

Manolo Lima Caraméz

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DA MICROBACIA DO
ITACORUBI – FLORIANÓPOLIS/SC – APLICAÇÃO DO
MODELO *SHALSTAB* PARA A CONFECCÃO DE MAPA DE
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS DE
ENCOSTAS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto
dos Reis Higashi.

Florianópolis
2017

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

Caraméz, Manolo Lima

Mapeamento Geotécnico da Microbacia do Itacorubi – Florianópolis/SC – Aplicação do Modelo *SHALSTAB* para Confecção de Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Rasos de Encostas / Manolo Lima Caraméz; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi – Florianópolis, SC, 2017.

187 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Mapeamento Geotécnico. 3. Suscetibilidade a Deslizamentos de Encostas. 4. Microbacia do Itacorubi. 5. Modelo *SHALSTAB*. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Manolo Lima Caraméz

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DA MICROBACIA DO
ITACORUBI – FLORIANÓPOLIS/SC – APLICAÇÃO DO
MODELO *SHALSTAB* PARA A CONFEÇÃO DE MAPA DE
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS DE
ENCOSTAS**

Essa Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de "Mestre em Engenharia Civil", e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, 10 de Março de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -
PPGEC

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

Banca Examinadora:

Prof.º Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (participação por
videoconferência) – Universidade Federal de Santa Maria

Prof.ª Liseane Padilha Thives, Dr.ª
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Esse trabalho é dedicado a Aline
Aparecida Fernandes (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã, que sempre me apoiaram e incentivaram servindo de exemplo e motivação.

Ao meu orientador Prof.º Rafael Augusto dos Reis Higashi, que acompanha minha vida acadêmica desde a graduação, pela confiança, dedicação, compreensão, companheirismo, paciência e amizade. Eterno “Professor Higashi” a quem serei sempre grato.

Ao Prof.º Orlando Martini de Oliveira, pelo apoio e auxílio na utilização do equipamento *Borehole Shear Test*.

Aos colegas Caroline Christ, Regiane Sbroglia, Gisele Reginatto, Gabriel Bellina, Miryan Sakamoto e Mariana Lapa, do Laboratório de Mapeamento Geotécnico e Laboratório de Mecânica dos Solos, pelo auxílio fundamental na execução dos ensaios de campo, de laboratório e na utilização do *software* de SIG.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o meu convite e acrescentarem conhecimento e informações a essa dissertação.

Aos meus amigos, por compreenderem minha ausência em determinados momentos.

Aos meus colegas da Única Consultores, pelo incentivo, companheirismo, amizade e compreensão.

A todos aqueles que, embora não tenham sido citados, me auxiliaram de alguma forma na realização dessa dissertação.

*“The mystery of love is greater than the mystery
of death”*
(Oscar Wilde, 1906)

RESUMO

Os desastres naturais, associados a movimentos de massa, cada vez mais causam perdas sociais e econômicas no Brasil. O processo de ocupação urbana desordenada, especialmente em áreas de encostas, contribuem indubitavelmente agravando as consequências desses desastres. O conhecimento prévio das características dos solos nessas áreas é de grande importância ao definirem-se diretrizes de ocupação do solo, bem como políticas públicas e de conscientização da população. As análises de estabilidade de encostas por meio de simulações computacionais, o estudo científico dos universos geotécnicos das áreas de interesse, assim como o desenvolvimento de mapas geotécnicos permitem a correta caracterização dos solos. Dessa forma, a presente dissertação objetiva a caracterização dos universos geotécnicos da Microbacia do Itacorubi, situada na Ilha de Santa Catarina, o desenvolvimento de um banco de dados georreferenciado de ensaios geotécnicos e a confecção de mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos utilizando o modelo *SHALSTAB* (*Shallow Slope Stability Model*). Foram coletados dados preexistentes, como mapas e ensaios *SPT* (*Standard Penetration Test*) e realizados ensaios de cisalhamento de campo *BHST* (*Borehole Shear Test*) e laboratoriais, e desenvolvidos mapas geotécnicos e de suscetibilidade para a área de estudo. Como resultados foram gerados um banco de dados de ensaios geotécnicos, contemplando 32 ensaios *SPT* e 6 ensaios *BHST* com as respectivas caracterizações, um mapa geotécnico contemplando oito unidades geotécnicas e três mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos, para três tipos de fontes de parâmetros físicos e de resistência de solos distintos, onde foi possível estimar que a maior parte da área de estudo pode ser classificada como estável, de acordo com o modelo *SHALSTAB*.

Palavras-Chave: 1. Mapeamento Geotécnico 2. Suscetibilidade a deslizamentos de encostas 3. Microbacia do Itacorubi 4. Modelo *SHALSTAB*.

ABSTRACT

Natural disasters, associated with mass movements, increasingly cause social and economic losses in Brazil. Disorganized urban occupation, especially in natural sloping areas, contributes increase the consequences of these disasters. Previous knowledge of soil characteristics in these areas are important to define zones of land use, as well as public policies and population awareness. The slope stability analysis through computational simulations, the scientific study of the geotechnical universes of slope areas, as well as the development of geotechnical mapping, allow the correct characterization of the soils. Therefore, this dissertation aims to characterize the geotechnical universes of Itacorubi's Microbacia, located on Ilha de Santa Catarina, the development of a geo - referenced geotechnical testing database and the creation of a map of shallow landslides susceptibility using the SHALSTAB model (Shallow Slope Stability Model). In order to reach the objectives, there was collected pre-existing data, such as maps and SPT (Standard Penetration Test) tests. BHST (Borehole Shear Test) and laboratory soils tests were performed, and geotechnical maps and susceptibility maps were developed for the study area. As a result a geotechnical test database was generated, contemplating 32 SPT tests and 6 BHST tests with the respective characterizations. Also was developed a geotechnical map contemplating eight geotechnical units and three susceptibility maps to shallow landslides, for three types of physical parameter sources and resistance of different soils, where it was possible to estimate that most of the study area can be classified as stable, according to SHALSTAB model.

Keywords: 1. Geotechnical Mapping 2. Shallow Slope Landslide 3. Itacorubi watershed 4. SHALSTAB model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sobreposição de temas para criação de um mapa geotécnico preliminar	22
Figura 2 – Simbologia de unidades geotécnicas segundo Davison Dias <i>et al.</i> (1987).....	23
Figura 3 - Modelo de estabilidade de talude.....	31
Figura 4 – Zonas de estabilidade – Modelo <i>SHALSTAB</i>	33
Figura 5 – Modelo em planta e seção de área de drenagem	34
Figura 6 – Área de Contribuição da Bacia do Rio Cunha (relação “a/b”).....	37
Figura 7 – Relações de estabilidade de encostas (<i>Coos Bay – Oregon</i>).....	40
Figura 8 – Campos de relação de estabilidade - <i>SHALSTAB</i>	41
Figura 9 – Mapa de suscetibilidade <i>SHALSTAB</i> – Bacia do Alto Aricanduva (SP).....	43
Figura 10 – Classes de estabilidade de encostas com base no modelo <i>SHALSTAB</i> – Tubarão/SC.....	44
Figura 11 – Classes de estabilidade de encostas – Bacia do Rio Cunha/SC (<i>SHALSTAB</i>).....	45
Figura 12 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos da Bacia do Rio Cunha (<i>SHALSTAB</i>)	46
Figura 13 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos com base no modelo <i>SHALSTAB</i> do município de Antônio Carlos.....	47
Figura 14 – Mapa com as classes de estabilidade do <i>SHALSTAB</i> para $z=10m$ da Microbacia Ribeirão Baú.....	48
Figura 15 – Variação do teor de argila – Comparativo Krigagem e outros interpoladores	58
Figura 16 – Mapa de isolinhas da variável densidade (g/cm^3) ...	59
Figura 17 – Zoneamento do RQD na cota 150m. (esquerda) Krigagem ordinária (direita) equações multiquádricas	61
Figura 18 – Imagem equipamento <i>BHST</i> (esquerda) – Desenho esquemático (direita).....	64
Figura 19 – Envoltórias de ruptura – Umidade natural (esq.) – Estado inundado (dir.).....	69
Figura 20 – Ensaios de cisalhamento direto – Microbacia do Itacorubi	70
Figura 21 – Localização do município de Florianópolis	73
Figura 22 – Histograma de precipitações totais anuais – 1969 a 2010.....	75

Figura 23 – Vista parcial – Manguezal do Itacorubi	75
Figura 24 – Perfil altimétrico longitudinal de Florianópolis	77
Figura 25 - Fluxograma do método de trabalho	80
Figura 26 – Delimitação da Microbacia do Itacorubi.....	86
Figura 27 – Delimitação dos bairros da Microbacia do Itacorubi	87
Figura 28 – Mapa hidrográfico – Microbacia do Itacorubi	88
Figura 29 – Mapa altimétrico – Microbacia do Itacorubi.....	89
Figura 30 – Modelo digital do terreno (MDT) – Microbacia do Itacorubi.....	90
Figura 31 – Vista do MDT (perspectiva) – Microbacia do Itacorubi.....	91
Figura 32 – Mapa de declividades – Microbacia do Itacorubi ...	92
Figura 33 – Mapa de mancha urbana– Microbacia do Itacorubi	94
Figura 34 – Mapa geológico – Microbacia do Itacorubi	95
Figura 35 – Mapa litológico – Microbacia do Itacorubi.....	103
Figura 36 – Mapa pedológico – Microbacia do Itacorubi	104
Figura 37 – Equipamento <i>BHST</i> – Características e detalhes ..	112
Figura 38 – Topossequências típicas de Florianópolis/SC – Oeste da ilha.....	117
Figura 39 – Topossequências típicas de Tubarão/SC.....	117
Figura 40 – Localização das tradagens.....	118
Figura 41 – Mapa de solos residuais e sedimentares – Microbacia do Itacorubi	120
Figura 42 – Mapa geotécnico preliminar – Microbacia do Itacorubi.....	123
Figura 43 – Mapa Geotécnico Ajustado – Microbacia do Itacorubi.....	127
Figura 44 – Laudo de sondagem SPT-29	132
Figura 45 – Localização dos ensaios <i>BHST</i> – Microbacia do Itacorubi	140
Figura 46 – Envoltórias - Tensão Normal x Tensão Cisalhante – Ensaios <i>BHST</i>	146
Figura 47 – Localização dos ensaios de sondagens à percussão “ <i>SPT</i> ”	151
Figura 48 – Mapas de correlações paramétricas <i>SPT</i> – Microbacia do Itacorubi	155
Figura 49 – Mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – Correlações Paramétricas <i>SPT</i>	157

Figura 50 – Mapa de suscetibilidade e outros – Microbacia do Itacorubi	159
Figura 51 – Residências em áreas instáveis – Morro da Cruz..	161
Figura 52 – Mapas de parâmetros de resistência dos ensaios <i>BHST</i> – Microbacia do Itacorubi.....	162
Figura 53 – Mapas de suscetibilidade à deslizamentos rasos – Ensaio <i>BHST</i>	165
Figura 54 – Mapas de suscetibilidade <i>BHST</i> e outros – Microbacia do Itacorubi	167
Figura 55 – Residências em áreas instáveis – <i>BHST</i> (estado natural)	169
Figura 56 – Residências em áreas instáveis – <i>BHST</i> (estado inundado).....	170
Figura 57 – Residências em áreas instáveis – Morro da Cruz..	170
Figura 58 – Residências em áreas instáveis – Morro da Carvoeira	171
Figura 59 – Residências em áreas instáveis – Morro do Itacorubi	171

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados do mapa de Suscetibilidade à deslizamentos rasos – <i>SPT</i>	158
Gráfico 2 – Resultados do mapa de suscetibilidade – <i>BHST</i> (natural).....	164
Gráfico 3 – Resultados do mapa de suscetibilidade – <i>BHST</i> (inundado).....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conversão "T/q", "q/T" e "log(q/T)"	37
Tabela 2 - Condições de estabilidade – modelo <i>SHALSTAB</i>	42
Tabela 3 – Resumo dos resultados de ensaio <i>BHST</i> – dois operadores distintos.....	65
Tabela 4 – Resumo dos resultados de ensaio <i>BHST</i> – operadores inexperientes	65
Tabela 5 – Comparação resultados <i>BHST</i> e Cisalhamento Direto	67
Tabela 6 - Resultados de parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	68
Tabela 7 – Resultados do ensaio <i>BHST</i> – Narayana Massocco (2015).....	72
Tabela 8 – Parâmetros de resistência dos solos – Narayana Massocco (2015).....	72
Tabela 9 – Resultados do ensaio <i>BHST</i> – ECV/UFSC	72
Tabela 10 - Fases de relevo – Microbacia do Itacorubi.....	92
Tabela 11 - Análise espacial do Mapa Geológico – Microbacia do Itacorubi	96
Tabela 12 - Análise espacial do Mapa Litológico – Microbacia do Itacorubi	102
Tabela 13 - Análise espacial do Mapa Pedológico – Microbacia do Itacorubi	104
Tabela 14 – Análise das tradagens	119
Tabela 15 – Características básicas das unidades geotécnicas .	129
Tabela 16 – Resultados das correlações paramétricas (<i>SPT</i>) por unidade geotécnica.....	130
Tabela 17 – Resultados dos ensaios <i>BHST</i> e caracterização por unidade geotécnica.....	130
Tabela 18 – Características gerais dos ensaios <i>BHST</i> – Microbacia do Itacorubi.....	140
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de umidade natural e granulometria	142
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de densidade, limites de Atterberg e MCT.....	142
Tabela 21 – Resultados dos ensaios <i>BHST</i> – Microbacia do Itacorubi	143
Tabela 22 – Resumo dos resultados dos ensaios <i>BHST</i> – Microbacia do Itacorubi	148

Tabela 23 - Dados básicos – Laudos de sondagens “ <i>SPT</i> ”.....	149
Tabela 24 – Parâmetros de solos estimados – Laudos “ <i>SPT</i> ” – Microbacia do Itacorubi.....	152
Tabela 25 – Resultados do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – Correlações Paramétricas <i>SPT</i>	158
Tabela 26 – Resultados do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – <i>BHST</i> (natural).....	164
Tabela 27 – Resultados do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – <i>BHST</i> (inundado).....	165

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento do mapeamento geotécnico.....	7
Quadro 2 – Classificação de Cartas Geotécnicas e seus conceitos	15
Quadro 3 – Metodologias de Mapeamento Geotécnico.....	17
Quadro 4 – Simbologia simplificada das classes pedológicas....	23
Quadro 5 – Identificação de espessura de horizonte.....	24
Quadro 6 – Simbologia simplificada das classes geológicas.....	24
Quadro 7 – Referências de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas	25
Quadro 8 – Indicações de uso e restrições do interpolador Krigagem.....	55
Quadro 9 – Dados de localização – Ensaio de cisalhamento direto e <i>BHST</i>	70
Quadro 10 – Coluna estratigráfica da ilha de Santa Catarina	78
Quadro 11 – Fontes cartográficas utilizadas.....	82
Quadro 12 – Unidades litológicas – Microbacia do Itacorubi..	101
Quadro 13 – Unidades geotécnicas – Mapa geotécnico preliminar	124
Quadro 14 – Unidades Geotécnicas – Mapa Geotécnico Ajustado	128

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

<i>ASTM</i>	<i>American Society for Test and Materials</i>
<i>BHST</i>	<i>Borehole Shear Test</i>
CD	Cisalhamento Direto
Cgi	Cambissolo substrato granito ilha
Cgt	Cambissolo substrato granito itacorubi
EDF	Enxame de Diques Florianópolis
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
Gsq	Glei substrato sedimentos quaternários
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Ilha de Santa Catarina
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compacta Tropical
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
ONU	Organização das Nações Unidas
PMF	Prefeitura Municipal de Florianópolis
PVgi	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito ilha
PVgt	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito itacorubi
Rgi	Solos Litólicos substrato granito ilha
Rgt	Solos Litólicos substrato granito itacorubi
<i>RQD</i>	<i>Rock Quality Designation</i>
SBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
<i>SHALSTAB</i>	<i>Shallow Slope Stability Model</i>

SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SMsq	Solos Indiscriminados de Mangues substrato sedimentos quaternários
<i>SPT</i>	<i>Standard Penetration Test</i>
<i>UNESCO</i>	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
1.1.1	Objetivo geral	5
1.1.2	Objetivos específicos	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	7
2.1.1	Banco de dados geotécnicos	10
2.1.2	Definições.....	13
2.1.3	Metodologias de mapeamento geotécnico.....	16
2.1.4	Aplicações de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas	25
2.2	MODELO SHALSTAB.....	29
2.2.1	Modelo de estabilidade de encostas.....	29
2.2.2	Modelo hidrológico	33
2.2.3	Combinação do modelo hidrológico e modelo de estabilidade de encostas	38
2.3	GEOESTATÍSTICA	49
2.3.1	Variáveis regionalizadas	51
2.3.2	Interpolação geoestatística por Krigagem.....	53
2.3.3	Aplicações de Krigagem em geotecnia.....	56
2.4	CISALHAMENTO DE CAMPO – BOREHOLE SHEAR TEST (BHST)	63
2.4.1	Ensaio <i>BHST</i> na microbacia do Itacorubi	67
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	73
3.1	LOCALIZAÇÃO	73
3.2	CLIMA E COBERTURA DO SOLO	74
3.3	GEOMORFOLOGIA E RELEVO	75
3.4	GEOLOGIA.....	77
4	MATERIAIS E MÉTODO	79
4.1	DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO....	80
4.2	AQUISIÇÃO E EDIÇÃO DOS DADOS PREEXISTENTES	81
4.2.1	Revisão bibliográfica.....	81
4.2.2	Mapas	81
4.2.3	Ensaio de campo e laboratoriais.....	111
4.3	MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR.....	116
4.4	CARACTERIZAÇÃO EM CAMPO (TRADAGENS)	
4.5	MAPA GEOTÉCNICO AJUSTADO.....	120

4.6	ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS SOLOS	120
4.6.1	Krigagem (geoestatística)	121
4.7	SIMULAÇÃO NO MODELO <i>SHALSTAB</i>	122
4.8	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	122
4.9	CONCLUSÕES / SUGESTÕES	122
5	RESULTADOS	123
5.1	MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR	123
5.2	MAPA GEOTÉCNICO AJUSTADO	126
5.2.1	Cgi – Cambissolo substrato granito ilha	131
5.2.2	Gsq – Glei substrato sedimentos quaternários	133
5.2.3	PVgi – Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito ilha	134
5.2.4	Cgt – Cambissolo substrato granito itacorubi	135
5.2.5	SMsq – Solos Indiscriminados de Mangue substrato sedimentos quaternários	136
5.2.6	PVgt – Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito itacorubi	137
5.2.7	Rgi – Solos Litólicos substrato granito ilha	138
5.2.8	Rgt – Solos Litólicos substrato granito Itacorubi	139
5.3	ENSAIOS GEOTÉCNICOS	139
5.3.1	Caracterização dos solos	139
5.3.2	Borehole Shear Test – BHST	143
5.3.3	Correlações paramétricas – Sondagens à percussão	148
<i>SPT</i>		
5.4	APLICAÇÃO DO MODELO <i>SHALSTAB</i>	154
5.4.1	Mapa de suscetibilidade – correlações paramétricas	154
<i>SPT</i>		
5.4.2	Mapa de suscetibilidade – ensaios <i>BHST</i>	161
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	172
6.1	CONCLUSÕES	172
6.2	SUGESTÕES	174
	REFERÊNCIAS	175

1 INTRODUÇÃO

O processo de expansão dos centros urbanos pode ocorrer, basicamente, de duas formas distintas. A primeira, e mais adequada, utiliza o planejamento como ferramenta fundamental para o desenvolvimento, tendo como insumos dados físicos, sociais e econômicos como diretrizes para estimar o acréscimo populacional e os recursos necessários para atender esse crescimento.

Entretanto, frequentemente tais diretrizes não são analisadas, induzindo então à segunda forma de expansão urbana, o crescimento desordenado. Sem o conhecimento sólido do meio físico e social, torna-se muito mais complexa a compreensão da realidade cotidiana, inviabilizando projeções futuras, as quais podem suscitar soluções em longo prazo para os problemas contemporâneos.

Nesse contexto, o município de Florianópolis, capital do Estado de Santa Catarina, experimenta, desde a sua fundação, em 23 de março de 1736, um crescimento urbano desordenado na grande maioria de seus distritos e bairros. Os efeitos provenientes dessa ocupação tornam-se evidentes nos problemas relacionados à insuficiência das redes de infraestrutura urbana, desrespeito às áreas de ecossistema frágil, uso e ocupação do solo influenciados pela especulação imobiliária, gargalos de mobilidade urbana, entre outros.

Segundo relatório divulgado pela Organização das Nações Unidas (ONU) no ano de 2013, Florianópolis foi classificada como a capital brasileira com maior índice de desenvolvimento humano (IDHM = 0,847). É a segunda cidade mais populosa do estado, com uma economia alicerçada nos setores de tecnologia, comércio, prestação de serviços, turismo e construção civil.

No ano de 2000, Florianópolis apresentava uma população de 342.315 habitantes. Em 2010 esse número foi acrescido para 421.240 habitantes, com projeção de 477.798 habitantes em 2016. Para o período compreendido entre os anos de 2000 a 2016, a cidade experimentou um aumento populacional estimado da ordem de 39,6%, a uma taxa média de 2,5% ao ano (IBGE, 2016).

Paralelamente a esse aumento populacional, houve o surgimento de ocupações em áreas de risco de deslizamento de encostas. Tais ocupações são comumente utilizadas para fins habitacionais, sem infraestrutura adequada, concentrando pessoas nessas áreas de risco.

De forma a conter essas ocupações e disciplinar o crescimento urbano, foi criada a Lei Federal 10.257/2001 (BRASIL, 2001), denominada “Estatuto da Cidade”, a qual dispõe:

Art. 41. O plano diretor é obrigatório para cidades:

I – com mais de vinte mil habitantes;

II – integrantes de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas;

III – onde o Poder Público municipal pretenda utilizar os instrumentos previstos no § 4o do art. 182 da Constituição Federal;

IV – integrantes de áreas de especial interesse turístico;

V – inseridas na área de influência de empreendimentos ou atividades com significativo impacto ambiental de âmbito regional ou nacional.

VI - incluídas no cadastro nacional de Municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

Como exemplo das consequências das gestões não consoantes às diretrizes do “Estatuto de Cidade”, em novembro de 2008 ocorreram diversos desastres naturais no estado de Santa Catarina, a grande maioria, caracterizados como deslizamentos de encostas. Segundo dados da Secretaria de Estado da Defesa Civil de Santa Catarina, foram confirmados 135 óbitos e 2 desaparecimentos, sendo que mais de 97% das mortes foram causadas por soterramentos.

Esses desastres foram associados a um volume anormal de precipitação pluviométrica, muito superior aos apresentados pela média histórica, o que ocasionou a saturação do solo, propiciando os deslizamentos. Ressalta-se que as perdas humanas, ambientais e econômicas foram majoradas pelo uso e ocupação indevidos de diversas áreas atingidas, tanto em zonas rurais quanto urbanas (BRASIL, 2009).

Segundo dados da Defesa Civil Municipal de Florianópolis, no ano de 2009, 29% das ocorrências atendidas foram caracterizadas como deslizamentos de solos, totalizando 252 chamados no município. Em áreas de encostas, como o Maciço do Morro da Cruz, esses valores chegam a 43% do total de ocorrências. Essas são associadas a grandes volumes de precipitação pluviométrica, apresentando-se em sua maioria durante os meses mais chuvosos. Isso ocorre uma vez que a infiltração e preenchimento dos vazios dos solos por água induz a uma alteração nas características e parâmetros dos mesmos.

Tendo em vista a alteração dos parâmetros físicos e de resistência dos solos em função dos efeitos das chuvas, é primordial caracterizar os solos por meio de ensaios laboratoriais e de campo, obtendo-se resultados imprescindíveis para um estudo geotécnico confiável, com credibilidade para uso na elaboração de um banco de dados geotécnicos e mapas de suscetibilidade à deslizamentos, auxiliando o planejamento público de uso e ocupação do solo e a implantação de políticas públicas de conscientização da população.

Possuindo essas informações, ao elaborar o planejamento de um município os gestores públicos devem considerar as limitações do meio físico quanto ao seu uso e ocupação, procurando compatibilizá-lo com o crescimento urbano, bem como considerar a existência de locais que estejam sujeitos a riscos naturais ou induzidos pela possível ocupação. A análise multidisciplinar desses fatores pode vir a produzir uma quantidade ampla de informações tornando tais análises como tarefas demasiadamente complexas.

De forma a simplificar as análises territoriais, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilitam a integração de informações gráficas e dados em um único ambiente computacional, permitindo uma análise mais rápida, clara e completa de problemas que envolvem um ambiente espacial e parâmetros pontuais de caracterização do mesmo.

Por meio de recursos gráficos, capacidade de armazenamento, facilidade de acesso e compartilhamento de dados, rapidez na execução de correções e flexibilidade no uso de computadores, os mapas digitais tornam-se muito mais atraentes e dinâmicos que os mapas impressos, de formato único, que necessitam de espaço físico para armazenamento, sem possibilidade de manipulação de dados e estando ainda suscetíveis à degradação.

Utilizando *softwares* de edição de SIG, é possível, então, dispor áreas associadas a dados geotécnicos georreferenciados. Tais dados podem ser referentes à pedologia, geologia, litologia, características das amostras de sondagem, declividade do terreno, nível do lençol freático, parâmetros físicos e de resistência, estimativas de unidades geotécnicas, entre outros.

Atualmente muitos estudos em ambiente SIG vêm sendo desenvolvidos por órgãos governamentais, como os Ministérios das Cidades e da Integração Nacional. Tais estudos referem-se à elaboração de mapas geotécnicos. Pesquisas nessa área fomentam o desenvolvimento e conhecimento no meio acadêmico, resultando em

trabalhos relacionados ao bem estar da sociedade e ocupação racional do solo.

Dessa forma, o presente estudo propõe uma caracterização dos solos e o gerenciamento dos dados em ambiente SIG para a Microbacia do Itacorubi, uma das principais e mais urbanizadas do município de Florianópolis. Como objetivos específicos, propõe-se a criação de mapas temáticos em ambiente SIG caracterizando geotecnicamente quanto à suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas os solos da área de estudo, auxiliando na gestão municipal de planejamento multidisciplinar, provendo benefícios sociais, ambientais e econômicos para a sociedade.

Como limitações desse estudo, salienta-se a quantidade de ensaios geotécnicos e inspeções de campo realizadas, havendo a necessidade de ampliação dessas investigações, de forma a permitir uma melhor caracterização e delimitação dos universos geotécnicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Essa dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento de mapas geotécnicos e de suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas para a Microbacia do Itacorubi.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dessa dissertação são:

- Caracterizar os solos da área de estudo e estimar seus respectivos parâmetros de resistência, por meio de ensaios laboratoriais (caracterização) e de campo (*Borehole Shear Test* e *SPT*), georreferenciando-os em ambiente SIG;
- Espacializar os parâmetros pontuais dos solos, extrapolando-os para toda a área de estudo por meio do método da Krigagem;
- Obter o Modelo Digital do Terreno – MDT – e respectivo mapa de declividades da área de estudo;
- Estimar a cota de transição entre solos residuais e sedimentares realizando tradagens simples, complementadas por classificação tátil-visual, individualizando os universos geotécnicos da área de estudo;
- Desenvolver um mapa geotécnico preliminar em ambiente SIG, baseado na metodologia utilizada no Sul do Brasil, proposta por Davison Dias (1995) e na metodologia de mapeamento de regiões costeiras, de Higashi (2006);
- Gerar um mapa geotécnico ajustado a partir do preliminar, conforme as observações de campo e resultados dos ensaios geotécnicos;
- Obter mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos da área de estudo por meio do modelo *SHALSTAB*;
- Atribuir aos mapas de suscetibilidade, classificação visual relativa à estabilidade, conforme graduação de cores;
- Comparar o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas e o mapa geotécnico com os demais mapas gerados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Conforme IAEG-UNESCO (1976), um 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.

Segundo Zuquette e Nakazawa (1998) o mapeamento geotécnico evoluiu a partir da integração de vários procedimentos. O surgimento de novas técnicas de mapeamento ajuda no enriquecimento do seu conteúdo e representação. O Quadro 1 descreve os principais procedimentos.

Quadro 1 - Principais trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento do mapeamento geotécnico

Procedimentos	Ano	Local	Descrição
Método de Moldenhawer	1919	Vila de Dantzig	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 Streme	1932	*ND	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.

Quadro 1 - Principais trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento do mapeamento geotécnico (continuação)

Procedimentos	Ano	Local	Descrição
Esquema de Muller	1938	Comunidade de Mark	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	Região de Ulm	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	Vila de Gotturgen	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	Vila de Stuttgart	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.

Quadro 1 - Principais trabalhos que auxiliaram no desenvolvimento do mapeamento geotécnico (continuação)

Procedimentos	Ano	Local	Descrição
Sistema de Graupner	*ND	*ND	Sistema composto por três pares de cartas e fichas, sendo que cada par foi usado para um fator, tendo Graupner adotado escalas em torno de 1:10.000, no estágio de reconhecimento e 1:1.000, na solução de problemas específicos.
Método de Quadran (quadrante)	1956	Freiberg - Escola Superior de Minas	Suas divisões referem-se às variações de diversas características do meio físico, tais como espessura ou profundidade do nível d'água, sendo proposto por Wawser, Rieger e Hille.

Nota: *ND – Não Definido - Fonte: Zuquette (1993)

Conforme Zuquette (1993) o mapeamento geotécnico, no sentido restrito, surgiu por volta de 1913 quando Langen apresentou alguns documentos gráficos durante a feira de construção de Leipzig na Alemanha. Estes documentos eram constituídos por um conjunto de plantas anexadas aos projetos de desenvolvimento de algumas cidades alemãs, que tinham como intuito demarcar, por meio de cores e símbolos, as áreas inundáveis, a variação do lençol freático e as áreas de exploração de materiais para construção civil.

A história do mapeamento geotécnico no Brasil, apesar de tratar-se apenas de um mapa geológico, iniciou em 1907 com o primeiro documento de geologia aplicada as obras de engenharia, referindo-se ao prolongamento da Estrada de Ferro Nordeste do Brasil. A partir destas pesquisas, pioneiras no mapeamento geotécnico, outros pesquisadores desenvolveram metodologias diversas para tentar mapear, compreender e mensurar o comportamento geomecânico dos solos (HIGASHI, 2002).

O desenvolvimento de um mapeamento geotécnico é conduzido conforme diretrizes e objetivos específicos para cada

caso em estudo, dessa forma existem várias definições para conceituá-lo. Tais definições são inerentes à metodologia e proposta de estudo adotados, podendo um mapa geotécnico ser desde uma simples carta de áreas alagadiças, até um complexo mapa digital formado a partir de informações interdisciplinares associadas a um sólido banco de dados geotécnicos espacial.

2.1.1 Banco de dados geotécnicos

Para a confecção de um mapa geotécnico é necessária a obtenção de inúmeras informações geográficas, alfanuméricas, imagens, dados de ensaios de campo e ou laboratório, entre outros. Com o propósito de armazenar tais informações de forma organizada e prática, é recomendável utilizar-se um Sistema de Banco de Dados em ambiente computacional.

Date (2004) define os bancos de dados como um método moderno de armazenamento e organização das informações ou certo número de arquivos referentes a uma determinada área de aplicação, seja um conjunto de aplicações circundando um conjunto de dados, ou ainda, um sistema computadorizado que guarda registros com objetivo geral de armazenar, manter e tornar a informação disponível aos diversos usos.

O mesmo autor lista, de forma genérica, algumas vantagens da utilização de um banco de dados computacional.

- Densidade: nos dias de hoje não há necessidade de produção de arquivos de papel, comumente volumosos;
- Velocidade: as consultas podem ser respondidas com rapidez sem qualquer necessidade de pesquisas manuais ou visuais demoradas;
- Dados atualizados: informações precisas e atualizadas estão disponíveis a qualquer momento sob consulta;
- Dados compartilhados: o compartilhamento significa não apenas que as aplicações existentes podem compartilhar os dados do banco de dados, mas também que podem ser desenvolvidas novas aplicações para operar sobre os mesmos dados;
- Atualização: facilidade de inclusão e atualização de dados continuamente.

Com relação às informações que são adicionadas ao banco de dados, é necessário haver um controle das mesmas, garantindo-se sempre sua qualidade e acurácia. Tais informações devem estar presentes, também, em número razoável de forma a torná-las representativas.

Para que o acesso seja facilitado, o banco de dados está geralmente associado a um SIG. Dessa forma, a mescla de dados, resultados e geração de gráficos e planilhas possibilitam uma maior liberdade e rapidez na análise e busca de resultados e correlações gráficas.

As principais estruturas dos bancos de dados modernos são do tipo hierárquica, relacional e em rede. O Sistema Gerenciador de Banco de Dados – SGBD – abrange um conjunto de módulos de programas que respondem pela organização, armazenamento, acesso, segurança e integridade das informações, atuando como interface entre os usuários, os programas de aplicação e os sistemas operacionais (BASTOS, 2005).

O banco de dados em modelo relacional representa os dados e os relacionamentos por um conjunto de tabelas, cada uma com um número de colunas e nomes únicos. O modelo relacional difere do modelo de rede e hierárquico no que diz respeito ao uso de ponteiros ou elos, uma vez que os modelos relacionais recorrem a ligação lógica, que corresponde a intersecção entre as linhas (registros) e as colunas (campos) das tabelas. Atualmente, os sistemas de gerenciamento de bancos de dados estruturam-se à base do modelo relacional.

O modelo relacional é um dos mais utilizados no armazenamento de informações. Date (2004) caracteriza esse modelo como um sistema em que, no mínimo, os dados são vistos pelo usuário como tabelas que realizam operações do tipo seleção (restrição), projeção e junção. Setzer e Silva (2005) também definem um modelo relacional como aquele onde os dados são representados por tabelas de valores, denominadas de relação, são bidimensionais e organizadas em linhas e colunas.

Diversos estudos de estruturação de Bancos de Dados Geotécnicos já foram efetuados no sul do Brasil, por exemplo:

- Um banco de dados por meio de geoprocessamento para a elaboração de mapas geotécnicos, tendo como objetivo a análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana da cidade de Porto Alegre foi realizado por Valente (1999);

- Guaresi e Teixeira (2001) desenvolveram um banco de dados de ensaios de campo *SPT* do município de Tubarão, em Santa Catarina, para uma melhor caracterização dos tipos de solos existentes na região;
- Maceno e Soares (2001) realizaram um estudo de fundações baseado em sondagens *SPT* realizadas nos terminais de integração de Florianópolis, onde um banco de dados contendo resultados de perfis de solos foi apresentado;
- Higashi (2002) estruturou um banco de dados geotécnicos com a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) no mapeamento geotécnico do Norte do Rio Grande do Sul;
- França (2002) elaborou um mapeamento geotécnico da área urbana do município de Joinville, em Santa Catarina, dispondo dados de levantamentos pedológicos e litológicos, bem como ensaios laboratoriais em um banco de dados associado a um SIG;
- Wosniak e Wendler (2002) cadastraram e localizaram no mapa digital de Curitiba, informações de 115 terrenos, compreendendo um total de 304 laudos de sondagem do tipo *SPT* (*Standard Penetration Test*) compondo um banco de dados geotécnicos;
- Higashi (2006) utilizou o gerenciamento de um banco de dados geotécnicos (dados de ensaios *SPT*, ensaios laboratoriais e de campo) para análise de planejamento urbano do município de Tubarão, em Santa Catarina;
- Bastos *et al.* (2007) confeccionaram um banco de dados contendo unidades geotécnicas e dados de ensaios de campo e laboratoriais produzidos de modo a compor um mapeamento geotécnico da planície costeira do estado do Rio Grande do Sul;
- Mafra Jr. (2007) desenvolveu um mapa preliminar de unidades geotécnicas para o município de Brusque-SC, associando-se a este um banco de dados geotécnicos, permitindo estimativa de comportamento geotécnico das unidades obtidas;
- Miranda (2008) criou um banco de dados geotécnicos com informações geológicas e pedológicas, laudos de

sondagens do tipo *SPT*, dados de granulometria de jazidas e material fotográfico para a obra de duplicação da BR-101, entre os municípios de Osório a Torres, no Rio Grande do Sul;

- Cardoso e Medeiros (2011) desenvolveram um mapa de suscetibilidade à deslizamentos de encostas em uma localidade no litoral de Santa Catarina. Para tal, produziram um banco de dados georreferenciados de ensaios geotécnicos, compreendendo ensaios de caracterização física das amostras, miniatura compacta tropical (MCT), cisalhamento direto e permeabilidade.

No presente estudo, o sistema de banco de dados utilizado é incorporado, na mesma plataforma, em *software* de SIG, permitindo uma unificação dos dados e manipulação dos mapas.

2.1.2 Definições

O produto final de uma atividade de mapeamento geotécnico, independente dos objetivos e metodologia adotada, refere-se a um mapa geotécnico, ou carta geotécnica. Nos parágrafos seguintes são abordadas algumas definições para esses.

A carta geotécnica envolve, necessariamente, a interpretação na definição dos limites espaciais de determinados atributos, ou características, do meio físico geológico, de acordo com o objetivo proposto pelo estudo, independente da escala de representação cartográfica escolhida. Diversos autores afirmam, ainda, que a elaboração de uma carta geotécnica pressupõe um toque pessoal e subjetivo, de acordo com a formação profissional do elaborador, ou equipe técnica, e de sua experiência e competência técnica. Nesse sentido, as cartas geotécnicas elaboradas por diferentes autores, embora com os mesmos objetivos, nas mesmas áreas físicas e escalas, e em idênticas condições de trabalho, podem perfeitamente resultar em produtos diferentes (CERRI *et al.*, 1996).

Conforme IAEG-UNESCO (1976), os princípios de classificação de rochas e solos para formar um mapa geotécnico são os seguintes: tipo geotécnico, tipo litológico, complexo litológico e sequência litológica.

O tipo geotécnico (ET – *engineering geological type*) tem o mais alto grau de homogeneidade física. O mesmo requer

uniformidade nos caracteres litológicos e no estado físico. Essas unidades podem ser caracterizadas pelos valores obtidos estatisticamente e derivados das determinações individuais das propriedades físicas e mecânicas e são, geralmente, mostrados nos mapas de grande escala (1:10.000 ou maiores).

O tipo litológico (LT – *lithological type*) é homogêneo na composição, textura e estrutura, mas usualmente não é uniforme no estado físico. Valores confiáveis da média das propriedades mecânicas não podem ser atribuídos à unidade por completo; geralmente somente uma estimativa geral das propriedades de engenharia, como uma faixa de valores, pode ser apresentada. Essas unidades são usadas em mapas de grande escala e, onde for possível, em mapas de média escala.

O complexo litológico (LC – *lithological complex*) compreende um conjunto de tipos litológicos relacionados e desenvolvidos sob condições paleogeográficas e geotectônicas específicas. Dentro de um complexo litológico, o arranjo espacial dos tipos litológicos é uniforme e distintivo para aquele complexo, mas o complexo litológico não é, necessariamente, uniforme no caráter litológico ou estado físico. Consequentemente, não é possível definir as propriedades físicas e mecânicas de todo complexo litológico, mas somente dos dados dos tipos litológicos individuais que compõem o complexo, indicando o comportamento geral do complexo litológico como um todo. O complexo litológico é usado como unidade de mapeamento em mapas de média escala (1:10.000 a 1:100.000) e em alguns de pequena escala.

A sequência litológica (LS – *lithological suite*) compreende muitos complexos litológicos e se desenvolve sob condições geralmente similares, paleogeográficas e tectônicas. Essas unidades somente são usadas em mapas de pequena escala (menores que 1:100.000).

Correspondências aproximadas: Tipo geotécnico – camada; Tipo litológico – membro; Complexo litológico – formação; Sequências litológicas – grupo.

Prandini *et al.* (1992) definem a cartografia geotécnica como sendo uma ferramenta de aplicação do conhecimento, que congrega métodos e técnicas numa investigação que procura estabelecer unidades territoriais homogêneas, quanto a problemas manifestos ou potenciais, além de formular orientações técnicas

para a ocupação de cada uma destas unidades. Trata-se de um trabalho multi e interdisciplinar, que envolve geologia de engenharia, pedologia, engenharia civil, arquitetura e urbanismo, climatologia, entre outros.

Ainda quanto às definições relacionadas à urbanização, o mapa geotécnico é um instrumento de gestão territorial, na medida em que estabelece um zoneamento do solo, subdividindo-o em unidades diferenciadas, segundo critérios relativos ao meio físico. Cada unidade geotécnica requer um tratamento específico para seu uso, visando evitar problemas decorrentes da ocupação inadequada, aproveitar melhor suas características e gerar um desenvolvimento sustentado do meio físico (SANTOS, 1997).

Zuquette e Nakazawa (1998) abordam que os termos cartografia e mapeamento geotécnico são encontrados muitas vezes como similares, em função da influência de duas correntes de trabalho distintas: a da língua francesa, derivada do termo “*Cartographie Geotechnique*” e a da língua inglesa, “*Engineering Geological Mapping*”. Wolski *et al.* (1998) diferenciam estas terminologias na medida em que compreendem o mapeamento geotécnico como o processo que abrange todos os procedimentos necessários para a obtenção da carta geotécnica por meio de investigação dos atributos (obtenção das informações e dados geotécnicos) e cartografia geotécnica como a representação gráfica dos produtos do mapeamento.

Bittar, Cerri e Nakazawa (1992) visando estudos de uso do solo urbano, identificam quatro tipos principais de cartas geotécnicas e apresentam seus conceitos através do Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação de Cartas Geotécnicas e seus conceitos

Tipo	Conceito
Cartas Geotécnicas Dirigidas	A partir da identificação de problemas de natureza geológico-geotécnica decorrentes do uso do solo, expõem as limitações e potencialidades dos terrenos.
Cartas Geotécnicas Convencionais	Apresentam a distribuição geográfica das características dos terrenos, a partir de atributos do meio físico, muitas vezes sem considerar as interações existentes entre o meio físico e as diferentes formas de uso urbano do solo.

**Quadro 2 – Classificação de Cartas Geotécnicas e seus conceitos
(continuação)**

Tipo	Conceito
Cartas de Suscetibilidade	Indicam a potencialidade de ocorrência de processos geológicos naturais e induzidos em áreas de interesse ao uso urbano do solo, expressando as suscetibilidades, segundo classes de probabilidade de ocorrência.
Cartas de Risco Geológico	Prepondera a avaliação de dado potencial à ocupação, expresso segundo diferentes graus de risco, resultantes da conjugação da probabilidade de ocorrência de manifestações geológicas naturais e induzidas e das consequências sociais e econômicas decorrentes.

Fonte: Bittar, Cerri e Nakazawa (1992)

A cartografia geotécnica tem se tornado uma ferramenta importante na avaliação de limitações e potencialidades do meio físico, fornecendo informações ao planejamento urbano e regional, para a qual a tecnologia de geoprocessamento contribuiu para aprimoramento e confecção de produtos complexos e confiáveis, permitindo a manipulação de grande volume de dados (FRANCO *et al.*, 2010).

Por fim, o uso da cartografia geotécnica, em relação ao planejamento urbano, atende à construção de obras civis; atividades minerais; análise de suscetibilidade e risco de erosão e movimentos de massa, estudos de impacto ambiental (ex.: EIA e RIMA), gestão dos recursos hídricos e de resíduos sólidos; e planejamento territorial (ex.: Plano Diretor Municipal).

2.1.3 Metodologias de mapeamento geotécnico

Devido à especificidade de cada estudo envolvendo mapas geotécnicos, diversas metodologias foram elaboradas, cada qual apropriada a um objetivo específico, porém todas convergindo para um único objetivo, o mapeamento geotécnico.

De uma forma geral, Kopezinski (2000) demonstra uma série de metodologias de mapeamento geotécnico em todo o mundo, organizadas do Quadro 3.

Quadro 3 – Metodologias de Mapeamento Geotécnico

Metodologia	Escala	Finalidade	Utilização
IAEG (Internacional)	<1:100.000 >1:10.000	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Francesa	Regional Local <1:100.000 >1:2.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
PUCE (Austrália)	<1:2.500.000 >1:2.500	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Britânica (Inglês)	<1:10.000 >1:2.500	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Russa	<1:100.000.000 >1:500.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Hinojosa e Leon	<1:1.000.000 >1:500.000	Específica Regional	Planejamento e projeto de estradas
ZERMOS	>1:50.000	Específica	Movimento de massa (planejamento)
Espanhola	>1:200.000 <1:2.000	Específica Regional	Planejamento regional e territorial
USA (Kiefer)	Regional e local	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Canadá	Regional e local	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional

Fonte: Kopezinski (2000)

Conforme Higashi (2006), a Metodologia PUCE (*Pattern, Unit, Component and Evaluation*) foi desenvolvida por Aitchinson e Grant (1976) na Austrália. A mesma utiliza mapas geológicos, topográficos, solos e vegetação, além de feições de relevo e drenagem para a obtenção de uma classificação dos terrenos para uso no desenvolvimento regional e urbano. Os terrenos são agrupados em unidades denominadas de província, padrão, unidade e componente, sendo:

- Província: definida com base na geomorfologia, levando em consideração aspectos geológicos e climáticos;
- Padrão: definido com base na amplitude de relevo, padrão e densidade de drenagem;
- Unidade: baseia-se nos critérios geomorfológicos, associação de solos e formações vegetais;
- Componente: definido com base nos tipos e ângulos de deslizamentos, tipo de perfil de solo, uso da terra ou da superfície de cobertura, associação vegetal e a litologia do substrato rochoso.

Visando o auxílio e organização quanto ao uso e ocupação do solo por obras de engenharia, foram criadas diversas metodologias de mapeamento geotécnico, sendo algumas dessas apresentadas brevemente a seguir.

- Metodologia IAEG-UNESCO (1976): considera os seguintes princípios de classificação de solos e rochas para mapeamento geotécnico: tipo litológico; complexo litológico; sequência litológica e tipo geotécnico;
- Metodologia utilizada em São Carlos, baseada na metodologia de Zuquette (1987) onde são definidas as seguintes etapas: levantamento e análise de informações anteriormente produzidas; reconhecimento de atributos e identificação das unidades homogêneas. São utilizados mapas topográficos, geomorfológicos, sondagens, fotos aéreas, entre outros. Com base em todas essas informações, é construído um mapa preliminar de unidades homogêneas;
- Metodologia utilizada no Sul do Brasil: baseia-se na metodologia proposta por Davison Dias (1995), onde os mapas geológico e pedológico são utilizados para a formação de unidades geotécnicas com estimativas de comportamento geomecânico.

2.1.3.1 Metodologia de mapeamento geotécnico proposta por Davison Dias (1995)

As pesquisas desenvolvidas por Davison Dias (1985, 1986, 1987, 1989 e 1993), permitiram o desenvolvimento de uma Metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas para os solos tropicais denominada de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas.

A metodologia proposta por Davison Dias (1995) baseia-se na formulação de um mapa temático geotécnico, onde os mapas pedológico e litológico, oriundo de um mapa geológico, são utilizados para a formulação de unidades geotécnicas com estimativas de comportamento geomecânico e estrutural.

Essa metodologia demonstra ser abrangente, permitindo que sejam formuladas estimativas de unidades geotécnicas com o objetivo de prever o comportamento dos solos relacionando-os com suas respectivas gênese.

A utilização da Pedologia como ciência orientadora do comportamento dos solos consiste em uma importante ferramenta no conhecimento e determinação das unidades geotécnicas. Alguns pesquisadores utilizam-se dessa ferramenta como acessório na formulação do mapa geotécnico, porém, poucos exploram a fundo esta ciência para uma melhor caracterização do comportamento geomecânico dos solos.

Yoder e Witzack (1975) abordaram o uso de pedologia associada à geologia e a topografia, contribuindo para a interpretação dos resultados laboratoriais obtidos de amostras de solos com perfis identificados pela pedologia.

Através da geomorfologia, norteadas pela pedologia, o mapa possibilita a modelagem de sequências topográficas típicas para cada região de estudo, baseada em curvas de nível e geologia local. Considerando-se a existência de variações dos tipos de solos de acordo com a declividade, indiretamente esta metodologia utiliza-se das feições de relevo (*landforms*) de Zuquette (1987) para caracterizar os solos e os lineamentos regionais.

Em suma, a metodologia utiliza-se principalmente do cruzamento dos mapas geológico e pedológico e indicações de comportamento do solo para que se obtenha um terceiro mapa de estimativa de comportamento dos solos, o mapa geotécnico.

Conforme Higashi (2002), a classificação geotécnica não deve ser confundida com a classificação pedológica, fato possível devido à origem das mesmas e a consequente semelhança na simbologia.

As unidades pedológicas são utilizadas com a finalidade de caracterização do solo com fins predominantemente agrônômicos, enquanto as unidades geotécnicas abordam o comportamento frente à utilização do solo em obras de engenharia, com a finalidade da obtenção de parâmetros que possam mensurar características do comportamento mecânico do material.

A diferenciação vertical entre os horizontes do solo, os quais definem o perfil, tem sido muito utilizada como critério principal de classificação e mapeamento do solo, sendo fundamental considerá-la nos estudos das relações genéticas entre o solo e os demais elementos constituintes do meio natural: o substrato geológico, o relevo, a vegetação, o comportamento hídrico e assim possibilitar a interpretação de vários processos da dinâmica superficial como erosões, deslizamentos, colapsos e demais fenômenos do meio físico relacionados com as diferentes formas de interferências da ação humana (HIGASHI, 2002).

Dessa forma, os solos, de uma maneira geral, ocorrem compondo unidades ou seções delimitáveis por meio de características morfológicas dos horizontes pedológicos, e características físicas e químicas determinadas através de ensaios em campo ou laboratoriais.

A espessura dos horizontes e a diferenciação vertical e lateral entre outros, são atributos igualmente importantes, utilizados na caracterização, classificação e mapeamento dos solos.

É necessário que haja um entendimento final de que as propriedades dos solos podem apresentar variações de local para local. Salienta-se que os resultados obtidos através da metodologia de mapeamento geotécnico, somente fornecem subsídios para uma estimativa de comportamento e não podem ser usados como valores de projeto.

Diversos estudos, dissertações e teses adotaram esta metodologia de mapeamento geotécnico como base de suas pesquisas. Entre eles Orlandini (1990), Azevedo (1990), Pinheiro (1991), Bastos (1991), Abitante (1997), Lima Jr. (1997), Santos

(1997), Duarte (1999), Valente (1999), Dassoler da Silva (2000), Higashi (2002) e (2006), Guaresi (2004), Caraméz (2011), Colzani e Isoppo (2013), Guesser (2013), Reginatto (2013), Christ (2015), Sbroglia (2015), Santos (2015), Souza (2016), Thiesen (2016), Monteiro (2016), entre outros.

Esta técnica de mapeamento geotécnico é comprovada por vários estudos e práticas de campo, e constitui a base geotécnica para o desenvolvimento da metodologia proposta no presente estudo. Entretanto, é necessário que haja um entendimento final de que as propriedades dos solos podem apresentar variações de região para região.

2.1.3.2 Metodologia de mapeamento geotécnico proposta por Higashi (2006)

A metodologia proposta por Higashi (2006) é baseada na Metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas empregada no sul do Brasil de Davison Dias (1995). A mesma é aplicável diretamente no planejamento urbano, utilizando-se análises dos vetores de crescimento e individualização dos universos geotécnicos com manipulação em ambiente SIG, para cidades costeiras.

Um mapa geotécnico é construído na tentativa de prever comportamentos e estimar, em conjunto com um SIG, universos característicos de solos do local de estudo.

O mapa geotécnico deve ser criado preliminarmente, com o objetivo de caracterizar as diferentes unidades de solos presentes na área de estudo e seu comportamento quando submetidas a diferentes solicitações e usos. Este procedimento auxilia na tomada de decisões e na escolha de quais tipos de solos devem ser caracterizados de maneira mais discretizada possível, visando aplicações geotécnicas e ambientais.

Um Sistema de Informações Geográficas deve ser utilizado para a integração do mapa geotécnico do local de estudos e ensaios geotécnicos pontuais, definindo o comportamento dos principais universos geotécnicos.

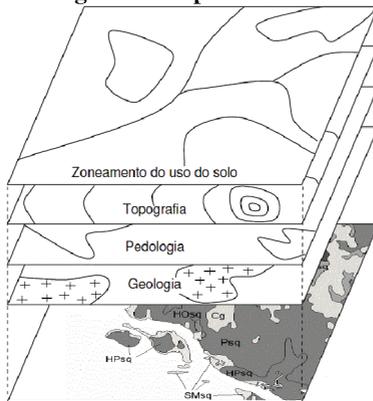
Conforme Higashi (2006), a confecção do mapa geotécnico deve ser realizada conforme a seguinte sequência:

- Planejamento;
- Análise preliminar da geotecnia local;

- Aquisição das informações preexistentes;
- Edição e manipulação de dados preliminares;
- Criação do mapa geotécnico preliminar;
- Análise temporal das manchas urbanas;
- Construção dos vetores de crescimento urbano;
- Individualização de universos geotécnicos;
- Aumento de escala do mapa geotécnico;
- Construção do mapa geotécnico da mancha urbana;
- Definição dos pontos de coleta de amostras;
- Ensaio de caracterização de solos;
- Criação de um banco de dados geotécnicos em SIG;
- Construção do Mapa Geotécnico Final.

O mapa geotécnico preliminar consiste numa classificação prévia dos universos geotécnicos da área de estudo conforme a geologia e pedologia, generalizando áreas de solos de comportamento geotécnico semelhantes. Conforme Higashi (2006), a Figura 1 ilustra, esquematicamente, o processo de criação de um mapa geotécnico preliminar.

Figura 1 – Sobreposição de temas para criação de um mapa geotécnico preliminar

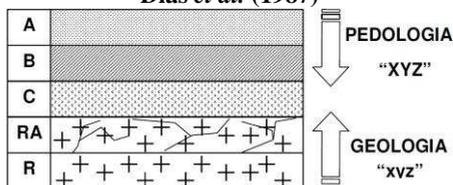


Fonte: Higashi (2006)

A classificação de uma unidade deve ser estimada seguindo a simbologia apresentada na Figura 2. Em um determinado perfil de solo as características que conduzem ao comportamento geomecânico são regidas pela pedologia da superfície para a subsuperfície, e pela geologia de forma inversa.

As letras maiúsculas “XYZ” correspondem à classificação pedológica dos horizontes superficiais (horizonte A e B) e as minúsculas “xyz” são identificadoras da geologia caracterizando os horizontes C, RA e R. Na classificação geológica é utilizada a rocha dominante. No caso de haver mais de uma litologia no material do substrato, adotam-se as siglas destas litologias em letras minúsculas separadas por vírgulas (HIGASHI, 2006). Os Quadros 4, 5 e 6 representam a simbologia simplificada das classes pedológicas, seus horizontes e a geologia, de acordo com a metodologia usada no Sul do Brasil.

Figura 2 – Simbologia de unidades geotécnicas segundo Davison Dias *et al.* (1987)



Fonte: Higashi (2006)

Quadro 4 – Simbologia simplificada das classes pedológicas

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areia Quartzosa	PB	Podzólico Bruno-Acinzentado
B	Brunizém	PE	Podzólico Vermelho-Escuro
BV	BrunizémVértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
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 Câmbico	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)

Quadro 5 – Identificação de espessura de horizonte

Espessura de horizonte (m)	Classificação
0 – 0,30	Sem horizonte (se)
0,30 – 2,00	Pouco espesso (pe)
2,00 – 5,00	Medianamente espesso (mde)
5,00 – 10,00	Espesso (e)
>10,00	Muito espesso (me)

Fonte: Davison Dias (2001)

Quadro 6 – Simbologia simplificada das classes geológicas

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
ca	Calcáreo	r	Riolito
cm	Complexo Metamórfico(*)	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos Quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos Terciários
f	Folhelho	x	Xisto

Fonte: Davison Dias (2001).

Nota: (*) – Complexo formado por várias rochas metamórficas de difícil individualização

2.1.4 Aplicações de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas

A cartografia geotécnica busca representar de forma gráfica o potencial do ambiente físico frente às influências antrópicas, visando a mitigação de problemas futuros e possibilitando a economia de recursos. Neste cenário, a previsão da ocorrência dos deslizamentos vem assumindo importância crescente no mapeamento geotécnico (HIGASHI, 2006).

No Quadro 7 são apresentados diversos estudos relativos à aplicação do mapeamento geotécnico para análise de estabilidade de encostas.

Quadro 7 – Referências de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas

Autor	Local	Observações
Bastos <i>et al.</i> (1998)	Caxias do Sul/RS	Realizaram um zoneamento de áreas de risco à instabilidade de encostas e inundações. Nesta pesquisa, executou-se um levantamento de campo através de fotos dos locais que apresentam riscos, e as principais razões para a instabilidade de taludes, rolamento e queda de blocos e erosão de cada ponto. Para a formulação da carta final de zoneamento de risco, utilizou-se, além da carta geológico-geotécnica, o mapa de isodeclividades em escala de 1:500. Como resultado foram apresentadas 4 classes de risco (baixo, médio, alto e risco à inundação). O mesmo foi baseado na metodologia do IPT/SP
Amaral e Lara (1998)	Rio de Janeiro/RJ	Foi realizado um mapeamento geológico-geotécnico, na escala 1:10.000, voltado especificamente para os processos de deslizamentos nas encostas. Esta pesquisa objetivou o subsídio de definições sobre potencial de ruptura de taludes naturais e escavados, análises sobre frequência de deslizamentos e também decisões ligadas ao gerenciamento do risco geológico.

Quadro 7 – Referências de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas (continuação)

Autor	Local	Observações
Gomes (1998)	-	O autor apresentou um mapeamento geotécnico em escala de 1:25.000 através da caracterização de perfis de intemperismo de uma área destinada à expansão em estado avançado de ocupação. Foram definidas 20 unidades geotécnicas de materiais inconsolidados onde cada unidade é representada por um perfil típico de alteração contendo informações como espessura, textura, índices físicos e comportamento geotécnico. Para a caracterização dos solos, além dos ensaios de granulometria e densidade real das partículas, realizou ensaios da Metodologia MCT.
Calijuri <i>et al.</i> (2001)	Viçosa/MG	Em seu estudo foi apresentado um sistema de registro e visualização de dados geotécnicos, aplicado ao processo de mapeamento de riscos geológicos, utilizando o <i>software GeoCamp</i> (Administrador de fichas geotécnicas de campo). Foi utilizado como piloto o mapeamento de risco geológico urbano e mapas de declividade.
Cerri <i>et al.</i> (2004)	São Paulo/SP	Realizou o mapeamento de zonas de risco no norte, leste e oeste do município. Neste estudo foram mapeadas 112 áreas de encosta e margens de córregos através de investigações geológico-geotécnicas de superfície apoiadas em dados anteriores e observações de campo. Como resultado final da pesquisa, foram apresentados setores de risco com atribuição da probabilidade de ocorrência de processos de instabilização.

Quadro 7 – Referências de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas (continuação)

Autor	Local	Observações
Saito <i>et al.</i> (2005)	Florianópolis /SC	Realizaram um levantamento dos assentamentos precários no maciço central da ilha de Santa Catarina através do Sistema de Informações Geográficas IDRISI. Em ambiente SIG a suscetibilidade a deslizamentos de encostas do Morro da Cruz foi analisada através do cruzamento de mapas temáticos dos aspectos físicos para serem empregados para fins de planejamento e medidas preventivas de acidentes.
Caraméz (2011)	Florianópolis /SC	O autor desenvolveu um mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos de encostas das microbacias do Itacorubi e Saco Grande, utilizando o modelo <i>SHALSTAB</i> . Para tal foram concebidos mapas de unidades geotécnicas através da metodologia proposta por Davison Dias (1995), havendo o cruzamento de mapas temáticos envolvendo litologia, pedologia, mancha urbana, hidrografia e um modelo digital de elevações para cada microbacia.
Reginatto (2013)	Rio dos Cedros/SC	Caracterizou os movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha. Para tal, foi elaborado um mapa de unidades geotécnicas, através da metodologia de Davison Dias (1995), posteriormente definindo-se a unidade com maior suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa, através da localização de eventos anteriores. Após tal definição, foram coletadas amostras e determinados os parâmetros físicos e de resistência do solo da unidade identificada. Por fim gerou-se um mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos para a área de estudo, utilizando o modelo <i>SHALSTAB</i> .

Quadro 7 – Referências de mapeamento geotécnico em estabilidade de encostas (continuação)

Autor	Local	Observações
Guesser (2013)	Antônio Carlos/SC	Desenvolveu uma mapa de estimativas de unidades geotécnicas para o município de Antônio Carlos, Santa Catarina, utilizando os preceitos da metodologia proposta por Davison Dias (1995). O mesmo foi confeccionado através da superposição de dados pedológicos e litológicos, complementado por dados geotécnicos obtidos por meio de ensaios de caracterização física e ensaios de cisalhamento direto. Ao total foram coletadas seis amostras em locais distintos para efetuar-se os ensaios laboratoriais.
Sbroglia (2015)	Ilhota/SC	Elaborou um mapa de unidades geotécnicas, conforme a metodologia proposta por Davison Dias (1995), através de um modelo digital de terreno (MDT) e diversos mapas temáticos (pedologia, geologia, geomorfologia e uso do solo). Foi diagnosticado o comportamento mecânico dos solos através de resultados de ensaios de caracterização física nas unidades geotécnicas. Posteriormente foi elaborada uma séries de 6 mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos, utilizando o modelo <i>SHALSTAB</i> , comparando as áreas instáveis com as respectivas unidades geotécnicas.

Apesar do grande número de estudos na área de mapeamento geotécnico que envolve a análise de áreas de risco a deslizamentos rasos de encostas, poucas são as pesquisas onde parâmetros de resistência como intercepto coesivo e ângulo de atrito do solo são determinados.

Devido à grande variação das condicionantes que regem os parâmetros de resistência dos solos com a profundidade, a delimitação em áreas através de unidades de solos de mesmo

comportamento geomecânico torna-se uma tarefa difícil e pouco confiável.

Normalmente, estes estudos são realizados apenas tendo como base alguns elementos cartográficos, como mapas de declividade e modelos tridimensionais do terreno, além de imagens de satélite e fotos aéreas.

Salienta-se a importância da utilização conjunta de documentos cadastrais, elementos cartográficos e ensaios geotécnicos de campo e/ou laboratório para a geração de mapas que apontem tanto áreas seguras para a ocupação quanto áreas de risco localizadas em encostas.

2.2 MODELO SHALSTAB

O modelo *SHALSTAB* (*Shallow Slope Stability Model*) consiste em uma modelagem digital do terreno, obtido através de dados físicos reais, para o mapeamento do potencial relativo de estabilidade a deslizamentos rasos de uma determinada área de estudo.

Diversos experimentos do modelo, assim como uma grande aplicação em contextos práticos, sugerem que o mesmo pode ser utilizado de forma satisfatória ao delimitar encostas com deslizamentos observados, assim como ao estimar áreas com futuro potencial de instabilidade à movimentos de massa (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998)

Segundo Guimarães *et al.* (2003), o modelo *SHALSTAB* combina um modelo hidrológico e um modelo de estabilidade de encosta para definir as zonas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos rasos, para cada *pixel* em uma base de dados. A seguir são apresentadas as formulações matemáticas para os modelos de estabilidade de encosta e hidrológico, fundamentado na teoria disponibilizada no sítio de internet do Grupo de Geomorfologia da Universidade de Berkeley, E.U.A, de autoria de Dietrich e Montgomery (1998).

2.2.1 Modelo de estabilidade de encostas

O *SHALSTAB* baseia-se na Equação do Talude Infinito da Lei de Ruptura de Mohr-Coulomb, a qual dispõe que a componente vertical descendente do peso do solo na ruptura (tensão cisalhante) “ τ ” é igual a força de resistência

proporcionada pela coesão (intercepto coesivo do solo e/ou força de enraizamento) “C” somada a resistência de atrito devido a tensão normal efetiva no plano de ruptura, conforme pode ser observado na Equação 1 (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998).

$$\tau = c' + (\sigma' - u)\tan\phi' \quad (1)$$

Onde:

τ = tensão cisalhante (tangencial);

c' = intercepto coesivo do solo e/ou força de enraizamento;

σ' = tensão normal;

u = poro-pressão;

ϕ' = ângulo de atrito interno.

A simplificação máxima a ser utilizada no modelo consiste na adoção de valor nulo para a coesão. Tal artifício é claramente equívocado na maioria das aplicações. Embora os solos pedregosos, solos arenosos e colúvios apresentem, teoricamente, valores baixos de coesão, podendo ser admitidos como um termo coesivo adicional na equação 1, o mesmo desempenha um papel importante na estabilidade dos taludes.

Os autores do modelo arbitraram eliminar a força de enraizamento baseados em motivos importantes. Primeiramente, tal força varia amplamente, tanto em sua distribuição espacial como ao longo do tempo. Embora estudos de campo demonstrem que a força de enraizamento é mensurável, a determinação da mesma empreende estudos longevos e complexos. Em modelos de grandes proporções, envolvendo bacias hidrográficas, a parametrização do padrão dessas forças em toda a área seria extremamente onerosa e duradoura, inviabilizando tal estudo.

O segundo motivo consiste na adoção de cenários mais conservadores, onde, definindo-se a força de enraizamento como nula, o resultado de áreas instáveis na bacia em questão tornar-se-ia majorado. Isso, teoricamente, induz o desenvolvimento de mapas de suscetibilidade com maior potencial à deslizamentos.

Como explanado posteriormente, a adoção de valor nulo para a força de enraizamento pode ser compensada utilizando-se valores de ângulo de atrito majorados, a um limiar aceitável. Por outrora os autores evidenciam que existem modelos que consideram tal força, onde muitos obtêm os valores empregando-se dados de modelos digitais de elevações (ex.: DIETRICH *et al.*,

1995; WU e SIDLE, 1995; MONTGOMERY, DIETRICH, e SULLIVAN, 1998).

Na versão subsequente do modelo *SHALSTAB*, a profundidade e a coesão do solo foram considerados espacialmente constantes, *SHALSTAB C*. Uma versão posterior, denominada *SHALSTAB V*, admite a variação espacial da profundidade do solo, a variação vertical da condutividade hidráulica e a coesão espacialmente constante do solo (desenvolvido por DIETRICH *et al.*, 1995).

Eliminando-se a coesão, a equação 1 pode ser reescrita, formando a Equação 2:

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

Onde:

z = espessura do solo;

h = nível d'água acima do plano de ruptura;

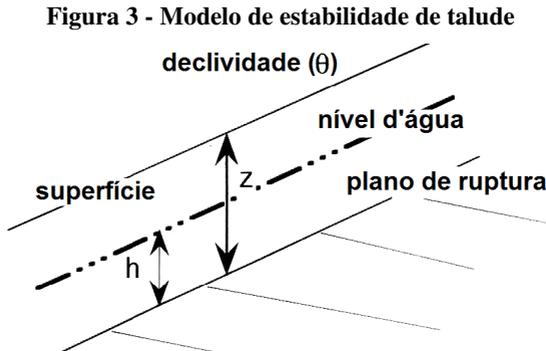
ρ_s = massa específica do solo;

ρ_w = massa específica da água;

g = aceleração gravitacional;

θ = ângulo do plano de ruptura.

A Figura 3 ilustra a aproximação unidimensional utilizada pelo modelo de estabilidade de talude, onde o plano de ruptura, nível d'água e superfície do solo são arbitrados como paralelos. Comumente, o plano de ruptura ocorre na interface colúvio / rocha alterada ou na superfície limite dos saprólitos.



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

A Equação 2 pode ser solucionada através da relação “h/z”, a qual é definida pela proporção da coluna de solo instabilizada na região saturada, sendo:

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (3)$$

Tendo como base a Equação 3, os autores mencionam que o solo não necessariamente precisa estar em condição de saturação para haver a ruptura. Enquanto, na maioria das vezes, tal condição é aceita quando estão sendo analisadas cicatrizes de deslizamentos, teoricamente a mesma pode ser relativa. A relação “h/z” pode variar desde um valor nulo (quando o ângulo de ruptura equivale ao ângulo de atrito), até um valor equivalente à “ ρ_s/ρ_w ” (quando a declividade é nula, ou seja: $\tan \theta = 0$).

De forma a estabelecer limites para a relação “h/z”, uma importante simplificação foi adotada. Assume-se que o plano de ruptura e o movimento subsuperficial do deslizamento ocorrem paralelamente à declividade do terreno. Nessa condição, a relação “h/z” somente pode ser igual ou inferior a 1. Qualquer situação que requeira uma relação “h/z” maior 1 considera-se incondicionalmente instável, onde nenhuma precipitação pode causar a ruptura.

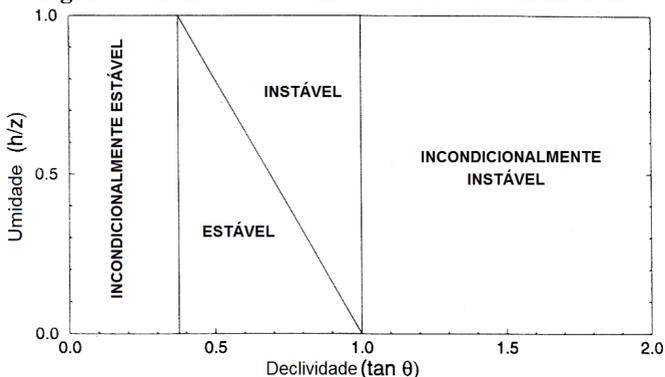
A Figura 4 ilustra as zonas de estabilidade, indicando a relação entre “h/z” e $\tan \theta$, para um ângulo de atrito interno (θ) igual a 45° e massa específica do solo (ρ_s) igual a 1,6g/cm³. Para qualquer declividade igual ou superior ao ângulo de atrito interno do solo, a expressão à direita da equação 3 torna-se nula, consequentemente o talude é instável, independente se o mesmo está seco. Tal condição é classificada como “Incondicionalmente Instável”.

Para o modelo apresentado, devido ao fato da relação “h/z” nunca exceder o valor 1, caso $\tan \theta$ seja menor ou igual a $\tan \phi$ (sendo: $1 - (\rho_s - \rho_w)$), então o talude é classificado como “Incondicionalmente Estável”. Indica-se que, para tal classificação, os taludes podem suportar o fluxo de massa, sem apresentar ruptura.

Conforme a classificação em zonas de estabilidade, as duas condições restantes são “Estável” e “Instável”, onde, para o primeiro caso, a relação “h/z” é superior à necessária para provocar instabilidade (verificar expressão à direita da equação

3). O segundo caso corresponde à relação “h/z” inferior à necessária para provocar instabilidade do talude.

Figura 4 – Zonas de estabilidade – Modelo SHALSTAB



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

O padrão de h/z necessário à condição de instabilidade simplesmente reflete as declividades locais. Quanto maior a declividade dos taludes, menor é quantidade de água necessária para ocasionar a condição de instabilidade.

Para uma determinada precipitação, o padrão real de h/z, devido ao fluxo subsuperficial através das elevações, poderá diferir significativamente. O escoamento subsuperficial tende a espalhar-se nos pés e cumes das elevações, mantendo a relação h/z relativamente baixa nesses locais. Nos vales, os valores de h/z tendem a serem maiores.

As instabilidades localizadas ocorrem quando o fluxo subsuperficial raso, orientado topograficamente, induz a uma saturação (relação h/z) próxima ao valor unitário. Tal classificação define as condições necessárias à instabilidade, entretanto um modelo de fluxo subsuperficial raso torna-se necessário para prever-se a resposta hidrológica a qual possa indicar a relação h/z apropriada.

2.2.2 Modelo hidrológico

De forma a modelar o controle hidrológico da relação h/z, utilizou-se o modelo de fluxo subsuperficial raso no estado estável desenvolvido por O'Loughlin (1986), o qual possui

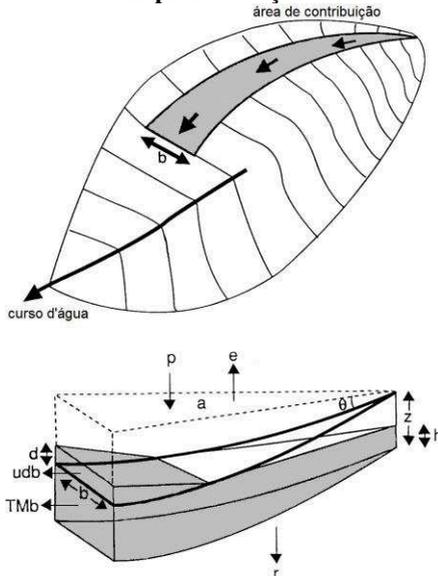
similaridades ao TOPOG (BEVEN e KIRKBY, 1979). Ressalta-se que o modelo utilizado no *SHALSTAB* utiliza algumas simplificações.

Assume-se que o modelo de resposta hidrológica no estado estável reproduz os resultados do padrão espacial relativo de saturação (h/z) durante uma tempestade intensa natural, onde as elevações não se encontram em estado estável.

Tal hipótese pode falhar caso os eventos de precipitação sejam suficientemente intensos para que solos pouco espessos, em áreas não convergentes, possam rapidamente atingir valores de saturação para condições de instabilidade antes que o fluxo subsuperficial raso consiga convergir em vales não canalizados.

A Figura 5 ilustra a geometria e o caminho percorrido pela água em um modelo de bacia, utilizado no modelo hidrológico adotado. A vista em planta exemplifica uma área de drenagem dada por um comprimento de controle e uma largura “b”, variáveis. Na seção transversal, a linha mais espessa representa a superfície do solo e a linha tracejada o fluxo subsuperficial raso e o fluxo de saturação superficial, com descargas de fluxos dados por “Tmb” e “udb”, respectivamente.

Figura 5 – Modelo em planta e seção de área de drenagem



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

No exemplo, o fluxo de escoamento “q” é equivalente à precipitação “p” menos a evapotranspiração “e” e o fluxo de escoamento profundo “r”. “a” corresponde a área de drenagem, “h” a espessura do fluxo da camada subsuperficial saturada e “z” a espessura da camada potencialmente instável, medidos verticalmente.

No modelo *SHALSTAB*, assume-se que a condutividade hidráulica decai significativamente abaixo do plano de ruptura e do escoamento superficial de saturação. Tal condutividade consiste no produto da velocidade de escoamento principal “u” pela espessura “d” (mensurada normalmente à superfície do solo) e pela largura de contribuição “b”, a qual não é calculada. “T” corresponde à condutividade hidráulica e “M” refere-se ao valor de $Sen\theta$ (DIETRICH *et al.*, 1992).

Na hipótese de assumir-se que não ocorre escoamento superficial, fluxo significativo de drenagem profunda e fluxo na interface com a rocha matriz, então o fluxo de escoamento “q”, correspondente ao produto da precipitação efetiva (precipitação total menos a evapotranspiração) pela área de drenagem “a”, deve equivaler à quantidade de escoamento a qual ocorre através de uma grade celular em particular, com largura “b” em condições de estado estacionário. Através da Lei de Darcy pode-se escrever:

$$q_a = k_s h \cos \theta \sin \theta_b \quad (4)$$

Na Equação 4, “ $Sen\theta$ ” corresponde ao gradiente principal. No estado saturado, o escoamento raso subsuperficial equivale a multiplicação da condutividade hidráulica “T” pelo gradiente principal “ $Sen\theta$ ” e pela largura do limite da exutória “b”. Em dada condição, pode-se desenvolver a seguinte aproximação, representada pela Equação 5:

$$Tb \sin \theta = k_s z \cos \theta \sin \theta_b \quad (5)$$

Combinando-se as Equações (4) e (5):

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \times \frac{a}{b \sin \theta} \quad (6)$$

Através da Equação 6, é possível observar que a relação “h/z” é determinada por duas condicionantes: uma taxa hidrológica e uma taxa topográfica.

A taxa hidrológica é dada pela expressão “q/T”. Essa se refere à magnitude do evento de precipitação, representado por “q”, relativa à capacidade subsuperficial de conduzir a água através do solo, ou seja, a condutividade. Quanto maior for “q” em relação a “T”, maior a probabilidade da massa de solo estar saturada e, conseqüentemente, maior será o número de locais no terreno em condições de instabilidade, onde “h/z” dada pela Equação 6, excede a dada pela Equação 3.

A taxa topográfica, dada pela expressão “a/bSen θ ”, refere-se à interferência da topografia no escoamento superficial. Os efeitos da convergência topográfica na concentração de escoamento superficial e elevação da poropressão são determinados pela relação “a/b”, a qual demonstra que quanto maior for a área de drenagem relativamente à largura de contribuição, maior será “h/z”.

Quanto maior a declividade das encostas, mais rápido será o fluxo subsuperficial e, conseqüentemente, menor será a saturação relativa definida por “h/z”. A taxa topográfica é praticamente idêntica à determinada pelo modelo *TOPMODEL* (BEVEN e KIRKBY, 1979), sendo muito utilizada para modelagem hídrica local e regional.

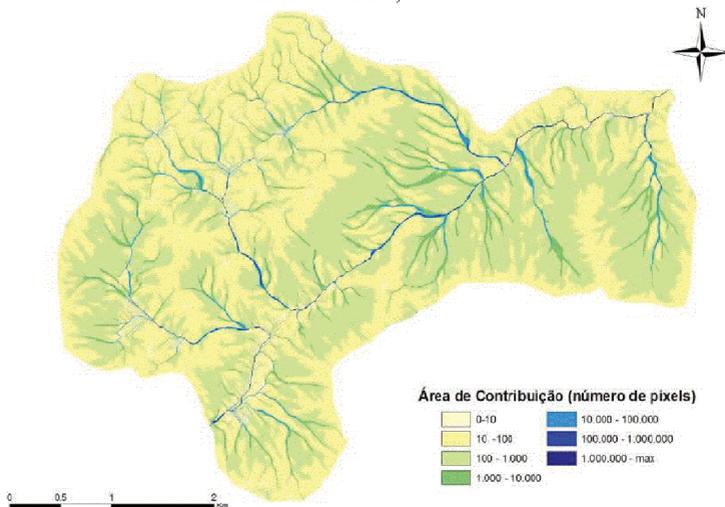
Como principal diferença entre os modelos, no *TOPMODEL* utiliza-se Tan θ ao invés de Sen θ . Fisicamente, Tan θ pode ser considerado inadequado para o modelo *SHALSTAB*, uma vez que o mesmo produz erro significativo para modelos de estabilidade de encostas. A taxa topográfica é claramente maior nos vales, onde as declividades tornam-se mais íngremes conforme aumenta a relação “a/b” e diminui o valor de Sen θ .

Devido ao fato de Sen θ ser inferior a 1, ocorre uma majoração dos valores da taxa topográfica e, conseqüentemente um aumento na relação “h/z”, sendo influenciado principalmente nos locais de declividade suave. Dessa forma, locais planos, com áreas de drenagem pequenas, como estradas, apresentam grandes valores de “h/z”, comparativamente a áreas de drenagem em locais com encostas íngremes.

Um exemplo de espacialização da relação “a/b”, necessária à simulação do modelo *SHALSTAB*, foi obtida por Michel (2011)

em seu estudo de deslizamentos na Bacia do Rio Cunha, no município de Rio dos Cedros – SC, onde a área de contribuição pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Área de Contribuição da Bacia do Rio Cunha (relação “a/b”)



Fonte: Michel (2011)

Sendo a relação “ q/T ” representada sempre por valores pequenos, utiliza-se, normalmente, o valor do logaritmo da expressão. A Tabela 1 fornece os valores de conversão para as relações “ T/q ” para “ q/T ” e “ $\log(q/T)$ ”.

Tabela 1 - Conversão “ T/q ”, “ q/T ” e “ $\log(q/T)$ ”

T/q (m)	q/T (1/m)	$\log(q/T)$ (1/m)
3162	0,00040	-3,4
1259	0,00079	-3,1
631	0,00158	-2,8
316	0,00316	-2,5
158	0,00633	-2,2
79	0,01366	-1,9

Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

A classificação dos mapas varia de acordo com incrementos de $-0,3 \log(q/T)$, equivalente a um fator 2. Dessa forma, assumindo-se que a condutividade hidráulica é idêntica nos mapas gerados, então cada um representa o efeito da duplicação da precipitação efetiva, “q”, por um fator igual a 2. Por exemplo, a precipitação eficaz para “ $\log (q/T) = -1,9$ ” é 16 vezes mais intensa que para “ $\log (q/T) = -3,1$ ”.

A precipitação real efetiva no estado estacionário pode ser calculada através da estimativa da condutividade hidráulica. Baseado no estudo realizado em campo, para a área de estudo *Coos Bay, Oregon* (E.U.A.), estimou-se uma condutividade hidráulica de aproximadamente $65\text{m}^2/\text{dia}$ (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Em tal estudo, para um valor de $\log (q/T) = -3,4$, indicou-se uma precipitação no estado estacionário igual a $26\text{mm}/\text{dia}$. Para $\log (q/T) = -1,9$, a precipitação calculada foi de $818\text{mm}/\text{dia}$.

2.2.3 Combinação do modelo hidrológico e modelo de estabilidade de encostas

Conforme Dietrich e Montgomery (1998), de forma a permitir a resolução da taxa hidrológica, é possível combinar o modelo de estabilidade de encostas (Equação 3) e o modelo hidrológico (Equação 6), sendo:

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{b}{a} \sin \theta \quad (7a)$$

É possível fazer as combinações, também, para solucionar a área por comprimento dos limites da exutória, sendo:

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} \sin \theta \quad (7b)$$

As Equações 7a e 7b consistem nas combinações dos modelos hidrológico/estabilidade de encostas solucionadas pelo modelo *SHALSTAB*. O mesmo abrange três condições topográficas, as quais são obtidas através da superfície numérica utilizada no modelo digital do terreno, sendo: área de drenagem “a”, comprimento de limite da exutória “b” e declividade da encosta “ θ ”.

Existem, potencialmente, quatro parâmetros que precisam ser fornecidos para a aplicação do modelo, sendo: o peso específico natural do solo " ρ_s ", o ângulo de atrito interno " ϕ ", a condutividade do solo " T " e a precipitação efetiva " q ". Aplicando o modelo, os autores consideraram útil e válido atribuir-se valores de peso específico e ângulo de atrito constantes em toda a área de drenagem, comparando os valores de " q/T " tornando as Equações 7a e 7b modelos de parâmetro livre. Claramente, se os dados de propriedades dos solos estiverem disponíveis, então os valores pontuais poderão ser utilizados, entretanto outros valores negligenciados, como as forças de enraizamento, podem ser considerados.

Embora as Equações 7a e 7b possam ser simplificadas para a condição de parâmetro livre, as mesmas permanecem como dimensionais. A relação " q/T " equivale ao comprimento por tempo sobre o comprimento ao quadrado por tempo, ou seja, tem a dimensão de uma unidade sobre o comprimento. Para as formulações e teoria, é utilizado o sistema métrico, onde a unidade de " q/T " será 1/metro e " T/q " será metro. Analogamente, a relação " a/b " será metro.

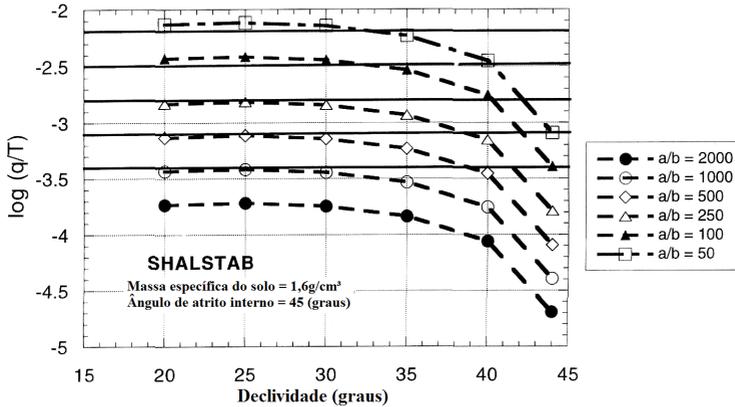
Os autores (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998), observaram que, para uma grande variedade de locais e tamanhos de grade, células com valores inferiores entre -2,5 e -2,8, para " $\log(q/T)$ ", são comumente condizentes à vales não canalizados, entretanto, para valores superiores, como -2,2, as áreas instáveis apresentam-se espalhadas pelo terreno em todas as encostas planares e cumes de elevações.

De forma a exemplificar como o modelo *SHALSTAB* funciona, foram representados os valores de " $\log(q/T)$ " em função da declividade do terreno, em graus, para diversos valores da relação " a/b ", arbitrando-se $\phi = 45^\circ$ e $\rho_s = 1,6g/cm^3$, conforme pode ser observado na Figura 7.

A partir do gráfico plotado, observou-se que, para valores de declividade do terreno até 30° , essa não influencia majoritariamente na classificação de estabilidade. Entre 30° e 40° a diminuição do valor de " $\log(q/T)$ " é inferior, ou apenas ligeiramente superior ao intervalo de classes de -0,3, utilizados nos mapas conforme o modelo. Dessa forma, o padrão espacial de estabilidade é majoritariamente dependente da relação de convergência " a/b " para valores de declividade até 40° , aproximadamente. A medida que as encostas apresentam-se

demasiadamente íngremes, com valores superiores à 40°, o gradiente local predomina.

Figura 7 – Relações de estabilidade de encostas (Coo's Bay – Oregon)



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

Conforme Ramos *et al.* (2002), em seu mapeamento de áreas suscetíveis à deslizamentos rasos na região do quadrilátero ferrífero – MG – concluiu-se que os resultados obtidos, utilizando o *SHALSTAB*, demonstram uma forte influência da declividade no condicionamento dos deslizamentos. No entanto ressaltou-se a importância da área de contribuição dentro desse contexto, uma vez que as áreas de maior instabilidade possuem elevada área de contribuição.

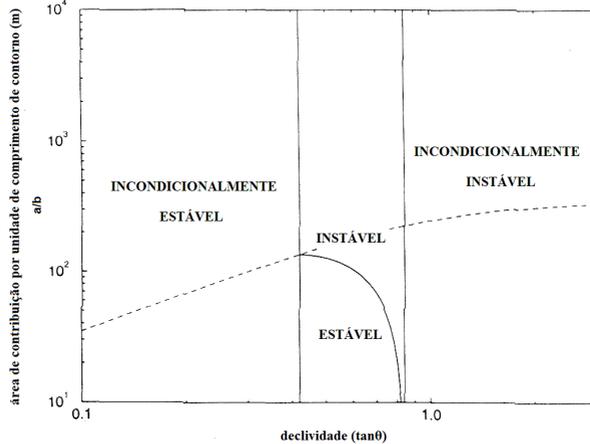
Outras observações puderam ser analisadas ao plotar-se as equações 7a e 7b em um gráfico com eixos definidos pela relação “a/b” (área de contribuição por comprimento de contorno) e tanθ (gradiente das encostas), representado pela Figura 8.

A confecção de tal gráfico torna-se útil uma vez que os dois fatores topográficos podem ser facilmente obtidos através do modelo digital do terreno. A relação “a/b” e tanθ formam os eixos e, conseqüentemente, cada célula do terreno pode ser plotada diretamente nesse gráfico e comparada para diferentes valores de escoamento superficial e teorias de erodibilidade.

A Equação 7b é representada como uma curva descendente na Figura 8, terminando onde tanθ = tanφ (1-ρ_s/ρ_w). Tal curva define o limite entre as condições “incondicionalmente estável” e “incondicionalmente instável”, respectivamente, assim como

representado na Figura 4. A posição da linha a qual separa as condições “instável” e “estável” depende da taxa hidrológica.

Figura 8 – Campos de relação de estabilidade - *SHALSTAB*



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1994)

É possível notar que, quando a relação “ h/z ” é igual a 1, ou seja, condição de saturação, a Equação 6 pode ser escrita como “ $a/b = (T/q) \text{ Sen}\theta$ ”. A linha tracejada na Figura 8 representa essa relação. Qualquer célula situada acima dessa linha apresenta-se no estado de saturação, por outrora, as células abaixo da linha estão não saturadas para o evento hidrológico definido pela taxa hidrológica.

Dessa forma, a interseção da linha tracejada com a linha vertical, a qual delimita o campo “incondicionalmente instável”, determina o ponto final das equações 7a e 7b, onde o limite inferior da estabilidade é ocasionado pela saturação.

A combinação das equações 6, 7a e 7b, na Figura 8, definem as classes de estabilidade, representadas na Tabela 2.

Em relação a aplicações de análises de suscetibilidade à deslizamentos no Brasil, Listo e Vieira (2011), indicam que o modelo *SHALSTAB* já foi amplamente utilizado na previsão de deslizamentos rasos em áreas com baixa intervenção antrópica, sendo correlacionado com mapas de cicatrizes de deslizamentos e apresentando resultados bastante satisfatórios. Entretanto, em áreas urbanas densas com presença de áreas de risco, o seu uso é ainda pouco comum.

Tabela 2 - Condições de estabilidade – modelo *SHALSTAB*

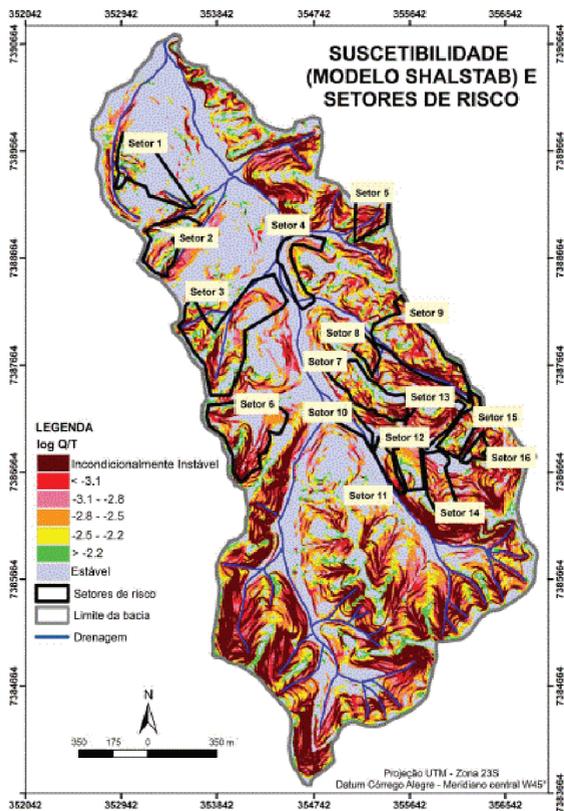
Classes de Estabilidade	Condição
Incondicionalmente estável, saturado	$\tan \theta \leq \tan \emptyset (1 - \rho_w/\rho_s); a/b > (T/q) \sin \theta$
Incondicionalmente estável, não saturado	$\tan \theta \leq \tan \emptyset (1 - \rho_w/\rho_s)$ $; a/b < (T/q) \sin \theta$
Estável, não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \emptyset}\right) \frac{T}{q} \sin \theta ;$ $a/b > (T/q) \sin \theta ;$ $\tan \emptyset > \tan \theta^3 \tan \emptyset (1 - \rho_w/\rho_s)$
Instável, saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \emptyset}\right) \frac{T}{q} \sin \theta ;$ $a/b < (T/q) \sin \theta ;$ $\tan \emptyset > \tan \theta^3 \tan \emptyset (1 - \rho_w/\rho_s)$
Instável, não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \emptyset}\right) \frac{T}{q} \sin \theta ;$ $a/b < (T/q) \sin \theta ;$ $\tan \emptyset > \tan \theta^3 \tan \emptyset (1 - \rho_w/\rho_s)$
Incondicionalmente instável, saturado	$\tan \emptyset > \tan \theta ; a/b > (T/q) \sin \theta$
Incondicionalmente instável, não saturado	$\tan \emptyset > \tan \theta ; a/b < (T/q) \sin \theta$

Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

Ainda conforme os mesmos autores, em seu estudo quanto à análise da suscetibilidade à deslizamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP), verificou-se que o modelo *SHALSTAB* confirmou as principais vantagens de uso, dentre as quais destacou-se: aplicação em diferentes áreas com diferentes usos do solo sem custos elevados para a aquisição de dados de entrada (ex.: os parâmetros topográficos) e a facilidade de uso em ambiente SIG.

A Figura 9 ilustra o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos, desenvolvido por Listo e Vieira (2011) para a Bacia do Alto Aricanduva, utilizando o modelo *SHALSTAB*.

Figura 9 – Mapa de suscetibilidade *SHALSTAB* – Bacia do Alto Aricanduva (SP)



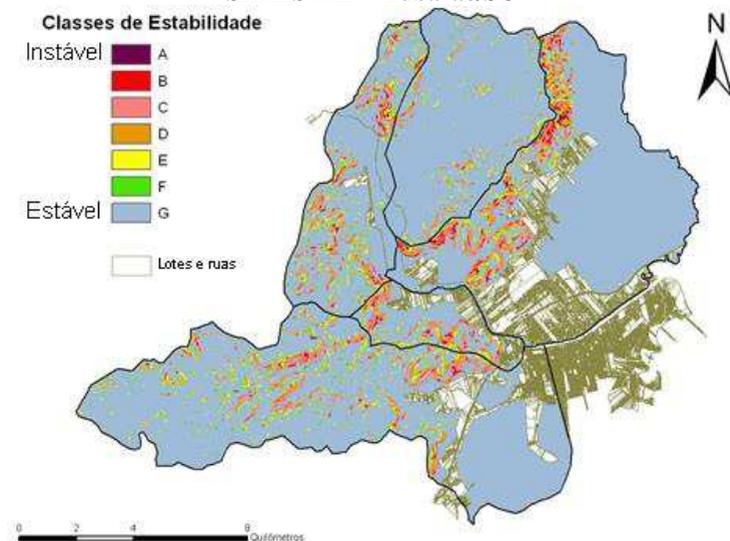
Fonte: Listo e Vieira (2011)

No Estado de Santa Catarina, diversas aplicações do modelo *SHALSTAB* foram desenvolvidas. Michel e Higashi (2010) realizaram uma análise espacial integrando a simulação à instabilidade de encostas e a implantação do sistema viário resultante da expansão do centro urbano do município de Tubarão, Santa Catarina. Os autores coletaram dados de delimitação da mancha urbana do município em quatro períodos diferentes, referentes aos anos de 1978, 1988, 1999 e 2002, de forma a definir os vetores de crescimento urbano.

Foram realizados ensaios laboratoriais de cisalhamento direto para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos por meio de coleta de amostras indeformadas no horizonte

C nas áreas delimitadas pelos diversos universos geotécnicos. Utilizando tais dados, complementados por ensaios de caracterização dos solos, foi realizada a simulação no modelo *SHALSTAB*. A Figura 10 ilustra a classificação da área de estudo.

Figura 10 – Classes de estabilidade de encostas com base no modelo *SHALSTAB* – Tubarão/SC



Fonte: Michel e Higashi (2010)

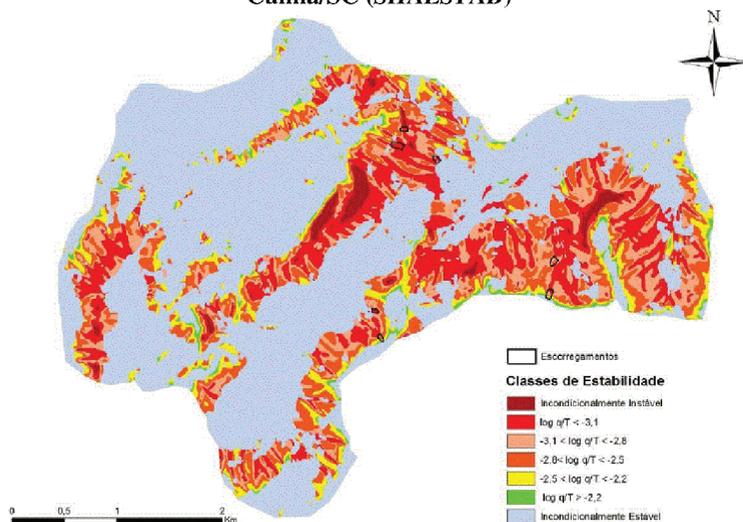
O uso do modelo *SHALSTAB* no diagnóstico espacial da estabilidade das encostas do centro urbano do município de Tubarão foi considerado uma alternativa válida, uma vez que apontou espacialmente os taludes suscetíveis ao deslizamento e suas proximidades à infraestrutura viária. Por meio de processos de aproximação realizados em outras áreas de análise, com a adequação dos parâmetros geotécnicos em locais onde de fato ocorreram deslizamentos rasos, foi possível obter um mapa de estimativa de instabilidades muito próximo da realidade (MICHEL e HIGASHI, 2010).

Michel (2011), gerou o mapa de estabilidade de encostas da Bacia do Rio Cunha – Santa Catarina – hierarquizado nas 7 classes estabelecidas por Dietrich e Montgomery (1998). Como estes valores são expressos por números muito pequenos, para um entendimento mais simples dos dados, os mesmos foram

representados pela função logarítmica decimal. O modelo estabelece a condição de estabilidade para todas as áreas planas, mesmo em condições de alta umidade. Áreas com maior declividade têm grande relação com a instabilidade, mesmo com baixa umidade. Isto fica evidenciado pela área classificada como incondicionalmente instável pelo modelo, que tem forte correlação com as áreas de maior declividade topográfica.

O autor conclui que o tamanho da área de contribuição influenciou fortemente na classificação realizada pelo modelo, visto que regiões que têm concentração de linhas de fluxo, ou seja, onde o relevo é convergente, quase sempre geram padrões de classificação com menores níveis de estabilidade, que podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 – Classes de estabilidade de encostas – Bacia do Rio Cunha/SC (SHALSTAB)



Fonte: Michel (2011)

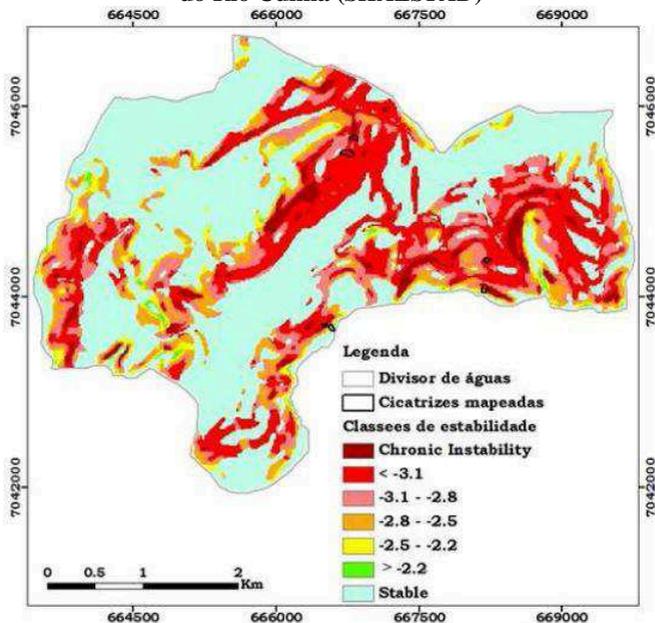
As classes geradas, em função do parâmetro livre q/T , utilizam os parâmetros hidrológicos para o cálculo da estabilidade. O enquadramento da maioria dos deslizamentos na classe mais instável depende de q/T , sendo que uma porcentagem pequena de área enquadrada nesta classe (11,41%) demonstra que o modelo capturou corretamente os fatores

topográficos e hidrológicos que governam a estabilidade das encostas na bacia (MICHEL, 2011).

Posteriormente, Reginatto (2013) desenvolveu uma nova simulação à suscetibilidade de deslizamentos rasos de encostas para a Bacia Hidrográfica do Rio Cunha. Em seu estudo foram identificados os movimentos de massas presentes na bacia, realizados ensaios laboratoriais para obtenção dos parâmetros físicos dos solos dos diversos universos geotécnicos e efetuado o comparativo das áreas de instabilidade estimadas pelo modelo *SHALSTAB* com os diversos mapas temáticos desenvolvidos.

A partir da distribuição das classes de estabilidade, foi possível observar que as cicatrizes apresentaram as zonas de ruptura em áreas classificadas como instáveis pelo modelo *SHALSTAB*, demonstrando que o mesmo apresentou um bom ajuste em relação aos dados observados em campo. A Figura 12 representa o Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos.

Figura 12 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos da Bacia do Rio Cunha (*SHALSTAB*)

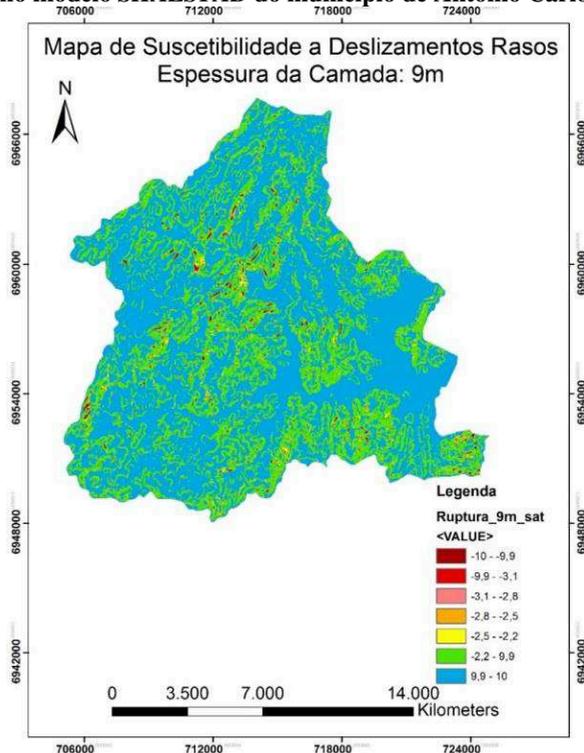


Fonte: Reginatto (2013)

Conforme a autora, o mapa de suscetibilidade fora comparado ao inventário dos movimentos de massa, identificando-se nas áreas de instabilidade, não somente deslizamentos do tipo translacionais, mas também deslizamentos rotacionais e complexos. O modelo previu, ainda, como instáveis, áreas onde não ocorreram deslizamentos no período de intensa pluviometria em 2008.

Guesser (2013) estimou áreas suscetíveis à deslizamentos rasos de encostas para o município de Antônio Carlos, utilizando o modelo *SHALSTAB*. O autor compôs um banco de dados geotécnico contendo dados de ensaios de caracterização física dos solos da área de estudo, assim como ensaios de cisalhamento direto, de forma a obter-se os parâmetros de resistência dos solos. A Figura 13 ilustra o mapa de suscetibilidade à deslizamentos.

Figura 13 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos com base no modelo *SHALSTAB* do município de Antônio Carlos



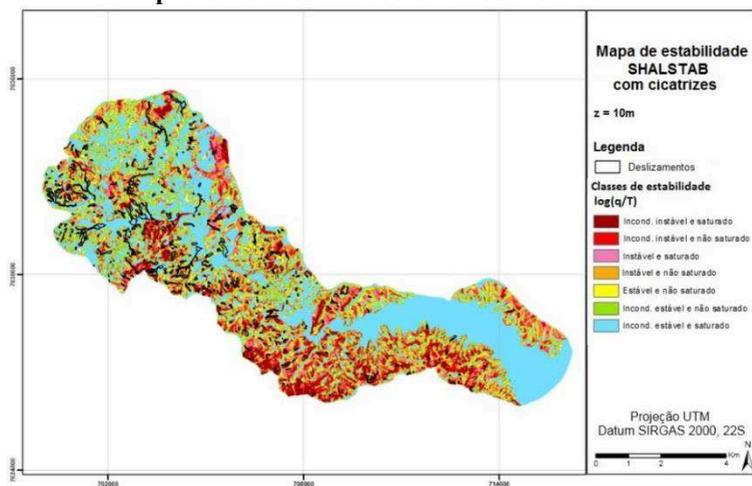
Fonte: Guesser (2013)

O autor utilizou um algoritmo criado por Michel (2013) para implementação do modelo *SHALSTAB* no *software* ArcMap, o qual se mostrou de fácil execução, gerando resultados confiáveis para a ocorrência de deslizamentos rasos nos diferentes cenários analisados.

Sbroglia (2015) mapeou e caracterizou as áreas suscetíveis à deslizamentos rasos na Microbacia do Ribeirão Baú, no município de Ilhota. No estudo, foi calculado o fator de segurança de modo a definir-se o ângulo de declividade limite das encostas para ocorrência do deslizamento. Foi elaborado um mapa de áreas estáveis e instáveis utilizando tal ângulo limite. Para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos foram conduzidos ensaios de cisalhamento direto na condição inundada.

A partir dos dados obtidos, calibrou-se o modelo *SHALSTAB*, elaborando-se o mapa de áreas suscetíveis à deslizamentos translacionais da região de estudo. Por fim comparou-se as áreas consideradas instáveis pelo modelo com o mapa geotécnico desenvolvido, analisando as unidades quanto à sua suscetibilidade. A Figura 14 ilustra o mapa gerado.

Figura 14 – Mapa com as classes de estabilidade do *SHALSTAB* para $z=10m$ da Microbacia Ribeirão Baú



Fonte: Sbroglia (2015)

Em suas conclusões, a autora indica que, comparativamente ao cadastro de cicatrizes de deslizamentos

rasos ocorridos, mais de 60% dos mesmos foram identificados nas classes instáveis do modelo, predominando nas áreas classificadas como incondicionalmente instáveis e saturadas. Constatou-se, ainda, que houve uma boa correlação entre as classes de maior suscetibilidade e o número de cicatrizes.

2.3 GEOESTATÍSTICA

No presente estudo, foram utilizados diversos dados pontuais aplicados a mapas. De forma a espacializar essas informações e permitir a interpolação e cruzamento dos dados, foi necessária a utilização de processos de geoestatística em ambiente SIG.

Em Geotecnia, a aplicação principal de geoestatística tem sido na caracterização da variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos “*in-situ*”. Dentro de um projeto geotécnico, o emprego de técnicas da geoestatística constitui-se numa importante ferramenta para o modelagem de variáveis de natureza estratigráfica e hidráulica do local a ser implantada uma obra, bem como, na avaliação da quantidade, distribuição e representatividade dos parâmetros (SOULIÉ, 1984).

Conforme Rodriguez (2013), a geoestatística é um ramo da estatística que une a teoria de variáveis aleatórias com a teoria de variáveis regionalizadas, gerando um novo conceito de funções aleatórias. Através dessas técnicas, dentre as quais se destacam a Krigagem e a simulação estocástica, é possível calcular um determinado valor de interesse, onde o valor está condicionado aos dados existentes e a uma função de correlação espacial entre esses dados. Portanto, incorpora-se uma interpretação da distribuição estatística dos dados no espaço.

A geoestatística é uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. São variáveis cujos valores amostrados estão relacionados com a posição espacial que ocupam, assumindo valores diferentes em diferentes lugares de observação, com certa independência de um lugar a outro (MATHERON, 1965).

Conforme Vieira (1993), a geoestatística aplicada tem por objetivo identificar, na aparente desordem entre as amostras, uma medida da correção espacial entre os atributos, estudar padrões de amostras adequadas e realizar estimativas de valores de locais

não amostrados com base em alguns valores conhecidos na população, técnica a qual se denomina Krigagem.

Quando se utiliza as técnicas geoestatísticas para a análise dos dados, algumas hipóteses básicas de trabalho são assumidas:

- A estacionaridade de 1ª ordem é a esperança do valor de um ponto no espaço ser igual à média admitindo-se que a média da amostra é igual à média populacional;
- A estacionaridade de 2ª ordem assume que há uma variação da média, mas a variância é constante dentro dos limites da continuidade espacial;
- A hipótese intrínseca diz que a probabilidade de variação dos valores tomados entre pontos com a mesma distância de separação é igual, ou seja, a relação de dependência espacial é a mesma em qualquer posição de “h”, que é o vetor que separa dois pontos amostrais, assim sendo, é assumida a estacionaridade dentro do alcance da continuidade espacial.

Conforme Matheron (1963), considerando-se que os fenômenos naturais não podem ser tratados como fenômenos aleatórios, surgiu a necessidade de se encontrar novas ferramentas matemáticas que permitam estudar de um modo sintético as suas características essenciais das variáveis regionalizadas, quais sejam, aspecto aleatório e aspecto espacial. Deste modo a Geoestatística se propõe estudar os dois objetivos principais:

- Tentar ser capaz de extrair da aparente desordem dos dados disponíveis, uma imagem da variabilidade dos mesmos, e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço. Este é o objetivo da análise estrutural e se consegue através do variograma;
- Deve ser também capaz de medir a precisão de toda predição ou estimativa feita através de dados fragmentados, ou seja, há necessidade de uma teoria de estimativa de reservas. Isto é feito através de um interpolador geoestatístico chamado de Krigagem.

Outro ponto a destacar-se é referente à factibilidade de valores locais próximos entre si, onde a geoestatística permite determinar os limites de ocorrência das atividades antrópicas

humanas, desastres ambientais, epidemias, áreas de ocorrências de crimes de forma independentes e dependentes, visando obter um tratamento estatístico adequado a cada situação, com variáveis correlacionadas. A geoestatística ampliou as limitações da estatística clássica, pelo fato das informações serem heterogêneas, e os atributos variarem no espaço e no tempo. A proposta geoestatística difere da proposta da estatística clássica, basicamente, pela forma de avaliar a variação dos dados (SILVA, 1988).

Segundo Camargo (2001), estudos realizados sobre dados relativos às jazidas de minérios, pelo sul-africano Daniel Krige, na década de 50, geraram a geoestatística como instrumento de avaliação das jazidas de ouro. Krige concluiu que somente a informação de variância não seria suficiente para explicar o fenômeno, que seria necessário considerar a distância entre as observações, ou seja, a geoestatística baseia-se na localização e dependência espaciais.

O engenheiro francês Georges Matheron procurou integrar todo o conhecimento das escolas norte-americana (apoiada na Estatística Clássica – variáveis independentes) e da sul africana de Krige (admitindo a existência de correlação espacial e erros de estimação) corrigindo seus problemas e dando-lhe formulação matemática, desenvolvendo assim, a Teoria das Variáveis Regionalizadas.

2.3.1 Variáveis regionalizadas

Matheron (1963, 1971) define Variável Regionalizada como sendo uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

O termo Variável Regionalizada foi escolhido por Matheron visando alertar para os aspectos, contraditórios apenas aparentemente, aleatório e estruturado dos fenômenos estudados. É aleatório no sentido de que os valores das medições podem variar consideravelmente entre si, e sua característica regionalizada, estruturada. Segundo uma dada lei no espaço, é evidente ao considerar-se que os valores das observações com que se trabalha não são completamente independentes da sua localização geográfica. Assim, próximo a um valor elevado, é

mais provável que seja encontrado outro valor elevado do que um muito baixo. Assim, pode-se dizer que a geoestatística trata as variáveis regionalizadas, podendo, mesmo, ser considerada uma aplicação prática da Teoria das Variáveis Regionalizadas (ANDRIOTTI, 2003).

As técnicas geoestatísticas, segundo o mesmo autor, podem ser usadas para descrever e modelar padrões espaciais (variografia), para prever valores em locais não amostrados (Krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de Krigagem) e para otimizar malhas de amostragem. Nesse último, é importante salientar que o erro cometido ao fazer uma avaliação com malhas de amostragem diminui com o detalhamento da malha, mas esse crescimento não é linear.

A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a alternância de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes: uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; uma componente aleatória, espacialmente correlacionada e; um ruído aleatório ou residual (BURROUGH, 1987).

Devido à amostragem singular, que é feita num ponto, torna-se praticamente impossível conhecer a função de densidade de probabilidade que governa uma variável regionalizada, entretanto é possível fazer inferências, conhecendo-se alguns parâmetros desta função. Na geoestatística linear utilizam-se os momentos da função casual (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978).

Para tornar aplicáveis estes momentos e fazer inferências, utiliza-se a hipótese de estacionaridade espacial, onde é assumido ser constante o valor médio esperado para as diversas localizações, ou ainda, que todos os elementos avaliados pertencem a mesma população. Dessa forma, cada par de dados $z(x)$ e $z(x+h)$, separados pela distância “h”, é considerado uma realização diferente das variáveis regionalizadas dentro de um fenômeno regionalizante.

Devido a fenômenos físicos de elevada capacidade de dispersão, que não possuem variância finita a priori e tampouco covariância, define-se em geoestatística a hipótese intrínseca. Esta hipótese afirma que os primeiros dois momentos das diferenças das variáveis $z(x)$ e $z(x+h)$, são independentes de

suas localizações, sendo função somente do vetor h que as separam (OLEA, 1984).

Segundo Olea (1975, 1977), as principais características de uma variável regionalizada são:

- **Localização:** uma variável regionalizada é numericamente definida por um valor, o qual está associado a uma amostra de tamanho, forma e orientação específicos. Essas características geométricas da amostra são denominadas “suporte geométrico”. O suporte geométrico não necessariamente compreende volumes, podendo se referir também a áreas e linhas. Quando o suporte geométrico tende a zero, tem-se um ponto ou amostra pontual e o suporte geométrico é imaterial. A teoria das variáveis regionalizadas considera a geometria das amostras, distintamente da estatística clássica, onde a forma, o tamanho e a orientação não são considerados. Um experimento estatístico clássico com o lançamento de moedas têm resultado que são independentes se a moeda é grande ou pequena, leve ou pesada, e de como é lançada;
- **Anisotropia:** algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas, isto é, apresentam variações graduais numa direção e rápidas ou irregulares em outra;
- **Continuidade:** dependendo do fenômeno sendo observado, a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena. Apesar da complexidade das flutuações, uma continuidade média geralmente está presente. A continuidade espacial da variável regionalizada pode ser analisada a partir do variograma.

2.3.2 Interpolação geoestatística por Krigagem

A Krigagem é um método de inferência espacial, que estima dados em pontos não amostrados a partir de dados amostrados, considerando a estrutura de dependência espacial do fenômeno em estudo. Esse método foi desenvolvido por Matheron e recebeu o nome de Krigagem em homenagem ao

engenheiro de minas Daniel G. Krige (WOJCIECHOWSKI, 2006).

Originalmente, Krige (1951) concluiu que não poderia estimar, de forma adequada, o conteúdo de ouro em blocos mineralizados se não considerasse a configuração geométrica das amostras, ou seja, a localização e o volume. Essas avaliações, a princípio empíricas e de aplicações localizadas, foram importantes para o engenheiro francês George Matheron desenvolver a teoria que estuda o comportamento de variáveis distribuídas espacialmente e que representam um fenômeno natural. Dessa forma, Matheron, durante a década de 60, generalizou os métodos de estimativas utilizados por Krige e desenvolveu os fundamentos teóricos da variabilidade de amostragem associada com o tamanho das amostras, bem como formulou uma teoria completa dos erros de estimativa.

Uma das vantagens primordiais do método de Krigagem está relacionada a eliminação, em média, dos erros de excesso devido a ponderação das amostras. Com isso tem-se uma melhoria da precisão. A Krigagem leva em consideração o número de amostras utilizadas; as posições das amostras na área a ser avaliada; as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo.

A estimativa por Krigagem é reconhecida como sendo uma das melhores estimativas lineares e não tendenciosa, mas para isso é necessário que o semivariograma tenha sido elaborado adequadamente (ALLESSI, 2011).

Conforme Rodriguez (2013), o semivariograma corresponde à metade da função variograma, sendo essa definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre duas variáveis em pontos distintos no espaço d-dimensional, separados por uma distância “h”.

O Quadro 8 demonstra algumas limitações deste método e suas indicações.

Conforme Soares (2011), diferente dos métodos convencionais de estimação, a Krigagem está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas. Inicialmente, o método de Krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, entretanto seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos, hidrológico, atmosférico e outros campos correlatos.

Quadro 8 – Indicações de uso e restrições do interpolador Krigagem

Quando usar:	Quando não usar:
<ul style="list-style-type: none">• Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais;• Anomalia local não presente em toda a área, por exemplo, em ambiente fluvial;• Quiser estimar com base em uma média global;• Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados.	<ul style="list-style-type: none">• Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o semivariograma;• Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado);• Amostras de populações diversas.

Fonte: Adaptado de Landim (2000)

A diferença entre a Krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $1/N$ (N = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na Krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a Krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínimas (CAMARGO, 1997).

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), é possível afirmar que a função de semivariograma descreve uma característica quantificada e descrita por um modelo matemático, podendo ser usada para, talvez, o mais importante recurso da geoestatística: a interpolação por Krigagem.

Após a definição do semivariograma experimental, a estimativa por Krigagem é realizada de acordo com a equação 8, sendo:

$$Z^*(x) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad (8)$$

Em que:

λ_i = pesos de cada valor medido;

Z = valor medido;

Z* = valor estimado através do método de Krigagem.

Os pesos "λ" são obtidos pelo Método de Multiplicadores de Lagrange, associados à equação de estimação e à exigência de que a esperança dos erros seja igual a zero. Os mesmos possibilitam que a variância de estimação seja mínima, fazendo com que a variância da Krigagem seja a menor dentre todos os processos de interpolação.

Conforme Braga (1990), o estimador de Krigagem determina uma ponderação dos estimadores amostrados, sendo os pesos calculados de forma a minimizar a variância do erro de predição, levando em consideração a configuração espacial da amostra.

Isaaks e Srivastava (1989) descrevem que existem diversos tipos de Krigagem, sendo: Krigagem pontual, ordinária, universal, de blocos, entre outras. A Krigagem de blocos envolve estimativa de valores da variável regionalizada para uma subárea da área total. A Krigagem de bloco é apropriada, relativamente à Krigagem pontual, para situações em que a informação média é mais útil que o valor exato no ponto.

Técnicas de interpolação para mapeamento de solo foram comparadas por Housseini *et al.* (1993). Os autores concluíram que a Krigagem ordinária foi o método mais apropriado, uma vez que a precisão do interpolador foi medida a partir da média de erros absolutos entre valores estimados e observados.

2.3.3 Aplicações de Krigagem em geotecnia

O uso do interpolador geoestatístico do tipo Krigagem apresenta aplicações diversas em estudos e caracterizações geotécnicas em ambiente SIG. Dentre as aplicações mais recentes, pode-se destacar às dos parágrafos seguintes.

Camargo (2011) realizou uma análise da variação espacial do teor de argila sobre a área da Fazenda Canchim, localizada no município de São Carlos – SP. O estudo envolveu a amostragem de 85 observações georreferenciadas, coletadas à profundidade média de 1 metro. Para os mesmos, foram realizados

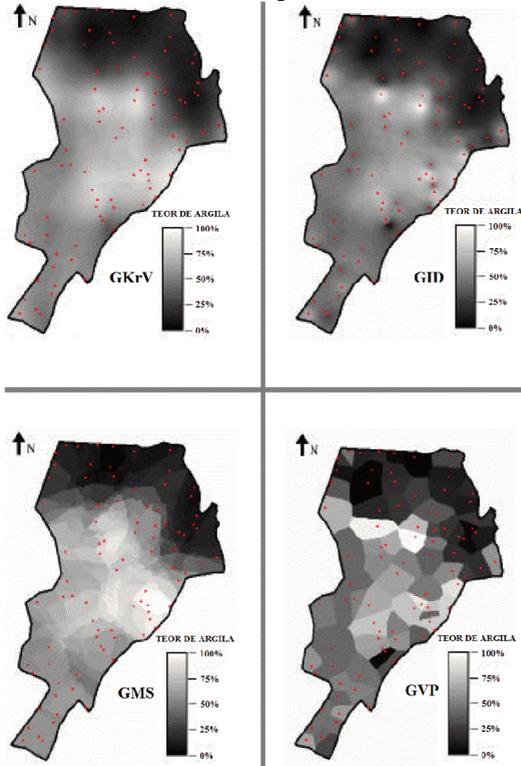
procedimentos de análise geoestatística: análise exploratória e de continuidade espacial do teor de argila, modelagem dos semivariogramas experimentais, validação do modelo e interpolação através de Krigagem.

Conforme seu estudo, foram realizadas, também, comparações entre os resultados obtidos através do método de Krigagem com outros métodos de estimação disponíveis no sistema SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – DPI/INPE). Os mapas gerados, apresentados na Figura 15 ilustram as grades de valores estimados, sendo:

- GK_rV: grade de valores estimados obtida pela interpolação de Krigagem a partir de um modelo anisotrópico;
- GID: grade de valores estimados obtida através do método de estimação média ponderada pelo inverso do quadrado da distância;
- GMS: grade de valores estimados obtida através do método de estimação média simples;
- GVP: grade de valores estimados obtida através do método de estimação do vizinho mais próximo.

Conforme o autor, é relativamente fácil constatar que a imagem referente à “GK_rV” (grade de Krigagem obtida a partir de um modelo anisotrópico e que supostamente representa a verdadeira continuidade espacial do fenômeno) é a que melhor expressa a variabilidade do teor de argila.

Figura 15 – Variação do teor de argila – Comparativo Krigagem e outros interpoladores



Fonte: Adaptado de Camargo (2011)

Wojciechowski (2006) desenvolveu um mapeamento de características físico-químicas de solos em áreas de floresta estacional decidual, realizando estimativas, para os locais não amostrados, através da Krigagem. Para tal, foram coletadas amostras de solo à profundidade até 0,5 metro. Posteriormente, as amostras foram ensaiadas em laboratório, avaliando-se a densidade, teor de argila, pH, teor de potássio, percentual de matéria orgânica e teor de fósforo.

A geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos do solo envolvidos na pesquisa. Após a definição do modelo do semivariograma, foram realizadas interpolações usando uma malha de 1 x 1 metro, totalizando em média 1296 pontos estimados pelo método da

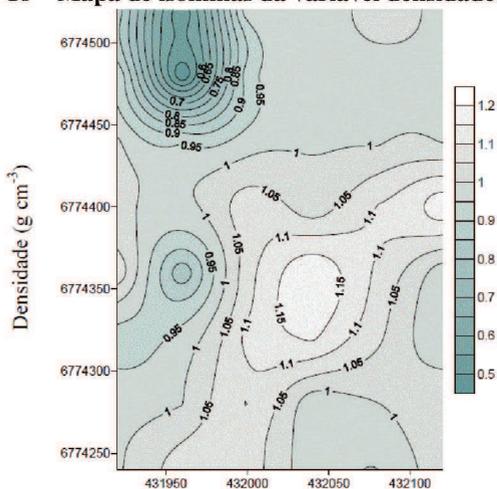
Krigagem. Os arquivos resultados do processo de interpolação por Krigagem foram exportado para o *software* “Surfer”, utilizado para a elaboração do mapeamento dos atributos do solo nas áreas experimentais.

Conforme o autor, a utilização do interpolador de Krigagem ordinária proporcionou o detalhamento de distribuição espacial dos valores das variáveis estudadas. A partir dessa interpolação, elaboraram-se os mapas de isovalores, ou isolinhas, das variáveis de interesse nas áreas experimentais de floresta madura, floresta secundária e capoeirão. A malha de 1 x 1 metro para interpolação foi suficiente para um bom delineamento e representação dos contornos na geração dos mapas.

O estudo da variabilidade espacial de alguns atributos físico-químicos do solo pela geostatística, utilizando-se a técnica da Krigagem, mostrou-se eficiente na geração dos mapas com maior confiabilidade, principalmente em zonas de influências isotrópicas, onde é explicada a variação no espaço da maioria dos atributos do solo em ambientes naturais.

A Figura 16 ilustra um mapa de densidade, exemplificando os mapas gerados através do método de interpolação por Krigagem para a área de estudo. A classificação físico-química dos solos foi materializada pela elaboração de isolinhas das variáveis, a intervalos definidos pelo autor.

Figura 16 – Mapa de isolinhas da variável densidade (g cm^{-3})



Patias (2010) desenvolveu um sistema para o tratamento de dados provenientes de sondagens rotativas. O sistema constitui-se por um banco de dados digital e o uso de recursos de ferramentas de interpolação por Krigagem ordinária, fornecendo zoneamento de parâmetros de caracterização geotécnica do maciço de fundação da área das obras da Usina de Itaipu.

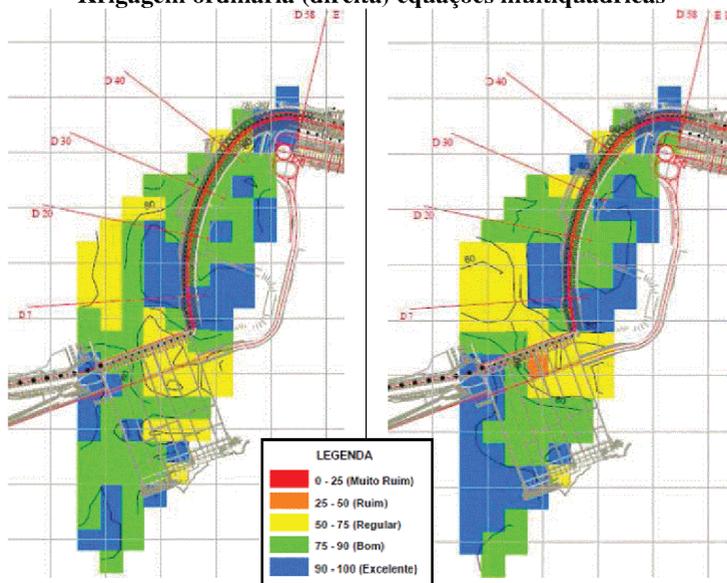
Para tal, foram coletados dados históricos de investigação e estudos geológico-geotécnicos das áreas da obra, compilados em um banco de dados digital, de forma a possibilitar o uso de diferentes métodos de interpolação e análises. Posteriormente, elaborou-se um mapa interativo de localização das sondagens, com capacidade para agregar e interpolar dados geotécnicos, como RQD (*Rock Quality Designation*), graus da fraturamento, alteração, consistência, entre outros.

A autora realizou uma comparação dos métodos de interpolação com Krigagem ordinária e equações multiquádricas para o RQD. Julgou-se adequada a utilização dos dois métodos uma vez que os dados utilizados, referentes a sondagens rotativas, têm diversas variáveis distribuídas de forma irregular ao longo de uma determinada área.

Ao longo de seu estudo, foram realizadas análises estatísticas dos dados iniciais, estudo paramétrico para definirem-se as condições de vizinhança e cálculo dos blocos de cubagem, confecção de mapas interativos de localização das investigações geológico-geotécnicas, resultados relativos ao zoneamento complementados por dados históricos e novos perfis geológicos e análise de dados provenientes de leituras de piezômetros instalados na fundação da barragem, originários de estudos anteriores.

Por fim, foram avaliados os dois métodos de interpolação utilizados para obter os zoneamentos de parâmetros de RQD. Complementarmente, realizou-se uma avaliação de validação dos dados interpolados comparados ao comportamento apresentado pelo maciço rochoso, a partir da análise dos piezômetros. A Figura 17 ilustra os zoneamentos realizados por ambos os métodos, para a cota de 150 metros.

**Figura 17 – Zoneamento do RQD na cota 150m. (esquerda)
Krigagem ordinária (direita) equações multiquádricas**



Fonte: Patias (2010)

Sturaro *et al.* (2000) apresentaram uma técnica geostatística pelo emprego da Krigagem indicativa, a qual permite a geração de mapas probabilísticos de variáveis, podendo ser integrados para a obtenção de mapas indicativos. Os autores exemplificaram a metodologia a partir de sondagens de simples reconhecimento da região de Bauru – SP, com a avaliação de mapas geotécnicos de favorabilidade à locação de aterros sanitários, pela integração de mapas probabilísticos referentes às variáveis espessura do solo e profundidade do lençol freático.

Folle *et al.* (2001) apresentaram a Krigagem ordinária como uma ferramenta eficiente para geração de mapas de resistência do solo N_{SPT} , realizadas em três níveis distintos, definidos de acordo com a variação média do índice de penetração com a profundidade. Em continuação, Folle (2002) explorou a Krigagem ordinária para estimativa dos valores de N_{SPT} e aplicou o processo de simulação sequencial Gaussiana, a fim de avaliar a precisão das estimativas realizadas pelo método de Krigagem ordinária, quantificando as incertezas associadas.

Visando o zoneamento de áreas que apresentassem risco de deslizamento, Jesus *et al.* (2005) realizaram uma aplicação em mapeamento geotécnico por meio da Krigagem ordinária para auxílio no planejamento urbano de ocupações futuras na cidade de Salvador/BA. Os parâmetros geotécnicos estimados foram o ângulo de atrito, a coesão, o peso específico dos grãos e o índice de vazios do solo.

A partir de um banco de dados da carta geotécnica de Recife, a qual conta com aproximadamente 1550 laudos de sondagens *SPT* da cidade, Genevois e Oliveira (2005) aplicaram a geoestatística para o estudo da variável espessura de camadas de argila orgânica do município, o qual apresenta subsolo com grandes bolsões de solo mole. Como produto, os autores geraram mapas de distribuição de camadas de argila orgânica.

Soares (2011) desenvolveu uma análise espacial da profundidade do lençol freático e do N_{SPT} para obras de fundação em João Pessoa – PB, utilizando laudos de sondagem à percussão e mapas ambientados em SIG. Para tal, foi estruturado um banco de dados com os laudos, produção de um modelo digital do terreno, através de uma base topográfica, e a localização e incorporação das informações geológico-geotécnicas provenientes dos boletins impressos.

Nas atividades de análise e modelagens espaciais foram utilizados métodos de interpolação determinísticos (ferramenta *Topo to Raster*) e geoestatísticos (Krigagem ordinária). Os principais produtos cartográficos gerados foram mapas de lençol freático (N.A.) e N_{SPT} , visando subsidiar obras de fundações. Para os testes com Krigagem ordinária, o modelo que apresentou menor discrepância no ajuste foi o esférico.

Conforme a autora, o modelo esférico, em todos os casos, apresentou melhor estruturação e relativamente um bom ajuste para a variável N_{SPT} , quanto às transições entre zona de alcance a patamar, podendo-se constatar, inclusive, a correspondência dos valores de variância a priori com os ajustados para a obtenção dos patamares.

Comparando-se os valores médios de cada metro, a autora observou um aumento do índice com a profundidade, sendo esse um comportamento esperado para essa variável. A predominância de areias também é compatível para o nível e a respectiva unidade geológica costeira com sedimentos marinhos.

Concluindo, a autora afirma que em ambos os métodos (*topo to raster* e Krigagem ordinária), os mapas demonstraram-se bastante parecidos. Entretanto, a Krigagem ordinária aparentemente reduziu as áreas com valores mais baixos e também mais altos presentes nos dados, mostrando um caráter suavizador do método.

2.4 CISALHAMENTO DE CAMPO – BOREHOLE SHEAR TEST (BHST)

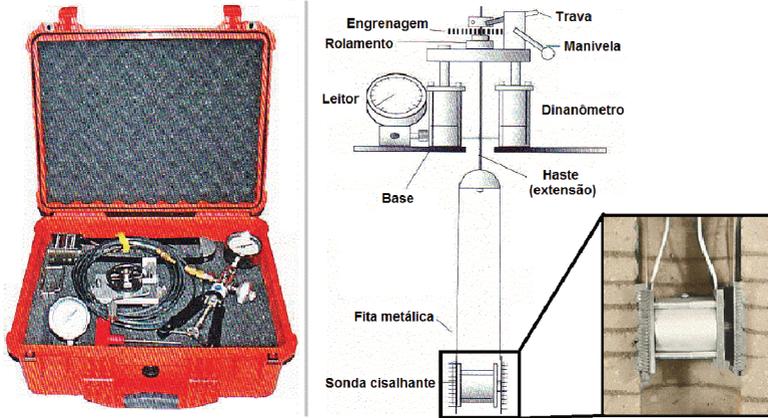
Para determinar os parâmetros de resistência dos solos, é possível executar ensaios laboratoriais e de campo. Os ensaios laboratoriais mais difundidos para obterem-se os mesmos são os de cisalhamento direto e compressão triaxial.

O ensaio laboratorial de cisalhamento direto tem por objetivo determinar parâmetros de resistência dos solos, a partir da coleta de amostras indeformadas, como ângulo de atrito interno e intercepto coesivo. Esse ensaio, bastante difundido no Brasil, é regulamentado pela norma Norte-Americana ASTM D 3080 – 98 – *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, da *American Society for Test and Materials* (ASTM, 1998).

Reitera-se que o procedimento de coleta de amostras para o ensaio laboratorial de cisalhamento direto induz a condições não idênticas àquelas no ambiente natural. Isso se deve ao fato de haver alívio de tensões no volume de solo coletado. Além disso, apesar de nomear-se a amostra como indeformada, comumente há deformações, ainda que mínimas, ao executar-se a coleta, assim como durante o transporte e manuseio das amostras. Podem ocorrer, também, variações de umidade, temperatura, estado de tensões, entre outros.

O uso do equipamento *Borehole Shear Test (BHST)* para a análise “*in situ*” de parâmetros de resistência, mesmo sem amplo conhecimento, vem sendo descoberto por vários pesquisadores e empresas devido à sua facilidade de utilização, rapidez de execução e baixa variabilidade dos resultados (LUTENEGGER e TIMIAN, 1987). Salienta-se que, em comparação ao ensaio laboratorial, o ensaio *BHST* possui a vantagem de ser mais rápido e de tornar mais fácil a repetição ou substituição de pontos amostrados. A Figura 18 ilustra o equipamento.

Figura 18 – Imagem equipamento *BHST* (esquerda) – Desenho esquemático (direita)



Fonte: Adaptado de *Handy Geotechnical Instruments* (2013)

O ensaio *BHST* consiste na obtenção de leituras de tensões cisalhantes máximas dentro de um furo pré-escavado no solo. Os ensaios são conduzidos através da expansão diametral de uma sonda cisalhante contra as paredes do furo, mantendo-se uma tensão normal constante, permitindo a consolidação do solo. Por fim, ocorre o deslocamento vertical da sonda, havendo, então, a mensuração da tensão cisalhante máxima. Através da repetição do ensaio, para tensões normais distintas, é possível plotar uma envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, obtendo-se o ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo do solo amostrado (HANDY e FOX, 1967).

Lutenegger e Timian (1987) pesquisaram a variabilidade de resultados de ensaios *BHST*, conduzidos por diferentes operadores, em argilas de consistência mole e média. Conforme os autores, a variação dos resultados pode ocorrer devido à variabilidade dos solos, equipamentos, operadores e interpretação dos dados, mesmo quando os ensaios são realizados nas condições mais semelhantes possíveis.

Foram realizados diversos ensaios em Massena, Nova Iorque, respeitando-se um tempo de consolidação de 5 minutos em todos os pontos, com cinco valores de tensões normais, variando 0 e 176kPa. A Tabela 3 ilustra o resumo dos resultados

de parâmetros de resistência médios obtidos por dois operadores distintos, onde cada um realizou 24 ensaios na área de estudo.

Tabela 3 – Resumo dos resultados de ensaio BHST – dois operadores distintos

Operador	Prof. (m)	Âng. Atrito Interno (°)	Intercepto Coesivo (kPa)
A	1,5	25,4	18,7
B	1,5	25,4	19,3
C	3,0	23,9	5,4
D	3,0	24,1	6,1

Fonte: Adaptado de Lutenneger e Timian (1987)

Por meio de testes de hipóteses, para um intervalo de confiança de 95%, conclui-se que não houve diferença significativa entre os resultados obtidos pelos dois operadores. Em continuidade, após breves explicações do procedimento de ensaio, 10 operadores inexperientes realizaram novas leituras, para uma profundidade de 1,5 metro, as quais são demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos resultados de ensaio BHST – operadores inexperientes

Operador	Âng. Atrito Interno (°)	Intercepto Coesivo (kPa)	r²
A	24,4	27,0	0,9968
B	25,5	20,1	0,9984
C	24,4	17,3	0,9474
D	26,9	14,5	0,9907
E	21,7	23,6	0,9771
F	23,1	17,7	0,9933
G	25,5	19,3	0,9848
H	24,8	22,1	0,9957
I	20,7	15,2	0,9868
J	27,2	15,7	0,9995
Média	24,4	19,3	-
σ	2,09	4,0	-
C.V. (%)	3,6	20,8	-

Fonte: Adaptado de Lutenneger e Timian (1987) (σ = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variação)

Em relação aos valores mensurados de ângulo de atrito interno, somente dois ensaios não satisfizeram o intervalo de confiança de 95%. Quanto ao intercepto coesivo, o mesmo ocorreu para apenas um ensaio. Dessa forma, os autores concluíram que, somente com um conhecimento mínimo do procedimento, foi possível obter resultados satisfatórios dos ensaios (LUTENNEGER e TIMIAN, 1987).

Yang (2005) investigou e analisou dois deslizamentos de encostas no estado de Iowa, Estados Unidos da América, propondo a estabilização dos mesmos por meio do retaludamento das áreas com ruptura. A declividade da solução foi determinada utilizando parâmetros de resistência do solo, obtidos por meio de ensaios *BHST*, validados em laboratório por meio de ensaios de cisalhamento por torção tipo “*ring shear*” e ensaios de cisalhamento direto.

Foram realizados nove ensaios *BHST* para o primeiro deslizamento, cujos resultados apresentaram valores médios de ângulo de atrito interno igual a 23,7° e intercepto coesivo igual a 12,5kPa. Em relação ao segundo deslizamento, por meio de nove ensaios, o ângulo de atrito médio foi igual a 24,4° e o intercepto coesivo médio igual a 24,11kPa.

Em suas conclusões, o autor indicou que o ensaio *BHST* apresentou resultados satisfatórios para a caracterização das encostas, especialmente quanto a obtenção “*in situ*” dos parâmetros de resistência dos solos, essenciais a análises de estabilidade. Ressaltou-se, também, a rapidez na obtenção dos parâmetros (YANG, 2005).

Conforme Bechtum (2012) o equipamento do ensaio *BHST* foi desenvolvido na década de 1960 por Richard Handy, Dr. O ensaio permite determinar o ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo no estado drenado em diversos tipos de solos. O autor desenvolveu um equipamento automatizado acoplado ao *BHST* convencional, o qual permite a aquisição em tempo real de leituras dos esforços normais e cisalhantes, em um *software* específico, e o processamento dos resultados por meio de um Macro.

Ainda em relação ao trabalho desenvolvido por Bechtum (2012), foram comparados resultados do ensaio *BHST* automatizado e de cisalhamento direto, para dois tipos de solos distintos, representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação resultados BHST e Cisalhamento Direto

Prof. (m)	BHST		Cisalhamento Direto	
	Âng. de Atrito Int. (°)	Intercepto Coesivo (kPa)	Âng. de Atrito Int. (°)	Intercepto Coesivo (kPa)
Areia glacial				
0,70	36,6	31,0	31,1	64,1
1,71	39,2	17,2	36,6	35,2
2,49	38,2	15,8	34,9	23,4
Argila mole				
1,55	24,4	41,4	24,8	55,8

Fonte: Adaptado de Bechtum (2012)

O autor salienta a maior variação entre os valores mensurados para o intercepto coesivo, em comparação ao ângulo de atrito interno. O ensaio *BHST* sugere fornecer valores menores de intercepto coesivo, quando comparado aos ensaios de cisalhamento direto (BECHTUM, 2012).

2.4.1 Ensaios *BHST* na microbacia do Itacorubi

Conforme Sakamoto *et al.* (2015) uma comparação entre os procedimentos de execução dos ensaios estudados mostra que o ensaio *Borehole Shear Test* possui bastante praticidade em comparação ao cisalhamento direto, método mais empregado. O tempo de consolidação do *BHST* é significativamente inferior ao tempo de consolidação do ensaio de cisalhamento direto, o qual ainda exige a moldagem prévia das amostras.

Ressalta-se que a coleta das amostras e moldagem para ensaios de cisalhamento direto devem ser feitas com muita cautela, pois esse ensaio impõe uma superfície de ruptura às amostras e alguma alteração na estrutura do solo pode afetar a confiabilidade dos resultados. Desse modo, o *BHST* mostra-se novamente vantajoso, uma vez que é executado “*in situ*” e, em caso de resultados inesperados ou indesejados, pode-se repetir o procedimento a fim de se obter os parâmetros corretos.

Para a área estudada por Sakamoto *et al.* (2015), os ensaios *BHST* coletados preliminarmente foram executados no mesmo talude em que foram coletadas as amostras indeformadas para a execução do ensaio de cisalhamento direto. Tanto para o *BHST* quanto para o Cisalhamento Direto, os solos foram ensaiados na condição de umidade natural e em seguida na condição inundada, onde o furo foi inundado com água.

Conforme os resultados obtidos para os parâmetros de resistência ao cisalhamento para ambos os ensaios, cisalhamento direto e *BHST*, por Sakamoto *et al.* (2015), foram determinados o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno para as condições inundada e no teor de umidade natural. A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 6 - Resultados de parâmetros de resistência ao cisalhamento

Pontos	CD in	BHST in	CD nat	BHST nat
	Ângulo de atrito interno, ϕ (°)			
1	34,40	32,60	38,02	43,10
	25,30			16,70
2	29,40	35,60	27,00	36,30
3	35,80	35,60	42,10	26,60
4	28,80	35,00	54,20	42,60
Intercepto coesivo, C (kPa)				
1	3,83	4,00	7,39	0,00
	16,00			21,00
2	5,10	0,00	28,26	9,00
3	5,38	1,00	18,38	9,00
4	18,20	6,00	51,30	13,00

Fonte: Adaptado de Sakamoto *et al.* (2015)

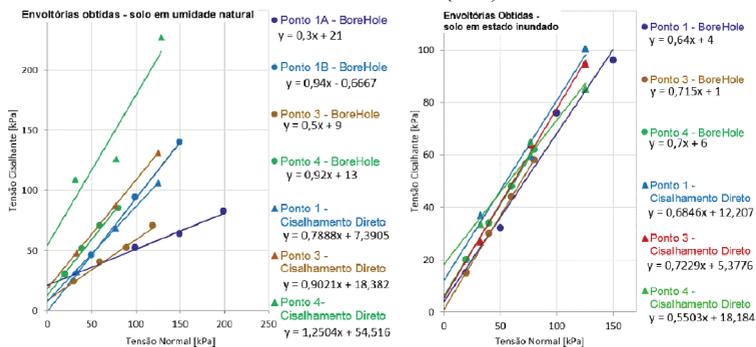
*CD = Cisalhamento Direto; *BHST* = Borehole Shear Test; in = Condição Inundado; nat = Teor de umidade natural

A Figura 19 ilustra as envoltórias de ruptura obtidas para os pontos amostrados sob a condição inundada e em umidade natural.

Analisando comparativamente os resultados, foi possível observar que as envoltórias são semelhantes para ambos os ensaios, sobretudo para o solo em condição inundada, onde as envoltórias apresentaram paralelismo evidente. Além disso, os parâmetros de resistência obtidos não diferiram de forma a gerar

diferenças significativas nos mapas de suscetibilidade a deslizamentos, originados pela aplicação do modelo *SHALSTAB* (SAKAMOTO et al., 2015).

Figura 19 – Envoltórias de ruptura – Umidade natural (esq.) – Estado inundado (dir.)



Fonte: Sakamoto et al. (2015)

Conforme estudos anteriores, como Caramez (2011), as áreas de maior declividade e que podem apresentar maior risco geotécnico estão contidas na unidade geotécnica PVg (Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito). Dessa forma, a coleta de amostras e execução de ensaios *BHST* foram concentrados nessas áreas, de maneira uniforme e abrangente, na tentativa de melhor representar o comportamento do solo em termos de resistência ao cisalhamento. Vale ressaltar que o processo de ocupação de muitas dessas encostas já se iniciou, bem como a base delas. Sendo assim, em sua maioria, os pontos estudados encontram-se próximos à área urbana e em terrenos de declive (SAKAMOTO et al., 2015).

O Quadro 9 demonstra os locais onde foram realizadas as coletas de amostras para o ensaio de cisalhamento direto e a execução do ensaio “*in situ*” *BHST*. A Figura 20 ilustra a localização dos pontos amostrados sobre imagem de satélite.

Quadro 9 – Dados de localização – Ensaios de cisalhamento direto e BHST

Ponto de Coleta	Coordenadas UTM (SIRGAS 2000)		Bairro	Local	Referência
	X (metros)	Y (metros)			
1	747.576,64	6.944.727,82	Itacorubi	Rod. Admar Gonzaga	Próx. Alameda Casa Rosa
2	744.417,11	6.944.173,13	Trindade	Próx. Av. César Seara	Bosque UFSC
3	747.179,39	6.946.177,17	Itacorubi	-	Próx. CREA/SC
4	747.488,15	6.945.271,65	Itacorubi	-	Ao lado Escola Autonomia

Fonte: Adaptado de Sakamoto *et al.* (2015)

Figura 20 – Ensaios de cisalhamento direto – Microbacia do Itacorubi



Fonte: Adaptado de Sakamoto *et al.* (2015)

Conforme Sakamoto *et al.* (2015), a proposta de utilização do método *BHST* se mostrou bastante aceitável, uma vez que o ensaio demanda pouco tempo de consolidação e gera menor perturbação na estrutura do solo. Análises comparativas entre o método Cisalhamento Direto, usualmente aplicado no Brasil, e o método *BHST*, indicaram envoltórias semelhantes para os resultados obtidos por ambos os ensaios, sobretudo para o solo em condição inundado, no qual as envoltórias apresentaram paralelismo evidente. Além disso, os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos não diferiram a ponto de gerar uma diferença significativa no resultado final dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos. Em termos percentuais as áreas instáveis e estáveis se mostraram praticamente iguais, assim como sua distribuição no mapa da bacia hidrográfica.

Dessa forma, concluiu-se que o ensaio *BHST* é uma alternativa viável para o mapeamento geotécnico de áreas de risco, permitindo a execução em um maior número de pontos em tempo reduzido, o que garante maior representatividade e uma caracterização legítima da área de estudos. Os dados obtidos por este ensaio são de grande importância, uma vez que podem ser aplicados no mapeamento de áreas de risco, auxiliando na gestão e no planejamento urbano, de modo a prevenir os impactos gerados por possíveis movimentos de massa (SAKAMOTO *et al.*, 2015).

A aluna Narayana Massocco, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFSC, sob orientação do Professor Orlando Martini de Oliveira, apresentou, em sua qualificação de Mestrado, os resultados de um conjunto de ensaios *BHST* efetuados em um talude no bairro Itacorubi, na Servidão Deoscoro Peres. O furo foi executado nas coordenadas geográficas 27°35'6,54" de latitude Sul e 48°29'45,14" de longitude Oeste, sendo efetuados ensaios para as profundidades de 50cm, 100cm, 150cm e 200cm, a contar da superfície do perfil de solo.

De forma a obter-se a envoltória de ruptura, foram aplicados dois valores distintos de tensão normal em uma mesma posição, para então haver as leituras das respectivas tensões cisalhantes. Posteriormente o equipamento foi rotacionado 90°, aplicando-se nova tensão normal e leitura de tensão cisalhante. As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 7 – Resultados do ensaio BHST – Narayana Massocco (2015)

n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tensão Normal (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Tempo de Consol. (min)	5	5	5	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Tensão Cisalhante (kPa)	34	53	80	20	30	55	26	42	62	20	36	57
Prof. (cm)	50	50	50	100	100	100	150	150	150	200	200	200

Tabela 8 – Parâmetros de resistência dos solos – Narayana Massocco (2015)

Prof. (cm)	Ângulo de atrito interno – ϕ (°)	Intercepto coesivo (kPa)
50	31	21
100	28	7,5
150	24	16
200	27	9,5

Em continuidade, um ensaio *BHST* foi realizado em Outubro de 2016 pelos Professores Orlando Oliveira e Rafael Higashi no terreno do Departamento de Engenharia Civil – UFSC. O mesmo não teve seus resultados publicados, entretanto foi utilizado no presente estudo de forma a contribuir quanto à melhor distribuição espacial e representatividade dos ensaios *BHST* para a área de estudo. A Tabela 9 apresenta os resultados.

Tabela 9 – Resultados do ensaio BHST – ECV/UFSC

Condição	Tempo consol. (min)	Prof. (m)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Âng. atrito int. – ϕ (°)	Interc. coesivo (kPa)
Inundado	5	0,8	25	20	28	5
			50	30		
			100	60		

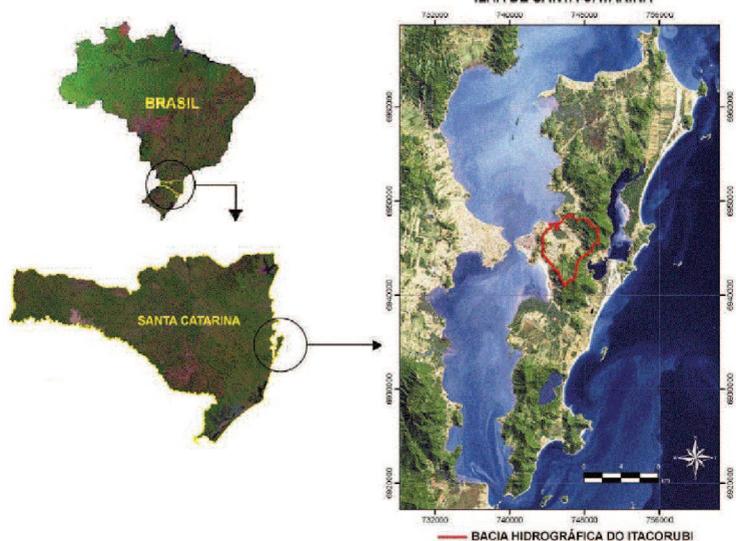
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No presente capítulo são abordadas as caracterizações gerais, necessárias ao detalhamento e qualificação da área de estudo – Microbacia do Itacorubi – de forma a alcançar os objetivos gerais e específicos propostos no presente estudo.

3.1 LOCALIZAÇÃO

O município de Florianópolis está situado no Estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil, entre os paralelos 27°25' e 27°50' de Latitude Sul e entre os meridianos 48°20' e 48°31' de Longitude Oeste. Seus limites geográficos são o Oceano Atlântico a leste, o município de São José a oeste, a Baía Norte ao norte e a Baía Sul ao sul. Possui uma forma alongada no sentido Norte-Sul e uma linha de costa bastante recortada. Apresenta área total de aproximadamente 436km², distribuindo-se em parte insular, com cerca de 424km², e parte continental, em torno de 12km². A Figura 21 localiza o município de Florianópolis no país e estado, destacando-se a área da Microbacia do Itacorubi.

Figura 21 – Localização do município de Florianópolis
ILHA DE SANTA CATARINA



Fonte: Silva (2010)

3.2 CLIMA E COBERTURA DO SOLO

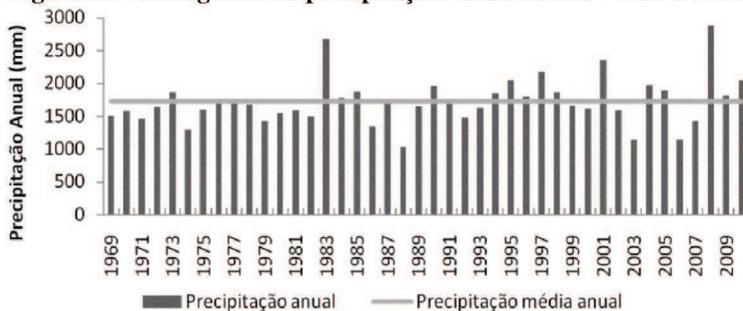
Conforme o Grupo de Gestão do Espaço/UFSC (GGE, 2006) a região da Microbacia do Itacorubi apresenta características climáticas inerentes ao litoral sul brasileiro (Mesotérmico Úmido). As estações do ano são bem caracterizadas, verão e inverno bem definidos, sendo o outono e primavera de características semelhantes. A temperatura oscila entre 16°C e 24°C e fundamentalmente a Massa Tropical Atlântica predomina na primavera e verão, e a Massa de Ar Polar Atlântica tem maior frequência nos meses de outono e inverno.

O sistema de classificação genérica – Köppen – o qual se baseia em elementos climáticos, como temperaturas médias anuais e totais pluviométricas, além da vegetação, classifica a região como clima tropical chuvoso e quente “Af” (temperatura média superior a 18°C e úmido o ano inteiro) e clima temperado chuvoso e quente “Cfa” (temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e úmido o ano inteiro).

Conforme Mulungo (2012), o regime pluviométrico da bacia, baseado nos dados da estação código 02748006, de responsabilidade do INMET e da EPAGRI, localizada nas coordenadas 27°36'07”, latitude Sul, e 48°37'11”, longitude Oeste, a 1,84m de altitude apresentou média anual de precipitações igual a 1722,72mm. Tal valor foi determinado através da análise de série histórica compreendendo os anos de 1969 a 2010. A distribuição anual de precipitações indica que 35,9% ocorrem no verão (Janeiro a Março), 27,3% na primavera (Setembro a Dezembro), 17,9% no outono (Abril a Junho) e 18,9% no inverno (Julho a Setembro). A Figura 22 ilustra o histograma de precipitações anuais para a área de estudo.

A precipitação é bastante significativa e bem distribuída durante o ano, não havendo estação seca, sendo o verão geralmente a estação que apresenta o maior índice pluviométrico. Elevadas precipitações ocorrem de janeiro a março, com média de 160 mm mensais, sendo que de abril a dezembro há pouca variação, com uma média em torno de 100 mm mensais. Os valores mais baixos ocorrem de junho a agosto. A umidade relativa média é de 80% (GGE, 2006).

Figura 22 – Histograma de precipitações totais anuais – 1969 a 2010



Fonte: Mulungo (2012)

Relativamente à cobertura do solo, uma importante formação vegetal presente na Microbacia do Itacorubi refere-se ao Manguezal do Itacorubi, localizado em sua porção noroeste, tendo como limite o mar da Baía Norte. A Figura 23 ilustra uma vista parcial do manguezal.

Figura 23 – Vista parcial – Manguezal do Itacorubi



3.3 GEOMORFOLOGIA E RELEVO

Conforme Santos (1997), originalmente a Ilha de Santa Catarina era constituída por um “arquipélago” de rochas

cristalinas, atualmente representadas pelos morros. A partir do Quaternário, esse conjunto de ilhas foi ligado por formações constituídas por sedimentos marinhos, lacustres, eólicos e fluviais, que hoje constituem as planícies.

Os terrenos cristalinos do Pré-Cambriano formam as partes mais elevadas da ilha, com altitude de até 534 metros, no Morro do Ribeirão. A morfologia geralmente apresenta linhas de crista, dada sua disposição frequentemente alongada, e a forte declividade de suas encostas.

Os terrenos sedimentares abrangem pequenas áreas de sedimentação; de baixa altitude, alcançando 40 metros nos campos de dissipação de dunas, apresentando morfologia típica. Na planície sedimentar verifica-se a atuação de processos erosivos e deposicionais sob várias condições distintas de ambiente, onde os rios, os mangues, as praias e as lagoas aí existentes, constituem a Unidade Geomorfológica Planícies Costeiras (SANTOS, 1997).

Conforme Silva (2010) a Bacia Hidrográfica do Rio Itacorubi constituía-se como uma paleoenseada, a qual originalmente fazia parte de uma Ilha isolada, compondo um “arquipélago” de rochas cristalinas, atualmente representadas pelos morros. Provavelmente, durante o período Terciário e em períodos alternados do Quaternário, esse grupo de ilhas foi unido por formações constituídas por sedimentos marinhos, lacustres, eólicos e fluviais, desenvolvendo-se as restingas, e à medida que se expandiam, aumentavam a extensão das praias e passavam a ser remodelados pelo vento, originando as dunas. O arquipélago se transformou na tão conhecida Ilha de Santa Catarina, constituindo a parte insular do Município de Florianópolis.

As descrições da geomorfologia, nas regiões do cristalino, os solos possuem espessura em torno de 1 m (horizontes A + B), onde predominam os do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo. Conforme Herrmann (1989) isso ocorre nas regiões mais acidentadas sendo maiores as espessuras nos relevos menos acidentados. Devido às características topográficas acidentadas do relevo, a erosão nesses solos é acentuada sendo necessário conservá-los com culturas perenes.

De acordo com Santos (1997), nas áreas sedimentares predominam as areias quartzosas. São solos ácidos, pobres em nutrientes e acentuadamente suscetíveis à erosão eólica. Devido à

permeabilidade elevada, períodos mínimos de estiagem são suficientes para acarretar deficiência hídrica. Para uso agrícola é necessário melhorar sua fertilidade.

A Figura 24 representa o perfil altimétrico longitudinal de Florianópolis. Observa-se um corte longitudinal (Sul-Norte) passando pelos maiores aclives e declives. A declividade influencia diretamente na velocidade de escoamento superficial das águas, e nas suas consequências: erosão, desmoronamento, assoreamentos e inundações (GGE, 2006).

Figura 24 – Perfil altimétrico longitudinal de Florianópolis



Fonte: Adaptado do GGE (2006)

As áreas mais planas concentram-se na porção Leste (região das lagoas), a Noroeste (Rio Vermelho), ao Norte (região de Jurerê, Canasvieiras estendendo-se até Ingleses), e no centro da porção sul da Ilha (Aeroporto, Rio Tavares e Campeche). A área continental do município de Florianópolis apresenta morros de pequena altitude, não ultrapassando os 100 metros.

3.4 GEOLOGIA

Conforme Tomazzoli e Pellerin (2015), do ponto de vista geológico-geomorfológico, a ilha de Santa Catarina pode ser dividida em dois domínios fundamentais: a) domínio de morros, montanhas e elevações, constituído por migmatitos do Complexo Águas Mornas, pelos granitos Ilha e Itacorubi e por rochas vulcânicas ácidas da Suíte Cambirela, todos cortados por diques do Enxame Florianópolis; b) domínio das planícies costeiras que interligam essas elevações e são constituídas por depósitos quaternários inconsolidados, de origem variada.

Ainda conforme os mesmos, a coluna estratigráfica da ilha de Santa Catarina é definida conforme a Quadro 10.

Quadro 10 – Coluna estratigráfica da ilha de Santa Catarina

Holoceno e Pleistoceno

Depósitos planícies costeiras

Cretáceo

Rochas cataclásticas policíclicas

Enxame de diques Florianópolis

Neoproterozóico

Rochas cataclásticas policíclicas

Suíte plutono vulcânica cambirela

Suíte pedras grandes

Suíte maruim

Paleo-Neoproterozóico

Complexo águas mornas

Fonte: TOMAZZOLI e PELLERIN (2014)

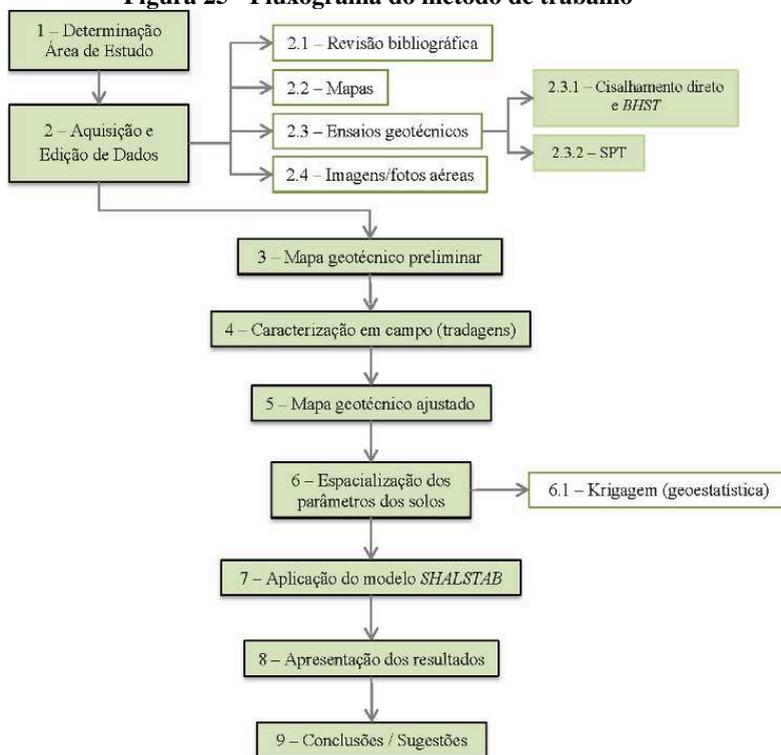
4 MATERIAIS E MÉTODO

O presente capítulo descreve e detalha as etapas de trabalho, compondo o método aplicado de forma a almejar os objetivos propostos. O método aqui aplicado baseia-se na “Metodologia de mapeamento geotécnico de grandes áreas empregadas no Sul do Brasil”, desenvolvida por Davison Dias (1995), e na “Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental”, desenvolvida por Higashi (2006).

Através da utilização parcial das duas metodologias citadas anteriormente, foi possível desenvolver essa pesquisa, condicionada pelas particularidades do presente estudo, características da área de aplicação e objetivos gerais e específicos.

O método adotado no presente estudo segue o fluxograma básico apresentado na Figura 25. As seções em sequência descrevem cada etapa de trabalho sintetizada no fluxograma.

Figura 25 - Fluxograma do método de trabalho



4.1 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Consiste na etapa inicial do método. Durante essa etapa deve ser analisado o local de estudo, conforme a disponibilidade de dados preexistentes, como mapas temáticos, laudos de sondagens e ensaios laboratoriais, a importância e relevância do estudo a ser conduzido, o conhecimento pessoal, análise prévia de cronogramas, hipóteses de trabalho e definição dos objetivos.

Para o presente estudo, foi selecionada a Microbacia do Itacorubi, Florianópolis/SC, local esse com boa disponibilidade de dados, mapas, ensaios geotécnicos laboratoriais e de campo, entre outros. Outro fator preponderante refere-se ao fato do autor ter realizado estudos prévios do local, como artigos científicos e um Trabalho de Conclusão de Curso em nível de graduação.

Por tratar-se de um estudo cujo tema é o mapeamento geotécnico, a escolha da ferramenta computacional é de grande importância. Após a análise das opções disponíveis, foi decidido utilizar o *software* de SIG “ArcGIS®”.

A escolha do *software* ocorreu uma vez que o mesmo conta com interface gráfica intuitiva, extensões de arquivo compatíveis com outras plataformas SIG, possui boas ferramentas de edição e análise, banco de dados integrado ao programa, utilização difundida em estudos de mapeamento geotécnico, aplicação de ferramentas de interpolação geoestatística, entre outros.

4.2 AQUISIÇÃO E EDIÇÃO DOS DADOS PREEXISTENTES

Consiste em uma etapa de grande importância, onde são definidos se existem subsídios para a continuidade e elaboração da dissertação. Conforme Higashi (2006), a utilização e análise de dados preexistentes, em especiais os mapas, são empregados pela maioria dos mapeamentos realizados para avaliações geotécnicas. Entretanto, apenas aqueles que apresentam informações nas melhores escalas são utilizados em cruzamentos e sobreposições para a geração das unidades geotécnicas.

Dessa forma, foram coletados diversos mapas, laudos de sondagens à percussão, resultados de ensaios geotécnicos, imagens aéreas e de satélite, entre outros.

4.2.1 Revisão bibliográfica

Após definir as diretrizes iniciais na etapa de planejamento, iniciou-se o estudo da fundamentação teórica relativa às áreas de conhecimento mais importantes de forma a alcançar-se os objetivos propostos.

4.2.2 Mapas

A obtenção dos mapas preexistentes constituiu uma das etapas mais importantes, conforme os objetivos do presente estudo. Foram obtidas as seguintes fontes cartográficas principais, a partir das quais foram extraídos diversos mapas básicos, descritos no Quadro 11.

Item	Descrição
Modelo Digital de Elevações (MDE)	
Fonte	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e Sustentável – SDS (Governo de Santa Catarina)
Desenvolvimento	Engemap Geoinformação
Escala	1:10.000
Resolução Espacial	39cm
Período	2010 a 2012
Datum Horizontal	Geocêntrico (Elipsóide <i>Geodetic Reference System 1980 – GRS80</i>)
Datum Vertical	Datum Altimétrico do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) – Datum de Imbituba
Sistema de Referência	SIRGAS 2000, zona 22S
Curvas de Nível	1 em 1 metro

Item	Descrição
Restituição Digital de Florianópolis	
Fonte	Secretaria Municipal da Receita – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Título	Projeto de Modernização da Gestão Territorial e Geoprocessamento Corporativo
Etapa	Restituição Digital Planialtimétrica
Escala	1:2.000
Data	Maio/2009 (Aerotriangulação realizada em Julho e Agosto de 2008)
Projeção	Universal Transversa de Mercator – UTM
Datum Horizontal	SAD-69 (ajustamento anterior a SET/1996)

Quadro II – Fontes cartográficas utilizadas (continuação)

Item	Descrição
Mapa Geológico	
Fonte	Departamento de Geociências – Centro de Filosofia e Ciências Humanas (UFSC)
Obtido de	Obtido do arquivo “PDF” disponível por meio da URL http://lmo.ufsc.br/mapa-geologico-da-ilha-de-santa-catarina/
Título	Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina
Data	Novembro/2014
Projeto	Atlas Geológico-Geomorfológico da Ilha de Santa Catarina
Base Cartográfica	ILHA de STA. CATARINA: Levantamento Aerofotogramétrico do Aglomerado Urbano de Florianópolis pelo IPUF. Escala 1:2.000. Curvas de Nível de 1m em 1m, 2002
Datum Horizontal	SAD 69
Projeção	Universal Transversa de Mercator – UTM, Zona 22S

Os mapas básicos, derivados dessas fontes, são relacionados nos itens seguintes.

a) Mapa de limites territoriais

Para a divisão territorial da Microbacia do Itacorubi foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do Estado de Santa Catarina.

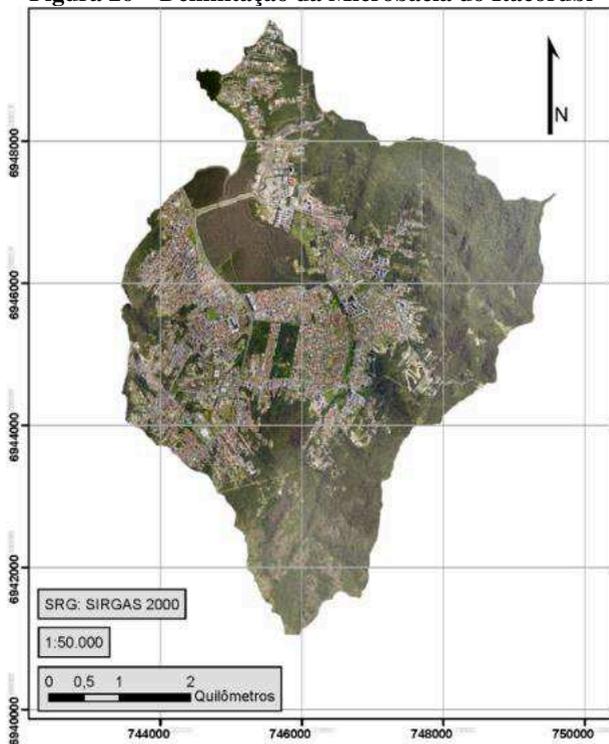
A partir dessa base, foi delimitada a área da microbacia, analisando-se os divisores de água visíveis através das curvas de nível. Como base preliminar para a delimitação, utilizou-se o Mapa de Bacias Hidrográficas de Santa Catarina, obtido no site da EPAGRI/SC (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina).

A setorização das unidades hidrográficas (UH) foi realizada pela EPAGRI-CIRAM a partir da análise dos dados da base cartográfica anterior de Santa Catarina, na escala 1:50.000, com objetivo de atender as necessidades específicas do Projeto PRAPEM / Microbacias 2 (EPAGRI, 2010).

A Figura 26 ilustra a delimitação da área de estudo, sobreposta à imagem aérea proveniente do mosaico de ortofotos do Modelo Digital de Elevação do Estado de Santa Catarina, sendo possível observar, de forma simplificada, o uso do solo, mancha urbana e principais avenidas.

A área da Microbacia está compreendida entre as coordenadas planas do sistema de referência UTM, SIRGAS 2000, zona 22S, vértice 1 N = 6.949.719,87m e E = 743.443,46m e vértice 2 N = 6.941.051,21m e E = 749.589,17m.

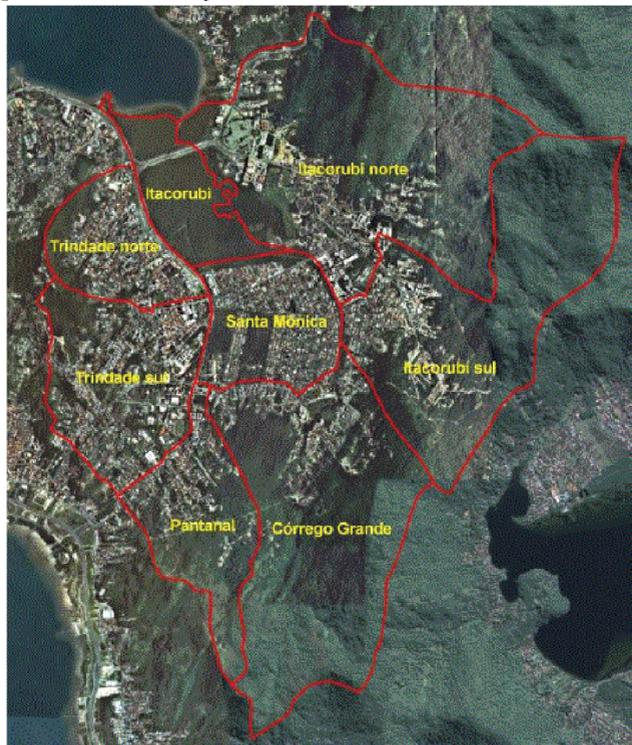
Figura 26 – Delimitação da Microbacia do Itacorubi



A região delimitada abrange os bairros Córrego Grande, Itacorubi, Pantanal, Santa Mônica e Trindade, além dos loteamentos Flor da Ilha, Jardim Anchieta, Jardim Germânia, Parque São Jorge, Jardim Itália e os assentamentos Alto Pantanal, Quilombo e Sertão do Córrego (IPUF, 2008, *apud* SILVA, 2010). A Figura 27 ilustra os bairros.

Após a edição do mapa de limites territoriais foi possível executar a delimitação dos demais mapas, originados por fontes díspares e em escalas distintas. O mesmo foi importado para o *software* de SIG através de ferramenta automatizada para arquivos originados em plataforma CAD (*Computer Aided Design*).

Figura 27 – Delimitação dos bairros da Microbacia do Itacorubi



Fonte: Silva (2010)

b) Mapa hidrográfico

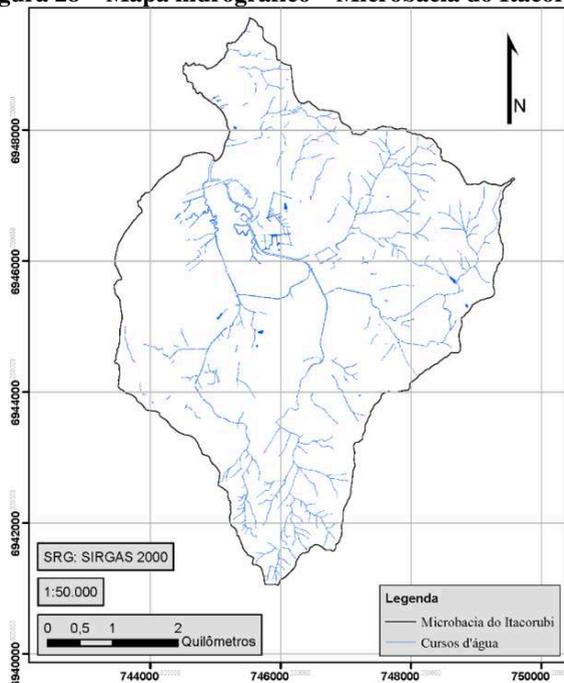
O mapa hidrográfico foi obtido através da Restituição Digital da PMF, contemplando os cursos naturais de água, lagos e lagoas, áreas inundadas e os canais artificiais de macrodrenagem urbana. O arquivo fornecido apresenta-se em formato “dwg”, em plataforma CAD, a partir do qual foram extraídos os dados referentes à Microbacia do Itacorubi. A Figura 28 ilustra o mapa.

A Microbacia do Itacorubi apresenta área de drenagem, em projeção, igual a 28,15km², ou 2.815,13ha, e possui perímetro de 27,20km. Seu curso d’água principal, o Rio Itacorubi, possui extensão em projeção planimétrica igual a 5,59km.

Conforme Silva (2010), a Microbacia do Itacorubi é drenada pelos rios do Sertão, Córrego Grande, Itacorubi e seus afluentes, além de alguns canais de drenagem menores. Na

microbacia existe o manancial Ana D'Avila (hoje manancial do Quilombo) que possui vazão média de 25,93 l/s, sendo captada a vazão média de 4 l/s.

Figura 28 – Mapa hidrográfico – Microbacia do Itacorubi



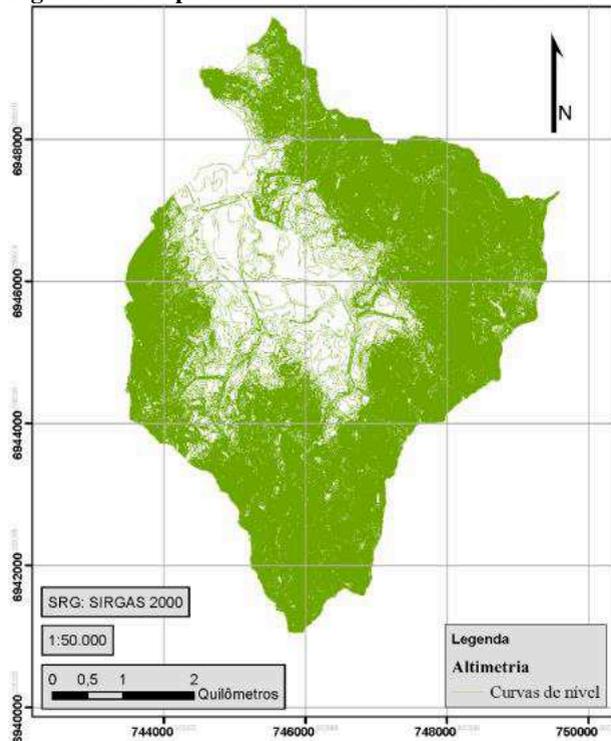
Conforme GGE (2006), o município de Florianópolis possui microbacias hidrográficas com dimensões e características físicas heterogêneas. Quanto mais permeável for o substrato, menor será a densidade da drenagem, logo quanto menos água infiltrar, maior será a densidade de drenagem. A maior densidade de drenagem concentra-se a oeste do município, são as áreas do centro e continente, onde existem características naturais de menor permeabilidade, além do efeito da ocupação humana em termos de impermeabilização do solo ocupado.

c) Mapa altimétrico e MDT

O mapa altimétrico, com curvas de nível, foi derivado do Modelo Digital de Elevações (MDE) do Estado de Santa Catarina, sendo geradas curvas mestras a cada 1 metro referentes à escala 1:2.000. O arquivo fornecido apresenta-se como um mosaico em formato SIG a partir do qual foram extraídos os dados referentes à Microbacia do Itacorubi.

Após ser editado em plataforma CAD, o mesmo foi inserido no software de SIG. Por meio do mapa altimétrico foi possível gerar a superfície numérica, utilizando ferramentas de análise tridimensional do software. Essa é indispensável na aplicação do método proposto uma vez que essa superfície provê os dados topográficos para a simulação de estabilidade do modelo SHALSTAB. O mapa altimétrico em formatação final é representado na Figura 29.

Figura 29 – Mapa altimétrico – Microbacia do Itacorubi



Conforme o mapa elaborado, a Microbacia do Itacorubi apresenta altitudes variando entre 0 metro, correspondendo ao nível do mar na exutória (Manguezal do Itacorubi), até 493 metros, na extremidade Leste, junto ao divisor de águas com a Microbacia da Lagoa da Conceição.

Por meio do mapa altimétrico, foi possível definir o Modelo Digital do Terreno – MDT da área de estudo. Esse é indispensável na aplicação da simulação *SHALSTAB*, uma vez que provê os dados topográficos. A Figura 30 ilustra o MDT gerado e a Figura 31 uma vista em perspectiva.

Figura 30 – Modelo digital do terreno (MDT) – Microbacia do Itacorubi

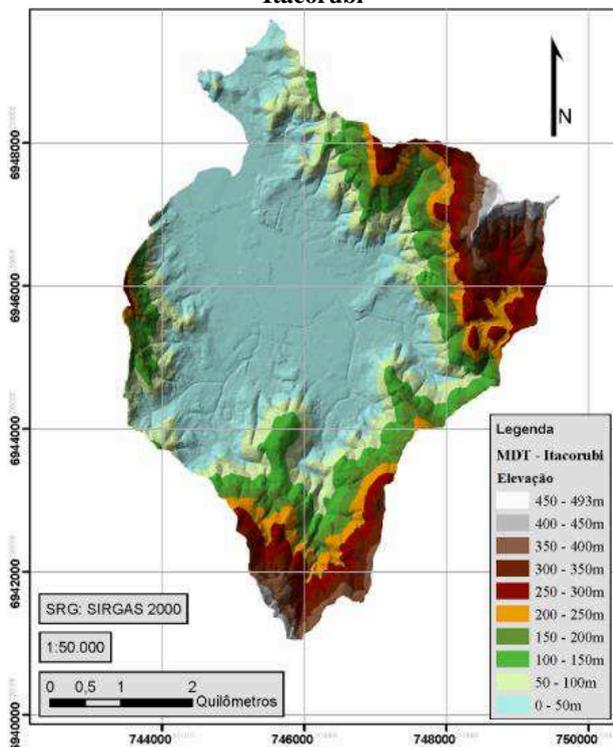
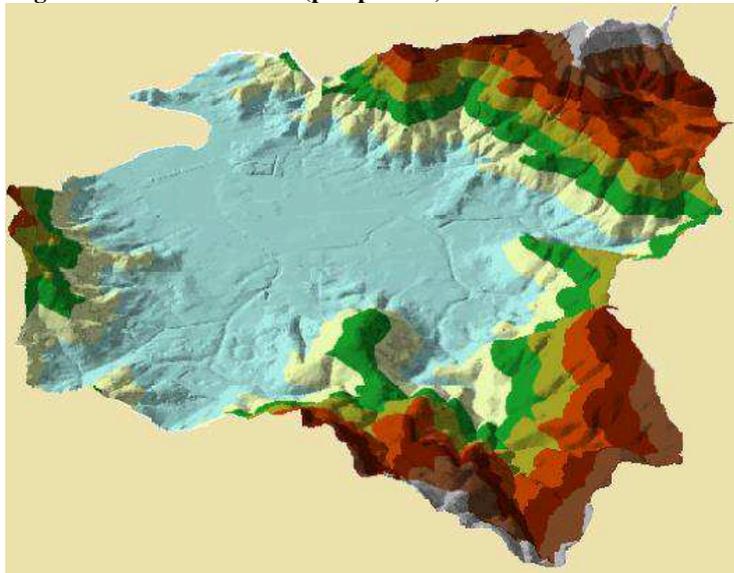


Figura 31 – Vista do MDT (perspectiva) – Microbacia do Itacorubi

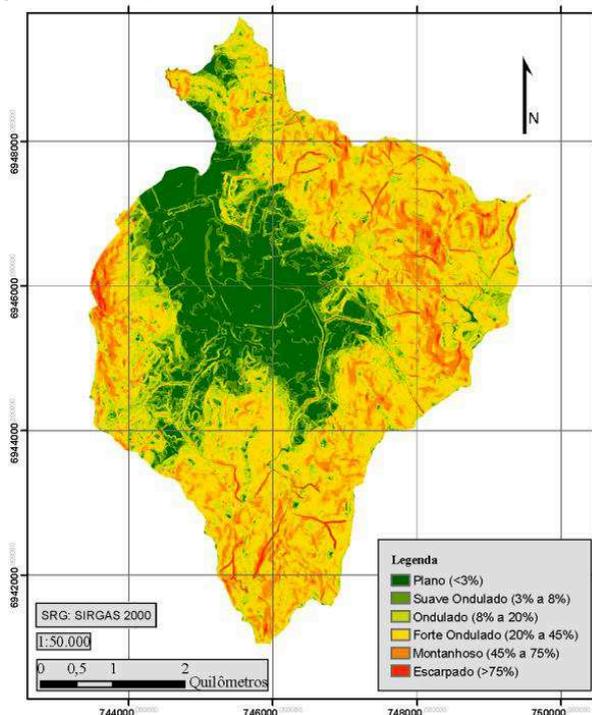


Conforme GGE (2006), os mapas de relevo e declividades são indispensáveis para a gestão territorial. As áreas de encosta com declividades acentuadas, assim como as áreas planas de cotas inferiores, tendem a compor áreas de risco, seja devido aos deslizamentos ou inundações. As mesmas devem ser identificadas, mapeadas, demarcadas e regulamentadas, a fim de restringir-se a ocupação humana.

Para a Microbacia do Itacorubi, foi desenvolvido o mapa de declividades, por meio de ferramentas de edição do *software* de SIG. A Figura 32 ilustra o mapa gerado, baseado no MDT.

Segundo Embrapa (2006), o relevo pode ser classificado quanto às declividades e comprimentos das encostas, assim como a configuração superficial dos terrenos correspondendo então às chamadas “Fases de Relevo”. As distinções são empregadas para prover informação sobre praticabilidade de emprego de equipamentos agrícolas, mormente os mecanizados, e facilitar inferências sobre suscetibilidade dos solos à erosão.

Figura 32 – Mapa de declividades – Microbacia do Itacorubi



Baseada nessa classificação, a Tabela 10 indica as áreas e respectivas taxas de ocupação de cada fase de relevo.

Tabela 10 - Fases de relevo – Microbacia do Itacorubi

Fases de relevo	Área (m ²)	Ocupação (%)
Plano (< 3%)	5.474.633,00	19,4
Suave ondulado (3 a 8%)	3.005.819,00	10,7
Ondulado (8 a 20%)	4.802.560,00	17,1
Forte ondulado (20 a 45%)	10.651.061,00	37,8
Montanhoso (45 a 75%)	3.656.671,00	13,0
Escarpado (> 75%)	560.578,00	2,0
TOTAL	28.151.322,00	100,0

Analisando o mapa de declividades e os dados de distribuição de fases de relevo, pode ser observada a prevalência de declividades com valores inferiores a 45%, predominando as fases de relevo entre “plano” e “forte ondulado”. A fase mais abrangente corresponde à “Forte ondulado”. A menor declividade presente é de 0%, enquanto a maior é de 89%. A declividade média da Microbacia do Itacorubi é igual a 13,1%, correspondendo à fase “Ondulado”.

As áreas de menor declividade concentram-se na porção central da Microbacia do Itacorubi, correspondendo, principalmente, ao Manguezal do Itacorubi e parte dos bairros Santa Mônica, Itacorubi, Córrego Grande, Trindade e Pantanal.

Aproximando-se às áreas limítrofes da Microbacia do Itacorubi, correspondendo aos divisores d'água, predominam terrenos com maiores declividades, de “Forte ondulado” à “Escarpado”. Excetua-se a porção Norte, onde há a delimitação com o mar e o exutório da mesma.

Conforme Higashi (2006), nas cidades costeiras os solos sedimentares ocorrem nas regiões planas, de baixas declividades e cotas de elevação, sendo encontrados normalmente perfis de argila mole provenientes de solos minerais (solos glei) e orgânicos, solos de mangue, areias quartzosas (podzolizadas ou não) e podzóis.

d) Mapa de mancha urbana

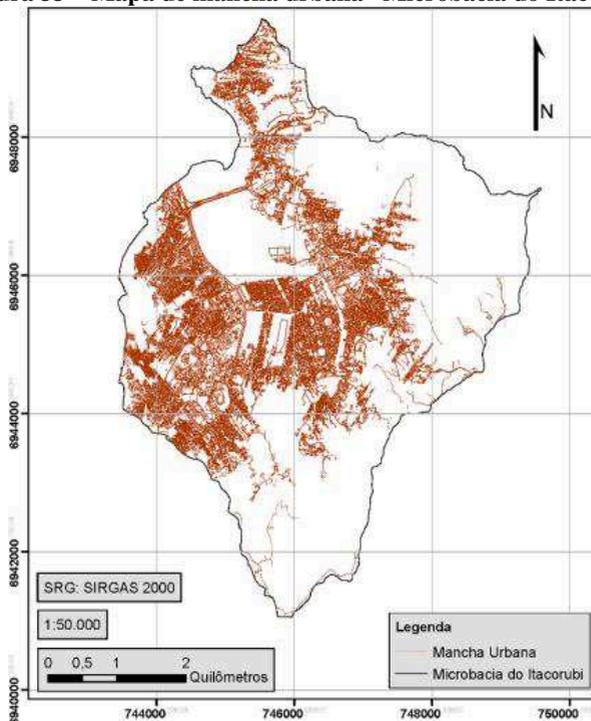
Para o presente estudo, o mapa de mancha urbana é composto por polígonos representando edificações, sistema viário, equipamentos urbanos e de serviços públicos, entre outros. Dessa forma, o mapa gerado difere de mapas de mancha urbana convencionais, os quais comumente representam as áreas urbanizadas como hachuras, sem delimitação das edificações dentro dos terrenos que ocupam. Essa diferenciação torna-se válida uma vez que, ao analisar as áreas suscetíveis à deslizamentos rasos, as delimitações das edificações permite verificar suas respectivas proximidades às áreas instáveis, e não somente o terreno, o qual pode ter sua maior parte não edificada.

O mapa de mancha urbana, assim como o de hidrografia, foi extraído da Restituição Digital da PMF. O mesmo contempla os alinhamentos das ruas, logradouros, avenidas, servidões, entre outros, e suas respectivas nomenclaturas.

Conforme informado nos dados básicos da restituição, a cobertura aerofotogramétrica foi realizada em Março de 2007, portanto o mapa de mancha urbana do presente estudo contempla as áreas edificadas até o período citado.

Assim como o mapa hidrográfico, o mapa de mancha urbana original, fornecido em formato “dwg”, plataforma CAD, contempla dados do município de Florianópolis em sua totalidade, entretanto foi selecionada a área referente à Microbacia do Itacorubi para posterior edição e inserção no SIG. A Figura 33 ilustra o mapa editado.

Figura 33 – Mapa de mancha urbana– Microbacia do Itacorubi



e) Mapa geológico

O mapa geológico foi obtido em formato *Portable Document Format* “.PDF” através de sítio eletrônico referente ao Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina (ISC) (TOMAZZOLI

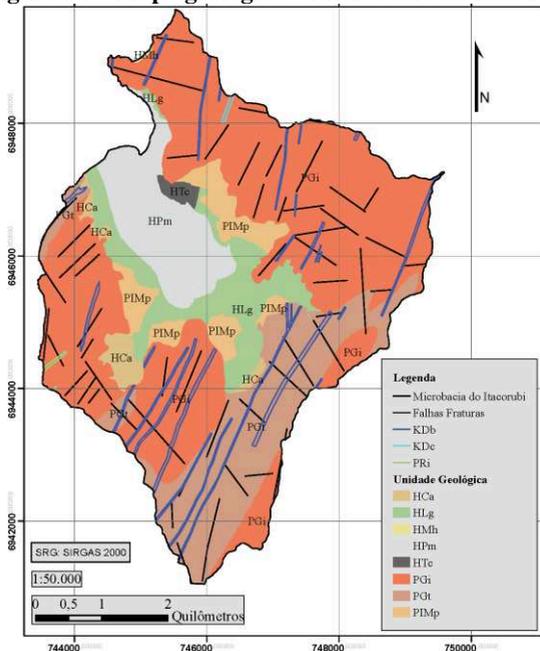
e PELLERIN, 2014). A seguir são apresentadas as principais informações da fonte.

O arquivo obtido apresenta informações para a Ilha de Santa Catarina, porção insular do município de Florianópolis. A partir do arquivo original, foram selecionadas as unidades geológicas para a Microbacia do Itacorubi, assim como os diques e falhas geológicas, fraturas e fotolineamentos. O mapa editado é apresentado na Figura 34.

Para a área de estudo, foram classificadas oito unidades geológicas distintas, as quais são detalhadas nos parágrafos seguintes, constam também zonas de falhas, fraturas e fotolineamentos, assim como diques básicos, ácidos e de riolitos. As áreas e respectivos percentuais de ocupação das unidades geológicas na microbacia são indicados na Tabela 11.

A unidade geológica predominante refere-se ao Granito Ilha, “PGi”, ocupando mais da metade da área total da bacia.

Figura 34 – Mapa geológico – Microbacia do Itacorubi



Essa unidade corresponde ao Granito Grosseiro Ilha, originalmente definido por Scheibe e Teixeira (1970 *apud*

TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015, p. 231). Integra a Suíte Intrusiva Pedras Grandes que engloba também o Granito Serra do Tabuleiro e outros granitóides alcalinos de natureza pós-tectônica, com muito pouca ou nenhuma deformação dúctil. Datações Rb-Sr acusaram idades de 524 ± 68 Ma (BASEI, 1985, *apud* TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015, p. 231).

Tabela 11 - Análise espacial do Mapa Geológico – Microbacia do Itacorubi

Unidade Geológica	Descrição	Área (m²)	Área ocupada (%)
PGi	Granito ilha	15.072.882,78	53,54
PGt	Granito itacorubi	5.529.360,34	19,64
HPm	Depósitos de planície de maré	2.744.176,62	9,75
HLg	Depósitos flúvio lagunares-lacustres	2.520.648,50	8,95
PIMp	Depósitos marinhos praias recobertos ou não por dunas	1.547.449,02	5,50
HCa	Depósitos colúvio-aluvionares	552.741,01	1,96
HTc	Depósitos tectogênicos	167.265,87	0,59
HMh	Depósitos marinhos praias atuais	16.804,16	0,06
TOTAL		28.151.328,31	100,00

Rocha predominante na ISC, o Granito Ilha apresenta-se como sieno e monzogranitos maciços, isótopos, de coloração rosada ou cinza claro, com textura equigranular, mais raramente pórfira, grossa ou média, hipidiomórfica. São constituídos por quartzo, feldspato K e biotita (anfíbólio) como minerais essenciais; zircão, alanita, apatita e minerais de óxidos de Fe-Ti (magnetita/ilmenita) como minerais acessórios e epidoto, sericita/muscovita, clorita, titanita, carbonatos e fluorita como minerais secundários.

O Granito Ilha é considerado como uma denominação local correlacionável ao Granito Serra do Tabuleiro, devido à grande semelhança petrográfica e geoquímica (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

A segunda unidade mais abrangente refere-se à PGt – Granito Itacorubi. Conforme Tomazzoli e Pellerin (2015), essa unidade ocorre associada às rochas piroclásticas, configurando uma faixa semi contínua, com direção nordeste, no maciço que envolve a praia da Lagoinha do Leste. Ocorre também no norte do Maciço da Costeira, bairros Córrego Grande e Itacorubi e no morro da Cruz, área central da cidade, nestes últimos casos, como veios ou corpos intrusivos maiores no Granito Ilha.

Na ISC apresentam-se com sienos ou monzogranitos de cor cinza claro ou rosada, podendo mostrar textura equigranular fina a média, ou ainda textura pórfira, com fenocristais de feldspato potássico ou plagioclásio.

O Granito Itacorubi, “PGt”, perfaz 19,64% da área da microbacia, caracterizando-se como a segunda unidade geológica predominante. Ambas as unidades de granito, “PGi” e “PGt”, quando somadas, abrangem cerca de 75% da área total. Analisando conjuntamente ao MDT, Figura 28, e Mapa de Declividades, Figura 30, tais unidades geológicas coincidem com as áreas de declividade “Forte ondulada” a “Escarpada”, a partir da cota de valor 10 metros, aproximadamente. Tais áreas caracterizam-se como os morros, os quais circundam a área central, mais plana, da microbacia.

A unidade HPm – Depósitos de Planície de Maré, a qual provem da unidade litoestratigráfica “depósito paludial” é composta por sedimentos ricos em matéria orgânica, encontradas na planície costeira, próxima a foz de rios e intrínsecas à atuação das marés. Do ponto de vista geomorfológico, esse depósito apresenta forma de planície de maré e terraço de maré, com altitudes médias de no máximo 2 metros (HORN FILHO *et al.*, 2014).

Ainda conforme os autores, a formação e evolução geológica desse depósito relaciona-se às transgressões e regressões marinhas, em base às variações relativas do nível médio do mar ocorridas nos últimos 5,1 ka AP, associadas ao sistema laguna-barreira IV da idade holocênica.

A área delimitada pela unidade “HPm” abrange todo o Manguezal do Itacorubi e parte do bairro Santa Mônica, em concordância com as caracterizações de Horn Filho *et al.* (2014). Conforme é apresentado no No Capítulo 5 – Resultados, os laudos de sondagem à percussão “SPT” 6, 7, 15, 26 e 32 indicam

camadas de “Argila orgânica muito mole com fósseis marinhos”, “Silte arenoso pouco compacto” e “Argila siltosa média a mole”.

A unidade HLg – Depósitos Flúvio Lagunares-Lacustres, resulta da acumulação de sedimentos oriundos da erosão e do transporte de materiais de áreas situadas à montante dos cursos fluviais dos rios da planície costeira, podendo ser retrabalhados posteriormente em ambiente lagunar pela ação da deriva litorânea, das ondas e dos ventos. Tais depósitos estão associados às desembocaduras dos rios, cursos fluviais esses que desaguaram em corpos lagunares, influenciando na sedimentação lagunar (HORN FILHO *et al.*, 2014).

O mesmo faz contato com diversas unidades litoestratigráficas, tanto do embasamento indiferenciado e depósitos do sistema continental e sistema transicional pleistocênico e holocênico. Do ponto de vista geomorfológico, o depósito flúvio-lagunar apresenta forma de terraço isolado de superfície plana, geralmente alongado e paralelo à linha de costa, alguns levemente circulares e situados acima do nível base dos rios.

A unidade PIMp – Depósitos Marinhos Praiais/recobertos ou não por dunas, corresponde sedimentos arenosos finos, bem selecionados, de cor amarelo-avermelhada devido à presença de óxidos/hidróxidos de ferro, depositados sob influência marinha. Formam terraços mais elevados, dispostos mais internamente em relação aos depósitos holocênicos do mesmo tipo (HORN FILHO *et al.*, 2014).

A unidade HCa – Depósitos Colúvio-Aluvionares possui composição terrígena, formada por material transportado, principalmente pelo efeito da gravidade, localizadas próximas às áreas fonte. Ocorre, geralmente, associada aos elúvios, encaixados nas paleodrenagens e drenagens dos maciços rochosos. Na ISC, os depósitos colúviais estão mais dispersos nas paisagens costeiras (HORN FILHO *et al.*, 2014).

O depósito colúvial é constituído de uma mistura de sedimentos arenosos, siltosos e argilosos, de grãos imaturos e angulosos, além de macroclastos de granulometria variável com tamanho de grão desde grânulos a matacões. Predominam entre os macroclastos dos colúvios os fragmentos de diversos tipos de granitos, basaltos e diabásios (HORN FILHO *et al.*, 2014).

O depósito aluvial caracteriza-se como resultado do transporte de sedimentos por meio da energia exercida pelas águas dos cursos fluviais, antigos e/ou atuais, e depositados tanto nas margens dos rios, bem como em áreas de transbordo, durante todo o Quaternário indiferentemente.

A unidade HTc – Depósitos Tectogênicos é composta por materiais retirados ou alterados pelos humanos para construções e outros usos antrópicos. Segundo Fanning (1989, *apud* HORN FILHO *et al.*, 2014), eles podem ser divididos entre quatro categorias: os materiais úrbicos, constituídos pelos artefatos manufaturados pelo homem moderno (vidro, asfalto, plástico, entre outros); os materiais gárbicos constituídos pelo lixo orgânico gerado pelo homem em quantidade significativa e que alteram os teores de metano e do oxigênio; os materiais espólicos provenientes de escavações e terraplenagem (minas, rodovias, entre outros); e, por fim, os materiais dragados provenientes de cursos d'água.

Conforme pode ser observado no mosaico de ortofotos, Figura 20, a unidade “HTc” está sobreposta à área do Centro de Transferência de Resíduos Sólidos (CTReS), pertencente a Companhia de Melhoramentos da Capital (Comcap), local esse onde, até Junho de 2000, constituía o aterro sanitário do município de Florianópolis. Ainda na mesma área, fora dos limites do antigo aterro, estão presentes edificações comerciais e residenciais, assim como um hotel e um posto de combustíveis, na localidade conhecida como Jardim das Garças.

Analisando o laudo de sondagem à percussão número 22, executado para um edifício residencial da localidade de Jardim das Garças, há uma camada de areia média pouco compacta de espessura média igual a 3 metros. Abaixo dessa camada, predomina argila orgânica mole com fósseis marinhos, com espessura em torno de 3,5 metros, evidenciando a existência de aterro para terraplenagem dos empreendimentos, em concordância com a classificação geológica.

A unidade HMh – Depósitos Marinhos Praiais Atuais é representada pelos sedimentos das praias atuais e praias pretéritas. Situa-se na interface entre a terra e o mar, ao longo da linha de costa, na forma de cordões arenosos paralelos e subparalelos. No caso das praias contemporâneas, o depósito marinho praial se estende desde o nível de baixa-mar média, até a

linha de vegetação permanente, que configura o limite superior das ondas de tempestade (SUGUIO, 2003).

Além das unidades geológicas, constam também o cadastro de falhas, fraturas e fotolineamentos, além dos seguintes diques:

- KDb – Dique Básico: diabásios de cor escura, afíricos, afaníticos ou faneríticos finas, médias ou grossas. Termos de granulação mais grossa ocorrem no centro de diques mais espessos e podem ser classificados como gabros. Formam diques com espessuras variadas, podendo localmente atingir até cerca de 200 metros;
- KDc – Dique Ácido: dacitos de cor cinza médio, pórfiras com fenocristais de plagioclásio sobre matriz afanítica. Formam diques com espessuras variadas, muitas vezes do tipo dique composto: borda de diabásio escuro e centro de dacito cinza;
- PRi – Dique de Riólito: rochas geralmente com textura pórfira, exibindo fenocristais de feldspato potássico e quartzo sobre matriz afanítica branca ou avermelhada. Formam diques ou corpos intrusivos irregulares com até poucos metros de espessura.

Conforme Tomazzoli e Pellerin (2015), na ISC, foram mapeados em torno de 400 diques integrantes do Enxame de Diques Florianópolis – EDF. Suas espessuras vão desde centimétricas/métricas, até superiores a duzentos metros, podendo prolongar-se continuamente por vários quilômetros. Estão orientados, preferencialmente, segundo a direção N10°-30°E e, em menor proporção, segundo NS, N20°-30°W, e E-W.

Os diabásios ou basaltos ATi são os litotipos predominantes. Podem apresentar textura pórfira (rara), afanítica ou equigranular fina a média. Na Microbacia do Itacorubi a origem do diabásio, na forma de estrutura de dique, está associada ao evento subvulcânico do período de 147 a 119 milhões de anos passados. É encontrado com espessuras que variam de alguns centímetros até uma dezena de metros, geralmente intrusivos nas rochas graníticas (BASTOS, 2004).

Os termos ácidos do EDF são representados principalmente por dacitos e foram caracterizados primeiramente

na ilha do Arvoredo (TOMAZZOLI & LIMA, 2006 *apud* TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015, p. 238), setor norte do EDF e depois também no setor norte da ISC (TOMAZZOLI, 2010 *apud* TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015, p. 237), onde compõem grandes diques, com direções NNE e NNW, que se estendem de forma semi-contínua por cerca de dez quilômetros.

Os dacitos exibem cor cinza e textura púrpura, com fenocristais tabulares de plagioclásio e pigeonita/augita (menores e mais escassos) sobre matriz granular fina, afanítica, hemi-vítrea ou, granofírica. Plagioclásio, augita, pigeonita, óxidos de Fe-Ti e quartzo são seus constitutivos essenciais, com apatita acessória, e clorita, epidoto, sericita e carbonato como minerais secundários. Eventualmente podem conter anfibólio verde ou castanho substituindo parcialmente a augita (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

Conforme a Metodologia de Mapeamento Geotécnico de Davison Dias (1995), a partir do mapa geológico deriva-se o mapa litológico. O mesmo pode ser descrito como uma conversão do mapa geológico, destacando o tipo de rocha ou sedimento que provê o substrato para a formação do respectivo solo. Dessa forma, as unidades geológicas foram convertidas para unidades litológicas, apresentadas no Quadro 12. Ao final, foram determinadas três unidades litológicas, “Granito Ilha”, “Granito Itacorubi” e “sedimentos quaternários”.

Quadro 12 – Unidades litológicas – Microbacia do Itacorubi

Unidade geológica	Unidade litológica
HCa – Depósitos Colúvio-Aluvionares	Sedimentos Quaternários
HLg – Depósitos Flúvio Lagunares-Lacustres	Sedimentos Quaternários
HMh – Depósitos Marinhos Praiais Atuais	Sedimentos Quaternários
HPm – Depósitos de Planície de Maré	Sedimentos Quaternários
HTc – Depósitos Tectogênicos	Sedimentos Quaternários
PIMp – Depósitos Marinhos Praiais/recobertos ou não por dunas	Sedimentos Quaternários

**Quadro 12 – Unidades litológicas – Microbacia do Itacorubi
(continuação)**

Unidade geológica	Unidade litológica
PGi – Granito Ilha	Granito Ilha
PGt – Granito Itacorubi	Granito Itacorubi

Reitera-se que as áreas estudadas criteriosamente referem-se àquelas caracterizadas como encostas íngremes compostas por solos residuais, locais esses com maior tendência de apresentar suscetibilidade a movimentos de massa. Dessa forma, as unidades provenientes de formações geológicas do tipo “depósitos” foram aglutinadas e as unidades provenientes de “Granito Ilha” e “Granito Itacorubi” foram singularizadas, devido à diferenciação dos solos formados por estas, assim como devido ao fato de estarem localizadas majoritariamente em regiões de encostas.

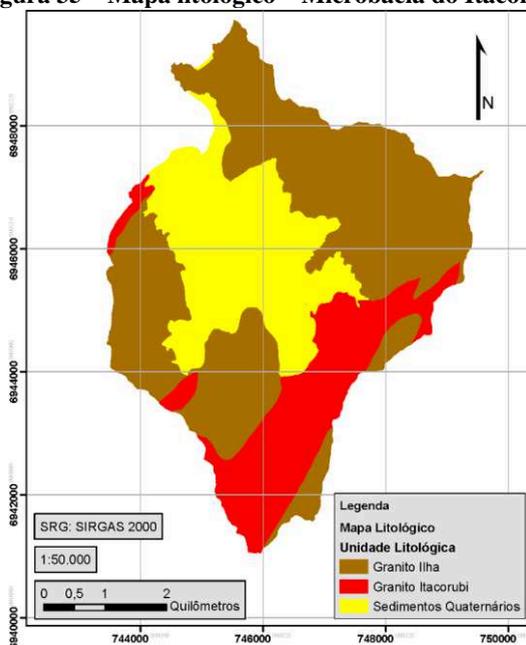
Assim como para o mapa geológico, foi desenvolvida uma breve análise em ambiente SIG de forma a obter-se os dados espaciais para as unidades litológicas. O mapa gerado é apresentado na Figura 35. A Tabela 12 apresenta os dados espaciais do mapa.

A litologia predominante refere-se às formações graníticas, representadas por “Granito Ilha” e “Granito Itacorubi”, sendo a primeira a mais representativa na área de estudo. Tal resultado era previsível devido ao fato de a área de estudo estar inserida em zona costeira e apresentar relevo acidentado, onde há predomínio desse tipo de formação.

Tabela 12 - Análise espacial do Mapa Litológico – Microbacia do Itacorubi

Unidade Litológica	Área (m²)	Área ocupada (%)
Granito Ilha	15.070.000,00	53,54
Sedimentos Quaternários	7.549.085,18	26,82
Granito Itacorubi	5.529.360,34	19,64
TOTAL	28.151.328,30	100,00

Figura 35 – Mapa litológico – Microbacia do Itacorubi



f) Mapa pedológico

O Mapa Pedológico foi obtido por meio do Mapa Geotécnico elaborado por Santos (1997). Conforme descrito pela autora, em seu Mapa Geotécnico do Município de Florianópolis foram adicionadas algumas unidades, como “Rg – Solos litólicos substrato granito”, por meio de observações de campo e ensaios laboratoriais, procedimento esse o qual possibilitou a melhoria na escala do mapa geotécnico em sua última versão.

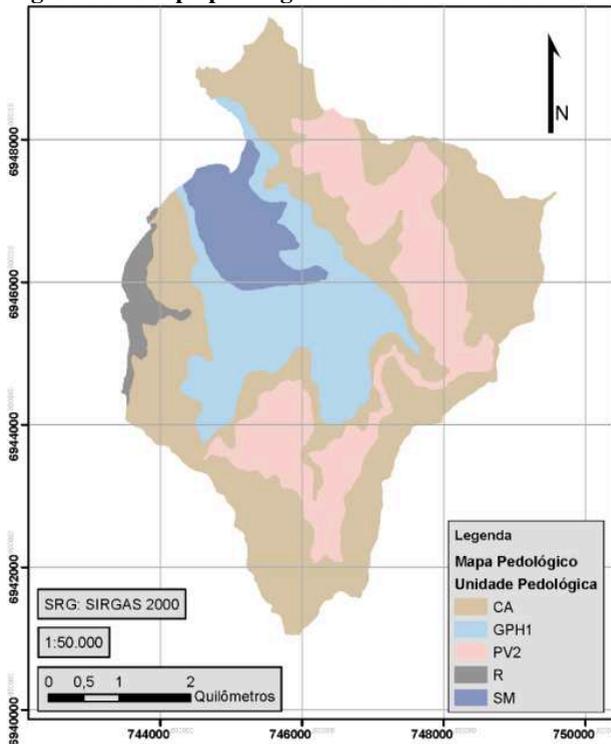
Dessa forma, utilizando o Mapa Geotécnico de Santos (1997), em ambiente SIG, foram extraídas as unidades geotécnicas referentes à Microbacia do Itacorubi. Devido ao fato dessas unidades conterem as classificações pedológicas, foi possível então selecionar as áreas e aglutiná-las por classe pedológica, formando então o Mapa Pedológico do presente estudo, o qual é apresentado na Figura 36.

Para a Microbacia do Itacorubi, foram delimitadas cinco unidades pedológicas distintas, cujos dados básicos são apresentados na Tabela 13. As unidades delimitadas são

caracterizadas nos parágrafos seguintes, em conformidade com a classificação utilizada anteriormente à estabelecida pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SBCS (EMBRAPA, 2006), mais apropriada à metodologia de Davison Dias (1995).

A unidade CA – Cambissolo Álico, é a predominante, ocupando 48,70% da área total. Segundo a Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), corresponde a classe “Cambissolos” a qual se caracteriza como solo constituído por material mineral no horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, exceto hístico com 40cm ou mais de espessura, ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta. Têm sequência de horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R.

Figura 36 – Mapa pedológico – Microbacia do Itacorubi



Adaptado de Santos (1997)

Tabela 13 - Análise espacial do Mapa Pedológico – Microbacia do Itacorubi

Unidade Pedológica	Descrição	Área (m²)	Área ocupada (%)
CA	Cambissolo álico	13.709.781,43	48,70
PV2	Podzólico Vermelho-Amarelo álico	6.246.800,66	22,19
GPH1	Glei pouco húmico	5.447.906,42	19,35
SM	Solos Indiscriminados de Mangue	2.055.092,63	7,30
R	Solos Litólicos	691.747,16	2,46
TOTAL		28.151.328,30	100,00

Quando derivados de rochas como gnaises, granitos, migmatitos, xistos, filitos, é usual a presença de relevantes teores, superiores a 4%, de fragmentos de rocha e/ou de minerais primários facilmente intemperizáveis (biotita, hornblenda, augita, alguns tipos de feldspatos, entre outros), pelo menos na areia fina. Possuindo-se experiência, é possível, em muitos casos, notar esses minerais no exame de campo com o auxílio de uma lupa de mão (OLIVEIRA, 1992).

Ainda conforme o autor, existem cambissolos de colorações bastante diversas e a diferenciação de horizontes é, em geral, modesta, somente tornando-se mais acentuada quando o horizonte A seja húmico ou proeminente.

Para o presente estudo ao sobrepor o Mapa Pedológico e o MDT, apresentado na Figura 30, é possível observar que essa unidade encontra-se distribuída em todas as regiões da Microbacia do Itacorubi. Na porção central é limítrofe às unidades “GPH1” e “PV2”, estando presente, também, junto a praticamente todo o perímetro da bacia. Essa disposição corrobora a topossequência típica de formação de solos para a porção Oeste da ISC, de Santos (1997), apresentada no Capítulo 4 – Materiais e método.

Estão dispostos 12 laudos de sondagem à percussão “SPT” para a unidade “CA”, sendo os laudos número 5, 10, 11, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 24 e 29. Segundo os laudos, os solos são descritos como “Areia média, siltosa, medianamente compacta a muito compacta”, “Silte arenoso, variegado, pouco compacto a medianamente compacto”, “Areia fina, argilosa, com matéria

orgânica, cinza escura, fofa”, “Areia grossa, siltosa, pouco compacta” e “Silte arenoso, com pedregulhos, medianamente compacto, a compacto”. Os perfis de solo, desde a superfície até o impenetrável, apresentam espessuras entre 1,58 metros e 15,53 metros, com média igual a 8,05 metros. As cotas de nível d’água variam entre 1,80 metros e 17,57 metros.

Ainda para a unidade “CA”, ao sobrepor o mosaico de ortofotos, Figura 26, observa-se que a maior parte da porção central da unidade encontra-se intensamente urbanizada. Ao longo da mesma desenvolvem-se parte da rodovia Admar Gonzaga (SC-404), Rua Lauro Linhares e Rua João Pio Duarte Silva, compreendendo três importantes vias do sistema viário da Microbacia do Itacorubi.

Em relação à porção periférica, a unidade contempla, ao Sul e Leste, áreas de encostas com pouca ou nenhuma ocupação antrópica, predominando a cobertura vegetal. Excetua-se o Norte, onde predominam áreas edificadas, englobando parte dos bairros Itacorubi e João Paulo. Partes das rodovias SC-401 e João Paulo estão contempladas, também, na porção Norte da unidade “CA”.

Continuando a comparação entre a área caracterizada pedologicamente como “CA” e os demais mapas, ao sobrepor o Mapa de declividades, Figura 32, é possível observar que, na porção central, predominam terrenos classificados como “Ondulados” a “Forte ondulados”, ou seja, com declividades entre 8% e 45%. Na porção periférica, onde predominam as encostas, os terrenos são classificados como “Forte ondulados” a “Escarpaados”, com declividades superiores a 20%, podendo atingir valores superiores a 75%, conforme classificação da EMBRAPA (2006).

A segunda unidade mais abrangente para a área de estudo refere-se à PV2 – Podzólico Vermelho-Amarelo Álico, englobando 22,19% da Microbacia do Itacorubi. Conforme o SBSC (EMBRAPA, 2006), essa unidade enquadra-se na classe “Argissolos”, sendo constituído por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B.

Segundo Oliveira (1992), os Podzólicos Vermelho-Amarelos têm as mais variadas profundidades e texturas,

inclusive com presença ou não de cascalhos e calhaus, admitindo ampla variabilidade de classes texturais, quer de um solo para outro, quer na sequência de horizontes de um mesmo perfil. Eventualmente, pedras podem estar presentes em alguns desses solos. O horizonte C distingue-se do B pela diferença de variável combinação de textura menos argilosa, cor menos viva, e menor desenvolvimento de estrutura e cerosidade. É comum também apresentar-se mais friável e com vestígios de material rochoso em processo de alteração.

Analisando o mapa pedológico gerado, juntamente ao MDT, Figura 30, é possível observar que tal unidade predomina nas áreas com cotas variando entre 13 metros e 262 metros.

Ao sobrepor o Mapa de Declividades, Figura 32, observa-se que a unidade “PV2” coincide com as áreas classificadas, conforme EMBRAPA (2006), como “Forte ondulado”, “Montanhoso” e, em pequenas áreas, “Escarpado”, ou seja, com declividades superiores a 20%, podendo haver declividades superiores a 75%.

Ao observarmos o mosaico de ortofotos, Figura 26, pode-se constatar que a unidade “PV2” abrange áreas, em sua maior parte, não urbanizadas ou alteradas, predominando regiões de encostas naturais, recobertas por vegetação.

O banco de laudos de sondagens à percussão “SPT”, possui somente um laudo de sondagem para a unidade “PV2”, sendo o de número 9, localizada no bairro Córrego Grande. O mesmo indica camada de solo caracterizada como “Silte arenoso, variegado, compacto a muito compacto” com espessura de solo, desde a superfície até o impenetrável, igual a 5,0 metros. Tais características acordam com as descrições de Oliveira (1992) e EMBRAPA (2006) para a unidade em questão.

A unidade GPH1 – Gleia pouco húmico, estende-se por 19,35% da área total da Microbacia do Itacorubi, sendo a terceira mais abrangente. Segundo o SBCS (EMBRAPA, 2006) corresponde a classe “Gleissolos”, caracteriza-se como solo constituído por material mineral com horizonte gleia iniciando-se dentro dos primeiros 150cm da superfície, imediatamente abaixo de horizonte A ou E, ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos.

Caracterizam-se pela forte gleização, em decorrência do ambiente redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido, em razão da saturação por água durante todo o ano, ou pelo menos

por um longo período, associado à demanda de oxigênio pela atividade biológica. Esses são solos que ocasionalmente podem ter textura arenosa (areia ou areia franca) somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura franco arenosa ou mais fina. (EMBRAPA, 2006).

Conforme o mapa de declividades, Figura 32, essa unidade situa-se nas regiões classificadas como “Plana” e “Suave ondulada”. Ao analisar-se o MDT, Figura 30, é possível observar que tal unidade encontra-se entre as cotas de valores 0 (zero) metros e 23 metros na porção central da microbacia, ou seja, formando uma área intermediária entre a unidade de solo residual “CA” e a área do Manguezal do Itacorubi, na região mais baixa e plana da microbacia.

Ao analisar os 18 laudos de sondagens à percussão “SPT” situados na área delimitada pela unidade “GPH1”, laudos número 1, 2, 3, 4, 8, 12, 13, 15, 16, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 30, 31 e 32, constam descrições das camadas de solo como “Silte arenoso, variegado, pouco compacto a medianamente compacto”, “Argila orgânica pouco arenosa, cinza escura, muito mole”, “Argila arenosa, cinza clara, mole a média”, “Areia média argilosa, cinza clara, fofa”, “Argila orgânica, com fósseis marinhos, cinza escura, muito mole”, “Silte arenoso, com pedregulhos, pouco compacto” e “Areia média, pouco siltosa, cinza clara, pouco compacta”, com espessuras de solo entre 5,52 metros e 18,78 metros. Outra informação importante, obtida dos laudos, refere-se ao nível d’água, com cotas variando entre -1,06 metros e 13,50 metros, evidenciando as condições de hidromorfismo, corroborando quanto à precisão do mapa de origem.

Ao sobrepor o mosaico de ortofotos, Figura 26, observa-se que a unidade “GPH1” refere-se a mais urbanizada da microbacia, compreendendo parcialmente os bairros Agrônoma, Trindade, Pantanal, Córrego Grande, Santa Mônica e Itacorubi. Ao longo da mesma desenvolve-se parte da Avenida Professor Henrique da Silva Fontes, também conhecida como Avenida Beira-Mar, a Rodovia Admar Gonzaga (SC-404), a Avenida Madre Benvenuta, em sua totalidade, e parte das ruas João Pio Duarte Silva e Vera Linhares de Andrade. Estão englobadas nessa unidade, a maior porção da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Eletrosul e Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

A quarta unidade pedológica mais representativa da Microbacia do Itacorubi, abrangendo 7,30% de sua área, refere-se à unidade SM – Solos indiscriminados de mangue. Conforme o SBCS (EMBRAPA, 2006), essa se enquadra na classe “Organossolos”, constituídos por material orgânico, com teor de carbono orgânico maior ou igual a 80g/kg de TFSA, o qual apresenta horizonte hístico, saturado com água durante a maior parte do ano, na maioria dos anos, a menos que artificialmente drenado. Apresenta horizonte C hístico, com espessura de 40cm ou mais.

Conforme Oliveira (1992), são solos formados pela progressiva acumulação, em ambiente palustre, de resíduos mormente vegetais que, com o correr do tempo, vão se decompondo em produtos orgânicos transformados. A diferenciação de horizontes nesses solos diz respeito, essencialmente, às transformações que se operam em virtude da decomposição dos constituintes e na aparência pouco notória perante as cores bastante escuras exibidas por esses solos. É comum, abaixo da camada orgânica, ocorrer um horizonte glei (Cg) de cor cinza de textura bastante variada, sendo a argilosa a mais comum nos perfis.

Para o presente estudo, a unidade “SM” compreende o Manguezal do Itacorubi, o qual tem como limite, em sua porção N-NO, a Baía Norte de Florianópolis, onde se localiza a exutória principal da microbacia no mar.

A unidade “SM” está disposta na região classificada como “Plana”, segundo o Mapa de declividades, Figura 32, com declividades inferiores a 3%. Por meio do mapa hidrográfico, Figura 28, é possível observar que ao longo da unidade desenvolvem-se os principais cursos d’água da microbacia: Rio do Sertão, Rio Itacorubi e Rio Córrego Grande.

Na área abrangida pela unidade “SM”, estão dispostos 2 laudos de sondagem à percussão, sendo os de número 6 e 7. Os solos, conforme os laudos, são caracterizados como “Argila orgânica, com fósseis marinhos, cinza escura, muito mole”, com espessuras de solo variando entre 15,45 metros e 16,09 metros. As cotas de nível d’água variam entre 1,90 metros e 2,40 metros, indicando as condições de saturação dos solos, caracterizados como hidromórficos.

Sobrepondo ao mosaico de ortofotos, Figura 26, é possível observar que a maior parte da unidade é recoberta por vegetação

típica de mangue, com algumas exceções no perímetro da unidade, nos bairros Santa Mônica, João Paulo e Itacorubi, onde ocorrem áreas urbanizadas. Ao longo dessa unidade desenvolve-se, também, o segmento da Rodovia SC-401, entre o Elevado do CIC (Centro Integrado de Cultura) e o Cemitério Municipal do Itacorubi, conhecido como Avenida da Saudade.

Por fim, há a presença da unidade R – Solos Litólicos, distribuída somente na porção Oeste da Bacia, em uma pequena área a qual abrange 2,46% da área total da Microbacia do Itacorubi, sendo essa a menos representativa. Conforme o SBCS (EMBRAPA, 2006), a mesma enquadra-se na classe “Neossolos”, sendo constituída por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20 centímetros de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Esses possuem sequência de horizonte A-R, A-C-R, A-Cr-R, A-Cr, A-C, O-R ou H-C

Do ponto de vista químico, físico e mineralógico, são muito heterogêneos e, ressaltando o que seja decorrência mormente da matéria orgânica, os solos revelam estreita relação com o material de origem que influi até na atividade da argila, que pode ser alta ou baixa. Podem ser eutróficos, distróficos ou álicos, com as mais variadas texturas. É frequente a presença de relevantes quantidades de minerais primários facilmente intemperizáveis (OLIVEIRA, 1992).

Para o presente estudo, a área delimitada pela unidade predomina em fases de relevo do tipo “Forte ondulado”, “Montanhoso” e, em pequenas áreas, “Escarpado”, ou seja, com declividades superiores a 20%, podendo haver declividades superiores a 75%. Sobrepondo ao MDT, Figura 30, é possível observar que tal unidade está contemplada em áreas com cotas variando entre 37 metros e 286 metros.

Para essa unidade, não foram localizados laudos de sondagens. Ao sobrepor o mosaico de ortofotos, Figura 26, pode-se constatar que a unidade “R” abrange áreas, em sua maior parte, não urbanizadas ou alteradas, predominando regiões de encostas naturais, recobertas por vegetação, executando-se áreas residenciais no bairro Trindade.

4.2.3 Ensaios de campo e laboratoriais

De forma a possibilitar a caracterização física dos solos da área de estudo, assim como obter diversas informações complementares, foram coletados ensaios preexistentes e executados novos ensaios. Tais dados são imprescindíveis à simulação no modelo *SHALSTAB*, como peso específico natural, intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, assim como para as diversas análises e correlações, por meio das referências cota de impenetrável, resistência do solo por número de golpes “ N_{SPT} ”, classificação amostral tátil-visual, resistência ao cisalhamento, entre outros.

Os ensaios laboratoriais de caracterização das amostras foram executados conforme as normas: ABNT NBR 6457 (ABNT, 1986); ABNT NBR 6459 (ABNT, 1984a); ABNT NBR 6508 (ABNT, 1984b); ABNT NBR 7180 (ABNT, 1984c) e; ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984d).

Para o ensaio de granulometria por sedimentação o defloculante utilizado foi do tipo solução de hexametáfosfato de sódio, com concentração de 45,7g do sal para 1000cm³ de solução.

4.2.3.1 Borehole Shear Test (BHST) – Procedimento

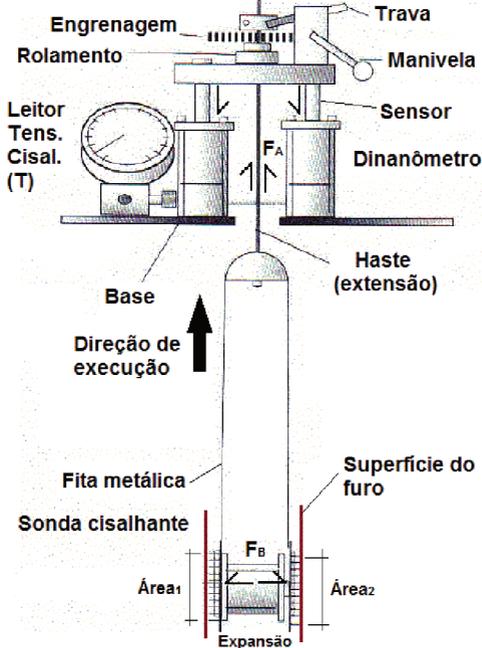
Para o presente estudo, o procedimento de execução do ensaio *BHST* foi conduzido em conformidade com as instruções do fabricante, *Handy Geotechnical Instruments* (2013), o qual indica que o mesmo tem por objetivo medir a resistência ao cisalhamento do solo em relação à tensão normal aplicada, fornecendo dados para a composição de envoltórias de ruptura ao cisalhamento, para então obterem-se os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno da superfície amostrada. O ensaio é próprio a ser executado em argilas moles, siltes, areias, solos duros e rochas brandas.

O ensaio *BHST* pode ser realizado em diversas profundidades na mesma perfuração. É possível ser executado a uma mesma profundidade inserindo o conjunto de cisalhamento e rotacionando-o 90 graus para cada tensão normal aplicada (*HANDY GEOTECHNICAL INSTRUMENTS*, 2013).

De acordo com o fabricante, o *BHST* é executado utilizando uma sonda cisalhante expansível em um furo pré-

escavado, expandindo-se então a sonda contra a parede de forma que a mesma comprima o solo, aplicando-se conseqüentemente uma tensão normal, a qual deve permanecer constante ao longo do ensaio. A resistência ao cisalhamento do solo é mensurada através do arranque da sonda a uma velocidade controlada. A Figura 37 ilustra o equipamento e as características.

Figura 37 – Equipamento BHST – Características e detalhes



Os esforços mensurados pelo equipamento são determinados conforme as Equações 9 e 10.

$$T = \frac{F_A}{\text{Área}_1 + \text{Área}_2} \quad (9)$$

$$\sigma_n = \frac{F_B}{\text{Área}_1 + \text{Área}_2} \quad (10)$$

Conforme *Handy Geotechnical Instruments* (2013), inicialmente procede-se a abertura de um furo com 75mm (três polegadas) de diâmetro, com seção regular. O mesmo pode ser um pouco maior, limitado pela capacidade de expansão da sonda cisalhante, usualmente em torno de doze milímetros.

A melhor perfuração normalmente é vertical, mas pode ser inclinada ou horizontal para fins especiais, como testes ao longo de um plano de estratificação, falhas ou camadas moles expostas a céu aberto ou para comparar resistências de cisalhamento verticais ou horizontais.

A superfície do solo em torno da abertura deve ser plana e perpendicular ao eixo do equipamento *BHST* de forma a suportar a placa base. A escavação pode ser executada utilizando-se trados em espiral. Como vantagem, é possível inspecionar as camadas de solo identificadas, auxiliando na escolha das profundidades para realizar o ensaio.

Após posicionar-se corretamente a sonda de cisalhamento, deve-se aplicar a tensão normal na parede do furo. Para tal, é necessário zerar o leitor de tensão normal, e, na operação com bomba manual, conectar a mangueira de tensão da cabeça de cisalhamento à bomba de ar. A tensão normal é aplicada acionando a bomba manual até a pressão desejada, indicada no leitor.

De forma a iniciar a ruptura ao cisalhamento, deve-se manter a tensão normal enquanto o solo é consolidado para o ensaio no primeiro ponto. Para solos arenosos esse tempo corresponde a aproximadamente 13 minutos, para solos argilosos, 15 minutos. Posiciona-se então a placa base acima das hastes, centralizando-a sobre o furo. Ao fundo do grampo das hastes há ranhuras cruzadas as quais devem ser presas em projeções no topo da trava. Gira-se então a manivela, no sentido horário, para iniciar o arranque da sonda cisalhante, permitindo a leitura de tensão cisalhante.

Após mensurar a tensão cisalhante máxima, e finalizar as leituras, aplica-se torque na manivela em sentido anti-horário, de forma a permitir o retrocesso do ponteiro do leitor de tensão cisalhante.

Após zerar o ponteiro, deve-se conectar a mangueira de tensão negativa na bomba manual, garantindo a completa contração da sonda cisalhante, permitindo sua posterior retirada do furo. Em continuidade ao ensaio, é necessário então aplicar outro valor de tensão normal, sempre crescente, anotando-se o tempo de consolidação e plotando os dados obtidos na leitura anterior. Seguindo o procedimento, deve ser aplicada a rotação da manivela para iniciar novamente o arranque da sonda cisalhante,

provendo nova leitura de tensão cisalhante para a nova tensão normal aplicada.

A etapa é repetida até obterem-se dados suficientes para criar uma envoltória verdadeira, sem refletir o assentamento das placas, excesso de poropressão ou problemas mecânicos como a expansão da cabeça ou o escorregamento da haste.

Paralelamente às repetições da etapa anterior, deve-se plotar os dados resultantes. Isso deve ser feito ao longo do progresso do ensaio de forma a revelar anomalias ou inconsistências, as quais podem ser corrigidas, como:

- Desenvolvimento de excesso de poropressão: Sintoma – envoltória com estabilização formando curva para baixo ou tendência à queda. Solução – aumentar o tempo de consolidação para os próximos pontos. Para assegurar a drenagem, altera-se curtos e longos tempos de consolidação (5 e 10 minutos) e observa-se se as envoltórias coincidem. Poropressões podem ser medidas na superfície da placa de cisalhamento com um transdutor ou outro dispositivo de leitura;
- Intercepto coesivo negativo em areias: Uma pequena coesão negativa pode ser indicada em areias abaixo do lençol freático, uma vez que a pressão da água se opõe à tensão normal aplicada. Essa quantidade é pequena e pode ser desconsiderada – exceto em grandes furos. A correção é feita subtraindo a pressão da água. Outra causa pode ser devido ao aumento da resistência final ao movimento da placa de cisalhamento, que pode inclinar a envoltória na direção correta. O erro é pequeno e normalmente pode ser negligenciado, iniciando-se novas leituras.

O ensaio *BHST* trata-se de um ensaio de estágios, isso significa que as leituras da resistência ao cisalhamento podem ser obtidas sem realocar a sonda cisalhante ou remover a tensão normal. Isso funciona uma vez que a geometria radial diminui a tensão para além da superfície do furo. Além disso, as tensões de consolidação são maiores próximas às placas, logo a cada repetição dos movimentos de cisalhamento, a superfície cisalhada sobressai sobre o solo previamente não cisalhado (*HANDY GEOTECHNICAL INSTRUMENTS*, 2013).

Como procedimento padrão utilizado no presente estudo, para cada ponto amostrado, inicialmente foi executado o ensaio para a condição de umidade natural, logo após a abertura do furo a trado. Posteriormente foi executado para a condição de estado inundado. Após a remoção completa do equipamento do furo, foi escavada profundidade adicional, em torno de 20 centímetros, de forma a possibilitar a execução do ensaio em superfície não cisalhada anteriormente. O furo foi então preenchido com água até a superfície, aguardando-se em torno de 15 minutos para reinserir o equipamento e realizar novas leituras.

4.2.3.2 Sondagens à percussão - SPT

Complementarmente aos ensaios de cisalhamento direto e *BHST*, foram selecionados laudos de sondagem à percussão “SPT” (*Standard Penetration Test*). Através dos mesmos foi possível obter os dados de profundidade do impenetrável, nível de lençol freático e classificação tátil-visual das amostras em diferentes profundidades.

Para o presente estudo, foram estimados parâmetros de resistência dos solos, utilizando os dados dos ensaios “SPT”, por meio de correlações paramétricas propostas por Berberian (2001). Para cada local amostrado estimou-se, utilizando o valor N_{SPT} para a profundidade de 5 metros e a descrição dos horizontes do solo, o intercepto coesivo (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico natural (γ_{nat}). Ressalta-se que tais correlações são amplamente utilizadas no dimensionamento de projetos de fundações diretas e profundas.

A utilização dos dados de laudos “SPT” deve-se ao fato de consistirem um dos ensaios geotécnicos *in situ* mais difundidos em engenharia civil para caracterização de solos e definição de parâmetros básicos de dimensionamento e projeto de engenharia e, também, devido à disponibilidade dos mesmos para a área de estudo.

Ao total, contemplaram-se 32 laudos de sondagem, os quais foram inseridos no *software* de SIG, sendo possível localizá-los espacialmente, compondo um banco de dados georreferenciado. Através da análise dos laudos e valores parâmetros físicos e de resistência estimados, foi possível aplicar interpoladores geostatísticos, especializando os dados pontuais.

4.3 MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR

Por meio da edição e inserção no *software* de SIG dos mapas pedológico, litológico, proveniente do mapa geológico, e altimétrico, é possível obter-se o mapa geotécnico preliminar. O mesmo é assim designado uma vez que consiste na simples sobreposição dos mapas citados, gerando um mapa de estimativas de unidades geotécnicas para a área de estudo, baseado na metodologia de mapeamento geotécnico de grandes áreas empregada no Sul do Brasil de Davison Dias (1995) e na metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras, de Higashi (2006).

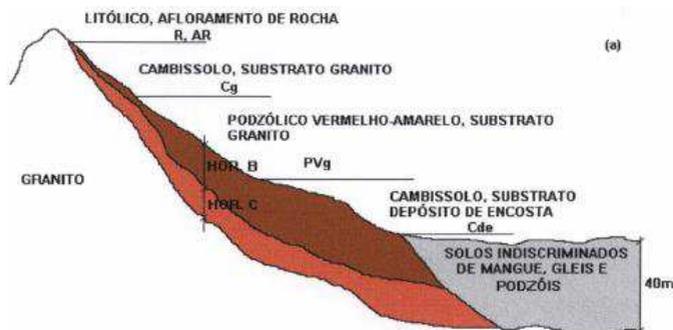
Conforme o método utilizado no presente estudo, nas etapas posteriores são acrescentados dados e informações ao mapa, possibilitando desenvolver-se o mapa geotécnico em escala mais detalhada, com maior precisão. É indicado direcionar-se os ensaios para as áreas de potencial de ocupação, possibilitando a concentração dos resultados, o que gera um maior conhecimento do comportamento geomecânico do solo.

4.4 CARACTERIZAÇÃO EM CAMPO (TRADAGENS)

Posteriormente à confecção do mapa geotécnico preliminar, o método utilizado no presente estudo prevê o ajuste, com conseqüente melhoria de escala e precisão, das estimativas de universos geotécnicos. Para tal são necessárias investigações em campo através de tradagens manuais simples, de forma a possibilitar a diferenciação tátil-visual dos solos amostrados.

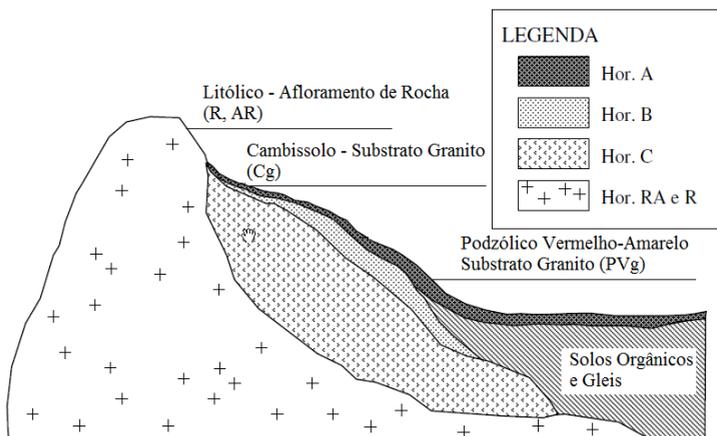
Conforme as classificações litológica e pedológica da área de estudo, apresentadas nos itens anteriores, os solos podem ser diferenciados quanto a sua natureza residual ou sedimentar. Santos (1997) apresentou uma toposequência de formação dos solos típicas do município de Florianópolis, indicada na Figura 38. De forma semelhante, Higashi (2006) elaborou a toposequência para o município de Tubarão/SC, conforme a Figura 39.

Figura 38 – Topossequências típicas de Florianópolis/SC – Oeste da ilha



Fonte: Santos (1997)

Figura 39 – Topossequências típicas de Tubarão/SC



Fonte: Higashi (2006)

Uma das formas de ajuste refere-se a observações do mapa de altimetria, uma vez que as unidades geotécnicas podem ser diferenciadas conforme as curvas de nível, obedecendo a toposequência de formação de solos apresentadas anteriormente.

Por meio das tradagens, foi possível determinar a cota de transição entre os solos sedimentares e residuais. Ao total foram realizadas seis tradagens na área de estudo, cujas localizações são ilustradas na Figura 40.

Figura 40 – Localização das tradagens



As tradagens foram realizadas em sentido transversal às curvas de nível, de forma a otimizar a estimativa da cota de transição, através de duas sequências com três amostras cada. A sequência 1, contemplando as tradagens 1, 2 e 3, foi realizada no bairro Córrego Grande, Servidão Dorval Manoel Bento, transversal à Rua João Pio Duarte Silva, nas proximidades da Escola Básica Municipal Padre João Alfredo Rohr.

A sequência 2, contemplando as tradagens 4, 5 e 6, foi realizada na Avenida San Marino, loteamento Parque São Jorge, transversal à Rua Vera Linhares de Andrade.

A diferenciação entre solos residuais e sedimentares ocorreu por meio de análise expedita tátil-visual, observando-se a textura, cor, consistência, umidade, resistência ao trado, presença de lençol freático, odor, entre outros. A Tabela 14 apresenta a análise das tradagens.

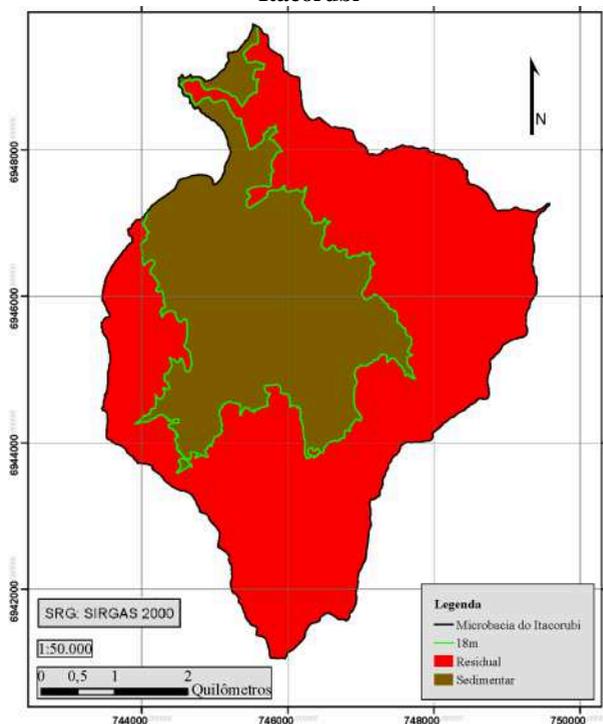
Tabela 14 – Análise das tradagens

Trado	Alt, Aprox. (m)	Caracterização Tátil-Visual			Resist. ao trado	Class.
		Consist.	Text.	Umidade		
1	8	Plástica e coesa	Fina	Regular	Baixa	Sedimentar
2	12	Plástica e coesa	Fina	Regular	Baixa	Sedimentar
3	20	Plástica e coesa	Interm.	Baixa	Alta	Residual
4	12	Plástica e pouco coesa	Interm.	Baixa	Baixa	Sedimentar
5	17	Arenosa	Grosseira com pedregulho	Baixa	Alta	Residual
6	5	Plástica e pouco coesa	Interm.	Alta	Baixa	Sedimentar

A partir da inserção dos locais amostrados no ambiente SIG, e sobreposição com o mapa altimétrico, determinou-se a cota de altitude 18 metros como o valor de transição entre solos residuais e sedimentares para a área de estudo, onde, para as cotas inferiores a 18 metros os solos foram classificados como sedimentares e, para as superiores, residuais. A Figura 41 ilustra o mapa gerado, destacando-se a curva de nível referente a cota altimétrica de transição.

Tal mapa fornece subsídios para o ajuste do Mapa Geotécnico Preliminar, gerando então o Mapa Geotécnico Ajustado. Isso é possível devido ao fato de estarem presentes unidades geotécnicas diferenciáveis por seu comportamento residual ou sedimentar, compondo universos geotécnicos. Esses permitem correções frente às eventuais imprecisões dos mapas originais de geologia e pedologia, devido às escalas dos mesmos.

Figura 41 – Mapa de solos residuais e sedimentares – Microbacia do Itacorubi



4.5 MAPA GEOTÉCNICO AJUSTADO

Utilizando-se ferramentas do *software* de SIG, é possível sobrepor as informações do mapa geotécnico preliminar e do mapa de solos residuais e sedimentares, ajustando-se a delimitação das unidades geotécnicas estimadas. Paralelamente, devem ser analisados os resultados dos ensaios geotécnicos de campo e laboratoriais. A partir desses ajustes é gerado, então, o Mapa Geotécnico Ajustado.

4.6 ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS SOLOS

Nessa etapa, após a inserção dos dados de ensaios geotécnicos no *software* de SIG e definição do mapa altimétrico,

foram utilizadas ferramentas geoestatística para espacializar os valores individuais de cada resultado de ensaio por meio do interpolador de Krigagem.

Os ensaios geotécnicos fornecem diversos parâmetros físicos e qualitativos dos solos da área de estudo, tais quais: massa específica, intercepto coesivo, ângulo de atrito interno, teor de umidade, cota do nível de lençol freático, cota do impenetrável (conforme os critérios de paralisação dos ensaios à percussão) e descrição tátil-visual das camadas de solo. Essas informações encontram-se inseridas no mapa da área de estudo de forma pontual, conforme as coordenadas de cada local de ensaio ou de coleta de amostra.

De forma a permitir a visualização dos dados nos mapas, é necessário ponderar os diversos valores para a área de estudo, possibilitando a delimitação de classes e a definição de áreas de influência para cada parâmetro desejado.

A espacialização dos parâmetros dos solos permite, também, a realização de análises posteriores e o desenvolvimento de novos mapas, utilizando-se ferramentas de geoprocessamento, a partir da definição de geofatores.

4.6.1 Krigagem (geoestatística)

Utilizando-se parâmetros ponderadores dos dados espacializados, os geofatores, é possível gerar novos mapas a partir da sobreposição de dois ou mais mapas. Para tal, é possível atribuir-se às informações preteridas em determinado mapa, pesos para a serem utilizados nas ponderações, conforme a importância dos dados a serem sobrepostos.

No presente estudo, optou-se por utilizar o método interpolador geoestatístico do tipo Krigagem, o qual apresenta histórico considerável aplicado a estudos geotécnicos, gerando bons resultados. O mesmo é utilizado, também, para a espacialização de valores pontuais, conforme exemplificado no item anterior, aplicado aos resultados dos ensaios geotécnicos.

Por tratar-se de uma área de estudo com relativa heterogeneidade dos resultados dos ensaios, torna-se necessário, para a confecção e visualização dos mapas de parâmetros físicos e qualitativos dos universos geotécnicos, utilizar métodos estimativos. A Krigagem, nesse caso, tem por função estimar tais

parâmetros para toda a área de estudo, a partir de informações pontuais.

4.7 SIMULAÇÃO NO MODELO *SHALSTAB*

A partir dos mapas gerados, modelo digital do terreno e espacialização dos parâmetros dos solos foi possível efetuar a simulação de estabilidade de encostas no modelo *SHALSTAB*, visando à estimativa de classificação de áreas suscetíveis à deslizamentos rasos.

4.8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesse item são apresentados todos os resultados provenientes da aplicação do método contemplando os mapas geotécnicos, de classificação de áreas suscetíveis à deslizamentos rasos, espacialização dos parâmetros dos solos, resultados dos ensaios geotécnicos, entre outros, conforme os objetivos geral e específicos do presente estudo.

4.9 CONCLUSÕES / SUGESTÕES

Caracterizando-se como a última etapa do método utilizado, na mesma são apresentadas as conclusões finais dos produtos, comparações e resultados gerados, assim como as sugestões para continuidade de estudo do tema proposto e melhorias passíveis de serem desenvolvidas seja para a área de estudo, seja para a aplicação do método.

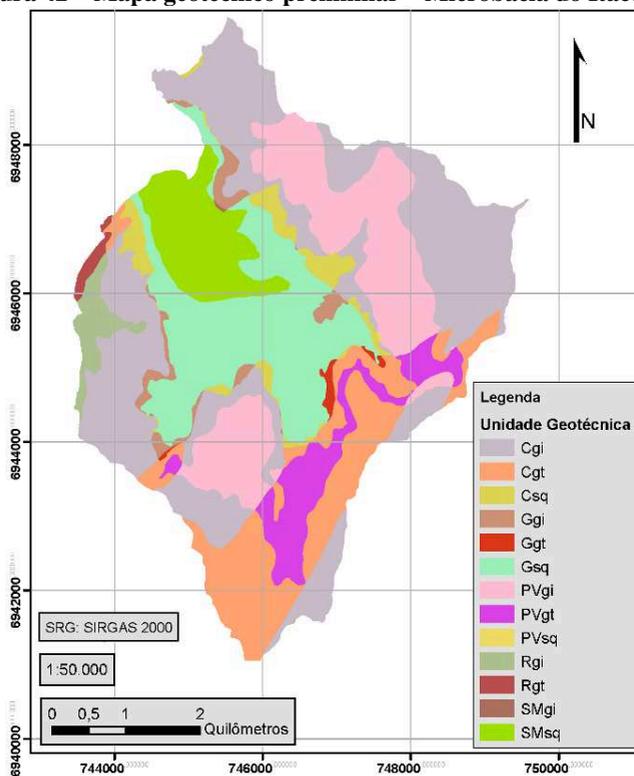
5 RESULTADOS

A seguir são apresentados os mapas, dados e resultados de ensaios produzidos, conforme o método e os objetivos do presente estudo para a Microbacia do Itacorubi.

5.1 MAPA GEOTÉCNICO PRELIMINAR

Através da simples sobreposição dos mapas litológico e pedológico, foi gerado o mapa geotécnico preliminar, conforme ilustra a Figura 42 e o Quadro 13.

Figura 42 – Mapa geotécnico preliminar – Microbacia do Itacorubi



Quadro 13 – Unidades geotécnicas – Mapa geotécnico preliminar

Unidade Geotécnica	Descrição
Cgi	Cambissolo substrato granito ilha
Cgt	Cambissolo substrato granito itacorubi
Csq	Cambissolo substrato sedimentos quaternários
Ggi	Glei substrato granito ilha
Ggt	Glei substrato granito itacorubi
Gsq	Glei substrato sedimentos quaternários
PVgi	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito ilha
PVgt	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito Itacorubi
PVsq	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato sedimentos quaternários
Rgi	Solos Litólicos substrato granito ilha
Rgt	Solos Litólicos substrato granito Itacorubi
SMgi	Solos Indiscriminados de Mangue substrato granito ilha
SMsq	Solos Indiscriminados de Mangue substrato sedimentos quaternários

O mapa gerado é assim designado pois consiste em uma estimativa de unidades geotécnicas para a área de estudo. A partir do mesmo, há a necessidade de serem realizados ajustes relativos às unidades geotécnicas estimadas, uma vez que a simples sobreposição dos mapas pode gerar inconsistências e informações errôneas.

Conforme pode ser observado no mapa gerado, foram estimadas treze unidades geotécnicas para o mapa, baseadas na metodologia de mapeamento geotécnico proposta por Davison Dias (1995) e Higashi (2006). Dentre as mesmas, destacam-se cinco as quais podem ser consideradas errôneas.

A unidade “Csq”, a qual pode ser descrita como “Cambissolo substrato sedimentos quaternários”, induz a uma classificação inadequada, uma vez que as características dos

Cambissolos não condizem com formação oriunda de origem sedimentar. Os mesmos podem apresentar textura franco-arenosa ou mais argilosa, contendo relevantes teores de fragmentos de rocha e/ou minerais primários, características essas de solos residuais, provenientes da intemperização direta da rocha matriz.

Salienta-se que, o mapa pedológico original, utilizado nesse estudo, não contém unidade do tipo “Cde – Cambissolo substrato depósito de encostas”, fator esse que corrobora quanto à inconsistência da unidade “Csq”, sendo os Cambissolos considerados de origem somente residual.

Essa unidade estimada apresenta-se na porção central da Microbacia, na interface entre as fases de relevo “ondulado” e “forte ondulado”, assim como entre as pedologias “Glei” e “Podzólico Vermelho-Amarelo” sendo essas caracterizadas como do tipo sedimentar e residual, respectivamente.

A segunda e terceira unidades consideradas errôneas referem-se a “Ggi” e “Ggt”, as quais poderiam ser descritas como “Glei substrato granito ilha” e “Glei substrato granito Itacorubi”, respectivamente. Essas classificações, conforme a pedogênese, são inadequadas, uma vez que solos hidromórficos sedimentares como o Glei não têm como material de origem formações graníticas, mas sim formações sedimentares, no caso da Microbacia do Itacorubi é mais adequada a indicação da litologia “Sedimentos Quaternários”.

As unidades geotécnicas “Ggi” e “Ggt” encontram-se distribuídas em pequenas áreas, de forma semelhante à unidade “Gsq”, ou seja, na interface entre as áreas delimitadas para solos residuais e sedimentares, evidenciando a dificuldade de correta delimitação nessa região de transição.

A unidade “PVsq”, situada em uma pequena área na região centro-leste do mapa, pode ser descrita como “Podzólico Vermelho-Amarelo substrato sedimentos quaternários”, a qual também pode ser considerada incoerente. Tal unidade pedológica, caracterizada como residual e de granulometria grosseira, tem sua pedogênese associada à formações graníticas, conforme as bibliografias consultadas.

De forma análoga às unidades “Ggi”, “Ggt” e “Csq”, a unidade “PVsq” situa-se na transição entre as áreas de solos residuais e sedimentares.

Na porção norte do mapa, há uma pequena unidade classificada como “SMgi”, ou “Solos indiscriminados de Mangue

substrato granito ilha”. Tal unidade pode ser considerada inconsistente pelos mesmos motivos das unidades “Ggi” e “Ggt”, levando em consideração sua característica hidromórfica sedimentar, tendo como substrato mais adequado a litologia “Sedimentos Quaternários”.

É válido discorrer que tais unidades estimadas não se enquadram na toposequência típica de formação de solos de Florianópolis, conforme as Figuras 38 e 39, do item 4.4 – Caracterização em campo (tradagens), evidenciando ainda mais o caráter preliminar das estimativas.

As inconsistências nas unidades geotécnicas estimadas observadas no Mapa Geotécnico Preliminar Primário podem ser associadas a diversos fatores. Primeiramente há as diferenças de escalas e fontes referentes aos mapas pedológico e geológico, a partir do qual derivou-se o mapa litológico. Pode-se atribuir também a dificuldade de classificação e caracterização nas áreas de transição entre solos residuais e sedimentares, especialmente quanto à pedologia, a qual teve por fonte mapa em escala 1:50.000.

Conforme Higashi (2006), no desenvolvimento de sua tese, fora relatada dificuldades para a distinção entre Cambissolos e Podzólicos Vermelho-Amarelo. Para o caso estudado, em razão de serem originados de rochas graníticas que são muito heterogêneas, é comum que em um mesmo talude sejam encontrados perfis de solos com grandes variações de coloração e granulometria. Isto dificulta a inclusão destes solos em um mesmo grupo, dificultando melhores análises.

Resumidamente, a simples sobreposição dos mapas pedológico e litológico pode gerar inconsistências de classificação, sendo necessárias então análises e interpretações posteriores, de forma a promover ajustes e acrescer qualidade ao Mapa Geotécnico.

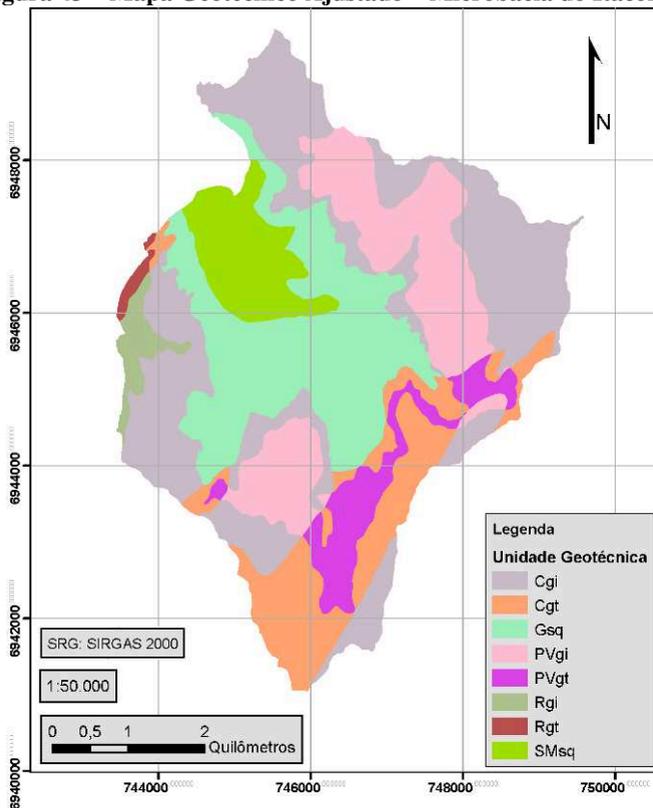
5.2 MAPA GEOTÉCNICO AJUSTADO

O Mapa Geotécnico Ajustado foi obtido por meio das correções das unidades geotécnicas estimadas no mapa geotécnico preliminar primário. Analisando conjuntamente os mapas de solos residuais e sedimentares, pedológico, de declividades e geológico, assim como a cota de transição entre

solos residuais e sedimentares, pôde-se então promover os ajustes necessários.

As unidades geotécnicas consideradas errôneas, “Csq”, “Ggi”, “Ggt”, “PVsq” e “SMgi” foram corrigidas no mapa e suas respectivas áreas foram reclassificadas individualmente, sendo agrupadas às demais unidades conforme a análise dos mapas citados anteriormente. Por fim, o mapa ajustado é representado na Figura 43 e Quadro 14.

Figura 43 – Mapa Geotécnico Ajustado – Microbacia do Itacorubi



Quadro 14 – Unidades Geotécnicas – Mapa Geotécnico Ajustado

Unidade Geotécnica	Descrição
Cgi	Cambissolo substrato granito ilha
Cgt	Cambissolo substrato granito itacorubi
Gsq	Glei substrato sedimentos quaternários
PVgi	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito ilha
PVgt	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito Itacorubi
Rgi	Solos Litólicos substrato granito ilha
Rgt	Solos Litólicos substrato granito Itacorubi
SMsq	Solos Indiscriminados de Mangue substrato sedimentos quaternários

Foi atribuído ao Mapa Geotécnico Ajustado, a escala de trabalho 1:50.000, uma vez que dentre os mapas utilizados para compô-lo, o Mapa Pedológico é o de menor escala (1:50.000).

As características básicas de cada unidade geotécnica são apresentadas na Tabela 15. Conforme é possível observar, a unidade geotécnica predominante é “Cgi”, e a menos abrangente “Rgt”. Somadas as unidades do tipo residuais ocupam 70,49% da microbacia. Reitera-se que os solos residuais são os de maior interesse no presente estudo, devido à predominância em fases de relevo mais acentuadas, característica essa que influencia quanto a estabilidade das encostas.

Tabela 15 – Características básicas das unidades geotécnicas

Unidade Geotécnica	Área (m ²)	Área ocupada na Bacia (%)	Abrangência de Cotas (m)	Universo Geotécnico	Fases de Relevô
Cgi	9.285.222,47	32,98	5 a 493	Residual	Suave Ondulado a Escarpado
Cgt	3.620.348,31	12,86	5 a 425	Residual	Ondulado a Escarpado
Gsq	6.252.117,07	22,21	0 a 38	Sedimentar	Plano a Ondulado
PVgi	4.606.537,38	16,36	7 a 295	Residual	Forte Ondulado a Montanhoso
PVgt	1.640.263,28	5,83	19 a 259	Residual	Ondulado a Escarpado
Rgi	557.115,89	1,98	43 a 281	Residual	Forte Ondulado a Escarpado
Rgt	134.631,27	0,48	44 a 286	Residual	Forte Ondulado a Escarpado
SMsq	2.055.092,62	7,30	0 a 5	Sedimentar	Plano a Suave Ondulado

A Tabela 16 demonstra os resultados das correlações paramétricas dos laudos *SPT*. Salienta-se que não foram obtidos laudos para as unidades “PVgt”, “Rgi” e “Rgt”.

Tabela 16 – Resultados das correlações paramétricas (SPT) por unidade geotécnica

Ud Geot.	Peso específico natural “ γ_n ” (kN/m ³)			Ângulo atrito interno “ ϕ ” (°)			Intercepto coesivo “c” (kPa)		
	Mín	Máx	Médio	Mín	Máx	Médio	Mín	Máx	Médio
Cgi	19	20	20	31	34	33	32	36	35
Cgt*	18			31			-		
Gsq	15	20	18	20	35	30	8	38	29
PVgi*	21			36			36		
SMSq	16	17	17	-			8	8	8

(*) Somente um laudo SPT

As unidades residuais apresentam valores médios ligeiramente superiores de peso específico natural. Em relação aos parâmetros de resistência, ângulo de atrito interno e intercepto coesivo, os resultados para unidades residuais são superiores em relação às sedimentares.

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios *BHST* e de caracterização. Não foram realizados ensaios para as unidades “Gsq”, “PVgi”, “Rgt” e “SMSq”.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios BHST e caracterização por unidade geotécnica

Ud Geot.	Dens. real dos grãos “ δ_s ” (kN/m ³)			Âng. atrito int. “ ϕ ” (°)		Int. coesivo “c” (kPa)	
	Mín	Máx	Médio	Nat.	In.	Nat.	In.
Cgi	25,7	25,7	25,7	26,6	27,6	31,5	8,5
Cgt	23,5	24,1	23,8	27,3	28,4	20,3	11,9
PVgi	23,7			33,8	31,0	20,4	12,3
Rgi	24,9			30,9	24,1	16,9	8,6

Nat. = estado de umidade natural; In. = estado inundado

As unidades “PVgi” e “Rgi” possuem resultados de somente um ensaio, cada.

A unidade com os maiores valores de parâmetros de resistência refere-se à “PVgi”. Relativamente a densidade real dos grãos, não foram observadas diferenças acentuadas entre as unidades, sendo a com o maior valor médio a unidade “Cgi”.

5.2.1 Cgi – Cambissolo substrato granito ilha

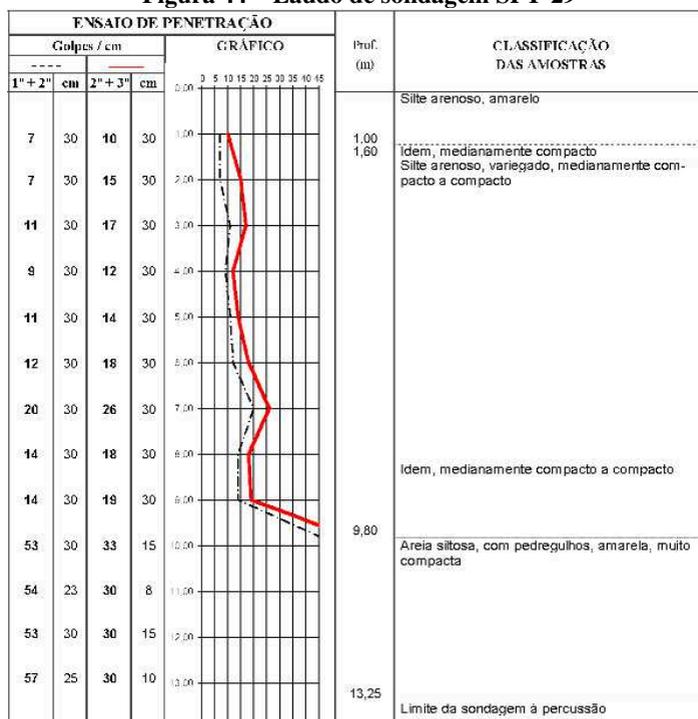
A unidade geotécnica “Cgi – Cambissolo substrato granito ilha”, predomina na área de estudo. A mesma encontra-se distribuída nas áreas periféricas, junto aos limites da bacia ou entre unidades residuais, como os Solos Litólicos e Podzólicos Vermelho-Amarelo, e sedimentar, no caso os Gleis. Essa distribuição está de acordo com a toposequência típica de formação dos solos da Ilha de Santa Catarina, proposta por Santos (1997).

Os ensaios à percussão (*SPT*) contemplados nessa unidade são os de número 10, 11, 20, 21, 24 e 29. Nesses, as descrições táteis-visuais indicam predominância de solos do tipo “silte arenoso, variegado, pouco compacto a medianamente compacto”. A espessura de solo, mensurada da cota de execução da sondagem até o impenetrável, varia entre 3,50m e 15,53m, com valor médio igual a 9,39m. O número de golpes “ N_{SPT} ” para profundidade de 5m, o qual indica a resistência à penetração do solo, varia entre 11 e 22, com valor médio igual a 16.

O laudo de sondagem nº 29, Figura 44, apresenta um perfil *SPT* típico de um Cambissolo para a área de estudo. Nesse é possível observar a resistência aos golpes e a descrição tátil-visual praticamente homogêneas para uma profundidade de aproximadamente 8 metros para então haver um aumento do número de golpes com avanço de profundidade, culminando no fim do ensaio.

Em relação aos ensaios laboratoriais de caracterização dos solos, a unidade “Cgi” abrange os pontos 3 e 5. Para as duas amostras, a fração argila + silte supera 50% da distribuição granulométrica. Quanto às frações “areia”, as duas amostras apresentaram predominância das frações tipo média e grossa, as quais somadas apresentam valores próximos a 27%, para cada amostra.

Figura 44 – Laudo de sondagem SPT-29



Fonte: Disponibilizado por Geodésia Estudos Projetos e Assessoria

Conforme demonstrado nos resultados de ensaios *BHST*, houve um decréscimo significativo nos valores de intercepto coesivo para os ensaios em condição de estado inundado.

Comparativamente aos resultados estimados pelas correlações dos laudos *SPT*, os valores de ângulo de atrito interno obtidos pelos ensaios *BHST* apresentaram resultados inferiores. O mesmo ocorre para o intercepto coesivo. Com base nesses resultados, as correlações sugerem apresentar valores superestimados para os parâmetros de resistência dos solos.

Ao sobrepor o Mapa Geotécnico e o Mapa de Mancha Urbana, observa-se que a maior parte da unidade “Cgi” é ocupada por edificações, logradouros ou equipamentos públicos, exceto a porção contida na região Noroeste, composta por encostas naturais com declividades forte onduladas a superiores.

Ao longo da área compreendida pela unidade “Cgi” estão presentes falhas, fraturas ou fotolineamentos, diques básicos e duas ocorrências de diques de Riolito, na porção Oeste da microbacia, conforme o mapa geológico. Os diques estão presentes na porção de cotas superiores e fases de relevo do tipo “ondulado” a “escarpado”.

5.2.2 Gsq – Glei substrato sedimentos quaternários

A segunda unidade mais abrangente da área de estudo refere-se a “Gsq – Glei substrato sedimentos quaternários”, a qual localiza-se na porção central da Microbacia, formando limite em sua maior parte com as unidades “SMsq”, “Cgi” e “Cgt”.

Os ensaios à percussão (*SPT*) contemplados nessa unidade são os de número 1, 2, 3, 4, 5, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 22, 23, 25, 27, 28, 30, 31 e 32. Nesses, as descrições táteis-visuais indicam predominância de solos do tipo “Silte arenoso, com pedregulhos, variegado, compacto”.

As espessuras de solo, mensuradas da cota de execução das sondagens até o impenetrável, variam entre 5,52m e 18,78m, com valor médio igual a 10,33m. A resistência à penetração “ N_{SPT} ” varia entre 2 e 22, com valor médio igual a 9, valores esses inferiores aos apresentados para a unidade “Cgi”, por exemplo.

Dentre as oito unidades geotécnicas mapeadas, a unidade “Gsq” pode ser considerada a mais densamente urbanizada, relativamente à área, fato esse que justifica, inclusive, o maior número de sondagens *SPT*. A sua localização, não contemplando grandes áreas de preservação, como o Manguezal do Itacorubi, a predominância de declividades moderadas (plano e suave ondulado), a alta densidade viária, entre outros, podem justificar essa característica.

Ao longo dessa unidade desenvolve-se a maior extensão dos rios do Sertão e Itacorubi, esse último com notório histórico de inundações, especialmente nos bairros Santa Mônica e Córrego Grande, assim como no loteamento Parque São Jorge.

Por estar inserida numa área predominantemente de formação sedimentar oriunda de depósitos flúvio lagunares-lacustres, marinhos e colúvio-aluvionares, com terrenos em sua grande maioria planos, não há falhas, fraturas ou fotolineamentos,

assim como diques, nessa unidade geotécnica, conforme o mapa geológico.

Sakamoto *et al.* (2015), realizaram um ensaio *BHST* em local delimitado pela unidade “Gsq” pelo presente estudo. O mesmo trata-se do ensaio nº 4, cujo ângulo de atrito interno, na condição de estado inundado teve valor igual a 35° e, no estado inundado, 43°. O intercepto coesivo apresentou valor igual a 6kPa, na condição de estado inundado, e 13kPa, no estado natural.

Comparativamente aos resultados estimados pelas correlações paramétricas, é possível observar que esses apresentaram valores superiores de intercepto coesivo.

5.2.3 PVgi – Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito ilha

A unidade “PVgi – Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito ilha”, é a terceira mais abrangente na Microbacia do Itacorubi, subdivida em duas áreas principais contidas entre a unidade “Cgi”, a primeira na porção Nordeste da microbacia e a segunda na porção Centro-Sul.

Há apenas um ensaio à percussão *SPT* contemplado nessa unidade, o de número 9. Nesse, a descrição tátil-visual indica solo do tipo “Silte arenoso, variegado, compacto a muito compacto”.

A espessura de solo é igual a 5 metros. A resistência à penetração “ N_{SPT} ” é igual a 27, valor esse superior ao apresentado para a unidade “Gsq”, por exemplo, um solo sedimentar.

Em relação aos ensaios laboratoriais de caracterização dos solos, a unidade “PVgi” abrange o ponto 1. Nesse a fração argila + silte é aproximadamente 53%. Destaca-se a fração areia grossa a qual apresentou 26% do total, sendo essa a segunda predominante.

Esse resultado é coerente com a classificação do solo, assim como a textura grosseira do mesmo quando coletado.

O índice de plasticidade da amostra foi igual a 25 (plasticidade alta). A classificação MCT foi do tipo “LG’ – Laterítico Argilosa”.

Os resultados dos ensaios de caracterização demonstram ser coerentes quando comparados a unidade “Cgi”, por exemplo. A distribuição granulométrica da unidade “PVgi” demonstra uma

maior presença de frações areia grossa, apresentando um valor mais alto de ângulo de atrito interno.

A unidade “PVgi” apresenta-se parcialmente urbanizada, onde as ocupações concentram-se nas regiões de menores cotas e declividades mais moderadas, ou seja, na fronteira com as unidades da porção central da Microbacia, “Gsq” e “Cgi”. As porções leste e nordeste encontram-se praticamente sem ocupação humana. Reitera-se que nesses locais predominam as cotas mais altas e as encostas mais íngremes, sendo essas menos propícias a execução de edificações, logradouros, espaços públicos, entre outros.

Diversas falhas, fraturas ou fotolineamentos, estão compreendidos na unidade “PVgi”. Em relação aos diques, estão presentes diques básicos em toda a sua área e uma ocorrência de dique ácido na porção Norte da unidade, próximo à SC-401, conforme o mapa geológico.

5.2.4 Cgt – Cambissolo substrato granito itacorubi

A unidade “Cgt – Cambissolo substrato granito itacorubi”, corresponde a quarta unidade mais abrangente do mapa geotécnico, distribuindo-se em duas áreas descontínuas na microbacia. A primeira, e maior, corresponde a uma faixa ocupando parte das porções Sul e Leste da microbacia, tal faixa encontra-se orientada no sentido Sudoeste-Nordeste. A segunda área, e menor, localiza-se na porção Noroeste, correspondendo a parte do terreno do Presídio Masculino de Florianópolis, do Departamento de Administração Prisional.

Assim como a unidade “Cgi”, a unidade “Cgt” também possui parte de sua área inserida em uma região de transição entre solos residuais e sedimentares, no caso entre as unidades “PVgt” e “Gsq”.

Há somente um ensaio à percussão nessa unidade, sendo o de número 18. Esse indica solo do tipo “areia siltosa, cinza clara/escuro, medianamente compacta”. A profundidade de solo é igual a 1,58m e o número de golpes “N_{SPT}” para profundidade de 1m é de igual a 11.

Para a unidade “Cgt”, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização correspondentes às amostras coletadas nos ensaios *BHST* 2 e 4. No primeiro, a fração argila +

silte compreendem 76% da distribuição granulométrica. Para o ensaio 4 a fração areia abrange 51% da granulometria.

A amostra coletada no ensaio 2 apresentou característica tátil visual particular, com coloração de tonalidade próxima ao rosa e textura bastante plástica ao ser moldada, no estado natural. Durante a tradagem para abertura do furo para execução do ensaio *BHST*, foi notória a facilidade da execução, sendo o perfil “macio” e homogêneo em toda a extensão do furo.

A amostra 4 foi classificada como “LG’ – Laterítico Argiloso”, conforme a metodologia MCT. Contrariamente a todas as outras amostras, a de número 2 foi classificada como “NG’ – Não Laterítico Argiloso”.

Comparativamente aos resultados estimados pelas correlações dos laudos *SPT*, os valores obtidos pelos ensaios *BHST* apresentaram resultados compatíveis de ângulo de atrito interno. Não é possível tecer análise quanto o intercepto coesivo, uma vez que por meio das correlações não foi possível estimar o mesmo.

A unidade “Cgt”, apresentam-se praticamente sem ocupação antrópica. Como exceções, uma pequena área da unidade, na porção Oeste da Microbacia apresenta ocupação. Outra pequena área, na porção Noroeste apresenta edificações, no caso o Presídio Masculino de Florianópolis.

Na área delimitada pela unidade “Cgt” estão presentes diversas falhas, fraturas ou fotolineamentos. Em relação aos diques, estão presentes somente diques básicos em todas as áreas da unidade, conforme o mapa geológico.

5.2.5 SMsq – Solos Indiscriminados de Mangue substrato sedimentos quaternários

A quinta unidade geotécnica predominante refere-se à “SMsq – Solos Indiscriminados de Mangue substrato sedimentos quaternários”, a qual está presente na porção central Norte da microbacia, formando limite com a Baía Norte. A mesma está integralmente contida no Manguezal do Itacorubi, uma das mais importantes unidades ambientais do município.

Os ensaios à percussão (*SPT*) contemplados nessa unidade são os de número 6, 7 e 26. Nesses, todas as descrições táteis-

visuais indicam solos do tipo “Argila orgânica, com fósseis marinhos, cinza escura, muito mole”.

A espessura de solo, mensurada da cota de execução da sondagem até o impenetrável, varia entre 15,45m e 17,93m, com valor médio igual a 16,49m. O número de golpes “N_{SPT}” é constante e igual a 1, evidenciando a baixa capacidade de suporte dos solos para obras de engenharia.

Ao sobrepor o Mapa Geotécnico e o Mapa de Mancha Urbana, observa-se que a maior parte da unidade “SMsq” não apresenta ocupação antrópica. Excetuam-se as porções norte e nordeste da unidade, por onde transpassa a Avenida da Saudade. Reitera-se que essa unidade contempla o Manguezal do Itacorubi, área de preservação permanente criada pelo Decreto Municipal nº 1529/2002.

Na unidade “SMsq” está localizada a exutória da Microbacia do Itacorubi, onde o Rio Itacorubi deságua na Baía Norte. Nessa área ocorre a presença do lençol freático junto à superfície, originando solos hidromórficos, contemplando os cursos d’água mais volumosos.

Por estar inserida numa área predominantemente de formação sedimentar oriunda de depósitos de planície de maré e depósitos flúvio lagunares-lacustres, com terrenos em sua grande maioria planos, não há falhas, fraturas ou fotolineamentos, assim como diques, nessa unidade geotécnica, conforme o mapa geológico.

5.2.6 PVgt – Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito itacorubi

A segunda unidade de podzóis provenientes de granitos refere-se a “PVgt – Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito itacorubi”, correspondendo a sexta mais abrangente. A mesma está localizada nas porções Sul e Sudeste da microbacia e, de forma semelhante à unidade “Cgt”, encontra-se orientada no sentido Sudoeste-Sudeste.

Para a unidade “PVgt”, não foram obtidos laudos de sondagem à percussão *SPT*, bem como não foram executados ensaios *BHST* ou de caracterização.

Semelhantemente à unidade “PVgi”, a unidade “PVgt” apresenta-se muito pouco urbanizada. A mancha urbana concentra-se na porção Oeste, bairro Pantanal, próximo à Escola

Básica Beatriz de Souza Brito. As demais áreas encontram-se praticamente sem ocupação humana. A área dessa unidade engloba uma pequena parte dos bairros Pantanal, Córrego Grande e Itacorubi.

Em relação à geologia, estão distribuídas algumas fraturas, falhas ou fotolineamentos, bem como diques básicos.

5.2.7 Rgi – Solos Litólicos substrato granito ilha

A unidade “Rgi – Solos Litólicos substrato granito ilha”, refere-se à sétima mais abrangente na microbacia ocupando 1,98% da mesma. Essa unidade localiza-se na porção Oeste, junto ao maciço do Morro da Cruz, até o divisor d’água. Essa distribuição é condizente com a topossequência típica de formação de solos da Ilha de Santa Catarina, proposta por Santos (1997), onde os solos litólicos estão dispostos nos topos dos morros.

Para a unidade “Rgi” não foram obtidos ensaios SPT, condição essa justificável, uma vez que, devido às declividades dos terrenos, essas não são áreas propícias à edificações ou desenvolvimento de malha viária.

Em contrapartida, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização dos solos, para a amostra nº 6. Nesse a fração argila + silte, perfaz mais de 61% da composição do solo. O índice de plasticidade da amostra foi igual a 32 (plasticidade alta). A classificação MCT foi do tipo “LG’ – Laterítico Argilosa”.

Em relação à ocupação antrópica, a unidade “Rgi” apresenta-se pouco urbanizada, com exceção de sua porção Norte, no Morro da Cruz, onde há diversas habitações de população carente, na Servidão Casa da Criança e Rua João da Cruz Meira, por exemplo. Na área englobada pela unidade está presente parte do bairro Trindade. O restante da unidade é ocupado majoritariamente por encostas naturais, sem ocupação.

Na unidade “Rgi” estão presentes algumas falhas, fraturas ou fotolineamentos, bem como uma pequena inserção de dique básico, conforme o mapa geológico.

5.2.8 Rgt – Solos Litólicos substrato granito Itacorubi

A oitava, e última, unidade mapeada refere-se à “Rgt – Solos Litólicos substrato granito itacorubi”. Essa é a unidade geotécnica menos abrangente da microbacia, representando somente 0,48% da área total, ou seja, quase setenta vezes menor que a unidade “Cgi”. A mesma localiza-se na porção Noroeste da microbacia, dividida em duas pequenas áreas junto ao Morro da Cruz, no divisor d’água.

Para a unidade “Rgt” não foram obtidos ensaios SPT, condição essa justificável, uma vez que, devido às declividades dos terrenos, essas não são áreas propícias à edificações ou desenvolvimento de malha viária.

Não foram conduzidos ensaios *BHST* nessa unidade, e, conseqüentemente, não houveram ensaios de caracterização.

Na área delimitada por essa unidade praticamente inexistem construções, sendo sua maior parte composta por encostas naturais, com altas declividades, recobertas por vegetação densa.

Na unidade “Rgt” estão presentes uma zona de falhas, fraturas ou fotolineamentos, bem como uma pequena inserção de dique básico, conforme o mapa geológico.

5.3 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

De forma a possibilitar a caracterização dos diferentes universos geotécnicos da área de estudo, foram realizados ensaios de campo e laboratoriais. Complementarmente, foram coletados ensaios preexistentes, permitindo uma melhor caracterização geotécnica. Os resultados de ambos são apresentados nos itens seguintes.

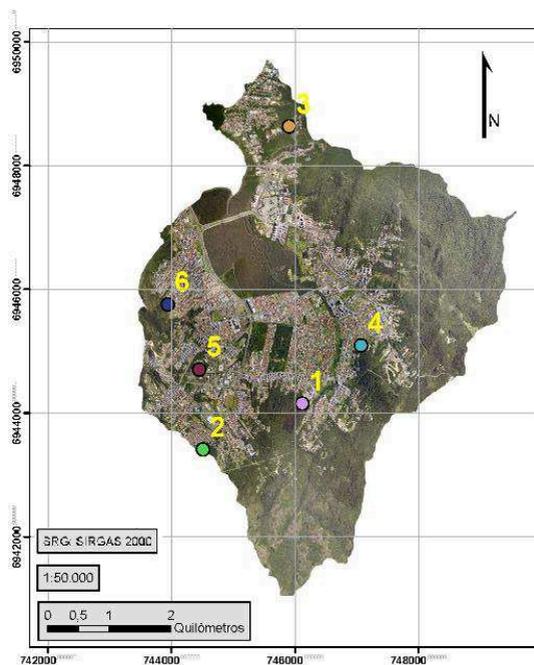
5.3.1 Caracterização dos solos

Os ensaios de campo foram realizados no período compreendido entre 28/09/2016 e 06/11/2016, utilizando o equipamento *BHST* de propriedade do Laboratório de Mapeamento Geotécnico – LAMGEO/UFSC. A Tabela 18 indica as características gerais e a Figura 45 ilustra a localização dos ensaios realizados.

Tabela 18 – Características gerais dos ensaios BHST – Microbacia do Itacorubi

Nº	Data	Coordenadas (UTM – 22S)		Observações
		Norte (S)	Este (E)	
1	05/11/2016	6.944.152,192	746.115,694	Não chovia a três dias
2	05/11/2016	6.943.411,854	744.507,601	Não chovia a três dias
3	14/10/2016	6.948.635,657	745.911,765	Chuva moderada no dia anterior
4	23/10/2016	6.945.105,621	747.067,321	Não chovia a quatro dias
5	30/10/2016	6.944.712,763	744.353,813	Não chovia a dois dias
6	06/11/2016	6.945.721,489	743.923,865	Não chovia a quatro dias

Figura 45 – Localização dos ensaios BHST – Microbacia do Itacorubi



O ensaio nº 1 foi realizado em um terreno virgem, com vegetação nativa em uma encosta natural, no bairro Córrego Grande. Próximo ao ponto amostrado havia uma obra residencial, onde foi efetuado um corte exibindo o perfil de solo.

Em relação ao ensaio nº 2, esse foi executado em um acesso à residências formado por um pequeno corte junto ao terreno natural, composto por vegetação nativa e espécies exóticas, como eucaliptos. O mesmo localiza-se ao final da Servidão Crescêncio Francisco Mariano, nas proximidades da Escola Básica Beatriz de Souza Brito, bairro Pantanal.

O ensaio nº 3 foi realizado em um lote residencial ao final da Rua Maestro Vila Lobos, no bairro João Paulo, com cobertura vegetal descaracterizada. Nas proximidades do fundo do terreno há um curso d'água natural.

O ensaio nº 4 localiza-se em uma propriedade na Rua Rostock, paralela à rua Vera Linhares de Andrade, no bairro Córrego Grande. Por tratar-se de uma área de loteamento, a cobertura vegetal nativa encontrava-se descaracterizada. Salienta-se que não foram observadas evidências de execução de aterro no local.

O ensaio nº 5 foi executado no Campus João David Ferreira Lima – UFSC / Trindade, próximo ao Departamento de Matemática. O local consiste em um canteiro entre calçadas. Foi necessária a abertura de dois furos, uma vez que no primeiro houve muita interferência de raízes, dificultando a tradagem. Após encerrar a primeira tentativa, deslocou-se o equipamento em torno de 2 metros para a segunda tentativa de abertura de furo, sendo essa completada sem interferências. Salienta-se que não foram observadas evidências de execução de aterro no local ou outra característica que pudesse influenciar o ensaio.

O último ensaio realizado, nº 6, foi executado em um lote residencial ao final da Rua Zamzibar do Nascimento Lins, no bairro Trindade, com cobertura vegetal nativa parcialmente preservada. Conforme relato do proprietário do imóvel vizinho, o terreno nunca foi alterado para fins residenciais, sendo mantida sua cobertura vegetal original. O terreno apresenta feições de encosta natural, com declividade moderada.

Iniciando as caracterizações dos solos da área de estudo, a Tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de umidade natural e granulometria.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de umidade natural e granulometria

Nº	Umidade nat. (%)	Granulometria (%)					
		Argila	Silte	A.F.	A.M.	A.G.	P.F.
1	24	40	13	4	13	26	4
2	44	27	51	14	6	1	1
3	19	39	15	5	14	14	13
4	29	27	22	6	18	21	6
5	21	31	26	7	14	12	10
6	22	50	11	2	8	15	14

A.F. = areia fina; A.M. = areia média; A.G. = areia grossa; P.F. = pedregulho fino

O ensaio nº 2 apresentou a maior fração “argila + silte”, 78% e, conseqüentemente, a menor fração “areia”, 22%. Contrariamente, o ensaio nº 4 apresentou a menor fração “argila + silte”, 49% e a maior fração “areia”, 51%.

A Tabela 20 apresenta os resultados dos ensaios de densidade real dos grãos, limites de Atterberg e classificação para solos tropicais MCT.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de densidade, limites de Atterberg e MCT

Nº	δ_s (g/cm ³)	Limites de consistência				Classificação	Class. MCT
		LL (%)	LP (%)	IP (%)			
1	2,37	60	35	25	Plasticidade alta	LG'	
2	2,41	89	59	30	Plasticidade alta	NG'	
3	2,57	55	36	19	Plasticidade média	LG'	
4	2,35	53	36	17	Plasticidade média	LG'	
5	2,57	43	22	21	Plasticidade alta	LG'	
6	2,49	70	38	32	Plasticidade alta	LG'	

A densidade real dos grãos apresenta resultados bastante semelhantes para todos os ensaios. Em relação aos limites de consistência, o maior índice de plasticidade refere-se ao ensaio nº 6, e o menor para o ensaio nº 17.

Conforme a classificação MCT, cinco ensaios foram classificados como “LG”, laterítico argiloso. Somente o ensaio nº 2 teve classificação diferente, “NG”, não-laterítico argiloso.

5.3.2 Borehole Shear Test – BHST

De forma a obter os parâmetros de resistência dos solos, foram realizados seis ensaios de cisalhamento de campo, do tipo *Borehole Shear Test*, distribuídos na área de estudo.

Os ensaios realizados respeitaram os procedimentos descritos no item 4.2.3.1 *Borehole Shear Test (BHST)* – Procedimento, detalhados nos próximos itens. A seleção dos locais onde foram realizados os ensaios de campo visou a melhor distribuição geográfica, abrangência de todas as unidades geotécnicas com solos residuais e terrenos em condições naturais, onde não houvessem intervenções antrópicas que pudessem tornar os resultados não representativos, como áreas aterradas ou edificadas.

A Tabela 21 apresenta os resultados dos ensaios *BHST* realizados.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios *BHST* – Microbacia do Itacorubi

	T.C. (min)	Prof. (m)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máx. (kPa)	Âng. atrito int. ϕ (°)	Int. coesivo (kPa)
<i>BHST 1</i>						
Nat.	15	1,0	50	52	34	20
	5		78	76		
	5		115	96		
In.	15	1,2	50	42	31	12
	15		75	58		
	15		100	72		

**Tabela 21 – Resultados dos ensaios BHST – Microbacia do Itacorubi
(continuação)**

	T.C. (min)	Prof. (m)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máx. (kPa)	Âng. atrito int. ϕ (°)	Int. coesivo (kPa)
<i>BHST 2</i>						
Nat.	15	0,4	48	40	24	21
	5		72	56		
	5		102	64		
In.	15	0,8	22	25	24	14
	5		42	30		
	5		70	44		
	5		90	54		
<i>BHST 3</i>						
Nat.	15	0,8	50	68	26	40
	15		75	68		
	15		100	92		
In.	15	1,0	25	20	27	9
	15		50	38		
	15		75	48		
	15		100	60		
<i>BHST 4</i>						
Nat.	15	1,0	50	52	31	20
	15		75	60		
	15		100	82		
In.	15	1,2	25	28	33	10
	15		50	42		
	15		75	55		
	15		100	78		

Tabela 21 – Resultados dos ensaios BHST – Microbacia do Itacorubi (continuação)

	T.C. (min)	Prof. (m)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máx. (kPa)	Âng. atrito int. ϕ (°)	Int. coesivo (kPa)
<i>BHST 5</i>						
Nat.	15	0,8	50	50	27	23
	15		75	60		
	15		100	76		
In.	15	1,0	25	24	28	8
	15		50	30		
	15		75	48		
	15		100	62		
<i>BHST 6</i>						
Nat.	15	0,6	47	46	31	17
	5		73	59		
	5		104	80		
In.	15	0,8	26	19	24	9
	5		50	32		
	5		73	43		
	5		100	52		

T.C. = tempo de consolidação; Nat. = estado de umidade natural; In. = estado inundado

A Figura 46 ilustra as envoltórias de ruptura para cada ensaio.

Figura 46 – Envoltórias - Tensão Normal x Tensão Cisalhante – Ensaio BHST

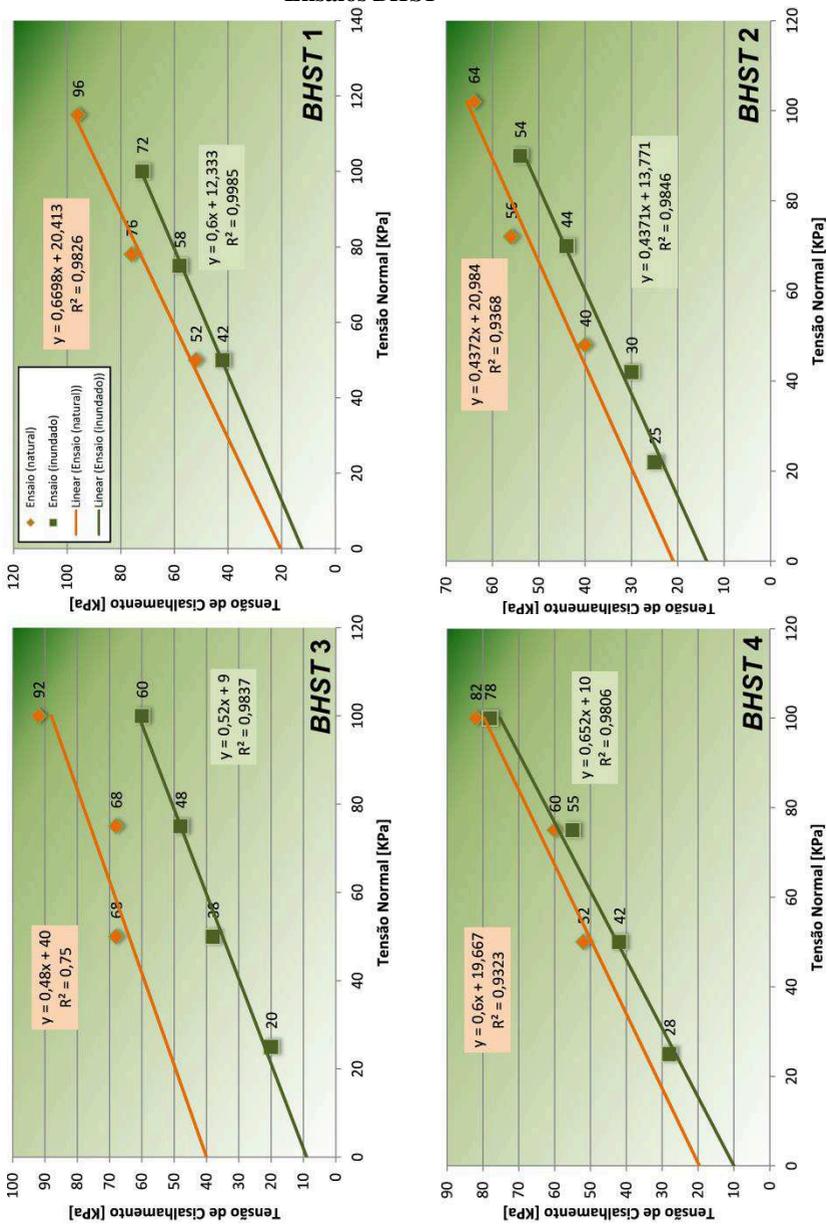
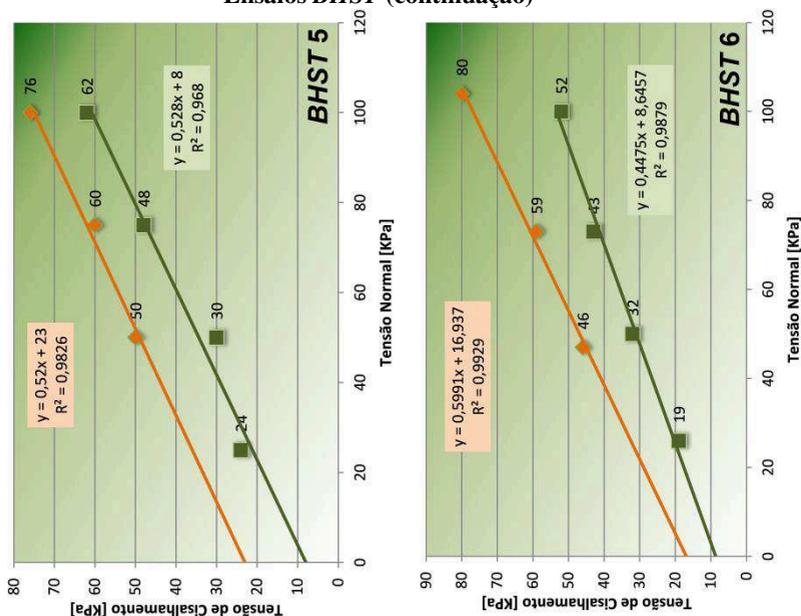


Figura 46 – Envoltórias - Tensão Normal x Tensão Cisalhante – Ensaios BHST (continuação)



Os ensaios foram realizados nas condições de estado de umidade natural (em laranja) e, posteriormente, inundado (em verde), conforme o procedimento descrito anteriormente. Salienta-se que, quando da abertura do furo a trado, em nenhum dos ensaios foi observado surgimento de nível d'água ao fundo.

Conforme é possível observar nas linhas de tendência geradas nos gráficos de envoltória de ruptura dos ensaios, essas apresentaram declividades semelhantes para as condições de estado natural e inundado. Essa tendência traduz-se em ângulos de atrito interno compatíveis para cada amostra, respectivamente.

Outro comportamento observado por meio da análise dos resultados, foi o decréscimo do valor de intercepto coesivo nas mensurações de estado natural para inundado.

O maior valor de ângulo de atrito interno foi obtido no ensaio BHST 1, estado natural, por outrora, o menor foi o do ensaio BHST 2, em ambas as condições. Para o intercepto coesivo, o maior valor observado foi no ensaio BHST 3, estado natural, o menor para o ensaio BHST 5, estado inundado.

É possível observar que o ensaio *BHST* 3 apresentou a maior variação de intercepto coesivo entre as condições de ensaio no estado inundado e natural. Salienta-se que o ensaio de caracterização demonstrou predominância da fração argila, com 39% do total.

Com relação ao ângulo de atrito interno, a maior diferença ocorreu no ensaio *BHST* 6. O valor mensurado para a condição de estado inundado foi aproximadamente 22% menor que o estado natural.

Tal comportamento pode indicar que houve a lubrificação das partículas de granulometria “areia”, induzindo a um realinhamento e diferença de embricamento entre os grãos. Salienta-se que a fração areia totaliza 39% da composição do solo, valor intermediário quando comparado aos demais ensaios.

Por fim, um resumo dos resultados dos ensaios *BHST* são compilados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resumo dos resultados dos ensaios *BHST* – Microbacia do Itacorubi

<i>BHST</i>	Âng. de atrito int. ϕ (°)		Diferença (in – nat) (%)	Int. coesivo (kPa)		Diferença (in – nat) (%)
	In.	Nat.		In.	Nat.	
1	31	34	-8,4	12	20	-39,6
2	24	24	0	14	21	-34,4
3	27	26	7,1	9	40	-77,5
4	33	31	6,9	10	20	-49,2
5	28	27	1,3	8	23	-65,2
6	24	31	-22,0	9	17	-48,9

In. = estado inundado; Nat. = estado de umidade natural

5.3.3 Correlações paramétricas – Sondagens à percussão *SPT*

Complementarmente aos ensaios de cisalhamento de campo *Borehole Shear Test*, foram coletados laudos de

sondagens à percussão – *SPT* (*Standard Penetration Test*), compondo um banco de dados georreferenciado.

Os dados básicos de cada laudo utilizado podem ser observados na Tabela 23 e as localizações dos mesmos, no *software* de SIG, são indicadas na Figura 47. É possível observar que os pontos estão distribuídos entre as cotas 2,0m e 53,5m, onde predomina a presença da mancha urbana.

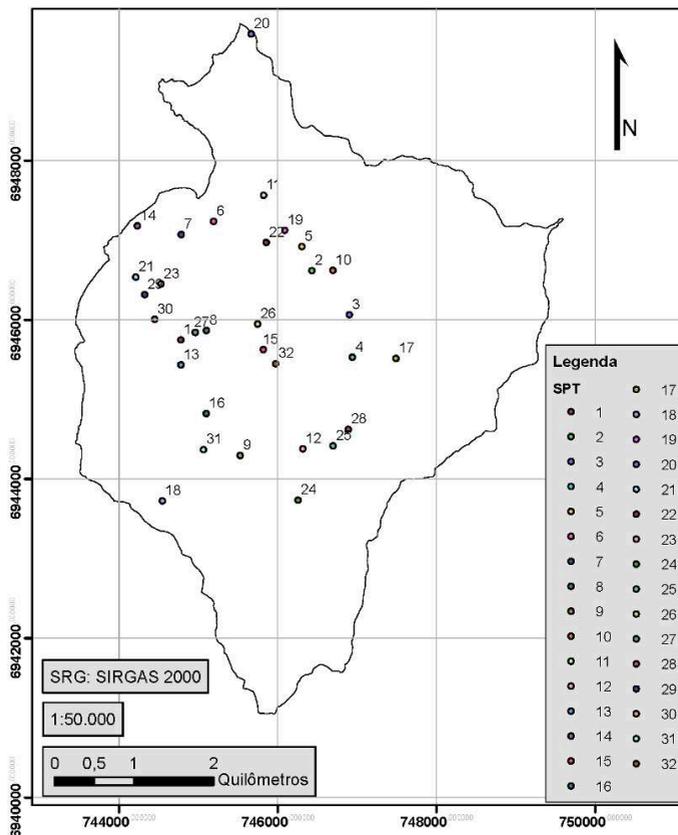
Tabela 23 - Dados básicos – Laudos de sondagens “SPT”

<i>SPT</i>	Coordenadas UTM (SIRGAS 2000 – 22S)		Bairro	Cota Ensaio (m)
	Norte (S)	Este (E)		
01	744.780,08	6.945.746,61	Trindade	5,90
02	746.429,51	6.946.616,37	Itacorubi	10,20
03	746.901,67	6.946.062,67	Itacorubi	5,50
04	746.939,51	6.945.529,65	Itacorubi	3,80
05	746.303,13	6.946.918,86	Itacorubi	9,50
06	745.192,09	6.947.234,85	Itacorubi	2,80
07	744.785,20	6.947.069,70	Itacorubi	3,20
08	745.101,89	6.945.864,46	Santa Mônica	2,80
09	745.526,91	6.944.293,96	Córrego Grande	53,50
10	746.694,69	6.946.619,37	Itacorubi	18,50
11	745.821,88	6.947.562,26	Itacorubi	30,40
12	746.315,88	6.944.379,30	Córrego Grande	9,50
13	744.780,36	6.945.433,41	Trindade	7,90
14	744.231,72	6.947.178,68	Agronômica	3,20
15	745.818,15	6.945.624,27	Santa Mônica	3,10
16	745.098,88	6.944.820,95	Trindade	7,10
17	747.489,04	6.945.513,06	Trindade	7,90

Tabela 23 - Dados básicos – Laudos de sondagens “SPT” (cont.)

SPT	Coordenadas UTM (SIRGAS 2000 – 22S)		Bairro	Cota Ensaio (m)
	Norte (S)	Este (E)		
18	744.546,92	6.943.723,46	Pantanal	15,80
19	746.087,54	6.947.123,12	Itacorubi	9,00
20	745.665,46	6.949.589,12	João Paulo	31,50
21	744.210,75	6.946.534,75	Trindade	9,30
22	745.854,62	6.946.970,46	Itacorubi	2,80
23	744.529,43	6.946.449,95	Agronômica	2,30
24	746.255,02	6.943.733,54	Córrego Grande	20,00
25	746.696,17	6.944.416,26	Córrego Grande	7,00
26	745.745,52	6.945.945,82	Santa Mônica	2,00
27	744.961,94	6.945.840,36	Trindade	3,80
28	746.889,07	6.944.622,36	Córrego Grande	14,65
29	744.324,28	6.946.315,48	Agronômica	9,47
30	744.450,13	6.946.005,16	Trindade	7,19
31	745.064,22	6.944.370,82	Pantanal	18,30
32	745.973,44	6.945.447,13	Santa Mônica	3,00

Figura 47 – Localização dos ensaios de sondagens à percussão “SPT”



As correlações paramétricas foram determinadas para a resistência e descrição dos laudos a uma profundidade de 5 metros. Esse valor foi arbitrado uma vez que o modelo *SHALSTAB* é apropriado para estimativa de deslizamentos rasos. Em estudos realizados por Michel (2011), Listo e Vieira (2012), Reginatto (2013), Sakamoto *et al.* (2015) e Vieira e Ramos (2015) foram adotados valores de espessura de solo entre 2 metros a 15 metros para a simulação. A Tabela 24 apresenta os resultados das correlações para a área de estudo.

**Tabela 24 – Parâmetros de solos estimados – Laudos “SPT” –
Microbacia do Itacorubi**

Ud Geot.	SPT	N_{SPT} (5m)	Peso esp. nat. “γ_n” (kN/m³)	Âng. atrito int. “ϕ” (°)	Int. coesivo “c” (kPa)
Cgi	10	11	19	31	34
	11	14	20	32	32
	20	22	20	34	36
	21	20	20	34	35
	24	12	19	32	35
	29	19	20	34	35
Gsq	01	15	19	33	36
	02	22	20	35	33
	03	9	19	21	28
	04	14	19	34	-
	05	18	20	35	-
	08	5	17	32	-
	12	10	18	29	34
	13	5	18	-	23
	14	6	18	29	34
	15	8	19	31	-
	16	6	17	30	-
	17	7	18	29	-
	19	6	17	29	-
	22	2	17	-	8
	23	5	15	29	-
	25	9	18	20	29
27	7	18	31	-	
28	12	19	32	36	

Tabela 24 – Parâmetros de solos estimados – Laudos “SPT” – Microbacia do Itacorubi (continuação)

Ud Geot.	SPT	N_{SPT} (5m)	Peso esp. nat. “γ_n” (kN/m³)	Âng. atrito int. “ϕ” (°)	Int. coesivo “c” (kPa)
Gsq	30	12	19	32	38
	31	6	18	29	36
	32	6	18	-	18
PVgi	09	27	21	36	36
SMsq	06	1	16	-	8
	07	1	17	-	8
	26	1	17	-	8
Cgt	18	11	18	31	-

Tais resultados possuem caráter preliminar, uma vez que foram obtidos de forma indireta, sendo utilizados somente para efetuar comparações ou simulações prévias. Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que os valores de resistência a penetração “N_{SPT}” variam bastante, sendo o valor máximo igual a 27 golpes, o mínimo igual a 1 golpe e o valor médio igual a 10 golpes.

Relativamente à variação de resultados “N_{SPT}”, a mesma é compreensível, uma vez que os ensaios foram executados em universos geotécnicos distintos, englobando desde solos sedimentares em área de manguezal, até solos residuais em encostas.

Os valores estimados de peso específico natural “ γ_n ” variam entre 15kN/m³ e 21kN/m³, com valor médio igual a 18kN/m³.

Os valores estimados de ângulo de atrito interno “ ϕ ” apresentaram valores entre 20° e 36°, com valor médio igual a 31°. Comparativamente aos resultados obtidos pelos ensaios *BHST*, nos quais os valores variaram entre 24° e 33°, com valor médio igual a 29° (condição natural) e 28° (condição inundado), tais correlações apresentaram valores ligeiramente superiores, ou seja, induzindo a uma condição de maior resistência ao cisalhamento dos solos.

Para o intercepto coesivo “*c*”, os valores estimados para os laudos *SPT* variaram entre 8kPa e 38kPa, com valor médio igual a 28kPa. Em comparação aos resultados provenientes dos ensaios *BHST*, não houve diferença significativa entre o valor mínimo, de 8kPa, e o valor máximo, de 40kPa. Relativamente ao valor médio, onde para os ensaios *BHST* foi igual a 24kPa (condição natural) e 10kPa (condição inundado), pôde ser observada diferença significativa, especialmente quando comparado ao resultado da condição de ensaio inundado, estando a média obtida pelas correlações dos laudos de sondagens muito superior.

Dessa forma, é possível concluir que, para o presente estudo, as correlações de laudos de sondagens sugerem fornecer dados menos seguros para análises de estabilidade de encostas, em comparação aos parâmetros obtidos por meio de ensaios *BHST*.

5.4 APLICAÇÃO DO MODELO *SHALSTAB*

Conforme o método utilizado, após a definição do MDT e do mapa de declividades, desenvolvimento do mapa de unidades geotécnicas e obtenção das caracterizações e parâmetros de resistência dos solos, foi possível então estimar as áreas suscetíveis a deslizamentos rasos utilizando o modelo *SHALSTAB* (MONTGOMERY E DIETRICH, 1994).

Devido às diferentes formas de obtenção dos parâmetros físicos e de resistência dos universos geotécnicos, foram desenvolvidos três mapas de suscetibilidade, distinguidos conforme os dados de entrada utilizados os resultados.

Tal distinção torna-se necessária de forma a possibilitar comparações entre os métodos, confrontando seus resultados, e, até mesmo, auxiliando na análise da acurácia dos mesmos e o quanto esses podem influenciar na simulação.

5.4.1 Mapa de suscetibilidade – correlações paramétricas *SPT*

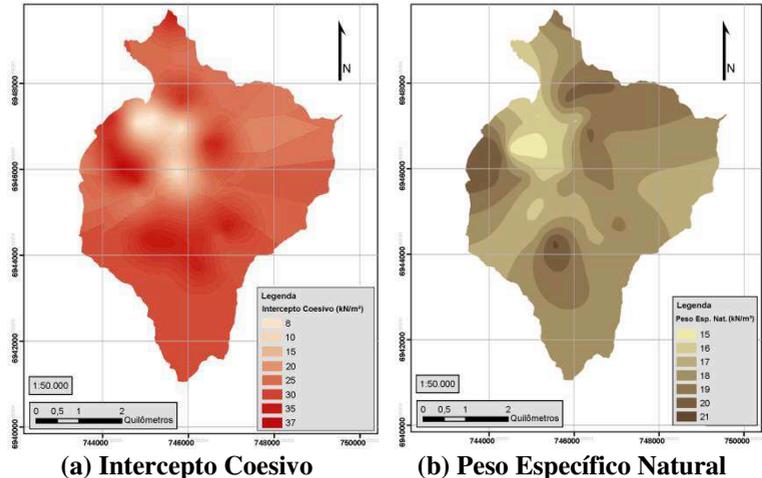
O primeiro mapa de suscetibilidade foi produzido utilizando os parâmetros físicos e de resistência dos solos estimados por correlações paramétricas dos laudos de sondagens *SPT*. Para tal, utilizando as ferramentas de geoprocessamento do *software* de SIG, incluindo as interpolações geoestatísticas por

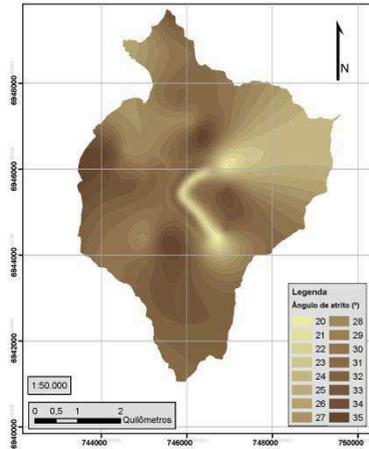
Krigagem, foram delimitadas diversas áreas de influência para cada dado necessário a simulação, sendo:

- Intercepto coesivo: ao total foram estimados valores de intercepto coesivo para 22 pontos distribuídos na microbacia, com valores variando entre 8kN/m^2 e 38kN/m^2 ;
- Peso específico natural: ao total foram estimados valores de peso específico natural para 32 pontos distribuídos na microbacia, com valores variando entre 15kN/m^3 a 21kN/m^3 ;
- Ângulo de atrito interno: ao total foram estimados valores de ângulo de atrito interno para 26 pontos distribuídos na microbacia, com valores variando entre 20° e 36° .

A Figura 48 ilustra os mapas gerados por meio do método da Krigagem para os quatro parâmetros explanados anteriormente.

Figura 48 – Mapas de correlações paramétricas SPT – Microbacia do Itacorubi





(c) Ângulo de atrito interno

Utilizando o modelo digital do terreno e as delimitações espaciais provenientes do mapa de unidades geotécnicas e mapas de correlações paramétricas, foi possível submeter a área de estudo à simulação de estabilidade *SHALSTAB*.

Para tal, foi utilizada uma rotina computacional automatizada, a qual fora desenvolvida e aprimorada pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico – LAMGEO/ECV/UFSC. Esse processo consiste em uma funcionalidade agregada à *toolbox* do *software* ArcGIS®. A Figura 49 ilustra o Mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos produzido pela ferramenta.

A Tabela 25 e o Gráfico 1 apresentam os resultados gerados pela simulação, conforme as classes de instabilidade definidas pela razão “ $\log q/T$ ”, do modelo *SHALSTAB*.

Figura 49 – Mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – Correlações Paramétricas SPT

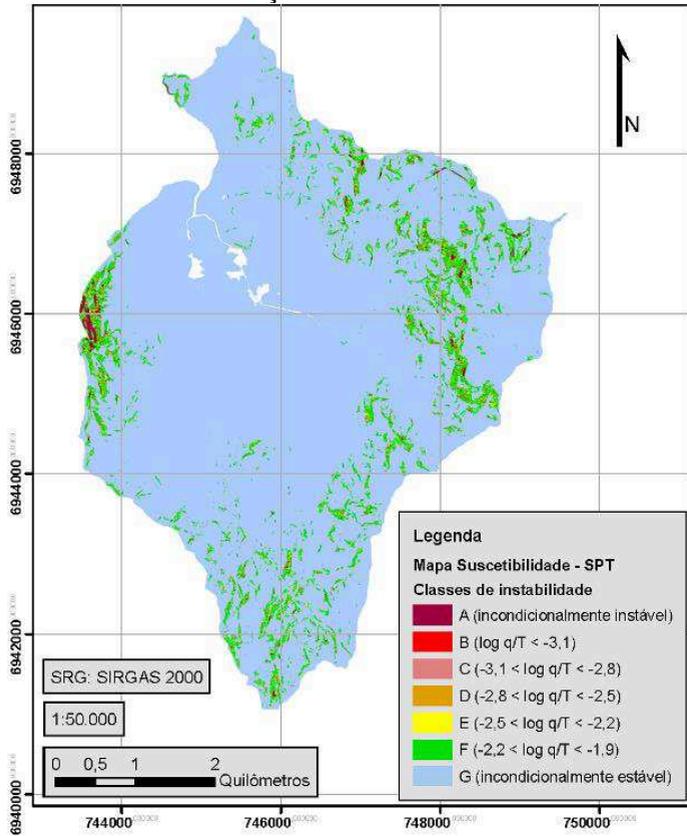
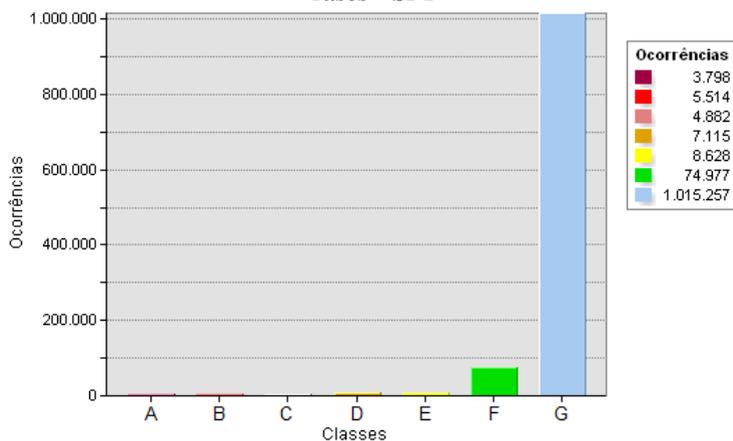


Tabela 25 – Resultados do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – Correlações Paramétricas SPT

Classe	Descrição	Ocorrência (<i>pixels</i>)	Área	
			(m ²)	(%)
A	Incond. instável, saturado	3.798	95.448,59	0,34
B	Incond. instável, não saturado	5.514	138.573,86	0,49
C	Instável, saturado	4.882	122.690,90	0,44
D	Instável, não saturado	7.115	178.809,04	0,64
E	Estável, não saturado	8.628	216.832,66	0,77
F	Incond. estável, saturado	74.977	1.884.267,80	6,69
G	Incond. estável, não saturado	1.015.257	25.514.705,44	90,63
TOTAL		1.120.171	28.151.328,29	100,00

Gráfico 1 – Resultados do mapa de Suscetibilidade à deslizamentos rasos – SPT

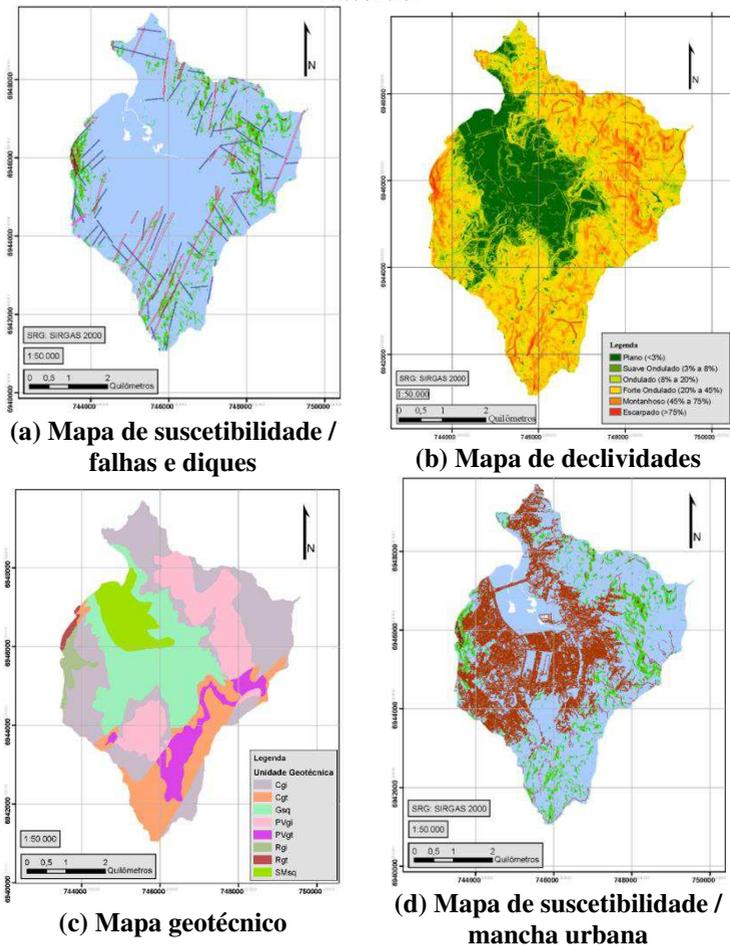


A coluna “ocorrências (*pixels*)” corresponde ao número de elementos de imagem que abrange determinada classe, uma vez que o resultado gerado é materializado por uma imagem matricial. Por meio dessa quantidade, foi possível determinar as respectivas áreas para cada classe do mapa.

Analisando os dados gerados, é possível observar que a maior parte da área da microbacia foi atribuída à classe “G – Incondicionalmente estável”. Somadas, as classes “E”, “F” e “G” perfazem um total de 98,10%, ou seja, predominam áreas onde se estima não haver riscos quanto à ocorrência de deslizamentos rasos.

A Figura 50 demonstra o mapa de suscetibilidade sobreposto às falhas, fraturas, fotolineamentos e diques, mancha urbana, assim como os mapas de declividades e geotécnico.

Figura 50 – Mapa de suscetibilidade e outros – Microbacia do Itacorubi



As áreas classificadas como instáveis situam-se, principalmente, na porção Leste e, posteriormente, na porção Oeste da microbacia. Nessas áreas é possível observar a proximidade com zonas de falhas, fraturas ou fotolineamentos, assim como diques básicos. Em nenhum local ocorre a perfeita sobreposição com os mesmos. As porções Norte e Sul apresentaram pequenas áreas esparsas classificadas como incondicionalmente instáveis.

Comparativamente ao mapa de declividades, as áreas de classes instáveis (A, B, C e D) coincidem com as fases de relevo do tipo “Forte ondulado”, “Montanhoso” e “Escarpado”. Tal resultado é coerente, uma vez que as áreas com maiores declividades apresentam maior predisposição à ocorrências de deslizamentos rasos. Reitera-se que o modelo *SHALSTAB* utiliza, além do MDT, os parâmetros físicos e de resistência dos solos. Concordando com o MDT, as áreas com maiores declividades coincidem com as áreas de maiores altitudes.

Ao sobrepor os mapas de suscetibilidade e de unidades geotécnicas, as áreas instáveis coincidem com as unidades “Cgi”, “Cgt”, “PVgi”, “PVgt”, “Rgi” e “Rgt”, ou seja, todas aquelas compostas por solos residuais.

As demais unidades geotécnicas, “Gsq” e “SMSq” apresentaram majoritariamente classificações estáveis, principalmente a classe “G – Incondicionalmente estável”. Em tais unidades predominam fases de relevo com declividades moderadas.

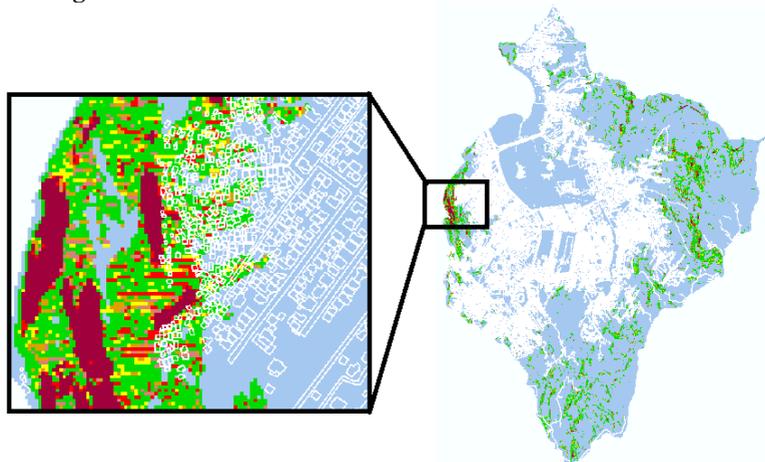
As regiões as quais foram atribuídas classes instáveis apresentaram parâmetros de resistência, conforme as correlações paramétricas, com valores intermediários quando comparados ao restante da microbacia. Contrariamente às áreas estáveis, nesses locais prevaleceram fases de relevo com declividades acentuadas.

Por fim, quando sobreposto ao mapa de mancha urbana, a maior parte das áreas instáveis, e incondicionalmente instáveis, não apresentam ocupação urbana ou malha viária. A exceção consiste em poucas residências isoladas na porção Oeste da microbacia, em região com declividade acentuada no Morro da Cruz.

Nessa região, é notória a proximidade das residências com as áreas classificadas como instáveis, ou seja, caso o processo de crescimento urbano desordenado continue, há a tendência que

essas áreas sejam ocupadas. Tal tipo de ocupação não é aconselhável, conforme os resultados do mapa de suscetibilidade, que podem ser observados na Figura 51.

Figura 51 – Residências em áreas instáveis – Morro da Cruz



5.4.2 Mapa de suscetibilidade – ensaios *BHST*

De forma semelhante ao item anterior, foram produzidos mapas de suscetibilidade à deslizamentos rasos utilizando os parâmetros de resistência obtidos por meio dos ensaios de campo *BHST*. Para esses, foram delimitadas áreas de influência para intercepto coesivo e ângulo de atrito interno conforme as duas condições de ensaio, primeiramente para o estado de umidade natural e, em segundo, para o estado inundado.

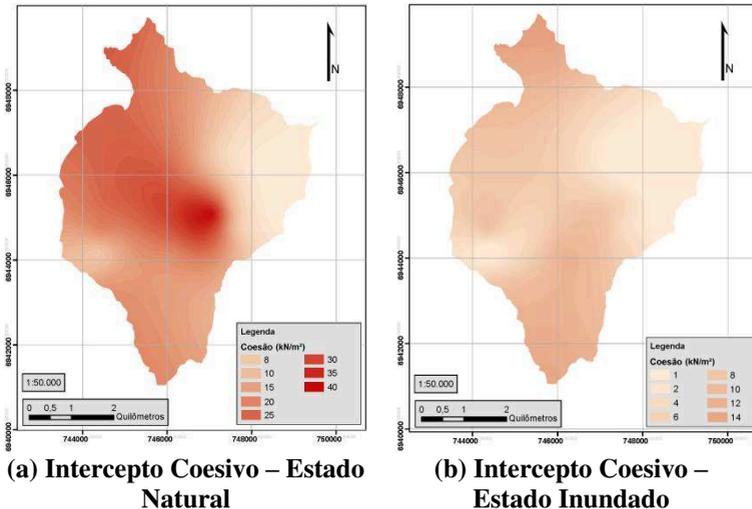
De forma a acrescer representatividade às áreas de influências geradas, foram utilizados os dados dos ensaios *BHST* conduzidos no presente estudo, assim como os demais dados coletados na revisão bibliográfica. Dessa forma, utilizando o interpolador geoestatístico do tipo Krigagem, foram delimitadas áreas de influência para:

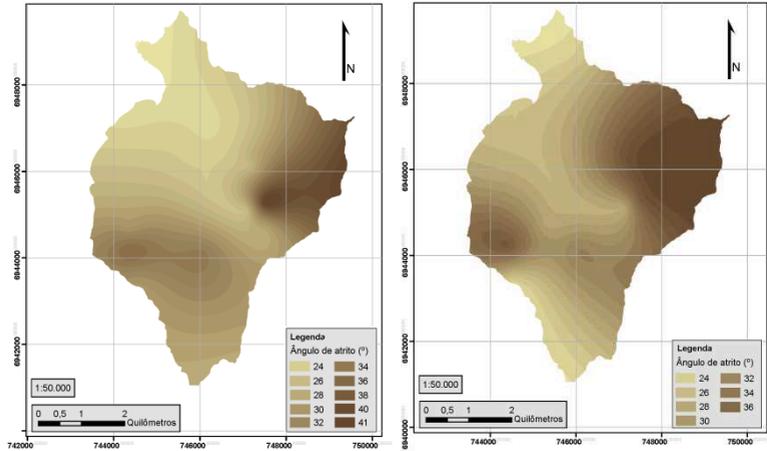
- Intercepto coesivo:
 - Estado natural: ao total foram estimados valores de intercepto coesivo para 11 pontos distribuídos na microbacia. Os valores variam entre 8kN/m² e 40kN/m²;

- Estado inundado: ao total foram estimados valores de intercepto coesivo para 11 pontos distribuídos na microbacia. Os valores variam entre 1kN/m^2 e 14kN/m^2 .
- Ângulo de atrito interno:
 - Estado natural: ao total foram estimados valores de ângulo de atrito interno para 11 pontos distribuídos na microbacia. Os valores variam entre 24° e 42° ;
 - Estado inundado: ao total foram estimados valores de ângulo de atrito interno para 11 pontos distribuídos na microbacia. Os valores variam entre 24° e 36° .

A Figura 52 ilustra os mapas gerados por meio do método da Krigagem para os dois parâmetros de resistência citados anteriormente e respectivas condições de ensaio.

Figura 52 – Mapas de parâmetros de resistência dos ensaios BHST – Microbacia do Itacorubi





(c) **Ângulo de Atrito Interno – Estado Natural**

(d) **Ângulo de Atrito Interno – Estado Inundado**

A diferença de valores de intercepto coesivo entre os ensaios nas condições de estado natural e inundado, torna-se graficamente mais perceptível frente ao aumento de umidade do solo. Por outrora, tal diferença não é tão explícita em relação ao ângulo de atrito interno, resultando em dois mapas semelhantes, sem contrastes significativos.

Utilizando o mapa de unidades geotécnicas, os mapas de parâmetros físicos provenientes dos dados dos ensaios *BHST* na condição de estado natural e o modelo digital do terreno foi gerado então o mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos por meio do *SHALSTAB*. A Figura 52 ilustra o mapa obtido, a Tabela 26 e o Gráfico 2 os resultados gerados pela simulação, conforme as classes de instabilidade definidas pela razão “log q/T”, do modelo *SHALSTAB*.

De forma análoga, foi gerado o mapa de suscetibilidade para a condição de estado inundado, representado também na Figura 53, cujas informações encontram-se na Tabela 27 e no Gráfico 3.

Tabela 26 – Resultados do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – BHST (natural)

Classe	Descrição	Ocorrência (<i>pixels</i>)	Área	
			(m ²)	(%)
A	Incond. instável, saturado	21.795	547.745,97	1,95
B	Incond. instável, não saturado	19.085	479.639,00	1,70
C	Instável, saturado	13.630	342.545,43	1,22
D	Instável, não saturado	17.321	435.306,63	1,55
E	Estável, não saturado	18.139	455.864,38	1,62
F	Incond. estável, saturado	166.221	4.177.420,67	14,84
G	Incond. estável, não saturado	863.960	21.712.806,21	77,13
TOTAL		1.120.171	28.151.328,29	100,00

Gráfico 2 – Resultados do mapa de suscetibilidade – BHST (natural)

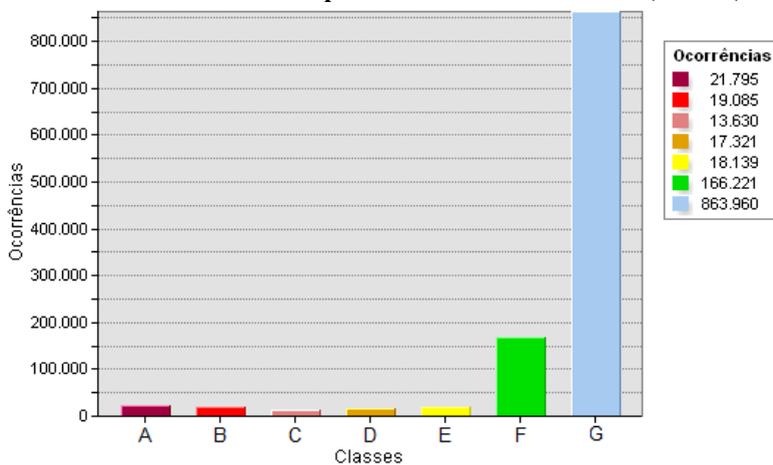


Figura 53 – Mapas de suscetibilidade à deslizamentos rasos – Ensaio *BHST*

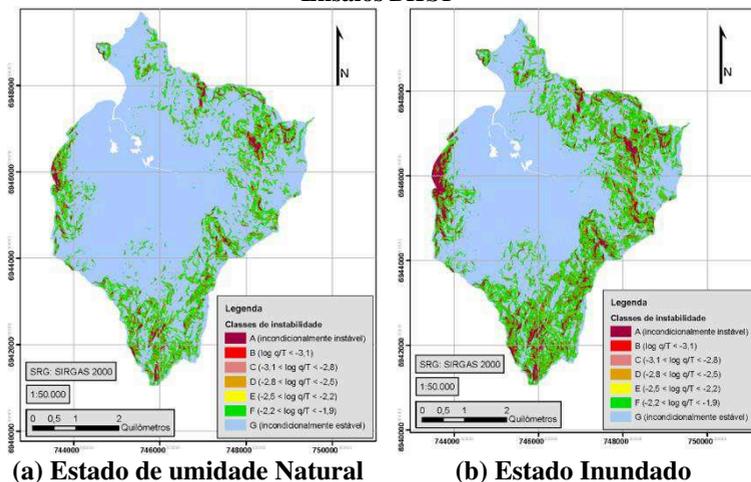
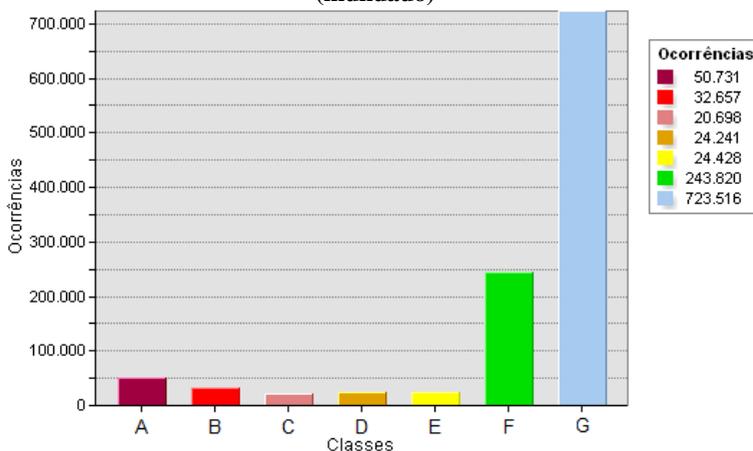


Tabela 27 – Resultados do mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos – *BHST* (inundado)

Classe	Descrição	Ocorrência (<i>pixels</i>)	Área	
			(m ²)	(%)
A	Incond. instável, saturado	50.731	1.275.025,90	4,53
B	Incond. instável, não saturado	32.657	820.770,75	2,92
C	Instável, saturado	20.698	520.204,33	1,85
D	Instável, não saturado	24.241	609.250,81	2,16
E	Estável, não saturado	24.428	613.950,69	2,18
F	Incond. estável, saturado	243.820	6.127.945,73	21,77
G	Incond. estável, não saturado	723.516	18.184.180,07	64,59
TOTAL		1.120.171	28.151.328,29	100,00

Gráfico 3 – Resultados do mapa de suscetibilidade – BHST (inundado)



Comparativamente, as duas simulações apresentam resultados semelhantes, onde o somatório das classes “E”, “F” e “G” foi em torno de 90%. Para o estado de umidade natural, o mapa de suscetibilidade à deslizamentos rasos indica valores um pouco superiores quanto a predominância dessas classes, diferindo em torno de 5% em relação aos valores apresentados para o de estado inundado.

Visualmente, é possível observar que a simulação para o estado inundado apresenta maior quantidade de áreas das classes “A” e “B”, incondicionalmente instáveis. O somatório das classes “A”, “B”, “C” e “D”, instáveis, é de 11,46% para a condição de estado inundado e 6,41% para a condição de estado natural.

Reitera-se que os mapas provenientes dos dados obtidos pelos ensaios *BHST* apresentaram resultados semelhantes para as duas condições, apesar da diferença mais contrastante entre os valores de intercepto coesivo.

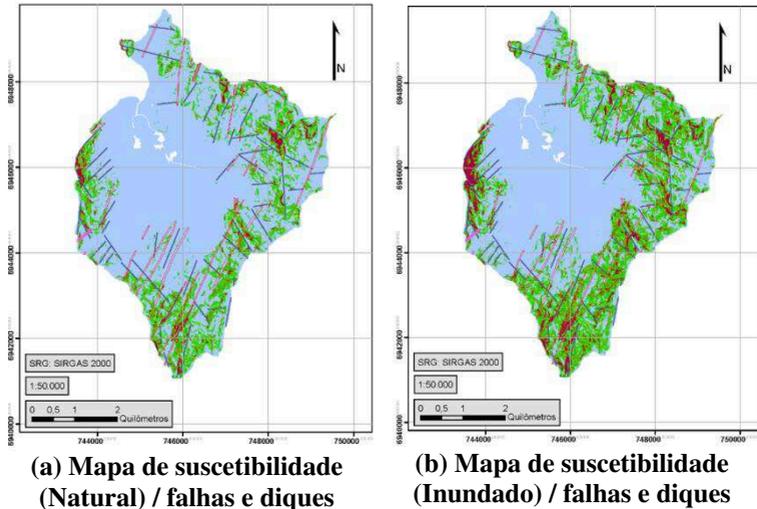
Em comparação ao mapa gerado a partir dos dados das correlações paramétricas, o mapa de ensaio *BHST*, estado inundado, apresentou maior número de ocorrências de classes instáveis, “A”, “B”, “C” e “D”, em torno de cinco vezes superior. Para o mapa na condição de estado de umidade natural, foi obtido um resultado aproximadamente três vezes superior de classificação instável. Proporcionalmente, foram obtidos menores valores de ocorrências para as classes estáveis, “E”, “F” e “G”.

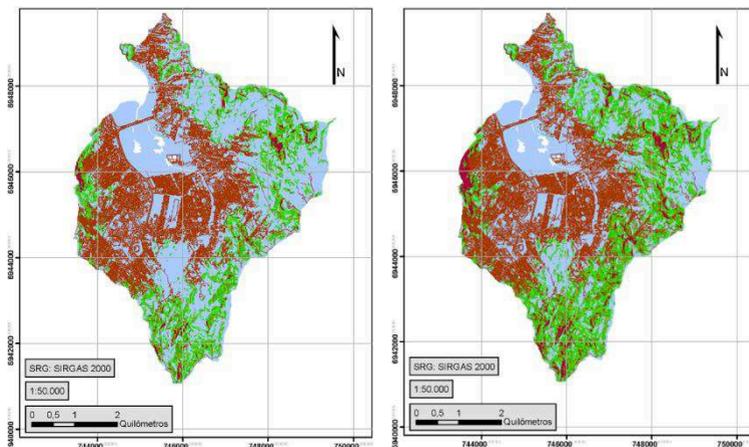
Tais resultados apresentam coerência, uma vez que os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno, obtidos por meio das correlações paramétricas, foram superiores, em média, aos obtidos dos ensaios *BHST*, em ambas as condições, natural e inundado. Os mapas de suscetibilidade ajudam a corroborar a tendência de superestimação desses valores por parte das correlações paramétricas.

Em todos os mapas de suscetibilidade gerados, é possível observar a predominância das classes instáveis, “A”, “B”, “C” e “D”, nas porções Leste e, principalmente, Oeste da bacia, onde localiza-se o Morro da Cruz, em áreas delimitadas pelo mapa de unidades geotécnicas como de Solos Litólicos.

A Figura 54 demonstra os mapas de suscetibilidade para ensaios *BHST*, sobrepostos às falhas, fraturas, fotolineamentos e diques, assim como mancha urbana.

Figura 54 – Mapas de suscetibilidade *BHST* e outros – Microbacia do Itacorubi





(c) Mapa de suscetibilidade (Natural) / Mancha urbana

(d) Mapa de suscetibilidade (Inundado) / Mancha urbana

Em ambos os mapas é possível observar a proximidade das classes instáveis com zonas de falhas, fraturas ou fotolineamentos, assim como diques básicos. Em alguns locais, ocorre a sobreposição entre áreas classificadas como instáveis e as falhas geológicas.

As áreas de classes instáveis para os mapas de estado natural e inundado (A, B, C e D) concordam com as fases de relevo do tipo “Forte ondulado”, “Montanhoso” e “Escarpado”, semelhantemente ao mapa de suscetibilidade produzido com os dados de correlações paramétricas.

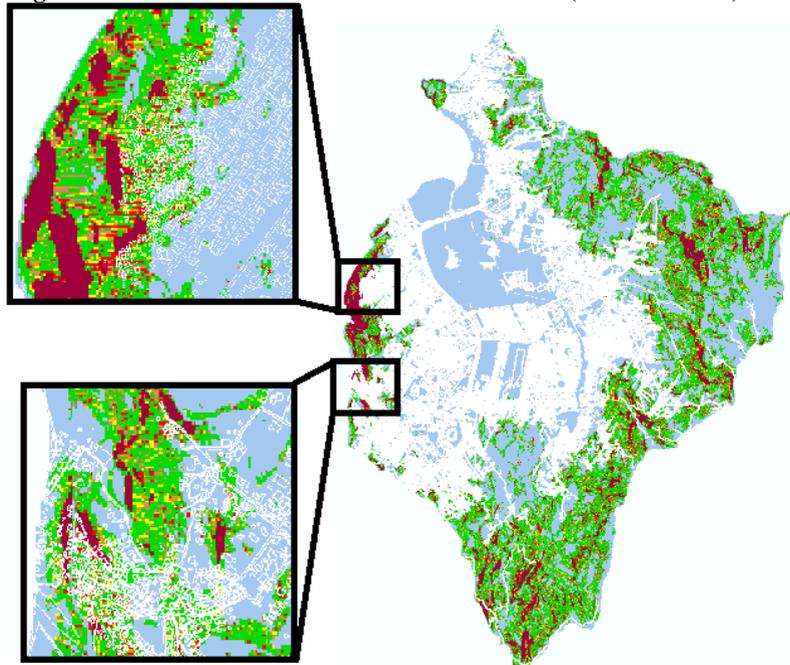
Ao sobrepor os mapas de suscetibilidade e de unidades geotécnicas, as áreas instáveis coincidem com as unidades “Cgi”, “Cgt”, “PVgi”, “PVgt”, “Rgi” e “Rgt”, ou seja, todas aquelas compostas por solos residuais. As ocorrências referentes a classe “A” predominam, em ordem decrescente, nas unidades “Rgi”, “Rgt” e “Cgi”.

As demais unidades geotécnicas, “Gsq” e “SMsq” apresentaram majoritariamente classificações estáveis, principalmente “G – Incondicionalmente estável”. Em tais unidades, predominam fases de relevo com declividades moderadas.

Assim como no mapa de suscetibilidade para as correlações paramétricas, o mapa para o estado natural apresentou sobreposição entre áreas de classes “A” ou “B”, e

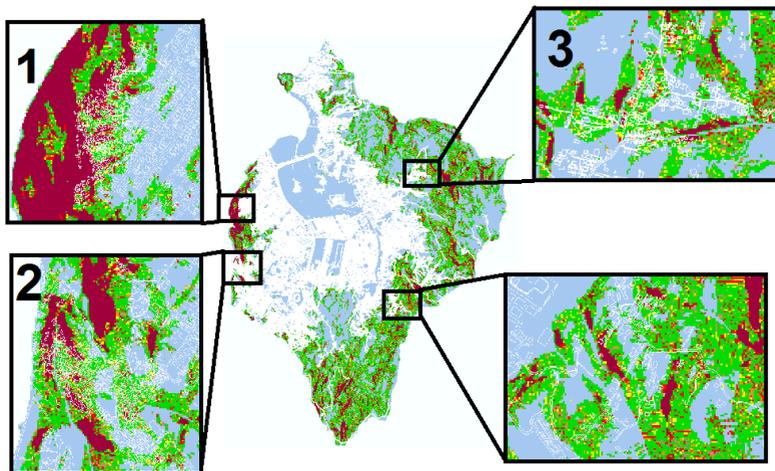
ocupações residenciais na porção Oeste, mais especificamente no Morro da Cruz e na localidade da Carvoeira. A Figura 55 demonstra os locais.

Figura 55 – Residências em áreas instáveis – BHST (estado natural)



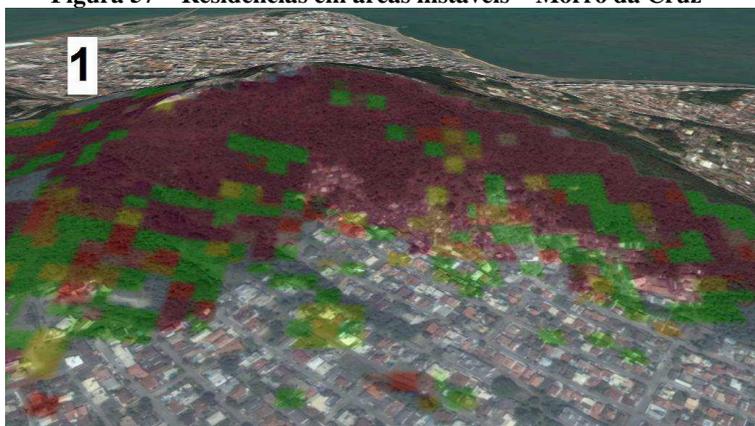
A Figura 56, além de apresentar os mesmos locais sobrepostos ao mapa de suscetibilidade para o estado inundado, demonstra também residências em áreas classificadas como incondicionalmente instáveis “A” ou “B”, na porção Leste da microbacia, mais especificamente no Morro do Itacorubi, e na porção Sudeste, no bairro Córrego Grande.

Figura 56 – Residências em áreas instáveis – BHST (estado inundado)



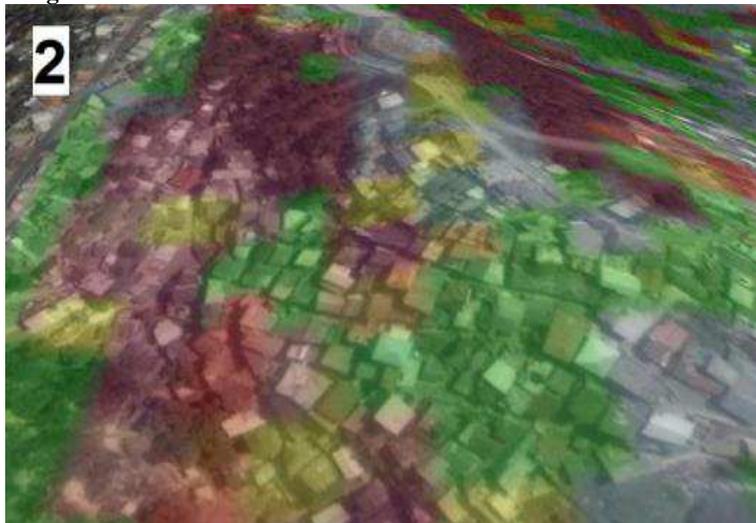
A Figura 57 ilustra uma sobreposição do mapa de suscetibilidade, para o estado inundado, com uma imagem de satélite disponível no *software* Google Earth® para a região do Morro da Cruz. As Figuras 58 e 59 ilustram o Morro da Carvoeira e o Morro do Itacorubi, respectivamente.

Figura 57 – Residências em áreas instáveis – Morro da Cruz



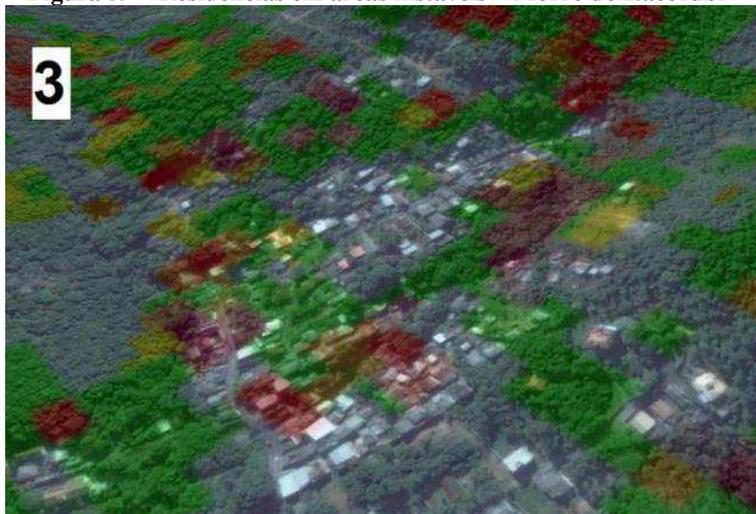
Fonte: Adaptado de Google Earth®

Figura 58 – Residências em áreas instáveis – Morro da Carvoeira



Fonte: Adaptado de Google Earth®

Figura 59 – Residências em áreas instáveis – Morro do Itacorubi



Fonte: Adaptado de Google Earth®

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desse estudo permitiu alcançar os objetivos geral e específicos.

A composição do banco de dados georreferenciados de ensaios de cisalhamento de campo *BHST* e respectivos ensaios de caracterização, permitiram avaliar os parâmetros de resistência, ângulo de atrito interno e intercepto coesivo, a distribuição granulométrica, a densidade real dos grãos e a classificação MCT dos solos da área de estudo.

Os resultados dos ensaios *BHST* demonstraram comportamento satisfatório, conforme as envoltórias obtidas para as condições de estado de umidade natural e inundado. Os valores de ângulo de atrito interno não indicaram diferenças significativas para as duas condições. Em relação ao intercepto coesivo, houve decréscimo de valor para a condição de estado inundado em todos os ensaios, comparativamente ao estado de umidade natural.

As estimativas de parâmetros de resistência dos solos, obtidas pelas correlações paramétricas do banco de dados *SPT*, sugerem fornecer valores superestimados quando comparados aos ensaios de cisalhamento de campo.

O Mapa Geotécnico Ajustado, originado a partir da aplicação das metodologias de Davison Dias (1995) e Higashi (2006), possibilitou a delimitação de oito unidades geotécnicas para a área de estudo, distribuídas em dois universos geotécnicos: solos residuais e sedimentares.

A unidade geotécnica predominante, “Cgi – Cambissolo substrato granito ilha”, está presente em praticamente toda a faixa de altitudes da microbacia. Os resultados dos ensaios geotécnicos e correlações paramétricas indicaram valores intermediários de parâmetros físicos e de resistência para essa unidade quando comparada às demais.

Em relação à ocupação antrópica, a unidade “Cgi” apresenta grande parte de sua área sobreposta à edificações, loteamentos, sistema viário e equipamentos urbanos. Nela predominam fases de relevo do tipo Suave Ondulado (3% a 8%) a Escarpado (> 75%).

A segunda unidade geotécnica mais abrangente, “Gsq – Glei substrato sedimentos quaternários”, apresentou valores de parâmetros físicos e de resistência mais baixos, conforme as correlações paramétricas. Sua área é a mais urbanizada dentre as unidades delimitadas, com declividades variando entre Plano (<3%) e Suave Ondulado (3% a 8%).

O interpolador estatístico de Krigagem permitiu espacializar os dados pontuais dos ensaios de cisalhamento de campo e correlações paramétricas. As áreas delimitadas para cada parâmetro físico e de resistência foram utilizadas para a simulação de estabilidade da microbacia. Essa ferramenta demonstrou resultados satisfatórios, permitindo a utilização da geoestatística no auxílio às análises e delimitações das unidades geotécnicas e áreas instáveis.

O modelo *SHALSTAB* permitiu gerar três Mapas de Suscetibilidade a Deslizamentos Rasos, conforme os ensaios geotécnicos, sendo o primeiro para as correlações paramétricas, o segundo para os ensaios *BHST* na condição de estado de umidade natural, e o terceiro para o estado inundado.

Os mapas de suscetibilidade gerados indicaram a predominância de áreas instáveis, correspondendo às classes “A”, “B”, “C” e “D” nas áreas de fases de relevo Forte Ondulado (20% a 45%) a Escarpado (>75%).

Em comparação ao Mapa Geotécnico Ajustado, as áreas instáveis sobrepõem-se aos universos geotécnicos de solos residuais, principalmente as unidades geotécnicas “Rgi”, “Rgt”, “Cgt” e “Cgi”. As unidades “Gsq” e “SMsq”, correspondendo a solos sedimentares, apresentaram somente áreas com classificações estáveis.

Quando sobreposto ao Mapa de Mancha Urbana, os mapas de suscetibilidade indicaram áreas edificadas em terrenos classificados como incondicionalmente instáveis, “A” e “B”, no Morro da Cruz, Morro da Carvoeira, Morro do Itacorubi e Córrego Grande.

O mapa de suscetibilidade proveniente dos resultados dos ensaios *BHST* para condição de estado inundado apresentou a maior quantidade de áreas instáveis. Contrariamente, para os resultados das correlações paramétricas, foi gerado o mapa de suscetibilidade com menos áreas instáveis, permitindo observar que o modelo *SHALSTAB* é influenciado diretamente pela variação de parâmetros físicos e de resistência dos solos.

Por fim, como resultado comum aos três mapas gerados, predominaram áreas classificadas como incondicionalmente estáveis, “F” e “G”, na área de estudo. Para o mapa utilizando correlações paramétricas essas classes ocupam 97,33% da microbacia, para os ensaios *BHST* em condição de estado de umidade natural 91,97%, e para o estado inundado 86,36%.

6.2 SUGESTÕES

De forma a possibilitar a continuidade do presente estudo, são listadas recomendações para trabalhos futuros.

- Aumentar a escala do mapa geotécnico, obtendo um mapa pedológico em escala mais detalhada que a utilizada no presente estudo e realizando mais observações de campo;
- Realizar mais ensaios de cisalhamento de campo *BHST* e ensaios de caracterização em laboratório, complementando o banco de dados geotécnicos;
- Ampliar o banco de dados de sondagens SPT, coletando laudos georreferenciados de empresas especializadas;
- Gerar um mapa de suscetibilidade com resultados de ensaios laboratoriais de cisalhamento direto, comparando-o aos gerados pelos demais ensaios geotécnicos;
- Obter o mapa de microzoneamento e uso do solo do IPUF, comparando-o aos mapas geotécnicos de suscetibilidade a deslizamentos da área de estudo;
- Obter dados da Secretaria de Defesa Civil municipal sobre deslizamentos na área de estudo e comparar as localizações com os resultados dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos;
- Identificar em campo as cicatrizes de deslizamentos da área de estudo comparando-as ao resultado do mapa de suscetibilidade em ambiente SIG;
- Adotar o método do presente estudo em outras bacias hidrográficas, especialmente na Ilha de Santa Catarina, devido aos processos de formação de solo e expansão urbana semelhantes à Microbacia do Itacorubi.

REFERÊNCIAS

- AITCHINSON, G. D., & GRANT, K. (1976). The PUCE Program of terrain description evaluation and interpretation of engineering purposes. *Regional Conference of Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 14*. Cape Town.
- ALLESSI, C. C. (2011). *Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO₂, CH₄, Rn e microbiota em um campo petrolífero do Recôncavo Baiano (BA)*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- AMARAL, C., & LARA, A. (1998). Mapa Geológico-geotécnico 1:10.000 Voltado para o Entendimento dos Processos e Riscos a Escorregamentos no Rio de Janeiro. *III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA*. Florianópolis.
- American Society for Test and Materials - ASTM. (1998). *ASTM D 3080 - 98 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Pennsylvania, Estados Unidos da América.
- ANDRIOTTI, J. L. (2003). *Fundamentos de estatística e geoestatística*. São Leopoldo, Rio Grande do Sul: Unisinos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984a). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984b). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984c). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984d). NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- BASTOS, C. A., MIRANDA, T. C., SHULER, A. R., SCHMITT, L. A., & VESCONCELOS, S. M. (2007). Mapeamento

- Geotécnico da Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. *6o Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental*.
- BASTOS, C. A., PINHEIRO, R. J., FILHO, C. L., & BRESSANI, L. A. (1998). Zoneamento de Áreas de Risco em Ocupação de Encosta da Serra Gaúcha. *III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA*. Florianópolis.
- BASTOS, G. (2005). *Estruturação de Banco de Dados a partir do Mapeamento Geotécnico Aplicado à Região de Ribeirão Preto (SP)*. Tese de Doutorado, EESC - USP, Departamento de Geotecnia, São Carlos.
- BASTOS, M. D. (2004). Atlas do Município de Florianópolis. 166. (IPUF, Ed.) Florianópolis.
- BECHTUM, T. (2012). *Automation and further development of the borehole shear test. Paper 12886*. Dissertação de Mestrado, Iowa State University, Ames.
- BERBERIAN, D. (2001). *Engenharia de Fundações*. Brasília: Editora UnB.
- BEVEN, K., & KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*(24), 43-69.
- BITTAR, O. Y., CERRI, L. F., & NAKAZAWA, V. A. (1992). Carta de risco geológico e carta geotécnica: uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil. *SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO*, pp. 35-41.
- BRAGA, L. P. (1990). Geostatística e aplicações. *IX Simpósio Brasileiro de Probabilidades e Estatística* (pp. 36-44 (minicurso)). São Paulo: IME/USP.
- BRASIL. (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil* (Lei Federal 10.257 de 10.07.2001 - Estatuto da Cidade ed.). Brasília: Congresso Nacional.
- BRASIL. (2001). Lei número 10.257 de 10 de Julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. *Legislação Federal*. Brasil.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. (2009). *Resposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre*.

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres - CEPED, Florianópolis.

BURROUGH, P. A. (1987). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford, Inglaterra: Clarendon Press.

CALIJURI, M. L., MEIRA, A. D., BHERING, E. M., & LORENTZ, L. F. (2001). Sistema de Cadastro e Visualização de Dados Geotécnicos. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA*. Brasília.

CAMARGO, E. C. (2011). *Capítulo 5 - Geostatística: fundamentos e aplicações*. Acesso em 8 de Outubro de 2015, disponível em Site da Divisão de Processamento de Imagens - DPI:
http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geost.pdf

CAMARGO, E. D. (1997). *Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigeagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (SPRING)*. Tese de Doutorado, Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP.

CAMPOS, G. L. (2015). *Variação sazonal do fator de segurança global da estabilidade de um talude de solo residual de diabásio*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

CARAMEZ, M. L. (2011). *Análise da Suscetibilidade a Escorregamentos de Encostas de duas Micro Bacias de Florianópolis Através do Modelo SHALSTAB*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

CARDOSO, S., & MEDEIROS, S. B. (2011). *Aplicação do modelo SHALSTAB na previsão de deslizamentos de encostas no litoral de Santa Catarina*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL, Departamento de Engenharia Civil, Palhoça.

CARUSO JR., F. (Dezembro de 1993). *Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina*. NOTAS TÉCNICAS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Geologia Costeira e Oceânica (CECO), Porto Alegre.

CARVALHO, D. F., & SILVA, L. D. (2006). *Hidrologia*. Rio de Janeiro: UFRJ.

CARVALHO, D. M., PESSOA, O. A., SILVEIRA, I. A., GOMES, R. A., & JÚNIOR, O. A. (2007?). Aplicação do Modelo SHALSTAB para a Demarcação de Áreas Susctíveis a Escorregamentos no Município de Itatiaia - RJ. 6. (D. d. Geografia, Ed.) Brasília: Universidade de Brasília.

CERRI, L. E., AKISSI, A., AUGUSTO FILHO, O., & ZAINE, J. E. (1996). Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo. *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 8, v.2, pp. 537-548. Rio de Janeiro.

CERRI, L. E., ZAINE, L. E., SILVA, V. C., NÉRI, A. C., BARBOSA, T. T., PAULA, J. P., et al. (2004). Mapeamento de Risco em Áreas de Ocupação Precária nas Zonas Norte, Leste e Oeste do Município de São Paulo (SP). *5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL*, V.1, pp. 115-122. São Carlos.

CHRIST, C. E. (2015). *Mapeamento de áreas suscetíveis ao colapso na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

COLZANI, R., & ISOPPO, A. (2013). *Estruturação e utilização de um banco de dados geotécnico da Ilha de Santa Catarina em SIG*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

CUNHA, M. A. (1991). *Ocupação de Encostas (Manual)*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

DATE, C. J. (2004). *Uma Introdução a Sistemas de Banco de Dados* (8ª ed.). (P. C. Serviços, Ed.) São Paulo: Editora Campus.

DAVISON DIAS, R. (1995). Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. *Revista do Instituto Geológico, Volume Especial*, 51-55.

DAVISON DIAS, R. (2001). Proposta de uma Metodologia de Estudos Geotécnicos para Impantação de Rodovias, Estradas Rurais e Vicinais em Solos Brasileiros. *REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*, (p. Anais...). Florianópolis.

DIETRICH, W. E., REISS, R., HSU, M. L., & MONTGOMERY, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and

shallow landsliding using digital elevation data. In: *Hydrological Processes* (Vol. 9, pp. 383-400).

DIETRICH, W. E., WILSON, C. J., MONTGOMERY, D. R., MCKEAN, J., & BAUER, R. (1992). Channelization Thresholds and Land Surface Morphology. *Geology*, 20, 675-679.

DIETRICH, W., & MONTGOMERY, D. (29 de Novembro de 1998). *Berkeley Geomorphology Group*. Acesso em 16 de Março de 2015, disponível em <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph//shalstab/>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (2 ed.). (H. G. SANTOS, & et al., Eds.) Rio de Janeiro, RJ: Embrapa solos.

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. (s.d.). *Mapoteca*. Acesso em 16 de Novembro de 2010, disponível em http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/pre_download_hidrograficas.jsp

FILHO, J. M. (2000). *Água Subterrânea: Histórico e Importância* (Vols. In Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações). (F. A. Feitosa, & J. M. Filho, Eds.) Fortaleza: CPRM/REFO.

FIRME, L. P. (2003). *Caracterização físico-química de solos de mangue e avaliação de sua contaminação por esgoto doméstico via traçadores fecais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

FOLLE, D. (2002). *O estudo geoestatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.

FOLLE, D., COSTA, J. F., & KOPPE, J. C. (2001). Geração de mapas de SPT: Uma abordagem geoestatística. *INFOGEO - Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia*. Curitiba.

FRANÇA Jr., R. T. (2002). *Levantamento de Dados e Informações para Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Joinville*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

FRANCO, G. B., MARQUES, E. A., CALIJURI, M. L., & GOMES, R. L. (Set de 2010). *Cartografia Geotécnica: Estágio*

Atual do Conhecimento. (I. d. Geografia, Ed.) *Caminhos de Geografia - Revista on-line*, 11(35), 158-172.

GENEVOIS, B., & OLIVEIRA, G. M. (2005). Aplicação de Geoestatística. In: A. D. GUSMÃO, & et al., *Geotecnia no Nordeste* (pp. 532-543). Recife, Pernambuco: Editora Universitária da UFPE.

GEORIO - Instituto de Geotecnia do Município do Rio de Janeiro. (2000). *Manual Técnico de Encostas – Análise e Investigação*. Rio de Janeiro.

GGE - Grupo de Gestão do Espaço - UFSC. (2006). *Atlas Ambiental Municipal - Florianópolis, SC - Brasil*. (P. FUNCITEC, Ed.) Florianópolis.

GOMES, R. L., & RODRIGUES, J. E. (1998). O Uso de Perfis de Intemperismo no Mapeamento Geotécnico de Materiais Inconsolidados - Aplicação no Município de Campinas – SP. *III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA*. Florianópolis.

GUARESI, & TEIXEIRA. (2001). *Banco de Dados de Sondagens SPT do Município de Tubarão*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Tubarão.

GUESSER, L. H. (2013). *Elaboração do mapa geotécnico preliminar e mapa de áreas suscetíveis a movimentos de massa do município de Antônio Carlos-SC*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

GUIMARÃES, R. F., FERNANDES, N. F., GOMES, R. A., & JÚNIOR, O. A. (Fevereiro, 2003). *Fundamentação Teórica do Modelo Matemático para Previsão de Escorregamentos Rasos Shallow Stability* (2 ed., Vol. 6). Brasília: Espaço & Geografia.

Handy Geotechnical Instruments, Inc. (Janeiro de 2013). Borehole Shear Test - Instructions. *Serial no 238*. Iowa - USA.

HANDY, R. L., & FOX, N. S. (1967). A soil borehole direct shear test device. *Highway Research News*(27), pp. p. 42-51.

HERRMANN, M. L. (1989). *Aspectos ambientais da porção central da ilha de Santa Catarina*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Geociências, Florianópolis.

HERRMANN, M. L. (2000). *Levantamento dos Desastres Naturais causados pelas Adversidades Climáticas no Estado de*

- Santa Catarina. Período de 1980 a 2000* (1a ed.). Florianópolis: IOESC.
- HIGASHI, R. A. (2002). *Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do Estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Área: Infraestrutura e Gerência Viária, Florianópolis.
- HIGASHI, R. A. (2006). *Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Infraestrutura Viária, Florianópolis.
- HORN FILHO, N. O., SCHMIDT, A. D., BENEDT, C., NEVES, J., PIMENTA, L. H., PAQUETTE, M., et al. (Dezembro de 2014). Estudo geológico dos depósitos clásticos quaternários superficiais da planície costeira de Santa Catarina, Brasil. *GRAVEL*, V. 12(1), 41-107.
- HOUSSEINI, E., GALLICHAND, J., & CARON, J. (1993). Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in South West Iran. *American Society of Agricultural Engineers*, 36(6), pp. 1687-1693.
- IAEG-UNESCO. (1976). *Engineering geological maps: a guide to their preparation*. (C. o. Geology, Ed.) Paris: Unesco Press.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2016). *Cidades*. Acesso em 22 de Janeiro de 2017, disponível em <http://cidades.ibge.gov.br/>
- ISAAKS, E. H., & SRIVASTAVA, R. M. (1989). *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- JESUS, A. C., MIRANDA, S. B., DIAS, L. S., BRITO JÚNIOR, J. A., & BURGOS, P. C. (2005). Contribuição para o zoneamento das áreas com características geotécnicas semelhantes da cidade de Salvador visando a aplicação em mapeamento de risco. *IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*, (p. 10). Salvador - BA.
- JOURNAL, A. G., & HUIJBREGTS, J. C. (1978). *Mining geostatistics*. Academic Press.
- KOPEZINSKI, I. (2000). *Mineração x Meio Ambiente: Considerações Legais, Principais Impactos Ambientais e seus*

Processos Modificadores. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

KRIGE, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. *Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African*, 52 (6), pp. 119-139. Johannesburg.

LANDIM, P. M. (2000). *Análises estatística de dados geológicos multivariados*. Texto didático 03, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Departamento de Geologia Aplicada - IGCE - Laboratório de Geomática, Rio Claro/SP.

LISTO, F., & VIEIRA, B. (2012). Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. *Geomorphology*, 169, 30-44.

LUTENEGGER, A. J., & TIMIAN, D. A. (1997). Reproducibility of Borehole Shear Test Results in Marine Clay. *Geotechnical Testing Journal*, 10(1), 13-18.

MACENO, F. F., & SOARES, G. (2001). *Estudo de fundações Baseado em Sondagens SPT Realizadas nos Terminais de Integração de Florianópolis*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

MAFRA Jr., C. d. (2007). *Elaboração do Mapa Preliminar de Unidades Geotécnicas do Município de Brusque Associado a um Banco de Dados Geotécnico em Ambiente de SIG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

MATHERON, G. (December de 1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246-1266.

MATHERON, G. (1965). *Les variables régionalisées et leur estimation*. Paris, France: Masson et cie.

MATHERON, G. (1971). *The theory of regionalized variables and its applications*. Paris: Le Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu.

MICHEL, G. P. (2011). *Estudo de Escorregamentos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com os Modelos SHALSTAB e SINMAP*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis.

MICHEL, G. P., & HIGASHI, R. A. (2010). Uso do SHALSTAB na análise espacial da estabilidade de encostas visando a

implantação de vias - Aplicação em sub-bacias do Rio Tubarão. *6º Seminário Nacional Modernas Técnicas Rodoviárias*. Florianópolis: Associação Catarinense de Engenheiros - ACE/SC.

MIRANDA, T. C. (2008). *Mapeamento das Unidades Geotécnicas e Desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas para Área de Abrangência da Rodovia BR-101/RS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre.

MONTEIRO, C. L. (2016). *Mapeamento das áreas de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

MONTGOMERY, D. R., & DIETRICH, W. E. (1994). A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, 30, 1153-1171.

MONTGOMERY, D. R., DIETRICH, W. E., & SULLIVAN, K. (1998). The Role of GIS in Watershed Analysis, in *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. 241-261. (S. Lane, K. Richard, & J. Chandler, Eds.) John Wiley & Sons.

MULUNGO, H. E. (2012). *Estudo de inundação na bacia do Campus da UFSC, Florianópolis - SC*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis.

NOGAMI, J. S., & VILLIBOR, D. F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo: Villibor.

OLEA, R. A. (1975). Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Kansas: Kansas Geological Survey.

OLEA, R. A. (1977). Measuring spatial dependence with semivariograms. Kansas: Kansas Geological Survey.

OLEA, R. A. (1984). Systematic Sampling of Spatial Functions (Series on Spatial Analysis, 7). In: *Kansas Geol. Survey* (p. 57). Kansas.

OLIVEIRA, J. B. (1992). *Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento*. (P. K. JACOMINI, & M. N. CAMARGO, Eds.) Jaboticabal: FUNEP.

OLIVEIRA, J. B. (1992). *Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento por João Bertoldo de Oliveira*. (P. K. JACOMINI, & M. N. CAMARGO, Eds.) Jaboticabal: FUNEP.

- O'LOUGHLIN, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*(22), 794 - 804.
- PACK, R. T., & TARBOTON, D. G. (1997). New developments in terrain stability mapping in B.C. *Proc. of the 11th Vancouver Geotechnical Soc. Symp- Forestry Geotechnique and Resource Engineer.*, 12.
- PATIAS, J. (2010). *Zoneamento geotécnico com base em krigagem ordinária e equações multiquádricas: Barragem de Itaipu*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP.
- PELLERIN, J. R., TOMAZZOLI, E. R., BAUZYS, F., BINI, G. M., ÉGAS, H. M., & WILVERT, S. R. (Setembro de 2010). Mapeamento Geológico-Geomorfológico do Setor Norte da Ilha de Santa Catarina. *Revista de Geografia, v. especial VIII SINAGEO*(n. 1).
- PRANDINI, F. L., NAKAZAVA, V. A., & FREITAS, C. G. (1992). Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. *CURSO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA APLICADA A PROBLEMAS AMBIENTAIS*(2).
- RAMOS, V. M., GUIMARÃES, R. F., REDIVO, A. L., GOMES, R. A., FERNANDES, N. F., & JÚNIOR, O. A. (22 de Jan de 2002). Aplicação do Modelo SHALSTAB, em Ambiente ArcView, para o Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Escorregamento Raso na Região do Quadrilátero Ferrífero (MG). *Espaço & Geografia*, 5(1), 49-67.
- REGINATTO, G. M. (2013). *Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros - SC, com ênfase em escorregamentos translacionais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.
- RODRIGUEZ, J. N. (2013). *Análise geoestatística multi-pontos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Matemática e Estatística, São Paulo.
- SAITO, S. M., HERRMANN, M. L., & PELLERIN, J. R. (2005). Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos nos Assentamentos Precários do Maciço Central de Florianópolis-SC. *11º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, V.1*, pp. 1251-1261. Florianópolis.

- SAKAMOTO, M. Y., GUESSER, L. H., OLIVEIRA, M. C., CONTESSI, R. J., ABREU, R. P., & HIGASHI, R. A. (2015). Uso do Método Borehole Shear Test no Mapeamento Geotécnico de Áreas de Risco. *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15*. Bento Gonçalves.
- SANTOS, G. T. (1997). *Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SANTOS, V. (2015). *Influência da escala no mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa com o SHALSTAB na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota/SC*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.
- SBROGLIA, R. M. (2015). *Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis.
- SETZER, V. W., & SILVA, F. S. (2005). *Bancos de Dados* (1a ed.). São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- SILVA, A. P. (1988). *Variabilidade espacial de atributos físicos do solo*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- SILVA, R. C. (2010). *Vulnerabilidade socioambiental a desastres na bacia hidrográfica do Rio Itacorubi, Florianópolis, SC*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.
- SOARES, W. C. (2011). *Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa - PB*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, São Carlos.
- SOUZA, G. D. (2016). *Caracterização de unidades geotécnicas com ênfase na capacidade de suporte do subsolo no município de Florianópolis/SC com base em um banco de dados de sondagem a percussão (SPT)*. Trabalho de Conclusão de Curso,

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

STURARO, J. R., LANDIM, P. M., & RIEDEL, P. S. (2000). O emprego da técnica geostatística da krigagem indicativa em geotecnia ambiental. *Solos e Rochas*, 23(3), pp. 157-164.

SUGUIO, K. (2003). *Geologia Sedimentar*. São Paulo: Edgard Blucher.

THIESEN, S. (2016). *Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis.

TOMAZZOLI, E. R., & PELLERIN, J. M. (Julho/Dezembro de 2015). Unidades do mapa geológico da Ilha de Santa Catarina: as rochas. *Revista GEOSUL*, 30(60), pp. p 225-247.

TOMAZZOLI, E. R., & PELLERIN, J. R. (Novembro de 2014). *Projeto Atlas Geológico-Geomorfológico da Ilha de Santa Catarina*. Acesso em 31 de Janeiro de 2016, disponível em Laboratório de Microscopia Ótica: <http://lmo.ufsc.br/mapa-geologico-da-ilha-de-santa-catarina/>

TUCCI, C. E. (2005). *Gestão de Águas Pluviais Urbanas* (4a ed.). Brasília, Brasil: Ministério das Cidades.

VALENTE, A. L. (1999). *Banco de Dados por Meio de Geoprocessamento para a Elaboração de Mapas Geotécnicos, Análise do Meio Físico e suas Interações com a Mancha Urbana de Porto Alegre*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.

VIEIRA, B. C., & RAMOS, H. (2015). Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). (USP, Ed.) *Revista do Departamento de Geografia, Volume 29*, p. 161 a 174.

VIEIRA, S. R. (1993). *Dynamic modelling and evaluation of water and solute transport. Soil profiles, extended to a landscape basis*.

WOJCIECHOWSKI, J. C. (2006). *Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual*. Dissertação de Mestrado,

Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Geomática - Tecnologia da Geoinformação, Santa Maria.

WOLSKI, M. S. (1998). Contribuição à cartografia geotécnica de grandes áreas com o uso de sistemas de informações geográficas: uma aplicação à Região do Médio Uruguai (RS). *CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC*, p. 8p.

WOSNIAK, M. T., & WENDLER, M. (2002). *Banco de Dados Geotécnicos da Cidade de Curitiba*. Monografia, Universidade Tuiuti do Paraná, Curso de Engenharia Civil, Curitiba.

WU, W., & SIDLE, R. C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Res.*, 2097-2110.

YANG, H. (2005). *Soil slope stability investigation and analysis in Iowa*. Tese de Doutorado, Iowa State University, Ames.

YOEDER, E. J., & WITCZAK, M. W. (1975). *Principles o Pavemente Design* (Second Edition ed.). (A. W.-I. publication, Ed.) John Wiley & Sons.

ZUQUETTE, L. V. (1987). *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, São Carlos.

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

ZUQUETTE, L. V., & NAKAZAWA, V. A. (1998). Cartas de Geologia de Engenharia. In: A. M. OLIVEIRA, & S. N. BRITO, *Geologia de Engenharia* (pp. 283-300). São Paulo, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE).