulado e fortemente ondulado Tabela 17.

Tabela 17 – Registro de Ocorrências de Deslizamento atendidos pela Defesa Civil de Joinville/SC entre os anos de 2008 e 2018 na área da BHRC distribuídos por Unidade Geotécnica e Unidade do Relevo

| Relevo | | Número de Ocorrências | | | | | |
|----------------|------------|-----------------------|------|------|------|------|-------|
| | | CXgn | CYsq | CXsq | PVgn | RLgn | Total |
| Escarpado | >75% | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Montanhoso | (45 à 75%) | 12 | 0 | 0 | 2 | 0 | 14 |
| Forte Ondulado | (20 à 45%) | 103 | 66 | 2 | 12 | 21 | 204 |
| Ondulado | (8 à 20%) | 92 | 60 | 0 | 25 | 0 | 177 |
| Suave Ondulado | (3 à 8%) | 32 | 23 | 0 | 9 | 0 | 64 |
| Plano | (0 - 3%) | 0 | 21 | 0 | 0 | 0 | 21 |
| Total | | 239 | 170 | 2 | 48 | 21 | 480 |

Fonte: do autor (2019)

Os dados expostos na Tabela 17 chamam a atenção para as ocorrências registradas nos locais em que o relevo é considerado suavemente ondulado (com 64 registros) e plano (com 21 registros). Tais ocorrências localizam-se nas áreas em que há elevada ocupação humana estando relacionadas a alterações de inclinação do relevo natural através de cortes que em alguns casos atingem ângulo próximo à 90° .

O exemplo que fora descrito no parágrafo anterior, pode ser observado através da Figura 47, onde no local encontra-se uma área de relevo considerado como suavemente ondulado (entre 3 e 8% de inclinação), no entanto há um corte em 90° com altura superior a 4 metros. O movimento em questão ocorreu na madrugada do dia 15/03/2019 após uma precipitação torrencial de 120 mm num intervalo de 4 horas.

Figura 47 – Ocorrência de Queda de Muro



(a) Fonte: Google Earth



(b) Fonte: do autor (2019)

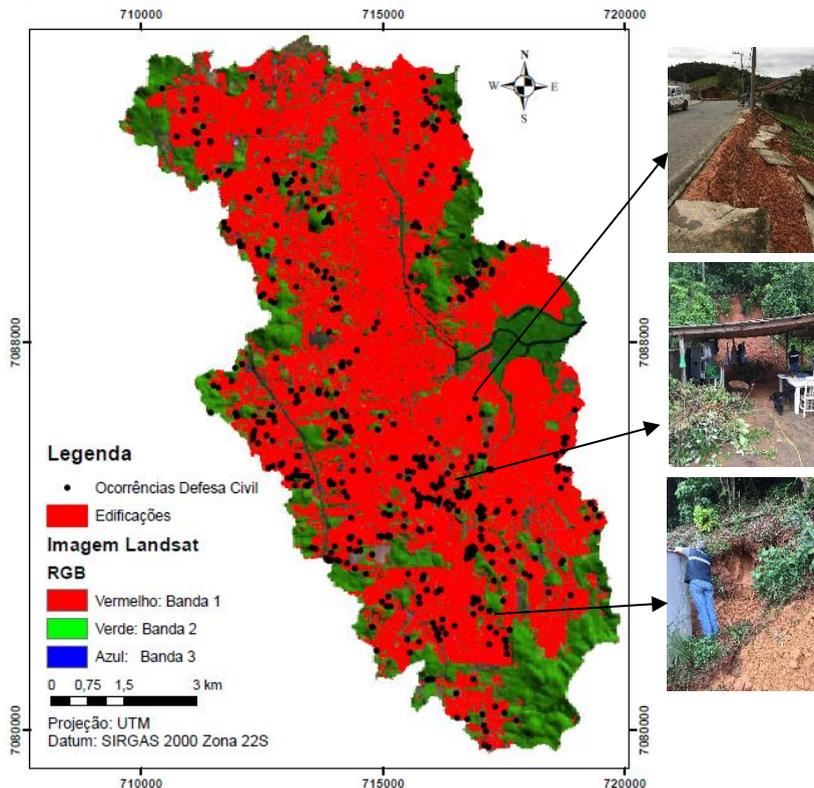
Ao se investigar os dados fornecidos pela Defesa Civil de Joinville, os mesmos apontaram que todas as ocorrências registradas por este órgão, estão relacionadas com movimentos induzidos pela ação antrópica. Tal fato justifica, o baixo índice de ocorrências registradas nas áreas em que o relevo se comporta como escarpado e montanhoso, uma vez que tais feições são encontradas apenas em áreas com cota superior à altitude de 40 metros e estas áreas tem ocupação espacial restringida pela lei 1410/75, que proíbe a urbanização de terrenos com altitude superior à 40 metros.

Entretanto, mesmo com a positivação de tal lei, algumas áreas residenciais encontram-se acima de tal cota e confrontam a lei de ordenamento territorial do município, e o mais relevante se expõem a

riscos promovendo cortes e terraceamento no relevo sem o devido cuidado com a geotecnia dos solos.

Os locais de atendimento das ocorrências na BHRC podem ser observados na Figura 48.

Figura 48 – Ocorrências Atendidas pela Defesa Civil



Fonte: do autor (2019)

Quando se analisa o número de edificações por unidade geotécnica observa-se que mais de 86% das edificações localizadas na área da BHRC, ocupam as unidades de CXgn e CYsq (Tabela 18).

Tabela 18 – Número de Edificações por Unidade Geotécnica

| Solo | Nº Edificações | % |
|---------------|----------------|--------|
| CXsq | 705 | 0,62 |
| CYsq | 76382 | 67,05 |
| CXgn | 21656 | 19,01 |
| PVgn | 3128 | 2,75 |
| RLgn | 766 | 0,67 |
| GXsq e Mangue | 11281 | 9,90 |
| Total | 113918 | 100,00 |

Fonte: do autor (2019)

Estes índices contribuem para os elevados atendimentos de ocorrência nas citadas unidades (CXgn e CYsq). Estas unidades também são as mais representativas quando se observa a área de ocupação da BHRC, entretanto o CXgn apresenta maior presença nas áreas que o relevo é mais inclinado e por isso os registros de instabilidade se mostraram mais presentes nesta unidade (Tabela 19).

Tabela 19 – Relevo por Unidade Geotécnica

| Relevo | CXgn | CXsq | CYsq | PVgn | RLgn |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Área (km ²) |
| Escarpado | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 |
| Montanhoso | 0,90 | 0,31 | 0,00 | 0,49 | 0,46 |
| Forte Ondulado | 6,78 | 0,20 | 0,00 | 2,87 | 1,59 |
| Ondulado | 6,82 | 0,42 | 8,46 | 2,47 | 1,44 |
| Suave Ondulado | 4,58 | 0,24 | 9,84 | 0,91 | 0,00 |
| Plano | 0,00 | 0,42 | 25,90 | 0,56 | 0,00 |
| Total | 19,08 | 1,58 | 44,19 | 7,30 | 3,62 |

Fonte: do autor (2019)

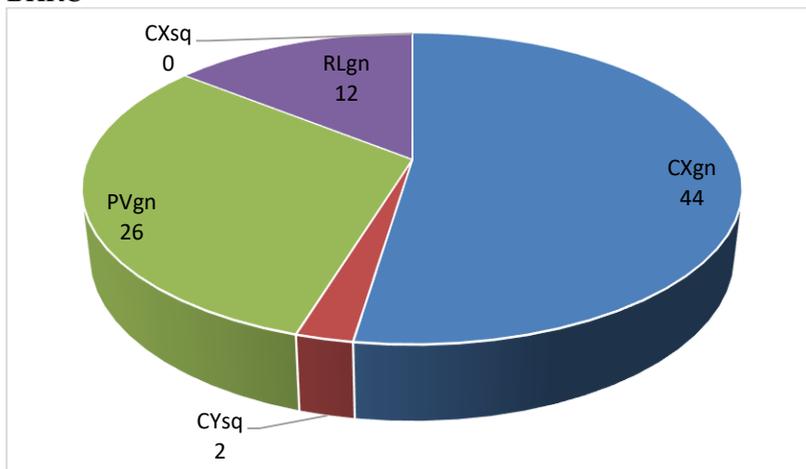
Por fim, cabe ressaltar que a baixa representatividade das ocorrências registradas pela defesa civil nas outras unidades geotécnicas (RLgn, PVgn e CXsq), não representa o grau de estabilidade das mesmas, uma vez que a base de dados deste órgão não considera os deslizamentos que ocorrem na encosta natural sem causar ameaça a uma determinada propriedade (Pública ou Privada). Além do mais, tais unidades localizam-se em áreas de possível expansão urbana, o que causa preocupação já que as mesmas ocupam inclinações mais elevadas do relevo.

5.4 MAPEAMENTO DAS CICATRIZES DA BHRC E BHRP

Além dos dados fornecidos pela Defesa Civil de Joinville, foi realizado o mapeamento de cicatrizes existentes na área da BHRC, com a finalidade de se identificar eventos de deslizamentos que não tenham sido atendidos pelo citado órgão.

Nestas análises foram identificadas 84 cicatrizes dentro da área da BHRC que estão relacionadas com eventos de deslizamentos. Dentre as unidades geotécnicas, o CXgn e o PVgn foram as unidades que mais registraram ocorrências de deslizamentos (Figura 49). Tal fato está relacionado com a elevada presença destes solos nas áreas em que o relevo se comporta como Montanhoso e Forte Ondulado (Tabela 20).

Figura 49 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade Geotécnica da BHRC



Fonte: do autor (2019)

A unidade CYsq demonstrou-se menos ativa quanto a identificação das cicatrizes, uma vez que nesta metodologia, foram identificados apenas 2 casos e todos estiveram localizados nos pontos em que o relevo apresenta-se como ondulado e sofreu alteração de inclinação provocado pela ação antrópica (Tabela 20).

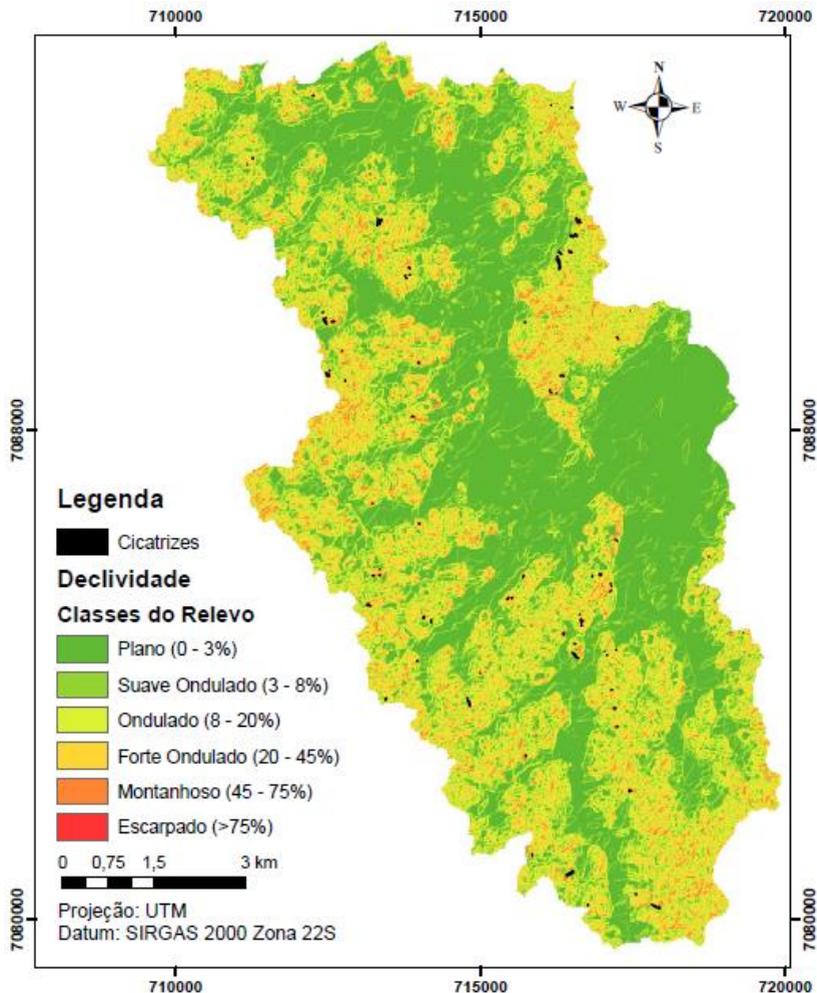
Tabela 20 – Cicatrizes Mapeadas na BHRC de acordo com Relevo e Unidade Geotécnica

| Relevo | Solo | | | | | Total |
|----------------|------|------|------|------|------|-------|
| | CXgn | CYsq | PVgn | RLgn | CXsq | |
| Escarpado | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Montanhoso | 21 | 0 | 8 | 1 | 0 | 30 |
| Forte Ondulado | 23 | 0 | 15 | 11 | 0 | 49 |
| Ondulado | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 5 |
| Suave Ondulado | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Plano | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 44 | 2 | 26 | 12 | 0 | 84 |

Fonte: do autor (2019)

Através da Tabela 20 é possível interpretar que a maior parte das cicatrizes mapeadas por este trabalho, foram localizadas nos pontos em que o relevo se comporta como sendo Montanhoso (de 45 à 75% de inclinação) e Forte Ondulado (de 20 à 45% de inclinação), sendo que, nestas duas unidades de relevo foram mapeadas 94% das cicatrizes (Figura 50).

Figura 50 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade de Relevo da BHRC



Fonte: do autor (2019)

Além da variável espacial de relevo, cabe destacar que a interferência da ação humana foi um dos principais agentes deflagradores destes eventos na BHRC, uma vez que com exceção do RLgn, os solos são desenvolvidos e apresentam elevado grau de intemperismo, o que o torna fácil de ser cortado e provocar alteração na inclinação natural do relevo.

Na BHRP, as interferências causadas pela ação humana não foram correlacionadas às cicatrizes, uma vez que nesta bacia os eventos de deslizamentos identificados se localizaram sempre na encosta natural e associados a elevada inclinação do relevo (Tabela 21).

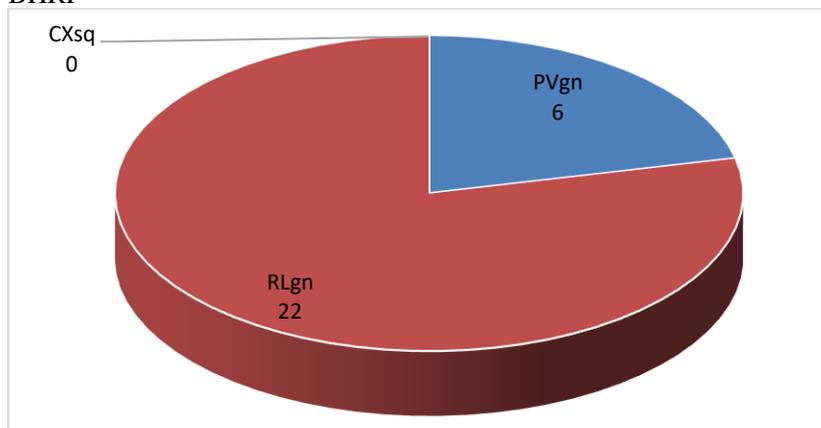
Tabela 21 – Cicatrizes Mapeadas na BHRP de acordo com Relevo e Unidade Geotécnica

| Relevo | Solo | | | Total |
|----------------|----------|-----------|----------|-----------|
| | PVgn | RLgn | CXsq | |
| Escarpado | 3 | 19 | 0 | 22 |
| Montanhoso | 2 | 1 | 0 | 3 |
| Forte Ondulado | 1 | 2 | 0 | 2 |
| Ondulado | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Suave Ondulado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Plano | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 6 | 22 | 0 | 28 |

Fonte: do autor (2019)

Para a BHRP foram mapeadas 28 cicatrizes de deslizamento do solo, estando a maior parte delas concentradas na unidade geotécnica que apresenta baixa ação de intemperismo com solos mais superficiais (RLgn) e nos pontos em que o relevo comportasse como escarpado (Figura 51).

Figura 51 – Cicatrizes de Deslizamentos por Unidade Geotécnica da BHRP



Fonte: do autor (2019)

O CXsq não apresentou cicatrizes de deslizamento, sendo que tal fato está correlacionado com a inclinação do terreno para esta bacia, que está concentrado nos pontos onde o relevo é considerado como Plano, Suave Ondulado e Ondulado (Tabela 22).

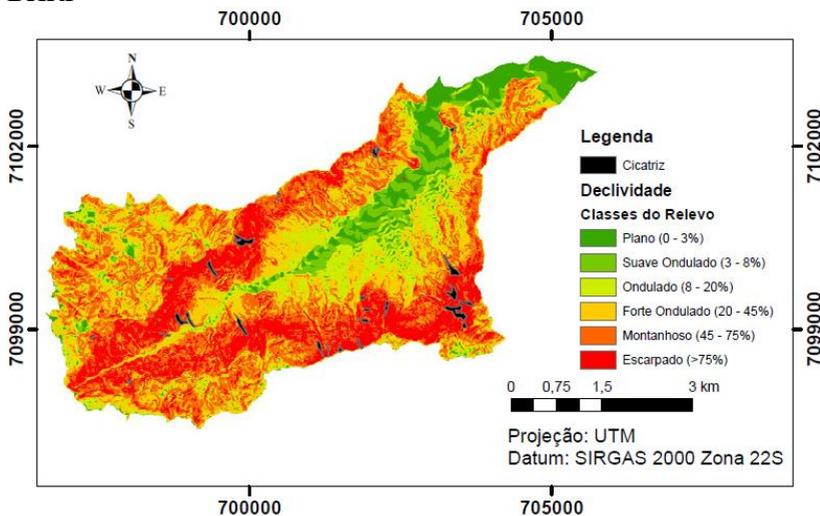
Tabela 22 – Classificação do Relevo para cada Unidade Geotécnica da BHRP

| Relevo | RLgn | PVgn | CXsq | Total |
|----------------|-------------------------|--------------|-------------|-------------------------|
| | Area (km ²) | | | Area (km ²) |
| Escarpado | 4,04 | 1,08 | 0,00 | 5,13 |
| Montanhoso | 3,25 | 4,45 | 0,00 | 7,70 |
| Forte Ondulado | 1,48 | 4,83 | 0,38 | 6,69 |
| Ondulado | 0,37 | 1,95 | 1,04 | 3,36 |
| Suave Ondulado | 0,08 | 0,45 | 1,21 | 1,73 |
| Plano | 0,04 | 0,34 | 1,55 | 1,94 |
| Total | 9,26 | 13,11 | 4,18 | 26,55 |

Fonte: do autor (2019)

As duas unidades mais ativas quanto aos eventos de deslizamento (RLgn e PVgn) ocupam a totalidade do relevo escarpado e montanhoso da BHRP. Cabe considerar que 90% das atividades de deslizamento mapeadas nesta bacia, ocorreram nestas classes de relevo (escarpado e montanhoso) e os outros 10% foram identificadas nos locais em que o relevo é classificado como forte ondulado (Figura 52).

Figura 52 –Cicatrices de Deslizamentos por Unidade de Relevo da BHRP



Fonte: do autor (2019)

Em ambas áreas, verificou-se que os eventos de deslizamentos se concentraram nos locais em que o relevo apresenta inclinação superior a classe de forte ondulado, apontando que a variável espacial deve ser uma das principais preocupações quanto à ocupação humana.

5.5 MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL DA BHRC E BHRP

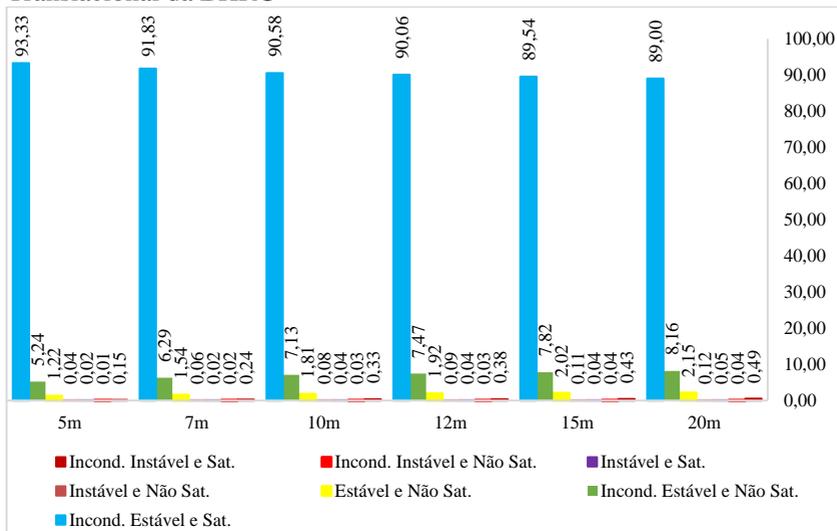
O modelo de mapeamento das áreas suscetíveis à deslizamentos translacionais aplicado neste trabalho foi o SHALSTAB (desenvolvido por Montgomery e Dietrich em 1998) que leva em consideração as variáveis espaciais (inclinação do relevo em graus para definição do fluxo e acumulação de águas oriundas da precipitação), resistência das unidades geotécnicas (coesão e ângulo de atrito), peso específico de cada unidade e espessura da camada de solo. Estas variáveis estão definidas nos capítulos anteriores e podem ser observadas no resumo apresentado pela Tabela 15.

Cabe destacar que em ambas bacias hidrográficas é possível gerar o mapa de suscetibilidade à deslizamentos translacionais (SHALSTAB)

na escala de 1:5.000, no entanto devido à falta de espaço no *layout* de página, os mapas serão gerados na escala de 1:75.000.

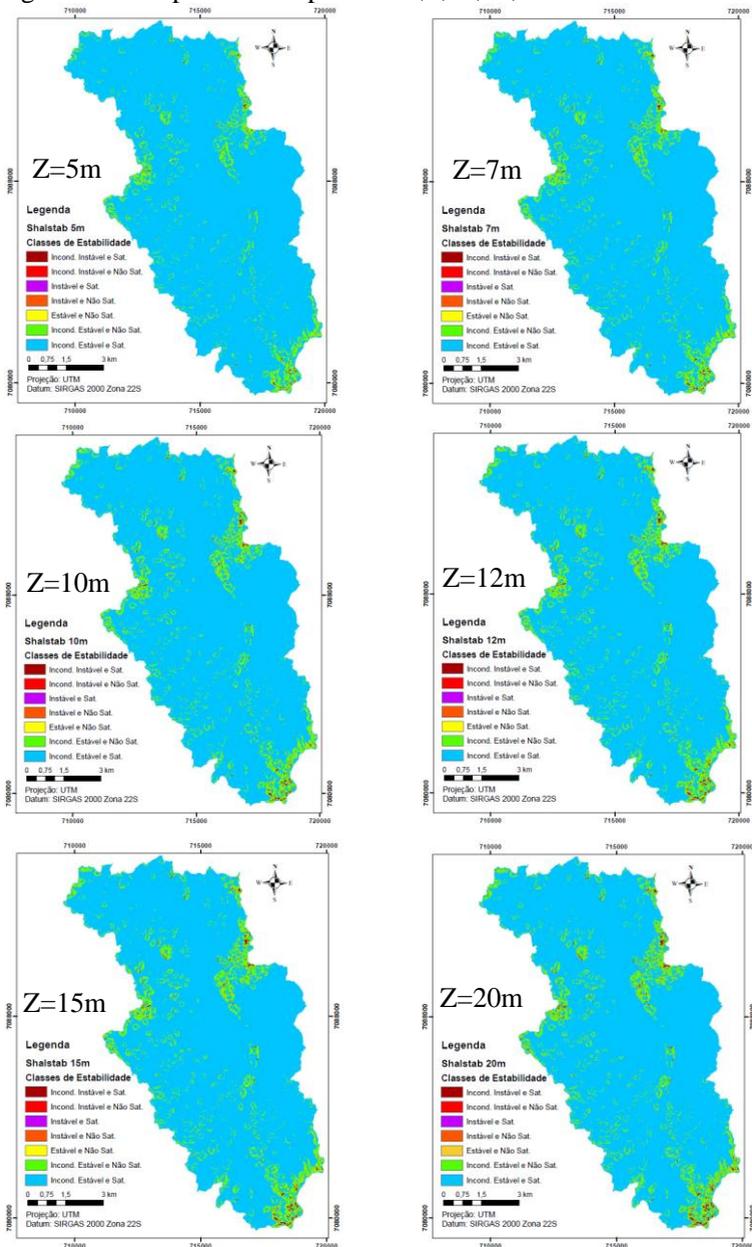
A BHRC apresentou elevado índice de estabilidade à movimentos translacionais, sendo que a soma das áreas incondicionalmente estáveis atingiu aproximadamente 97% da área desta bacia, mesmo quando se considera profundidade de ruptura de 20 metros (Figura 53, 54 e Tabela 23).

Figura 53 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRC



Fonte: do autor (2019)

Figura 54 – Mapa Shalstab para $z = 5, 7, 10, 12, 15$ e 20m da BHRC



Fonte: do autor (2019)

Tabela 23 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRC

| Classe de Estabilidade | Altura (z) | | | | | |
|---------------------------------|------------|------|------|------|------|------|
| | 20m | 15m | 12m | 10m | 7m | 5m |
| Incond. Instável e Sat. (%) | 0,49 | 0,43 | 0,38 | 0,33 | 0,24 | 0,15 |
| Incond. Instável e Não Sat. (%) | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,01 |
| Instável e Sat. (%) | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| Instável e Não Sat. (%) | 0,12 | 0,11 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 0,04 |
| Estável e Não Sat. (%) | 2,15 | 2,02 | 1,92 | 1,81 | 1,54 | 1,22 |
| Incond. Estável e Não Sat. (%) | 8,16 | 7,82 | 7,47 | 7,13 | 6,29 | 5,24 |
| Incond. Estável e Sat. (%) | 89,0 | 89,5 | 90,1 | 90,6 | 91,8 | 93,3 |
| Total (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Por meio das figuras 53, 54 e da Tabela 23, é possível verificar que mesmo variando a profundidade de ruptura dos solos em 15 metros, foi registrada baixa variação entre as classes de estabilidade, tal fato está relacionado com o relevo ameno apresentado por esta bacia. Portanto para validação dos resultados escolheu-se a profundidade de 10 metros, uma vez que os solos de Joinville são considerados profundos, por estarem numa área que apresenta elevado índices pluviométricos (podendo ultrapassar média de 2000mm/ano), além de esta profundidade apresentar um valor médio entre a profundidade de 20 e de 5m.

Cabe ressaltar que a utilização de profundidades superiores a 5m para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais vem sendo uma prática comum no sul do Brasil e para esta região vem apresentando bons resultados.

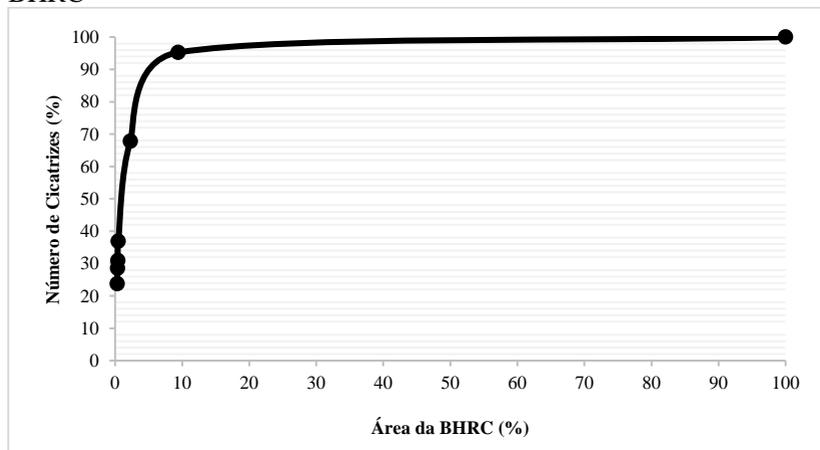
As cicatrizes mapeadas por este trabalho apresentaram que 36,9% localizam-se sobre a uma região considerada instável pelo modelo Shalstab para a profundidade de 10 metros. Destaca-se que as áreas consideradas instáveis pelo citado modelo, não chegam a cobrir uma área de 0,5% do território da BHRC, ou seja, apenas 0,5% da área corresponde à frequência de 36,9% da ocorrência de deslizamentos (Tabela 24 e Figura 55).

Tabela 24 – Análise do Número de Deslizamentos Translacionais da BHRC para $z = 10\text{m}$

| Classes de Estabilidade | N° Cicatrizes | % Cicatrizes | % Acumulada | % Área | % Acumulada |
|-----------------------------|---------------|--------------|-------------|--------|-------------|
| Incond. Instável e Sat. | 20 | 23,81 | 23,81 | 0,33 | 0,33 |
| Incond. Instável e Não Sat. | 4 | 4,76 | 28,57 | 0,03 | 0,36 |
| Instável e Sat. | 2 | 2,38 | 30,95 | 0,04 | 0,40 |
| Instável e Não Sat. | 5 | 5,95 | 36,90 | 0,08 | 0,48 |
| Estável e Não Sat. | 26 | 30,95 | 67,86 | 1,81 | 2,29 |
| Incond. Estável e Não Sat. | 23 | 27,38 | 95,24 | 7,13 | 9,42 |
| Incond. Estável e Sat. | 4 | 4,76 | 100 | 0,58 | 100 |
| Total (%) | 84 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

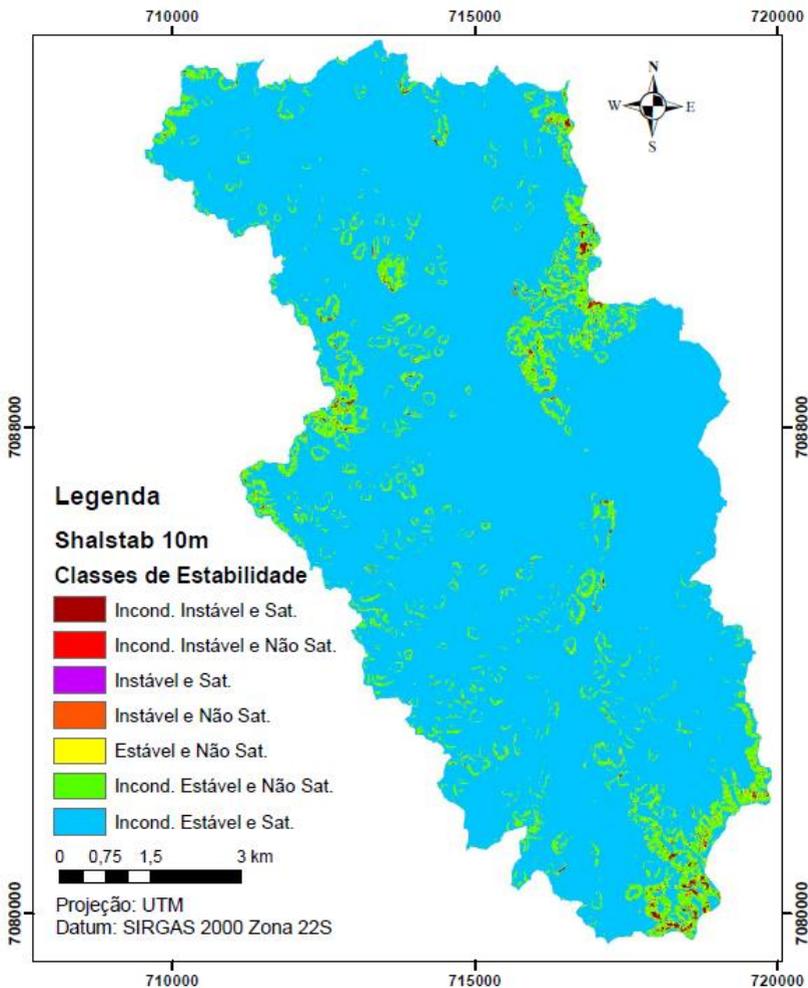
Figura 55 – Curva de Validação para o Mapa Shalstab com $z = 10\text{m}$ da BHRC



Fonte: do autor (2019)

Os pontos considerados instáveis pelo modelo Shalstab apresentaram alta relação entre número de ocorrência e a área (km^2) de ocorrência, tendo como média 80 cicatrizes de deslizamentos por km^2 .

A projeção das cicatrizes mapeadas sobre as áreas de instabilidade do modelo SHALSTAB estão apresentadas na Figura 56.

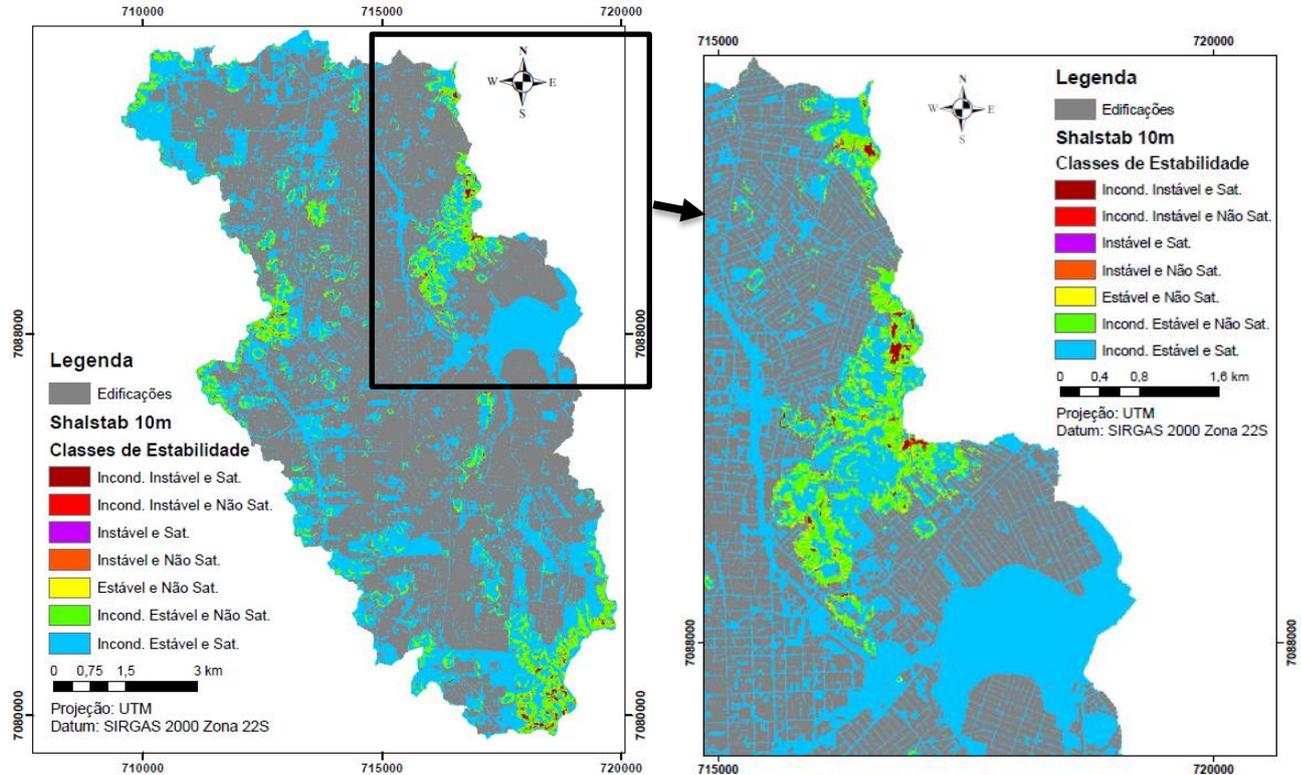
Figura 56 – Mapa Shalstab para $z = 10\text{m}$ da BHRC

Fonte: do autor (2019)

A partir da curva de validação observou-se que a maior parte das cicatrizes mapeadas na área da BHRC encontra-se em áreas consideradas pelo modelo como sendo estáveis. Tal fato está correlacionado com o dinamismo apresentado pela ocupação urbana, uma vez que as áreas classificadas como instáveis, apresentam-se adjacentes à ocupação humana (Figura 57) que por vezes causam alteração do relevo e quando realizado em data posterior a confecção do

Modelo Digital do Terreno passam despercebidas pela classificação da estabilidade. Cabe ainda destacar que o modelo SHALSTAB não é indicado para ser executado em áreas com acentuado índice de urbanização, entretanto este trabalho buscou reconhecer a fragilidade das áreas de relevo não habitadas (contidas na bacia) com finalidade de limitar a expansão urbana para as áreas que apresentam-se como instáveis.

Figura 57 – Mapa Shalstab para $z = 10\text{m}$ da BHRC com Urbanização



Fonte: do autor (2019)

Em relação as unidades geotécnicas, é possível observar que o RLgn é a unidade mais presente nas áreas classificadas como instáveis pelo modelo Shalstab (Tabela 25).

Tabela 25 – Participação de cada Unidade Geotécnica em cada uma das Classes de Estabilidade do Modelo Shalstab para $z = 10m$ da BHRC

| Classes de Estabilidade | Solo | | | | | Total |
|---------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | CXgn | CXsq | CYsq | PVgn | RLgn | |
| Incond. Instável e Sat. (%) | 20,28 | 0,27 | 3,49 | 14,46 | 61,49 | 100 |
| Incond. Instável e Não Sat. (%) | 6,90 | 0,00 | 2,42 | 18,15 | 72,53 | 100 |
| Instável e Sat. (%) | 11,31 | 0,89 | 2,40 | 19,51 | 65,88 | 100 |
| Instável e Não Sat. (%) | 17,34 | 0,00 | 2,26 | 23,56 | 56,84 | 100 |
| Estável e Não Sat. (%) | 34,38 | 1,01 | 6,58 | 29,36 | 28,68 | 100 |
| Incond. Estável e Sat. (%) | 35,69 | 0,86 | 6,14 | 31,43 | 25,89 | 100 |
| Incond. Estável e Não Sat. (%) | 24,31 | 1,63 | 64,58 | 7,41 | 2,07 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Por outro lado, as unidades PVgn e CXgn foram as unidades que mais apresentaram cicatrizes de deslizamentos mapeadas por este trabalho, e tiveram participação de no máximo 20% de composição das áreas consideradas instáveis. No entanto cabe ressaltar que estas duas unidades estão localizadas nas áreas de encosta e sofrem acentuada ocupação humana que rotineiramente altera a inclinação do relevo e proporciona novas áreas de instabilidade para estas áreas.

Em relação aos dados obtidos junto a Defesa Civil, verificou-se que o modelo Shalstab, não apresentou eficácia na identificação das ocorrências atendidas por este órgão, uma vez que a curva de validação apontou que 98,7% dos registros de ocorrência atendidos pela defesa civil encontra-se em área considerada estável por este modelo (Tabela 26, Figura 58 e 59).

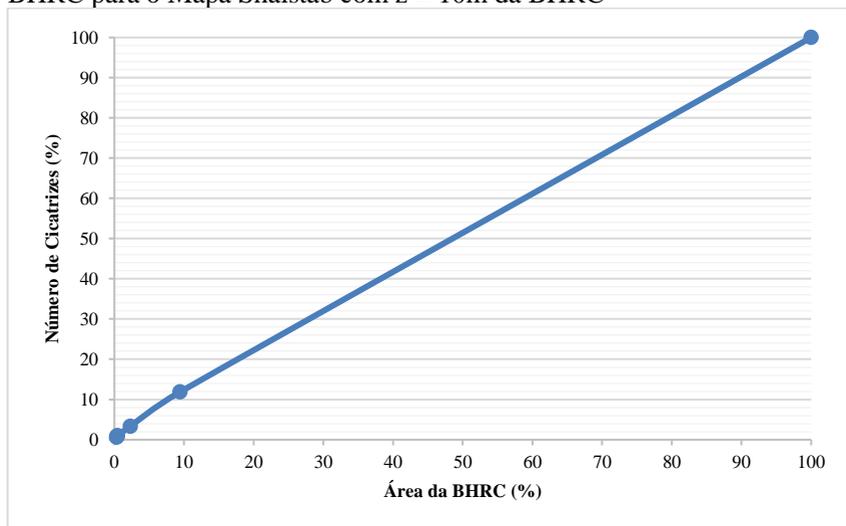
Cabe reforçar que os dados oriundos da Defesa Civil, consideram quedas de muro utilizado para contenção de solo como eventos de deslizamentos, e com isso, mesmo uma determinada região encontrando-se sobre uma área em que a inclinação do relevo é amena as alteração desta inclinação promovida pela intervenção humana, reclassifica a inclinação do relevo que dependendo do tamanho de tal obra, pode não ser reconhecido pelo Modelo Digital do Terreno.

Tabela 26 – Análise do Número de Ocorrências de Deslizamentos Atendidas pela Defesa Civil de Joinville na Área da BHRC com o Modelo Shalstab para $z = 10\text{m}$

| Classes de Estabilidade | Nº Ocorrências | % Ocorrências | % Acumulada | % Área | % Acumulada |
|---------------------------------|----------------|---------------|-------------|------------|-------------|
| Incond. Instável e Sat. (%) | 3 | 0,63 | 0,63 | 0,33 | 0,33 |
| Incond. Instável e Não Sat. (%) | 1 | 0,21 | 0,83 | 0,03 | 0,36 |
| Instável e Sat. (%) | 0 | 0 | 0,83 | 0,04 | 0,4 |
| Instável e Não Sat. (%) | 1 | 0,21 | 1,04 | 0,08 | 0,48 |
| Estável e Não Sat. (%) | 11 | 2,29 | 3,33 | 1,81 | 2,29 |
| Incond. Estável e Sat. (%) | 41 | 8,54 | 11,9 | 7,13 | 9,42 |
| Incond. Estável e Não Sat. (%) | 423 | 88,1 | 100 | 90,6 | 100 |
| Total | 480 | 100 | | 100 | |

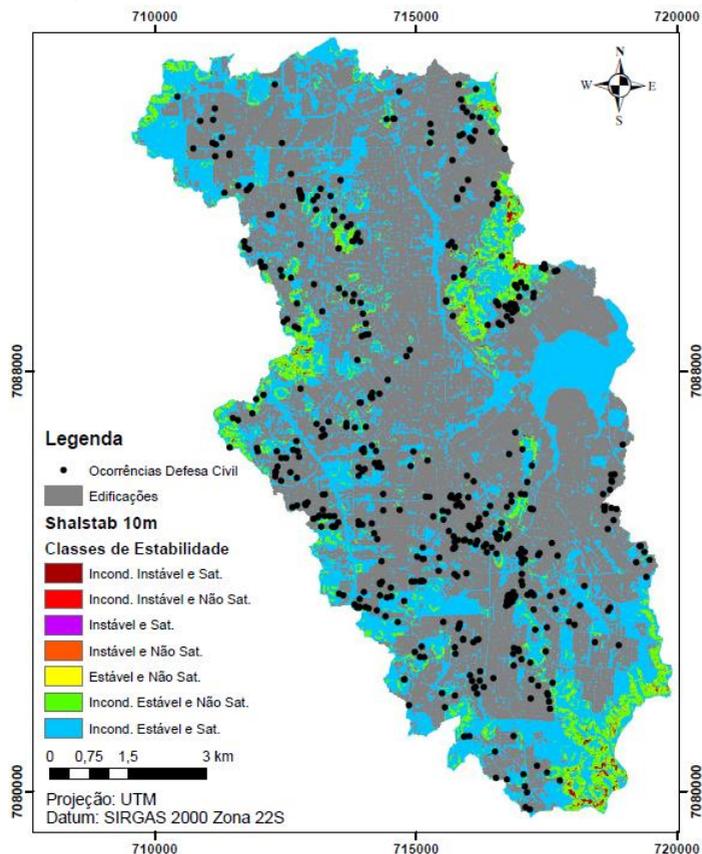
Fonte: do autor (2019)

Figura 58 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Deslizamentos Atendidas pela Defesa Civil de Joinville na Área da BHRC para o Mapa Shalstab com $z = 10\text{m}$ da BHRC



Fonte: do autor (2019)

Figura 59 – Mapa Shalstab para $z = 10\text{m}$ com as Edificações e Registro de Ocorrências Atendidas pela Defesa Civil de Joinville na Área da BHRC



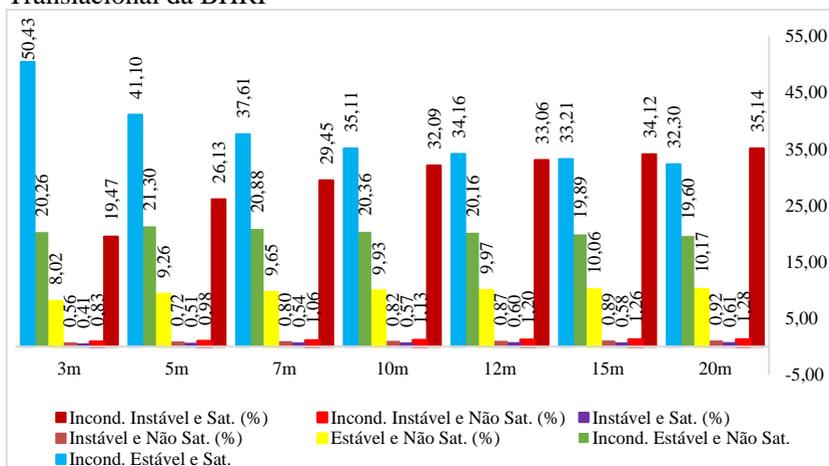
Fonte: do autor (2019)

A Bacia Hidrográfica do Rio da Prata (BHRP) apresenta características geomorfológicas diferentes da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (analisada anteriormente). Na BHRP a paisagem encontra-se encaixada sobre um vale em “V”, onde diferença de elevação entre o culme e o exutório desta bacia é superior à 900 metros; e o relevo exhibe alta inclinação, sendo que 73,77%, está classificado com classes superiores ao Forte Ondulado (20 à 45%). Quando se analisa a ocupação humana, verifica-se que nesta bacia há menor interferência da de fatores

antrópicos e que o principal uso do solo está relacionado com atividades agrícolas.

A BHRP apresentou elevado índice de estabilidade quando se considerou a espessura do solo de 3 metros de profundidade tendo 70,69% de sua área classificada na situação de incondicionavelmente estável. Entretanto, notou-se que a medida que a profundidade de ruptura aumentou (para profundidades superiores a 10 metros) esta área sofreu uma redução de aproximadamente 15% (Figura 60, 61 e Tabela 27).

Figura 60 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRP



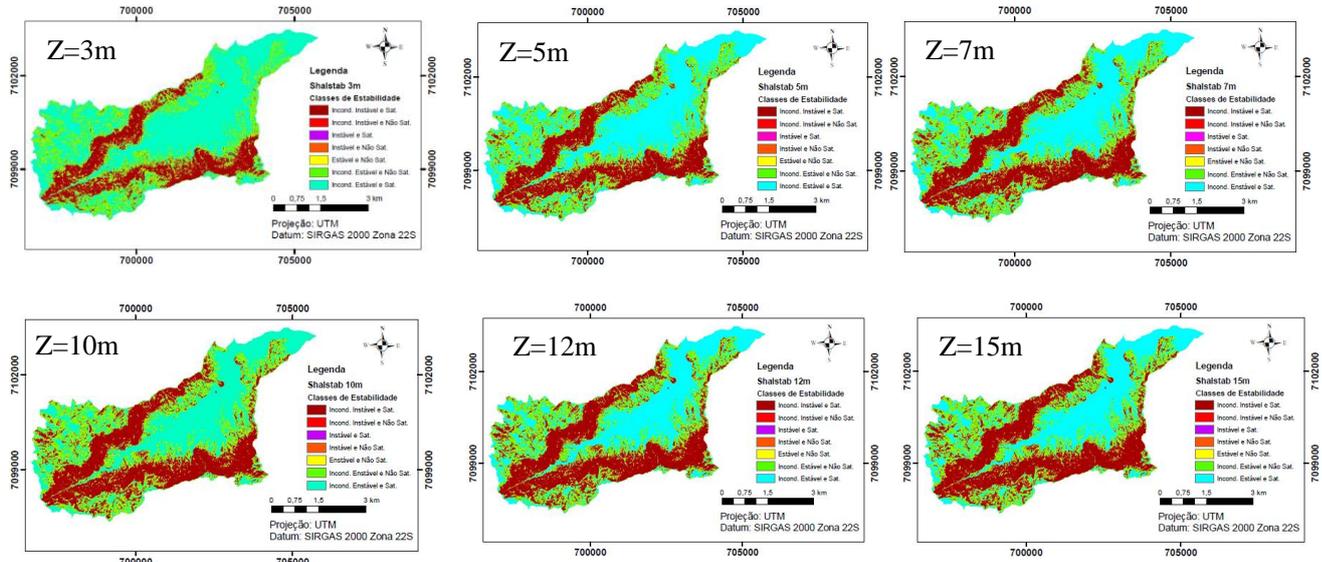
Fonte: do autor (2019)

Tabela 27 – Porcentagem de Áreas Instáveis ao Deslizamento Translacional da BHRP

| Classe de Estabilidade | Altura (z) | | | | | | |
|---------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|
| | 20m | 15m | 12m | 10m | 7m | 5m | 3m |
| Incond. Instável e Sat. (%) | 35,1 | 34,1 | 33,1 | 32,1 | 29,5 | 26,1 | 19,5 |
| Incond. Instável e Não Sat. (%) | 1,28 | 1,26 | 1,20 | 1,13 | 1,06 | 0,98 | 0,83 |
| Instável e Sat. (%) | 0,61 | 0,58 | 0,60 | 0,57 | 0,54 | 0,51 | 0,41 |
| Instável e Não Sat. (%) | 0,92 | 0,89 | 0,87 | 0,82 | 0,80 | 0,72 | 0,56 |
| Estável e Não Sat. (%) | 10,2 | 10,1 | 9,97 | 9,93 | 9,65 | 9,26 | 8,02 |
| Incond. Estável e Não Sat. (%) | 19,6 | 19,9 | 20,2 | 20,4 | 20,9 | 21,3 | 20,3 |
| Incond. Estável e Sat. (%) | 32,30 | 33,2 | 34,2 | 35,1 | 37,6 | 41,1 | 50,4 |
| Total (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Figura 61 – Mapa Shalstab para $z = 3,5,7,10,12, \text{ e } 15\text{m}$ da BHRC



Fonte: do autor (2019)

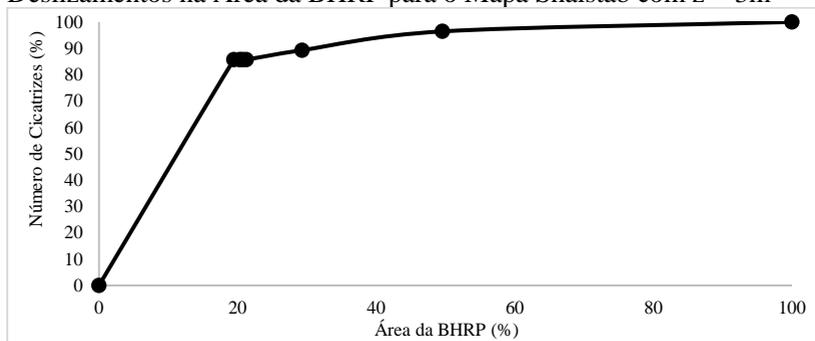
Para a validação dos resultados obtidos pelo modelo SHALSTAB, cabe considerar que 78,57% das cicatrizes foram mapeadas em solo residual jovem (RLgn) e com baixo desenvolvimento pedológico, por isto a espessura considerada para validação dos resultados desta bacia foi de 3m. Esta profundidade apresentou boa correlação, uma vez que a mesma apontou que 85,71% das cicatrizes mapeadas na BHRP, ocorre sobre as áreas consideradas como incondicionalmente instáveis pelo modelo SHALSTAB. Esta frequência de eventos, ocorrem sobre 21,28% da área desta bacia (Tabela 28 e Figura 62).

Tabela 28 – Análise do Número de Deslizamentos Translacionais da BHRP para $z = 3\text{m}$

| Classes de Estabilidade | Nº Cicatrizes | | | % Área | |
|-----------------------------|---------------|--------------|-------------|--------|-------------|
| | Nº Cicatrizes | % Cicatrizes | % Acumulada | % Área | % Acumulada |
| Incond. Instável e Sat. | 24 | 85,71 | 85,71 | 19,47 | 19,47 |
| Incond. Instável e Não Sat. | 0 | 0,00 | 85,71 | 0,829 | 20,30 |
| Instável e Sat. | 0 | 0,00 | 85,71 | 0,414 | 20,72 |
| Instável e Não Sat. | 0 | 0,00 | 85,71 | 0,565 | 21,28 |
| Estável e Não Sat. | 1 | 3,57 | 89,29 | 8,022 | 29,30 |
| Incond. Estável e Não Sat. | 2 | 7,14 | 96,43 | 20,26 | 49,57 |
| Incond. Estável e Sat. | 1 | 3,57 | 100,00 | 50,43 | 100 |
| Total | 28 | 100 | | 100 | |

Fonte: do autor (2019)

Figura 62 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Deslizamentos na Área da BHRP para o Mapa Shalstab com $z = 3\text{m}$

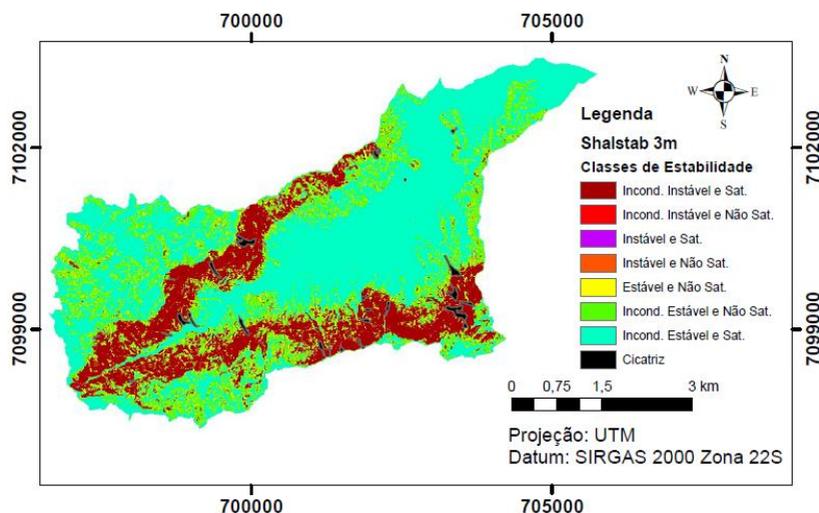


Fonte: do autor (2019)

As cicatrizes mapeadas nesta bacia se concentram predominantemente nas áreas incondicionamente instável, sendo que nesta classificação a média de ocorrências de deslizamentos identificada por este trabalho, foi de 1 cicatriz para cada km^2 de área incondicionalmente instável.

A projeção das cicatrizes sobre o mapa de deslizamentos translacionais pode ser observada através da Figura 63.

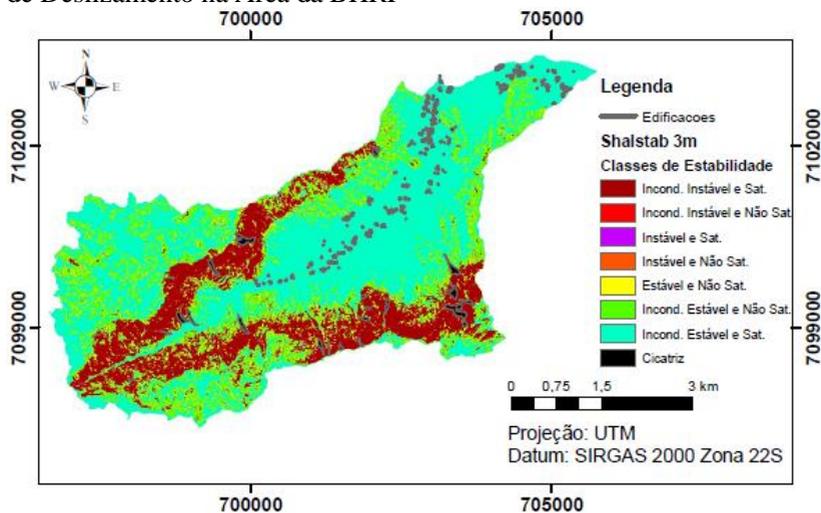
Figura 63 – Mapa Shalstab para $z = 3\text{m}$ da BHRP



Fonte: do autor (2019)

A ocupação humana concentra-se encaixada nas margens do Rio da Prata e pouco influenciaram nas cicatrizes mapeadas por este trabalho. Cabe ressaltar que as edificações se encontram localizadas nas áreas consideradas incondicionalmente estáveis por este modelo (Figura64)

Figura 64 – Mapa Shalstab para $z = 3\text{m}$ com as Edificações e Cicatrizes de Deslizamento na Área da BHRP



Fonte: do autor (2019)

Contudo estas duas bacias apresentaram características adversas entre si, sendo que na BHRC as cicatrizes mapeadas podem ser classificadas como induzidas pelo uso e ocupação do solo urbano, diferentemente é o que ocorre na BHRP, onde as Cicatrizes Mapeadas não demonstraram relação direta com a ação antrópica.

Em relação as unidades geotécnicas existentes nesta bacia, verificou-se que os solos mais ativos quanto aos movimentos gravitacionais de massa são o RLgn e o PVgn. Juntos estes solos concentraram 100% das cicatrizes de deslizamento. Tal fato está relacionado com a suscetibilidade a deslizamentos translacionais, que segundo o mapeamento realizado por este trabalho as citadas unidades estão localizadas nas áreas que apresentam as maiores suscetibilidades a deslizamentos (Tabela 29).

Tabela 29 – Participação de cada Unidade Geotécnica em cada uma das Classes de Estabilidade do Modelo Shalstab para $z = 3\text{m}$ da BHRP

| Classes de Estabilidade | RLgn | PVgn | CXsq | Total |
|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| Incond. Instável e Sat. | 4,95 | 0,30 | 0,00 | 5,25 |
| Incond. Instável e Não Sat. | 0,17 | 0,03 | 0,00 | 0,20 |
| Instável e Sat. | 0,08 | 0,03 | 0,00 | 0,11 |
| Instável e Não Sat. | 0,11 | 0,05 | 0,00 | 0,15 |
| Estável e Não Sat. | 0,94 | 0,98 | 0,03 | 1,95 |
| Incond. Estável e Não Sat. | 1,70 | 3,67 | 0,06 | 5,42 |
| Incond. Estável e Sat. | 1,29 | 8,05 | 4,11 | 13,46 |
| Total | 9,25 | 13,10 | 4,18 | 26,55 |

Fonte: do autor (2019)

O CXsq não apresentou registro de cicatrizes de deslizamentos para nesta bacia, tal fato pode ser justificado pela ausência destes solos em áreas consideradas instáveis pelo modelo Shalstab. Esta unidade localiza-se principalmente nas áreas consideradas como Incondicionalmente Estáveis mesmo quando saturados.

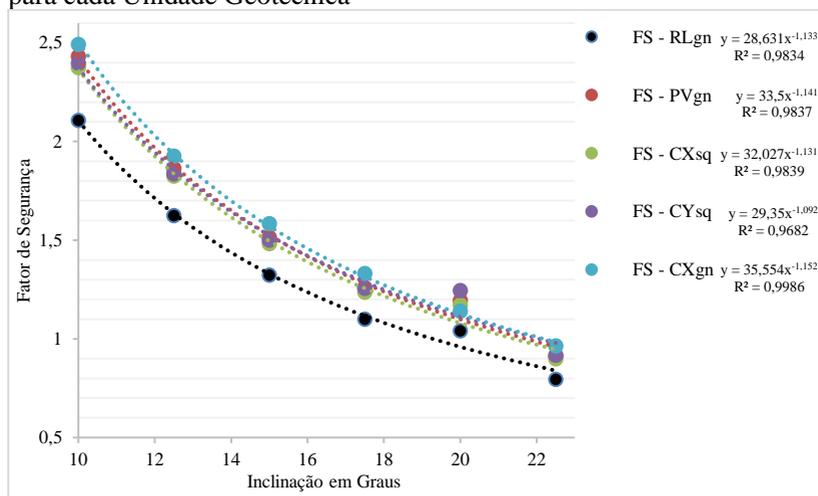
Cabe ainda ressaltar que a BHRP apresentou uma soma de $5,71\text{km}^2$ de áreas instáveis (segundo o modelo Shalstab) na profundidade de 3 metros, sendo que esta área se mostrou 15 vezes maior que as áreas instáveis apresentadas pela BHRC. Porém, quando se observou o número de cicatrizes mapeadas, percebeu-se que houve uma ordem inversa e a BHRC registrou mais ocorrências de deslizamentos do que a BHRP.

5.6 MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO ROTACIONAL DA BHRC E BHRP

As análises de estabilidade aos deslizamentos rotacionais buscaram identificar a inclinação máxima que instabiliza cada uma das unidades geotécnicas. A identificação de cada uma destas unidades foi realizada de acordo com o que fora descrito na metodologia deste trabalho, e as características de cada unidade geotécnica foi definida de acordo com as grandezas estabelecida na Tabela 15.

Considerando a teoria dos taludes infinitos, foi-se aplicado o modelo de Morgenstein Price que resultou nas curvas de ruptura para cada uma das unidades geotécnicas. Tais curvas estão exibidas no resumo apresentado pela (Figura 65).

Figura 66 – Correlação entre Fator de Segurança e Inclinação do Relevo para cada Unidade Geotécnica



Fonte: do autor (2019)

Tabela 30 – Correlação entre Fator de Segurança e Inclinação do Relevo para cada Unidade Geotécnica

| Solo | α (°) | | | | | |
|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10° | 12,5° | 15° | 17,5° | 20° | 22,5° |
| FS - RLgn | 2,106 | 1,624 | 1,323 | 1,1 | 1,041 | 0,795 |
| FS - PVgn | 2,431 | 1,864 | 1,513 | 1,259 | 1,193 | 0,912 |
| FS - CXsq | 2,374 | 1,824 | 1,483 | 1,236 | 1,171 | 0,898 |
| FS - CYsq | 2,397 | 1,836 | 1,501 | 1,256 | 1,245 | 0,917 |
| FS - CXgn | 2,491 | 1,926 | 1,584 | 1,33 | 1,14 | 0,964 |

Fonte: do autor (2019)

A partir da Figura 66 e Tabela 30, foram definidas as inclinações críticas para cada uma das unidades geotécnicas de acordo com o Fator de Segurança (FS). As inclinações críticas apontaram que a maior parte dos solos estudados por este trabalho, podem ser considerados estáveis quando apresentam inclinação de relevo menor que 15° (Tabela 31)

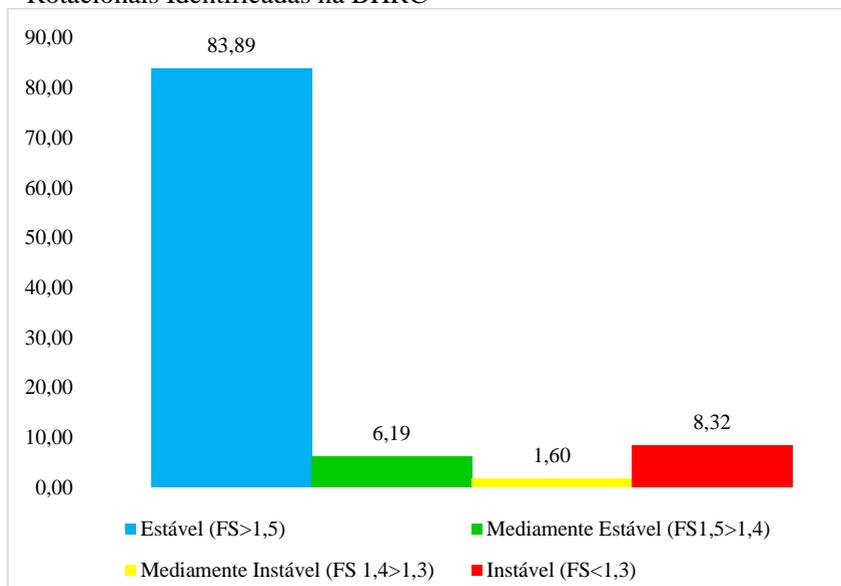
Tabela 31 –Inclinação Crítica do Relevo de acordo com o Fator de Segurança para cada Unidade Geotécnica

| FS | Unidade Geotécnica | | | | |
|------|--|-------|-------|-------|-------|
| | RLgn | PVgn | CXsq | CYsq | CXgn |
| | α (°) - Crítico | | | | |
| 1,50 | 13,50 | 15,21 | 14,98 | 15,23 | 15,61 |
| 1,40 | 14,35 | 16,16 | 15,92 | 16,22 | 16,57 |
| 1,30 | 15,32 | 17,25 | 17,00 | 17,36 | 17,67 |

Fonte: do autor (2019)

Na BHRC o mapeamento de áreas suscetíveis aos deslizamentos rotacionais, apontou que 83,89% da bacia apresenta FS superior a 1,5, e por isso podem ser consideradas estáveis. Entretanto, as áreas consideradas por este trabalho como instáveis apresentaram que 8,32% encontram-se com FS inferior à 1,3 (Figura 67).

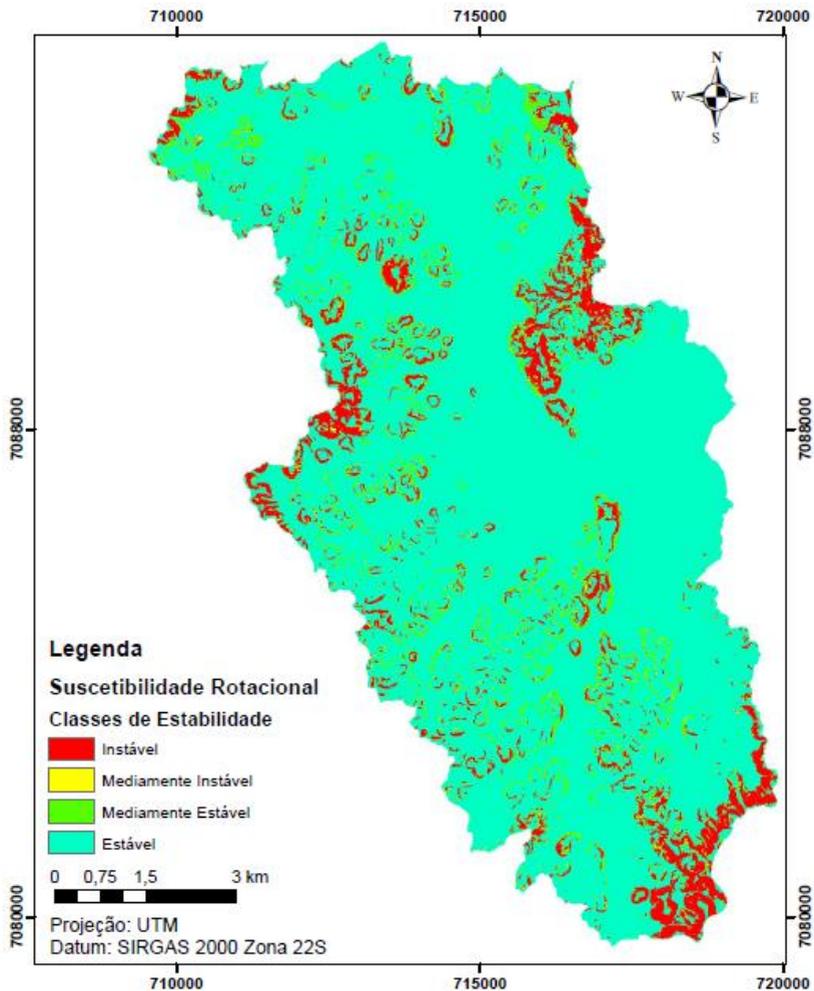
Figura 67 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais Identificadas na BHRC



Fonte: do autor (2019)

O mapa de suscetibilidade ao deslizamento rotacional da BHRC pode ser observado através da Figura 68.

Figura 68 – Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos Rotacionais da BHRC



Fonte: do autor (2019)

Dentre as unidades geotécnicas em condições instáveis, observa-se que o CXgn é a unidade que mais está exposta a eventos de

deslizamentos rotacionais. Tal unidade ocupa 2,89 km² das áreas que se situam com FS inferior à 1,4. Esta unidade geotécnica juntamente com o PVgn e RLgn são as unidades com maior representação dentre as áreas consideradas instáveis por este trabalho (Tabela 32), e por isso devem receber maior atenção quanto ao seu processo de uso e ocupação dos solos.

Tabela 32 – Estabilidade ao Deslizamento Rotacional de cada Unidade Geotécnica da BHRC em Porcentagem de Representação

| Classe de Estabilidade | CXg | CXs | PVg | CYs | RLg | GXs | Mangu | Total |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | n | q | n | q | n | q | e | |
| | % | | | | | | | |
| Instável | 2,85 | 0,46 | 2,60 | 0,06 | 2,35 | 0,00 | 0,00 | 8,32 |
| Mediamente Instável | 0,63 | 0,29 | 0,43 | 0,02 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 1,60 |
| Mediamente Estável | 0,65 | 4,54 | 0,79 | 0,02 | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 6,19 |
| Estável | 18,9 | 48,0 | 5,01 | 1,33 | 1,49 | 1,82 | 7,24 | 83,89 |
| | 2 | 8 | | | | | | |
| Total | 23,0 | 53,3 | 8,83 | 1,42 | 4,27 | 1,82 | 7,24 | 100,0 |
| | 5 | 7 | | | | | | 0 |

Fonte: do autor (2019)

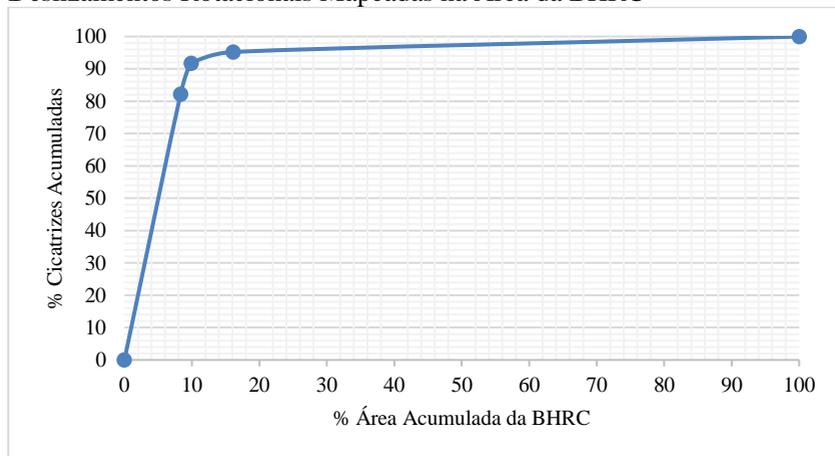
Os resultados obtidos pelo deslizamento rotacional apresentaram que 92% da frequência de cicatrizes mapeadas por este trabalho se concentraram em menos de 10% da composição da área desta bacia. Esta relação, apontou que o método realizado por este trabalho exibiu resultados satisfatórios para o mapeamento das áreas rotacionais (Tabela 33 e Figura 69).

Tabela 33 – Análise do Número de Deslizamentos Rotacionais para a BHRC

| Classe de Estabilidade | Nº Cicatrizes | % Cicatrizes | % Acumulada | % Área | % Acumulada |
|----------------------------------|---------------|--------------|-------------|--------|-------------|
| Instável (FS<1,3) | 69 | 82,14 | 82 | 8,32 | 8,32 |
| Mediamente Instável (FS 1,4>1,3) | 8 | 9,52 | 92 | 1,60 | 9,92 |
| Mediamente Estável (FS1,5>1,4) | 3 | 3,57 | 95 | 6,19 | 16,11 |
| Estável (FS>1,5) | 4 | 4,76 | 100 | 83,89 | 100,00 |
| Total | 84 | 100 | | 100 | |

Fonte: do autor (2019)

Figura 69 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Deslizamentos Rotacionais Mapeadas na Área da BHRC



Fonte: do autor (2019)

A eficácia deste modelo, pode estar correlacionada com o elevado desenvolvimento pedológico (solos profundos) contido nesta unidade, sendo que tal fato leva a acreditar que os deslizamentos ocorrentes nesta bacia sejam de forma rotacional.

Entretanto quando se analisa os dados gerados pela Defesa Civil, mais uma vez se verifica que há baixa correlação entre o mapeamento de

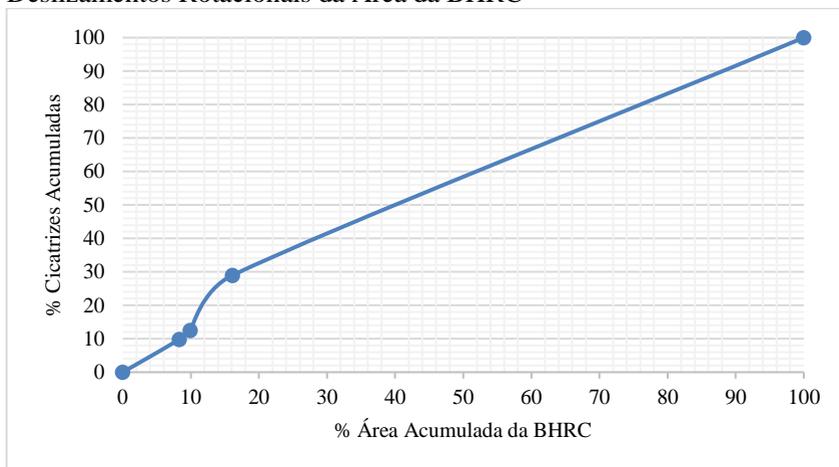
áreas suscetíveis e o histórico de ocorrências relacionadas ao mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos, uma vez que 71,04% dos registros de ocorrência localizaram-se sobre área estável (Tabela 34 e Figura 70).

Tabela 34 – Análise do Número de Ocorrências Atendidas pela Defesa Civil Correlacionadas com o Mapeamento de Deslizamentos Rotacionais da BHRC

| Classe de Estabilidade | N° Cicatrizes | % Cicatrizes | % Acumulada | % Área | |
|----------------------------------|---------------|--------------|-------------|--------|-------------|
| | | | | % Área | % Acumulada |
| Instável (FS<1,3) | 47 | 9,79 | 9,79 | 8,32 | 8,32 |
| Mediamente Instável (FS 1,4>1,3) | 13 | 2,71 | 12,50 | 1,60 | 9,92 |
| Mediamente Estável (FS1,5>1,4) | 79 | 16,46 | 28,96 | 6,19 | 16,11 |
| Estável (FS>1,5) | 341 | 71,04 | 100,00 | 83,89 | 100,00 |
| Total | 480 | 100 | | 100 | |

Fonte: do autor (2019)

Figura 70 – Curva de Validação para Número de Ocorrências de Atendidas pela Defesa Civil Correlacionada com o Mapeamento de Deslizamentos Rotacionais da Área da BHRC

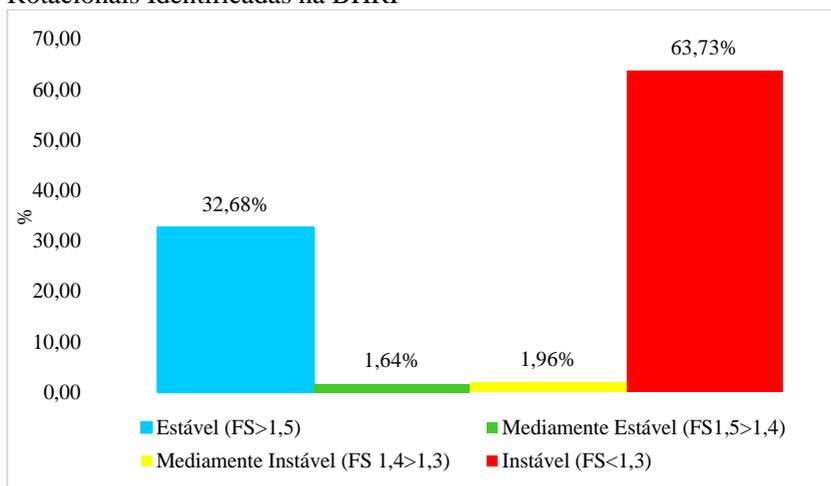


Fonte: do autor (2019)

Por meio da curva apresentada pela Figura 70, verifica-se que 30% dos atendimentos realizados pela defesa civil correspondeu a mais de 20% da área acumulada da bacia. Esta curva reforça o fato de a ocupação humana ser um dos principais indutores aos deslizamentos na área desta bacia.

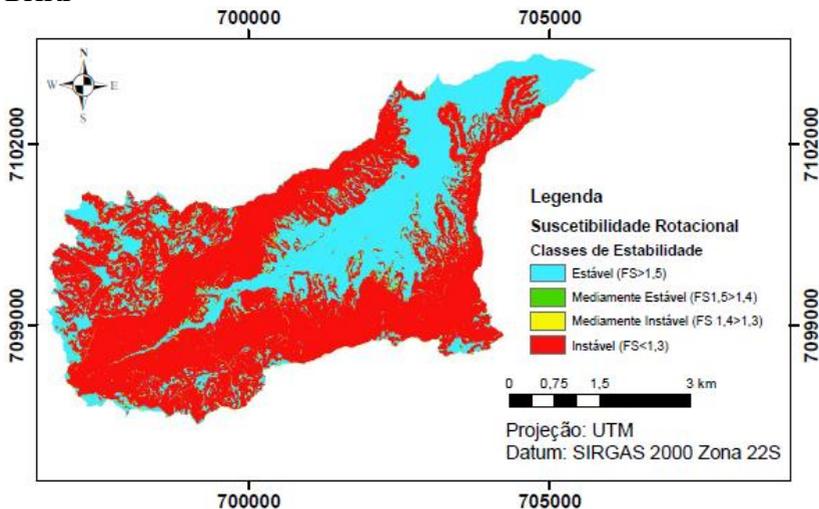
Por outro lado, quando é analisada a Bacia Hidrográfica do Rio da Prata (BHRP) verificamos que 63,7% da área estudada encontra-se em condição instável (com FS inferior a 1,3) aos deslizamentos rotacionais Figura 71. Portanto nesta bacia as áreas instáveis a deslizamentos rotacionais ocupam a maior parte da área. Tal ocorrência pode ser observada através da Figura 72, onde a cor vermelha representa FS inferior a 1,3.

Figura 71 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais Identificadas na BHRP



Fonte: do autor (2019)

Figura 72 – Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos Rotacionais da BHRP



Fonte: do autor (2019)

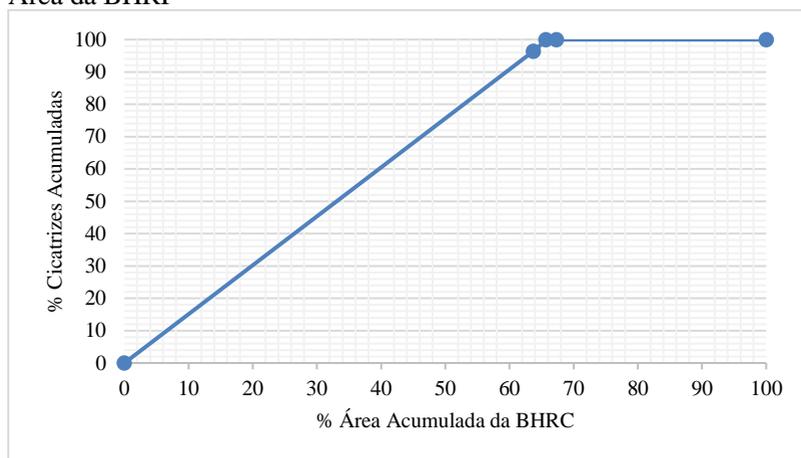
Quando se correlacionam as cicatrizes mapeadas com as classes de estabilidade definidas por este trabalho, observa-se que 96,43% dos eventos mapeados ocorrem sobre áreas consideradas como instáveis, ou seja, apresentam FS inferior à 1,3. Para a validação dos resultados desta bacia, verifica-se que 100% dos eventos de deslizamentos se concentram em 65,69% da área da mesma (Tabela 35 e Figura 73).

Tabela 35 – Análise do Número de Deslizamentos Rotacionais para a BHRP

| Classe de Estabilidade | Nº Cicatrizes | % Cicatrizes | % Acumulada | % Área | % Acumulada |
|------------------------------------|---------------|--------------|-------------|--------|-------------|
| Instável (FS < 1,3) | 27 | 96,43 | 96,43 | 63,73 | 63,73 |
| Mediamente Instável (FS 1,4 > 1,3) | 1 | 3,57 | 100,00 | 1,96 | 65,69 |
| Mediamente Estável (FS 1,5 > 1,4) | 0 | 0,00 | 100,00 | 1,63 | 67,32 |
| Estável (FS > 1,5) | 0 | 0,00 | 100,00 | 32,68 | 100,00 |
| Total | 28 | 100 | | 100 | |

Fonte: do autor (2019)

Figura 73 – Curva de Validação para Número de Cicatrizes Correlacionadas com o Mapeamento de Deslizamentos Rotacionais da Área da BHRP



Fonte: do autor (2019)

Em relação as unidades geotécnicas observam-se que a maior parte das áreas consideradas instáveis da BHRP se dividem entre os solos PVgn e RLgn (Tabela 36)

Tabela 36 – Estabilidade ao Deslizamento Rotacional de cada Unidade Geotécnica da BHRP

| Classes de Estabilidade | CXsq | PVgn | RLgn | Total |
|----------------------------------|-------------|----------------------|-------------|--------------|
| | | Área km ² | | |
| Estável (FS>1,5) | 3,89 | 4,11 | 0,65 | 8,65 |
| Mediamente Estável (FS1,5>1,4) | 0,03 | 0,30 | 0,06 | 0,39 |
| Mediamente Instável (FS 1,4>1,3) | 0,03 | 0,36 | 0,12 | 0,52 |
| Instável (FS<1,3) | 0,23 | 8,33 | 8,43 | 16,99 |
| Total | 4,18 | 13,11 | 9,26 | 26,55 |

Fonte: do autor (2019)

Para esta bacia cabe ressaltar que o solo CXsq se concentra nas áreas classificadas como estáveis e por isso representam baixa suscetibilidade à deslizamentos rotacionais.

5.7 MAPEAMENTOS DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO ROTACIONAL E TRANSLACIONAL DA BHRC E BHRP

O mapeamento de áreas suscetíveis foi construído a partir da sobreposição do mapa de suscetibilidade à deslizamentos translacionais e rotacionais, conforme descrito na metodologia deste trabalho.

A composição deste mapa apontou que em ambas áreas os deslizamentos rotacionais impõem maior suscetibilidade aos eventos de deslizamentos.

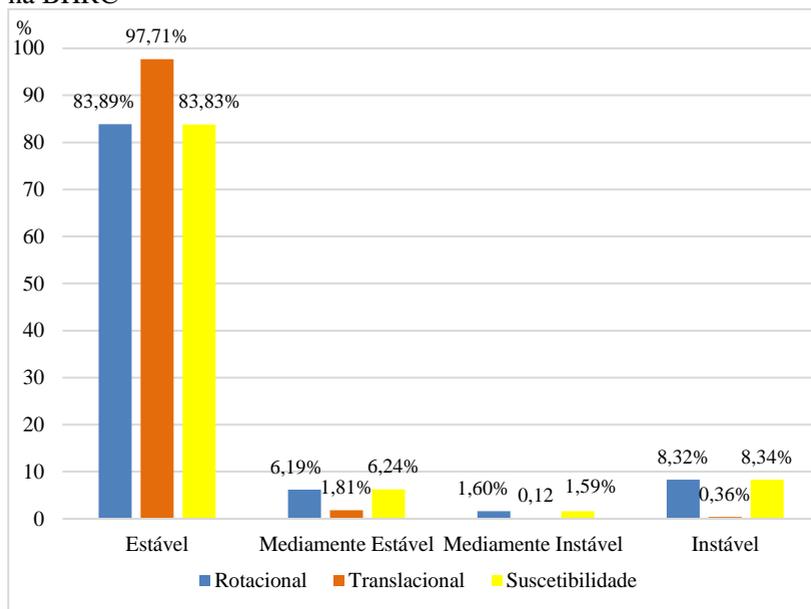
Na BHRC identificou-se que a classificação de estabilidade do mapeamento rotacional apresentou similaridade com o mapeamento de áreas suscetíveis à deslizamentos. No entanto, assim como o no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais, a classe considerada estável e instável sofreram respectivamente redução e acréscimo em relação ao mapa de suscetibilidade à deslizamentos (Tabela 37 e Figura 74).

Tabela 37 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=10m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRC

| Classes de Estabilidade | Rotacional | Translacional | Suscetibilidade |
|-------------------------|------------|---------------|-----------------|
| Estável | 83,89 | 97,71 | 83,83 |
| Mediamente Estável | 6,19 | 1,81 | 6,24 |
| Mediamente Instável | 1,60 | 0,12 | 1,59 |
| Instável | 8,32 | 0,36 | 8,34 |
| Total | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Fonte: do autor (2019)

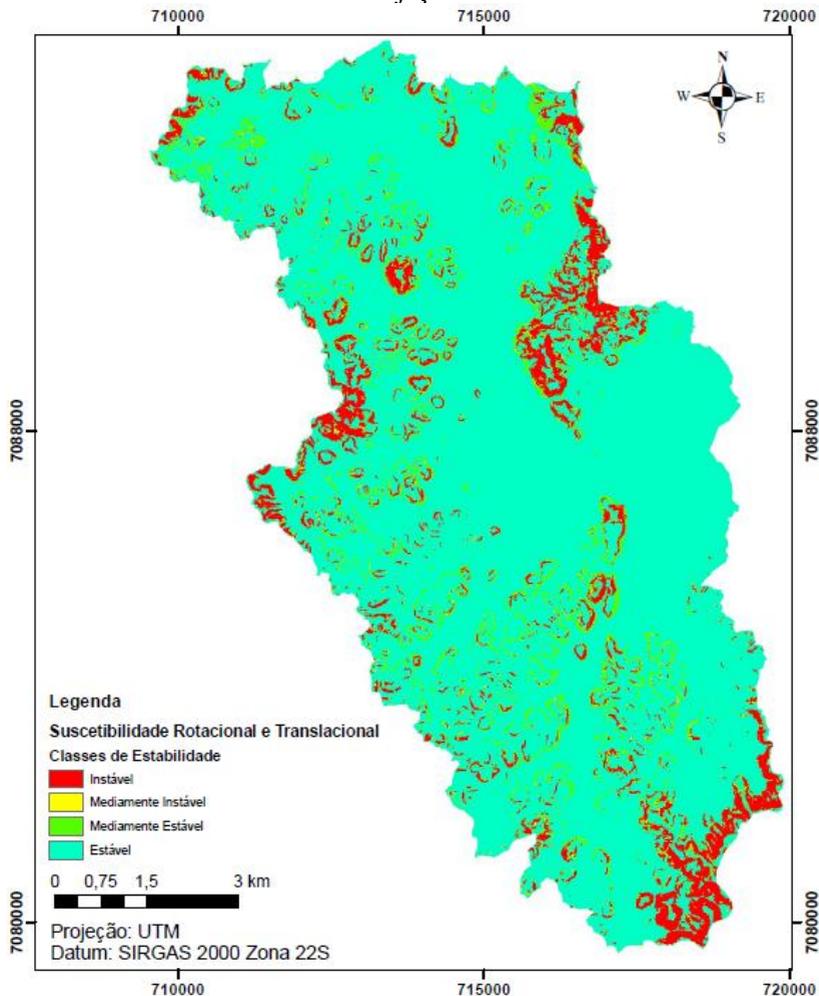
Figura 74 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=10m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRC



Fonte: do autor (2019)

Em relação as análises das cicatrizes mapeadas na área da BHRC observam-se que 84,52% destas ocorrem em áreas classificadas como instáveis pelo mapa de suscetibilidade à deslizamentos. Estas cicatrizes se concentram 8,34% do território (Figura 75 e Tabela 38).

Figura 75 – Mapa de Suscetibilidade à deslizamentos Rotacional e Translacional da BHRC com a Projeção das Cicatrizes



Fonte: do autor (2019)

Ao se comparar os resultados obtidos em cada um dos mapeamentos de suscetibilidade é possível verificar que os melhores resultados foram os envolvidos no mapa de suscetibilidade rotacional e translacional, pois, o mesmo classificou a maior parte das cicatrizes mapeadas como ocorrentes em áreas instáveis (Tabela 38).

Tabela 38 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e os Mapas de Suscetibilidade à Deslizamentos, à Deslizamentos Rotacionais e à Deslizamentos Translacionais ($z=10m$) para a BHRC

| Classes de Estabilidade | Suscetibilidade Rotacional e Translacional | | | Suscetibilidade Rotacional | | | Suscetibilidade Translacional | | |
|-------------------------|--|--------|--------|----------------------------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|
| | Nº Cic | % Cic. | % Área | Nº Cic | % Cic. | % Área | Nº Cic | % Cic. | % Área |
| Instável | 71 | 84,52 | 8,34 | 69 | 82,14 | 8,32 | 24 | 28,57 | 0,36 |
| Mediamente Instável | 6 | 7,14 | 1,59 | 8 | 9,52 | 1,60 | 7 | 8,33 | 0,12 |
| Mediamente Estável | 4 | 4,76 | 6,24 | 3 | 3,57 | 6,19 | 26 | 30,95 | 1,81 |
| Estável | 3 | 3,57 | 83,83 | 4 | 4,76 | 83,89 | 27 | 32,14 | 97,71 |
| Total | 84 | 100 | 100 | 84 | 100 | 100 | 84 | 100 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Sobre as unidades geotécnicas observa-se que a maior parte das cicatrizes se concentraram no solo CXgn, sendo que 44,05% das cicatrizes, foram identificadas sobre a condição instável deste solo (Tabela 39).

Tabela 39 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e o Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRC

| Classes de Estabilidade | CXgn | CYsq | PVgn | CXsq | RLgn | Total (%) |
|-------------------------|-------|------|-------|------|-------|-----------|
| Instável | 44,05 | 1,19 | 28,57 | 0,00 | 10,71 | 84,52 |
| Mediamente Instável | 3,57 | 1,19 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 7,14 |
| Mediamente Estável | 3,57 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,19 | 4,76 |
| Estável | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 3,57 |
| Total | 52,38 | 2,38 | 30,95 | 0,00 | 14,29 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Além do CXgn, outras unidades como o PVgn e o RLgn também apresentaram a maior parte das cicatrizes de deslizamentos classificadas como estando sobre áreas instáveis. A justificativa para estas

ocorrências, estão relacionadas com a representatividade das mesmas dentro das áreas classificadas como instáveis (Tabela 40).

Tabela 40 – Análise do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRC

| Classes de Estabilidade | CXgn | CYsq | PVgn | % | | | | Total (%) |
|-------------------------|-------|-------|------|------|------|------|--------|-----------|
| | | | | CXsq | RLgn | GXsq | Mangue | |
| Instável | 2,85 | 0,46 | 2,61 | 0,06 | 2,37 | 0,00 | 0,00 | 8,34 |
| Mediamente Instável | 0,65 | 0,29 | 0,41 | 0,02 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 1,59 |
| Mediamente Estável | 0,66 | 4,54 | 0,80 | 0,02 | 0,21 | 0,00 | 0,00 | 6,23 |
| Estável | 18,89 | 48,08 | 5,01 | 1,33 | 1,47 | 1,82 | 7,24 | 83,83 |
| Total | 23,05 | 53,37 | 8,83 | 1,43 | 4,28 | 1,82 | 7,24 | 100,00 |

Fonte: do autor (2019)

Quanto aos dados obtidos junto a Defesa Civil de Joinville/SC, verificou-se que a maior parte das ocorrências atendidas por este órgão encontram-se em áreas classificadas como estáveis. Entretanto pode-se observar que das 70,83% das ocorrências atendidas dentro desta área, 41,04% concentram-se na unidade de CXgn. Cabe destacar que, esta unidade também é a que mais se destaca nas ocorrências localizadas sobre as áreas consideradas instáveis (Tabela 41)

Tabela 41 – Comparação entre o Número de Ocorrências atendidas pela Defesa Civil de Joinville/SC e o Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRC

| Classes de Estabilidade | CXgn | CYsq | PVgn | % | | | Total % |
|-------------------------|-------|-------|-------|------|------|--------|---------|
| | | | | CXsq | RLgn | Mangue | |
| Instável | 4,58 | 1,46 | 2,71 | 0,21 | 0,83 | 9,79 | |
| Mediamente Instável | 0,83 | 1,04 | 0,42 | 0,00 | 0,42 | 2,71 | |
| Mediamente Estável | 2,92 | 13,75 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 16,67 | |
| Estável | 41,04 | 19,58 | 6,88 | 0,21 | 3,13 | 70,83 | |
| Total % | 49,38 | 35,83 | 10,00 | 0,42 | 4,38 | 100 | |

Fonte: do autor (2019)

Cabe ressaltar que a unidade CYSq se destaca ao se analisar os registros de ocorrências da defesa civil de Joinville. Nos registros deste órgão esta é a segunda unidade que mais intercorre eventos de deslizamentos. Todavia 19,58% das ocorrências atendidas nesta área se encontra sobre este solo e está classificado como estável.

Contudo os mapas de suscetibilidade a deslizamento não corroboraram resultados correlatos aos registros da defesa civil. É relevante reafirmar que a maior parte das ocorrências atendidas pelo citado órgão situa-se sobre regiões com elevada ocupação humana e que por este motivo o dinamismo envolvido nos cortes e aterros, podem não ter sido identificado pelo modelo digital do terreno.

Nas análises da BHRP observou-se que assim como na BHRC, os mapas de suscetibilidade a deslizamento apresentaram alta relação com o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais. Nesta bacia as áreas das classes de estabilidade praticamente não apresentaram variação entre os mapas de deslizamentos rotacionais e os mapas de suscetibilidade a deslizamentos.

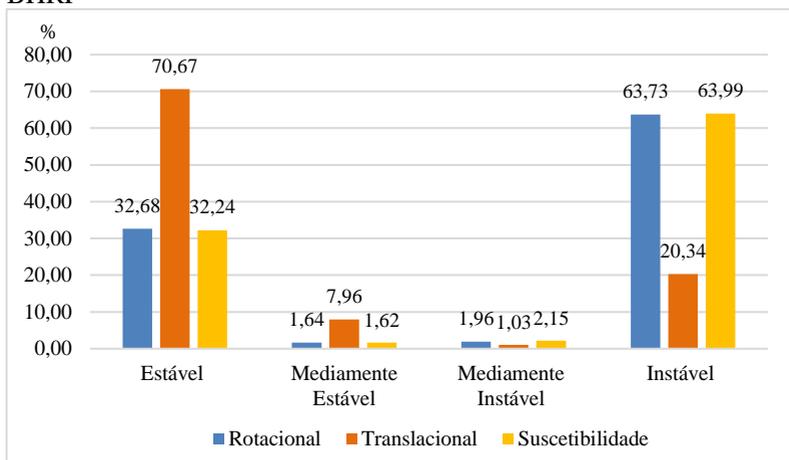
Com relação aos deslizamentos translacionais ($z=3m$), estes apresentaram as maiores variações quando comparados com o mapa de suscetibilidade. Por exemplo as áreas consideradas instáveis exibiram 43,65% de variação e as classes consideradas estáveis variaram 38,43% (Tabela 42 e Figura 76).

Tabela 42 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=3m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRP

| Classes de Estabilidade | Rotacional | Translacional | Suscetibilidade |
|-------------------------|------------|---------------|-----------------|
| Estável | 32,68 | 70,67 | 32,24 |
| Mediamente Estável | 1,64 | 7,96 | 1,62 |
| Mediamente Instável | 1,96 | 1,03 | 2,15 |
| Instável | 63,73 | 20,34 | 63,99 |
| Total | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Fonte: do autor (2019)

Figura 76 – Distribuição das Classes de Estabilidade à Deslizamentos Rotacionais, Translacional ($z=3m$) e de Suscetibilidade Identificadas na BHRP



Fonte: do autor (2019)

Em relação às análises das cicatrizes mapeadas na área da BHRP observam-se que 96,43% destas ocorrem em áreas classificadas como instáveis pelo mapa de suscetibilidade à deslizamentos. Estas cicatrizes se concentram em 63,99% do território (Tabela 43)

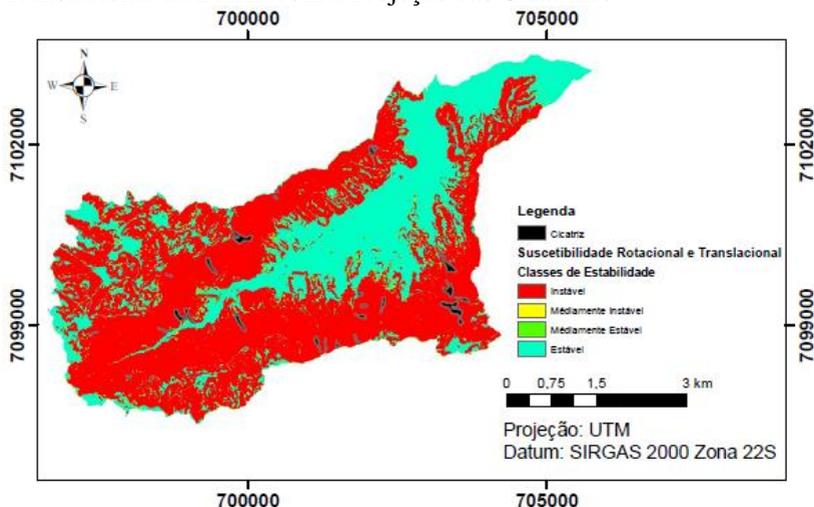
Tabela 43 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e os Mapas de Suscetibilidade à Deslizamentos, à Deslizamentos Rotacionais e à Deslizamentos Translacionais ($z=3m$) para a BHRP

| Classe de Estabilidade | Suscetibilidade Translacional | | | Suscetibilidade Rotacional | | | Suscetibilidade Rotacional e Translacional | | |
|------------------------|-------------------------------|-------|--------|----------------------------|-------|--------|--|-------|--------|
| | Nº Cic | % Cic | % Área | Nº Cic | % Cic | % Área | Nº Cic | % Cic | % Área |
| Instável | 26 | 92,86 | 20,34 | 27 | 96,43 | 63,73 | 27 | 96,43 | 63,99 |
| Mediamente Instável | 0 | 0,00 | 1,03 | 1 | 3,57 | 1,96 | 1 | 3,57 | 2,15 |
| Mediamente Estável | 0 | 0,00 | 7,96 | 0 | 0,00 | 1,64 | 0 | 0,00 | 1,62 |
| Estável | 2 | 7,14 | 70,67 | 0 | 0,00 | 32,68 | 0 | 0,00 | 32,24 |
| Total | 28 | 100 | 100 | 28 | 100 | 100 | 28 | 100 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Portanto a BHRP apresentou 66,14% de área considerada instável pelo mapeamento realizado por este trabalho (Figura 77)

Figura 77 – Mapa de Suscetibilidade à deslizamentos Rotacional e Translacional da BHRP com a Projeção das Cicatrizes



Fonte: do autor (2019)

Sobre as unidades geotécnicas, observa-se que a maior parte das cicatrizes se concentraram no solo RLgn, sendo que 78,57% das cicatrizes identificadas nesta área se encontram na condição instável deste solo (Tabela 44).

Tabela 44 – Comparação entre o Número de Cicatrizes e o Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRP

| Classe de Estabilidade | CXsq | PVgn % | RLgn | Total% |
|------------------------|------|-----------|-------|--------|
| Instável | 0 | 17,86 | 78,57 | 96,43 |
| Mediamente Instável | 0 | 3,57 | 0 | 3,57 |
| Mediamente Estável | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Estável | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 0 | 21,43 | 78,57 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

O PVgn apresentou a outra parte das cicatrizes de deslizamentos, sendo que nesta unidade, 3,57% destes eventos foram identificadas sobre áreas classificadas como mediamente instáveis e 17,86% sobre áreas classificadas como mediamente instáveis. A justificativa para estas ocorrências, estão relacionadas com a representatividade das mesmas dentro das áreas classificadas como instáveis (Tabela 45).

Tabela 45 – Análise do Mapa de Suscetibilidade à Deslizamentos de acordo com as Unidades Geotécnicas da BHRP

| Classe de Estabilidade | CXsq | PVgn % | RLgn | Total% |
|------------------------|-------|-----------|-------|--------|
| Instável | 0,87 | 31,37 | 31,75 | 63,99 |
| Mediamente Instável | 0,11 | 1,54 | 0,49 | 2,15 |
| Mediamente Estável | 0,11 | 1,21 | 0,30 | 1,62 |
| Estável | 14,65 | 15,25 | 2,34 | 32,24 |
| Total | 15,74 | 49,38 | 34,88 | 100 |

Fonte: do autor (2019)

Nesta bacia é possível verificar que dentre os 63,99% das áreas classificadas como instáveis, 31,37% e 31,75%, respectivamente, correspondem aos solos PVgn e RLgn. Estas duas unidades devem receber maior atenção quanto ao uso e ocupação humana.

O CXsq concentra 93,07% das suas áreas nas imediações classificadas como estável e desta forma, pode-se justificar nula identificação de eventos deslizamentos sobre tal unidade geotécnica.

Por fim cabe destacar que o mapeamento de áreas suscetíveis à deslizamentos da BHRC e da BHRP, apresentaram dimensões diferentes de abrangência para as áreas consideradas instáveis. A BHRP apresentou área de instabilidade potencialmente maior que a BHRC, tal fato está correlacionado diretamente com a diferença entre o relevo destas áreas, sendo que o relevo da BHRP é mais escarpado que o da BHRC. No entanto, os números de ocupação urbana na BHRC são superiores ao da BHRP e as áreas instáveis localiza-se iminente próximas as ocupações humanas estabelecidas no local, sendo que estas ocupações se mostraram responsável pela indução de uma série de eventos de deslizamentos ocorrentes na BHRC e devem ser uma grandeza considerável na definição de áreas de risco no instante em que se estiver realizando o planejamento urbano.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho corrobora com a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil que propõe o sistema de informações e monitoramento de desastres como um sistema oficial e necessário para identificação de ameaças, suscetibilidade, vulnerabilidade e riscos de desastres além da elaboração de cartas geotécnicas em municípios que apresentem áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

As duas bacias hidrográficas investigadas neste trabalho apresentam características de relevo e ocupação territorial distintas. Na BHRC o relevo é ameno e típico de área de planície, com morros isolados e altitude que chegam à, no máximo, 225 metros acima do nível do mar, o que favorece a ocupação urbana. Além do mais é sobre esta área que o município abrigou os primeiros habitantes e desenvolveu seu centro comercial, industrial e habitacional. A outra bacia investigada por este trabalho (BHRP) tem um relevo típico de serras, onde o culme apresenta 952 metros de altitude e o exultório apenas 35 metros de altitude. Geomorfologicamente esta área encontra-se alocada em um vale em “V” e exhibe escarpas que fazem a transição entre as áreas de planície e planalto do norte de Santa Catarina. Em relação à ocupação humana, vale destacar que esta área se localiza em uma região rural do município de Joinville/SC e expõe baixa taxa de edificações.

Quanto ao embasamento litológico, em ambas bacias se verificou o Gnaisses e sedimentos quaternário como sendo as únicas unidades a compor estas áreas. Entretanto, os Gnaisses apresentaram maior representatividade na composição da área da BHRP, até porque como destacado no parágrafo anterior o relevo desta bacia é mais jovem que o da BHRC.

Ao se analisar a pedologia, verificou-se que as bacias apresentam unidades similares em se tratando do Cambissolo Háplico, Argissolo Amarelo e Neossolo Litólico. Todavia, a BHRC retratou 3 classes a mais que a BHRP, que foram: os Solos Indiscriminados de Mangue, o Gleissolo Háplico e o Cambissolo Flúvico. No que se concerne à composição pedológica da BHRC verificou-se que o Cambissolo Flúvico e o Cambissolo Háplico são as unidades que mais se destacam com recobrimento de 53,32% e 24,49% respectivamente. Estas duas unidades são as que apresentam maior ocupação humana estabelecida sobre os solos. Já o cobrimento pedológico da BHRP certifica que o Argissolo Amarelo e o Neossolo Litólico são as mais recorrentes neste

território com taxas de recobrimento de 49,38% e 34,88%, respectivamente. Cabe destacar que em ambas bacias o Argissolo Amarelo e o Neossolo Litólico são unidades que ocupam as áreas com maior altitude e inclinação do relevo, além de apresentarem as menores taxas de ocupação humana.

O mapa geotécnico produzido por este trabalho apontou que as unidades geotécnicas existentes em ambas bacias foram similares no que se refere ao Cambissolo Háplico com substrato de Sedimentos do Quaternário (CXsq), Argissolo Amarelo com substrato de Gnaisse (PVgn) e o Neossolo Litólico com substrato de Gnaisse (RLgn). Entretanto a BHRC exibiu 2 unidades geotécnicas a mais que a BHRP, sendo: o Cambissolo Háplico com Substrato de Gnaisse (CXgn) e o Cambissolo Flúvico com substrato de sedimentos do quaternário (CYsq). Cabe destacar que os Gleissolos e os Solos Indiscriminados de Mangue foram ignorados quando realizada a classificação de unidades geotécnicas, pois na análise preliminar do mapeamento geotécnico identificou-se a impossibilidade de se coletar amostras e ensaiar a resistência dos mesmos, uma vez que o Gleissolo encontra-se totalmente urbanizado e o solo indiscriminado de mangue não oferece condições para a realização dos ensaios previstos por este trabalho.

Na BHRC verificou-se que a maior parte do recobrimento dos solos foram classificados como solos transportados, e assim como na BHRP estes se localizam nas áreas mais baixas e planas do relevo. De maneira oposta, a BHRP apresentou a maior parte do seu recobrimento ocupado pelos solos residuais, que de forma igualitária a BHRC se localizam nas áreas de maior altitude e inclinação do relevo.

As unidades geotécnicas identificadas em ambas bacias hidrográficas apresentaram granulometria fina e com textura argilosa e/ou siltosa. Com exceção do CYsq que não apresentou plasticidade e nem coesão para condição saturada, todos os outros solos foram classificados como plásticos e exibiram coesão saturada que variou entre 6,28 kPa e 11,77 kPa.

O solo CYsq também foi o único que apresentou ângulo de atrito superior a 32°, sendo que para todas as outras unidades o ângulo de atrito apresentou valores inferiores à 30°, considerando-se que o menor valor registrado foi para a unidade RLgn com 26,88°.

A densidade real dos grãos apresentadas pelos solos investigados assumiram valores que podem ser considerados altos para o sul do Brasil, uma vez que os valores apresentaram variação entre 2,908 e 2,723 g/cm³. Já o Limite de Liquidez dos solos residuais de Gnaisse

ficou próximo aos valores referenciados como típicos para os solos brasileiros por Pinto (2000) e variaram entre 57% e 54%.

Na classificação MCT verificou-se que RLgn e CYsq foram os únicos classificados como solo siltoso não laterítico, todos os demais apresentaram comportamento laterítico e foram classificados como solos argilosos. Estes solos também receberam classificação similar entre si no método da AASHTO, que classificou os solos CXgn, PVgn como A-7-6; o CXsq como A-7-5; o CYsq e o RLgn como A-4 e A-5, respectivamente.

Sobre a execução dos ensaios de cisalhamento do solo realizado em campo pelo método do *Borehole Shear Test*, pode-se verificar que o mesmo é capaz de ser executado com facilidade, agilidade e apresenta alta correlação entre os pontos de diferentes tensões confinantes. Vale ainda destacar, que mesmo quando foi executado em ponto diferente (mas sobre a mesma unidade geotécnica) o ensaio apontou valores similares de ângulo de atrito e coesão do solo para condição inundada.

Para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais identificou-se a elevada importância que o modelo SHALSTAB profere em função da inclinação do relevo. Cabe ainda destacar que o modelo SHALSTAB não é indicado para ser executado em áreas com acentuado índice de urbanização, entretanto este trabalho buscou reconhecer a fragilidade das áreas de relevo não habitadas (contidas na bacia) com finalidade de limitar a expansão urbana para as áreas que se apresentam como instáveis.

Na BHRC verificou-se que aproximadamente 98% da BHRC foi classificada em condição estável e mediamente estável. Quanto as unidades geotécnicas, verificou-se que o CXgn, RLgn e PVgn foram as unidades que mais ocuparam áreas em condição classificada como instável e mediamente instável no modelo SHALSTAB. Já os solos CXsq e CYsq se concentram nas áreas consideradas estáveis e mediamente estáveis.

O solo RLgn também se apresentou como sendo o de maior preocupação para a área da BHRP, uma vez que este se concentra prioritariamente nas áreas classificadas como instáveis e mediamente instáveis para os deslizamentos translacionais. Entretanto, os solos PVgn e CXsq se concentram prioritariamente nas regiões estáveis e mediamente estáveis.

Nos cálculos do fator de segurança, o modelo matemático e o *software* apresentaram bons resultados e identificaram que os solos apresentam inclinação crítica similares para taludes com FS de 1,5, 1,4 e 1,3. O solo RLgn foi que se manifestou como sendo o mais frágil quanto

a este modelo exibindo inclinação máxima de 13,50, 14,35 e 15,32 para obtenção do FS de 1,5, 1,4 e 1,3, respectivamente.

O mapeamento dos deslizamentos rotacionais apontou que aproximadamente 90% da área de BHRC foi classificada como sendo estável e mediamente estável. Já para BHRP aproximadamente 66% da área desta bacia manifestou-se como instável e mediamente instável. Quanto à preocupação de fragilidade das unidades geotécnicas, verificou-se que estas continuaram sendo as mesmas daquelas apresentadas no mapeamento de deslizamentos translacionais, havendo apenas o acréscimo do solo PVgn na BHRP que nesta metodologia se concentrou prioritariamente sobre a área considerada instável.

Para as duas bacias analisadas verificou-se que os deslizamentos rotacionais apresentaram resultados preponderantes ao mapeamento de áreas suscetíveis, ou seja, as áreas instáveis e estáveis praticamente mantiveram-se com a mesma área e as unidades geotécnicas permaneceram sob as mesmas condições de fragilidade.

Quanto aos dados obtidos perante a defesa civil Joinville/SC verificou-se uma significativa fragilidade do método para prevenção de fenômenos de deslizamentos ocorrentes em grandes centros urbanos como o da BHRC, uma vez que, a alteração do relevo promovida pela ação humana (cortes e terraceamentos) por vezes podem não ser identificadas pelo Modelo Digital do Terreno (MDT), principalmente quando tais alterações ocorrem em data posterior a confecção do MDT.

Entretanto, as cicatrizes mapeadas por este trabalho apontaram que os modelos de mapeamento realizados neste trabalho são válidos, uma vez que a maior parte das cicatrizes foram localizadas dentro das áreas consideradas como instáveis.

Além do mais, o modelo se mostrou útil para integrar as ferramentas de planejamento urbano da cidade Joinville/SC, visto que reconhecer a fragilidade de cada unidade geotécnica é fundamental para fomentar políticas públicas de uso e ocupação do solo e criar mecanismo de controle para que a expansão urbana evite ocupar as áreas consideradas por este trabalho como sendo instáveis e mediamente instáveis; e ainda contribuem como base para que a inclinação dos cortes (mesmo quando realizados em áreas de relevo suave ondulado) exijam estudos de engenharia mais detalhados para que se possa garantir a estabilidade destas áreas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver um método com critérios que seja capaz avaliar melhor as áreas instáveis no centro urbano de Joinville/SC;
- Correlacionar o comportamento dos líquidos nos solos com a finalidade de criar um mapa de riscos à deslizamento capaz de se pautar em dados pluviométricos, ou seja, desenvolver uma metodologia que permita identificar o limite máximo de precipitação que desencadeie eventos de deslizamento;
- Realizar maior número de ensaios para se usar análise estatística na caracterização das unidades geotécnicas, e não mais trabalhar com a classificação determinística;
- Acrescentar os ensaios de Varredura por Microscopia Eletrônica (MVE) e Difração de Raio-X, para identificar as características das partículas de solo;
- Conceber ensaio de eletrorresistividade, SPT e/ou DPL para o reconhecimento de solos em regiões mais profundas e estimar com mais clareza a profundidade do maciço rochoso;
- Usar outros métodos de investigação da resistência dos solos como o Cisalhamento Direto e o Triaxial, para promover uma comparação entre os resultados e proporcionar um olhar mais amplo para o comportamento físico de cada unidade geotécnica;
- Identificar cicatrizes de deslizamentos que ocorreram depois da data de confecção do MDT;
- Considerar aspectos relacionados a erodibilidade dos solos na fase de mapeamento;
- Investigar a possibilidade de uso variável de espessura de ruptura das unidades geotécnicas na confecção do mapa de deslizamentos translacionais.

REFERÊNCIAS

ABREU, Rodrigo Paulo de.; et al. **Comparação de Dois Métodos para a Determinação dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Solos**. *XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015. 8p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Monica_Oliveira18/publication/308634654_Comparacao_de_Dois_Metodos_para_a_Determinacao_dos_Parametros_de_Resistencia_ao_Cisalhamento_dos_Solos/links/57e9785608aef8bfcc961985.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2017.

ARTERIS, AUTOPISTA LITORAL SUL. **Riscos Geológico-Geotécnicos em Taludes Rodoviários: Desenvolvimento de uma Metodologia de Mapeamento e Gerenciamento Integrado de Informações para a BR-376, Trecho da Serra do Mar (PR-SC)**. 2015. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/12571/Relatorios_de_Pesquisa___RDT.html> Acesso em: 02 jul. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento**. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR7181 - Análise Granulométrica do Solo**. Rio de Janeiro - RJ, 2016. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 7180 - Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro - RJ, 2016. b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6459 - Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro - RJ, 2016. c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 11682**. Rio de Janeiro - RJ. 2009.

AUGUSTO FILHO, O. Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. USP - São Paulo, 1994.

BAGGIO, Sérgio Benjamin. Água Subterrânea em Joinville - SC - Avaliação hidrogeológica do aquífero fraturado. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-26092014-161652/>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

BENESSIUTI, Mariana F. Estudo dos mecanismos de instabilidade em solos residuais de biotita-gnaiss da bacia do Ribeirão Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2011.

BIM, Rodrigo. Mapa de susceptibilidade a movimento de massa da microbacia do Ribeirão das Pedras/SC determinado com ênfase na variação pluviométrica. UFSC, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/158890>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

BORA., Celso Felipe. Análise de Estabilidade de uma Encosta da Serra de Mar Paranaense: Influências da Consideração da Poropressão e do Fluxo em Meio Não Saturado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2015.

CALLE, José Antonio Cacino. Análise de ruptura de talude em solo não saturado. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas – fundações – obras de terra. 6ª Ed, Li ed. Rio de Janeiro - RJ, 1987.

CARAMEZ, Manolo Lima. Mapeamento Geotécnico da Microbacia do Itacorubi – Florianópolis/SC – Aplicação do Modelo SHALSTAB para a Confecção de Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Rasos de Encostas. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2017.

CARVALHO, A. P. P. **Mapeamento geoambiental do município de Delfinópolis-MG**. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2017.

CONORATH, Gabriel Daniel. **Águas Urbanas: Análise Morfométrica e Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - Joinville/SC**. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 2012. Disponível em: <<http://tede.udesc.br/bitstream/tede/1964/1/daniel.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

CORSI, Alessandra Cristina; PENHA, Marcela; GUIMARÃES, Pereira. **Comparação dos Mapas Obtidos pela Modelagem no Shalstab com as Cartas Geotécnica e de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundação**. XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas COBRAE 2017 -2 a 4 Novembro. ISBN 2594-9217-2017, p. 8, 2017. Disponível em: <<https://cobrae2017.websiteseuro.com/arearestrita/apresentacoes/63/4033.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CRUZ, Jamil Ferreira. **Reavaliação da Segurança da Barragem de Terra da Usina Hidrelétrica do Piauí**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas., Ouro Preto - MG, 2007.

DAVISON DIAS, R. **Proposta de uma Metodologia de Estudos Geotécnicos para Impantação de Rodovias, Estradas Rurais e Vicinais em Solos Brasileiros**. Anais da Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis, 2001.

DAVISON DIAS, Regina. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais**. Revista do Instituto Geológico, v. 16, n. special, p. 51-55, 1995. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0100-929X.19950011>>

DE ABREU, Ana Elisa Silva. **Mapeamento Geotécnico para Gestão Municipal - Abordagem Combinando Tres Métodos Distintos e sua Aplicação em Analandia (SP)**. São Carlos, p. 217, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-26032010-101623/>>. Acesso em: 3 fev. 2018.

DEMARTINO, Natalia Magalhães. Aplicação do modelo shalstab no mapeamento de deslizamentos rasos na sub-bacia do Rio Comprido - Joinville/SC. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 2016. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/78548283.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. **Prepared for publication as a technical report by NCASI**, 1998.

DNER 093/94, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Determinação da densidade real**. 1994.

EMBRAPA, Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuaria. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2006.

FERRAZ, Marcus Souza et al. **Predicação do Angulo de Resistencia ao Cisalhamento dos Solos via Programação Genética Gramatical**. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - RIPE, v. 2, n. 9, p. 162–181, 2017. Disponível em: <<http://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/23688/17012>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

FRANÇA JUNIOR, Romualdo Theophanes. **Levantamentos de Dados e Informações para Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Joinville**. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2002. Disponível em: <<file:///C:/Users/Diogo/Downloads/193963.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

FREITAS, Marco Antônio Coelho. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Universidade do Porto, Portugal, 2011. Disponível em: <<http://www.fe.up.pt>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

GODOI, Cesar Schmidt. **Caracterização Geomecânica de um Solo Residual de Gnaïsse**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2014. Disponível em: <https://www.academia.edu/7979388/CARACTERIZAÇÃO_GEOMECA_NICA_DE_UM_SOLO_RESIDUAL_DE_GNAISSE>. Acesso em: 9 mar. 2019.

GONÇALVES, Mônica Lopes. **Geologia para planejamento de uso e ocupação territorial do município de Joinville**. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-22062015-133432/>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

GUEDES, S. B.; COUTINHO, Roberto Quental; DA FONSECA, Antônio Viana. **Detalhes Sobre os Ensaios de Compressão Não Confinada e Tração por Compressão Diametral**. Revista Geotecnia, v. 136, n. 1, p. 127–142, 2016.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 2006.

HIGASHI, Rafael Reis. **Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do estado do Rio Grande do Sul**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, p. 155, 2002. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84205>>

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**. ed. Reston, Virginia, U.S, 2008. Disponível em: <https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Deslizamentos_M5DS_0.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª Edição ed. Brasília, 2007. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios**. 1. ed. Brasília/DF, 2007. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoErradicacao/Livro_Mapeamento_Enconstas_Margens.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2018.

JACOMINE, Paulo Klinger Tito. **A Nova Classificação Brasileira De Solos**. Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica. v. 5, n. 6, p. 161–179, 2013. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/19350/1/Jacomine.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2019.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 1969. Disponível em: <<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471511927.html>>

LAMBRECHTS, J. R. ...; RIXNER, J. J. Laboratory Shear Strength of Soil. **American Society for Testing and Materials**, v. 1, n. PCN 04-740000-38, p. 551–565, 1981.

LIMA, Gabriel Muniz de Araujo. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos por critérios topográficos : um estudo no alto da Bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar - SC**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/106783>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

LUTENEGGER, A. J.; HALLBERG, G. R. **Borehole Shear Test in Geotechnical Investigations**. American Society for Testing and Materials, p. 566–578, 1981. Disponível em: <<https://compass.astm.org/download/STP28771S.8420.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2018.

MARQUES, Ícaro Rodrigues et al. **Análise comparativa de resultados de ensaios de compressão triaxial com corpos de prova de diferentes dimensões**. Revista Tecnologia, v.35, n. 1/2, p. 66–77, 2016. Disponível em: <<http://periodicos.unifor.br/tec/article/view/4401>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

MELLO, Y. R.; SIMM, M.; VIEIRA, C. V. **Características Físicas da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Joinville (SC)**. Acta - Biológica Catarinense, 2017. Disponível em: <<file:///C:/Users/Diogo/Downloads/MELLOetal.2017.CaracteristicasfisicasdabaciahidrograficadRioCachoeira.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2018.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. Revista *Géotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

MÜLLER, Anaximandro Steckling. **Aplicabilidade de medidas não-estruturais no controle de cheias urbanas: estudo de caso Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - Joinville - SC**. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-05082011-145343/>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

MULLER, Cristiane Regina. **Avaliação de suscetibilidade a inundações utilizando geotecnologias para a bacia hidrográfica do Rio Cachoeira, Joinville, SC**. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Florianópolis/SC, 2012.

ODEBRECHT, Edgar et al.. **Acontecimentos e consequências. Atuação da ABMS e exemplo de um Laudo de Diagnóstico e sua aplicação em Joinville/SC**. ANAIS COBRAE, v. 1, p. 1–8, 2017. Disponível em: <http://www.adfiducia.com.br/artigos/20170301-134757_modelo-artigo-cobrae-2013----artigo---v3.pdf>. Acesso em: 28 maio. 2018.

OLIVEIRA, Therezinha Maria Novais; et al. **Bacias Hidrográficas da Região de Joinville: Gestão de Dados**. Joinville/SC, 2017. Disponível em: <https://www.univille.edu.br/account/editora/VirtualDisk.html/downloadDirect/1145899/Bacias_hidrograficas_2017.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2019.

PRIETO, Carla Corrêa et al. **Comparação entre a Aplicação do Modelo Shalstab com Mapas de Suscetibilidade e Riscos de Deslizamentos na Bacia do Córrego Piracuama em Campos do Jordão - SP**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, n. 1, 2017. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/1349/1079>>. Acesso em: 9 ago. 2018.

REGINATTO, GISELE MARILHA PEREIRA. **Caracterização de Movimentos de Massa na Bacia Hidrográfica de Rio Cunha, Rio dos Cedros – SC, co Ênfase em Escorregamentos Translacionais.** Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 2013.

SAKAMOTO, Miryan Yumi et al. **Uso do Método Borehole Shear Test no Mapeamento Geotécnico de Áreas de Risco.** 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2015. Disponível em: <<http://cbge2015.hospedagemdesites.ws/trabalhos/trabalhos/255.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2018.

SANTA CATARINA. **Atlas de Santa Catarina.** Florianópolis, 1987. Disponível em: <<http://www.spg.sc.gov.br/mapas/image/atlasv.jpg>>

SANTOS, Juliana Vieira Dos. **Aplicação de SIG para análise do perfil geológico-geotécnico do campus sede da UFSC e elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT.** Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/176668>>. Acesso em: 30 maio. 2018.

SBROGLIA, Regiane Mara; et al. **Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis.** XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas COBRAE 2017 -2 a 4 Novembro, v. 1, n. 2594-9217–2017, p. 8, 2017. Disponível em: <<https://cobrae2017.websiteseuro.com/arearestrita/apresentacoes/63/3878.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SBROGLIA, Regiane Mara. **Mapeamento Geotécnico e das Áreas Suscetíveis a Deslizamentos na Microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC.** Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 2015.

SILVA, João Paulo Moreira Da. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto - FEUP, Portugal, 2011.

SOUZA, André Monteiro Santos. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na bacia do Rio Camboriú**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 2015. a. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/133850>>

SOUZA, Leonardo Andrade De. **Cartografia geoambiental e cartografia geotécnica progressiva em diferentes escalas : aplicação na bacia hidrográfica do Ribeirão do Carmo, municípios de Ouro Preto e Mariana, Minas Gerais**. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto/MG, 2015b. Disponível em:
<<http://repositorio.ufop.br/handle/123456789/6495>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SUN, Guanhua et al. **A global procedure for stability analysis of slopes based on the Morgenstern-Price assumption and its applications**. Computers and Geotechnics, [s. l.], v. 80, p. 97–106, 2016. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X16301501?via%3Dihub>>. Acesso em: 30 mar. 2019.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela Do. **Desastres naturais: Por que ocorrem?** 1ª ed. São Paulo/SP, 2008. . Disponível em:
<<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

UBERTI, Antônio Ayrtton Auzani. **Estudos para a Elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental do Município de Joinville - Santa Catarina: Boletim Técnico do Levantamento da Cobertura Pedológica do Município de Joinville**. Joinville/SC, 2011. Disponível em:
<http://sistemaspmj.joinville.sc.gov.br/documentos_vivacidade/Mapa de Fragilidade Ambiental de Joinville/Boletins/Boletim Técnico do Município de JOINVILLE - RF.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2018.

UNESCO, IAEG. **Engineering Geological Maps. A Guide to Their Preparation.** Paris - França, 1976.

VICTORINO, Mariana Meza. **Influência da Chuva nas Poropressões e Estabilidade dos Taludes Rodoviários de um Trecho da BR 376 na Serra do Mar Paranaense.** Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba/PR, 2015.

ZUQUETTE, L. V. **A importância do mapeamento geotécnico no uso e na ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** Universidade de São Paulo USP - São Carlos/SP, 1993.