

Stephanie Thiesen

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA MAPEAMENTO GEOTÉCNICO
E CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÃO A PARTIR DE ENSAIOS SPT:
UM ESTUDO DE CASO EM BLUMENAU/SC**

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

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

Florianópolis
2016

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

Thiesen, Stephanie

Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT : um estudo de caso em Blumenau/SC / Stephanie Thiesen ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi - Florianópolis, SC, 2016.
207 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 3. Mapeamento geotécnico. 4. Cartas de aptidão para fundação a partir de sondagens SPT. 5. Estudo de caso em Blumenau/SC. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Stephanie Thiesen

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA MAPEAMENTO GEOTÉCNICO
E CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÃO A PARTIR DE ENSAIOS SPT:
UM ESTUDO DE CASO EM BLUMENAU/SC**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Florianópolis, 15 de julho de 2016.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do PPGEC/UFSC

Banca Examinadora:

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

Prof. Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro, Dr.
Universidade Federal de Santa Maria (Videoconferência)

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Às fontes de motivação dos meus dias e aos coautores das coisas mais importantes da minha vida. Mami (*in memoriam*), Papi, Nati & Cia., Allan, Diego, meu amor e minha eterna gratidão!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família, Papi, Nati, Allan e, em especial a nossa amada Mami, pelo infindável apoio, coragem e amor eterno, sem os quais, desbravar o universo acadêmico não teria o mesmo sentido.

Ao meu gêmeo de alma e parceiro de vida, Diego Vieira, essencial também nas discussões técnicas e lógicas de nossas peripécias.

À família PET Engenharia Civil, local onde me descobri como profissional e onde cultivei os melhores amigos que alguém poderia ter. Ao Dr. Cláudio Cesar Zimmermann, tutor nato, que com sua sabedoria, intensidade, conduta e amizade, internalizou o PET em mim.

À amiga (e tantas outras coisas) Eng. Juliana Vieira dos Santos, pela parceria, competência, confiança e incentivo, sempre presentes nas nossas aventuras.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de me desenvolver tecnicamente e pessoalmente desde a graduação. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e seu corpo docente de excelência. E, em especial, ao meu orientador Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi, pela confiança, entusiasmo e objetividade.

Expresso aqui meus agradecimentos ao engenheiro José Marcos Moser e ao IBGE, pelo suporte e credibilidade.

Às empresas colaboradoras e à Prefeitura Municipal de Blumenau, especialmente ao Dr. Maurício Pozzobon e ao geólogo Gerson Ricardo Müller, que, por meio de profissionais de excelência, respeitam e estimulam a academia. Obrigada pelo suporte técnico, interesse, disponibilidade e confiança depositada.

Às estrelas, à vida.

*“Science is much more than a body of knowledge.
It is a way of thinking.”*
(Carl Sagan, 1990)

RESUMO

A possibilidade de realização de análises envolvendo informações quantitativas e qualitativas associadas a elementos geográficos garante aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) um atrativo diferencial no planejamento em diversas instâncias. Por meio de um estudo de caso, o presente trabalho apresenta o descritivo dos procedimentos de tratamentos e processamento de dados geotécnicos georreferenciados para a elaboração do mapeamento geotécnico do município de Blumenau/SC, com base na metodologia Davison Dias (1995), e de mapas de aptidão para fundação a partir de 537 sondagens do tipo SPT (*standard penetration test*). Para o desenvolvimento do estudo, foram analisadas as 27 microbacias do município de Blumenau/SC. Dentre as informações geradas por meio dos recursos de geoprocessamento e como resultados parciais do estudo de caso, foram elaborados o Modelo Digital do Terreno (MDT), mapas de hidrografia, declividade, geologia, litologia e pedologia. Finalmente, além da obtenção do mapeamento geotécnico em si, o mesmo foi associado a informações geomecânicas de laudos de sondagens SPT, resultando em perfis estratigráficos de referência para as unidades geotécnicas estimadas para a região: Cambissolo substrato gnaiss (Cgn), Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito (Cs,f,a), Glei substrato sedimentos quaternários (GHsq) e Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss (PVgn). Foram elaborados mapas de profundidade do impenetrável a sondagem à percussão, de profundidade do lençol freático, de tensão admissível para fundação superficial e de isolinhas de N_{SPT} orientado para fundação profunda, a partir do qual se extraiu o comprimento máximo para alguns tipos de estacas para a região urbanizada de Blumenau/SC. Os resultados mostraram-se válidos não somente por possibilitar a aplicação prática de manipulação e modelagem do banco de dados em ambiente SIG, mas também por propiciarem resultados estratégicos para tomada de decisão no âmbito público, favorecendo políticas de uso e ocupação do solo, e privado, orientando e fornecendo informações em linguagem técnica para profissionais da área de fundações e geólogos.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica (SIG) 1. Mapeamento Geotécnico 2. Sondagem à Percussão (SPT) 3. Cartas de Aptidão para Fundação 4. Estudo de Caso em Blumenau/SC 5.

ABSTRACT

The possibility of analysis involving quantitative and qualitative information associated with geographic features guarantees Geographic Information Systems (GIS) as a solid foundation for planning in all instances. Through a case study, this paper describes procedures for the treatment and processing of geotechnical data, which were georeferenced to develop the geotechnical engineering mapping for the city of Blumenau/SC, based on the methodology proposed by Davison Dias (1995), and foundation suitability maps from 537 SPT boreholes (standard penetration test boreholes). To develop the study, the 27 watersheds from Blumenau/SC were analyzed. Among the information generated by means of the geoprocessing resources and as partial case study results, the Digital Terrain Model (DTM), hydrographic, slope, geological, lithological and pedological maps were developed. Finally, in addition to obtaining the geotechnical mapping itself, it was associated with geomechanical information from SPT reports, resulting in stratigraphic reference profiles for the geotechnical units of the region: Cambisol substrate gneiss (Cgn), Cambisol substrate siltstone, shale and sandstone (Cs,f,a), Gleysol substrate quaternary sediments (GHsq) and Red-Yellow Podzolic substrate gneiss (PVgn). Maps were developed portraying: SPT impenetrable layer depth, groundwater level, allowable stress for shallow foundation and N_{SPT} contour lines oriented for deep foundation, from which the maximum length for common types of piles for the urbanized region of Blumenau/SC were extracted. The results were valid not only for enabling the practical application of manipulation and modeling of database in GIS environment, but also in providing strategic results for decision making in the public sphere, promoting land use and occupation policies, and in the private sector, guiding and providing information in technical language for professionals in the field of foundations and geologists.

Keywords: Geographical Information System (GIS) 1. Geotechnical Engineering Mapping 2. Standard Penetration Test (SPT) 3. Foundation Suitability Maps 4. Case Study in Blumenau/SC 5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pedon – Esquema dos horizontes do perfil de solos.....	36
Figura 2 – Conceito das unidades geotécnicas.....	50
Figura 3 – Equipamento para ensaio de reconhecimento à percussão SPT.....	54
Figura 4 – Exemplo de perfil individualizado de sondagem.....	55
Figura 5 – Estimativa do NSPT médio.....	58
Figura 6 – Sistema sapata-solo.....	59
Figura 7 – Representação do bulbo de tensões.....	60
Figura 8 – Resolução espacial – exemplo.....	71
Figura 9 – Localização do município de Blumenau/SC.....	75
Figura 10 – Esquema do método do trabalho.....	81
Figura 11 – Associação entre Geologia e Litologia.....	92
Figura 12 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – PVsq → PVde.....	97
Figura 13 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – Csq → GHsq.....	98
Figura 14 – Sondagens SPT em região de condição semelhantes à unidade Csq.....	99
Figura 15 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – Csq → Cgn.....	100
Figura 16 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – Csq/PVsq → Ilha.....	101
Figura 17 – Critérios de seleção do furo crítico do Grupo.....	105
Figura 18 – Análise dos furos que não atingiram o impenetrável. a) Furo do grupo 1. b) Furo do grupo 30.....	107
Figura 19 – Análise para classificação geotécnica pelo laudo de sondagem.....	110
Figura 20 – Comparação entre interpoladores para o mesmo conjunto de amostras – Krigagem circular, esférica e exponencial.....	112
Figura 21 – Estudo do nível de água na região próxima ao rio Itajaí-Açu.....	114
Figura 22 – Composição pedológica e litológica de Blumenau/SC.....	119

Figura 23 – Unidades geotécnicas de Blumenau/SC.....	123
Figura 24 – Unidades geotécnicas na zona urbana de Blumenau/SC.....	125
Figura 25 – Perfil estratigráfico – Gleii substrato sedimentos quaternários.....	129
Figura 26 – Perfil estratigráfico – Cambissolo substrato silito, folhelho e arenito.....	131
Figura 27 – Perfil estratigráfico – Podzólico Verm.-Amarelo substrato gnaisse.....	133
Figura 28 – Perfil estratigráfico – Cambissolo substrato gnaisse.....	135
Figura 29 – Toposequência típica dos solos de Blumenau/SC.....	137
Figura 30 – MDT do lençol freático (dados SPT) – Zona urbana de Blumenau/SC.....	140
Figura 31 – MDT do lençol freático (dados SPT e do rio Itajaí-Açu) – Zona urbana de Blumenau/SC.....	142
Figura 32 – Comparação entre MDTs: a) a partir dos dados SPT e do rio Itajaí-Açu b) a partir dos dados SPT.....	143
Figura 33 – MDT do impenetrável à percussão – Zona urbana de Blumenau/SC.....	147
Figura 34 – Representatividade espacial – Comparação visual de dados.....	183
Figura 35 – Aplicação exemplo – Bairro Vila Nova.....	185

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Limites administrativos e geográficos de Blumenau/SC.	76
Mapa 2 – Limites administrativos – Blumenau/SC.....	78
Mapa 3 – Modelo Digital do Terreno – Blumenau/SC.	88
Mapa 4 – Declividade – Blumenau/SC.	90
Mapa 5 – Hidrografia – Blumenau/SC.....	91
Mapa 6 – Pedologia – Blumenau/SC.	93
Mapa 7 – Geologia – Blumenau/SC.....	94
Mapa 8 – Litologia – Blumenau/SC.	95
Mapa 9 – Georreferenciamento dos 537 furos de sondagem. a) Blumenau/SC. b) Zona urbana de Blumenau/SC.....	102
Mapa 10 – Mapeamento Geotécnico – Blumenau/SC.....	121
Mapa 11 – Mapeamento Geotécnico – Zona urbana de Blumenau/SC.	124
Mapa 12 – Localização dos grupos SPT dos perfis estratigráficos – Zona urbana de Blumenau/SC.	128
Mapa 13 – Profundidade freática (dados SPT) – Zona urbana.....	139
Mapa 14 – Profundidade freática (dados SPT e do rio Itajaí-Açu) – Zona urbana.	141
Mapa 15 – Cota freática (dados SPT e do rio Itajaí-Açu) – Zona urbana.	145
Mapa 16 – Superfície do impenetrável à percussão – Zona urbana... ..	146
Mapa 17 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 1 m... ..	149
Mapa 18 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 2 m... ..	151
Mapa 19 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 3 m... ..	152
Mapa 20 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 4 m... ..	153
Mapa 21 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 1 m.	156
Mapa 22 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 2 m.	157
Mapa 23 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 3 m.	158

Mapa 24 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 4 m.	159
Mapa 25 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 2 m. ...	161
Mapa 26 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 4 m. ...	162
Mapa 27 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 6 m. ...	163
Mapa 28 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 8 m. ...	164
Mapa 29 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 10 m. ...	165
Mapa 30 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 12 m. ...	166
Mapa 31 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 14 m. ...	167
Mapa 32 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 16 m. ...	168
Mapa 33 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 18 m. ...	169
Mapa 34 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 20 m. ...	170
Mapa 35 – Comprimento de estaca pré-moldada ($\Phi < 30$ cm) – Zona urbana.	173
Mapa 36 – Comprimento de estaca pré-moldada ($\Phi \geq 30$ cm) – Zona urbana.	174
Mapa 37 – Comprimento de estaca hélice contínua – Zona urbana. ...	175
Mapa 38 – Sondagens SPT e Resolução Espacial – Zona urbana.	182

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Horizontes do solo -Resumo.	36
Quadro 2 – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – Categorias de classificação.....	40
Quadro 3 – SiCS – Classificação e termos de conotação e memorização das ordens.	41
Quadro 4 – SiBCS – Classificação e descrição das ordens.	42
Quadro 5 – Simbologia simplificada das classes pedológicas.	51
Quadro 6 – Simbologia simplificada da geologia.	51
Quadro 7 – Estados de compacidade, consistência e peso específico..	57
Quadro 8 – Relação entre a geometria da sapata e a profundidade do bulbo de tensões.	60
Quadro 9 – Valores limites de NSPT para a parada das estacas.	61
Quadro 10 – Triangulação – Vantagens e desvantagens.	64
Quadro 11 – Inverso ponderado da distância – Vantagens e desvantagens.....	65
Quadro 12 – Krigagem – Vantagens e desvantagens.....	68
Quadro 13 – Comparação entre os métodos de interpolação apresentados.....	70
Quadro 14 – Microbacias hidrográficas de Blumenau/SC.	77
Quadro 15 – Bairros – Zona urbanizada de Blumenau/SC.	79
Quadro 16 – Dados, fontes e escalas.	82
Quadro 17 – Informações gráficas tratadas e importadas para o SIG. .	85
Quadro 18 – Informações de Geologia e Litologia incorporadas ao banco de dados.	86
Quadro 19 – Informações de Pedologia incorporadas ao banco de dados.	87
Quadro 20 – Unidades inconsistentes do Mapa Geotécnico Preliminar.	96
Quadro 21 – Composição inicial do banco de dados de sondagem – Estrutura e descrição dos campos.....	104
Quadro 22 – Composição do banco de dados de sondagem SPT – Estrutura e descrição dos campos adicionais.....	108

Quadro 23 – “Tabela de atributos” das sondagens extraída no ArcGIS®.	109
Quadro 24 – Perfis estratigráficos – Resultado geral.....	136
Quadro 25 – Consolidação da resolução espacial de estudos realizados.	179
Quadro 26 – Número mínimo de observações.....	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação geotécnica da sondagem SPT.	111
Tabela 2 – Frequência das unidades geotécnicas estimadas – Blumenau/SC.....	122
Tabela 3 – Frequência das unidades geotécnicas estimadas – Zona urbana de Blumenau/SC.	125
Tabela 4 – Identificação das sondagens SPT utilizadas nos perfis estratigráficos.....	127
Tabela 5 – Frequência da profundidade do lençol freático – Zona urbana de Blumenau/SC.....	144
Tabela 6 – Frequência da profundidade impenetrável – Zona urbana de Blumenau/SC.....	148
Tabela 7 – Porcentagem da área x Tipo de fundação – Zona urbana de Blumenau/SC.....	154
Tabela 8 – Porcentagem da área x σ_a para fundação superficial – Zona urbana.	160
Tabela 9 – Porcentagem da área x N_{SPT} – Zona urbana de Blumenau/SC.	171
Tabela 10 – Porcentagem da área x Comprimento máximo da estaca – Zona urbana de Blumenau/SC.....	176

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Amar.	Amarelo
ASTM	American Society for Testing and Materials, órgão estadunidense de normalização
CE	Ceará
Cfi	Cambissolo substrato filito
Cg	Cambissolo substrato granito
Cgn	Cambissolo substrato gnaise
cm	Centímetro
Compr.	Comprimento
CPT	Ensaio de penetração de cone (acrônimo de <i>Cone Penetration Test</i>)
Cs,f,a	Cambissolo substrato silito, folhelho e arenito
DGN/DWG	Extensão de arquivos utilizada pelo AutoCAD® para SHP
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Epagri	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EUA	Estados Unidos da América
Fund.	Fundação
GERCO	Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro
GHsq	Glei substrato sedimentos quaternários
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Impen.	Impenetrável a percussão SPT
INPE	Instituto nacional de pesquisas espaciais
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas
isoSPT	Curvas que representam regiões de mesmo valor de N_{SPT} , isovalores de N_{SPT}
Landsat	Acrônimo de <i>Land Remote Sensing Satellite</i> , é um programa norte-americano de satélites para observação da Terra
kg	Quilograma

kN	Quilonewton
m	Metro
Máx.	Máximo
mm	Milímetro
MDT	Modelo Digital do Terreno
MODIS	Acrônimo de Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, é um instrumento a bordo do satélite EOS-AM-1 com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais: atmosfera, oceano e terra.
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira
NA	Nível d'água
PB	Paraíba
pH	Potencial hidrogeniônico
PMB	Prefeitura Municipal de Blumenau
Prof.	Profundidade
PVde	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato depósito de encostas
PVg	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito
PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse
PVs,f,a	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato siltito, folhelho e arenito
Rfi	Solos Litólicos substrato filito
Rg	Solos Litólicos substrato granito
Rgn	Solos Litólicos substrato gnaisse
SC	Santa Catarina
SHP	Shapefile, extensão utilizada pelo ArcGIS®
SIG	Sistema de Informação Geográfica (<i>Geographic Information System – GIS</i>)
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPT	Sondagem a percussão (acrônimo de <i>Standard Penetration Test</i>)
tf	tonelada-força
TIN	Rede Triangular Irregular (acrônimo de <i>Triangulated Irregular Network</i>)

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
Verm.	Vermelho
WGS-84	<i>World Geodetic System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

N_{SPT}	Índice de resistência à penetração do ensaio SPT. Número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm.
V_S	Velocidade de propagação da onda de cisalhamento
Φ	Diâmetro
σ_a	Tensão admissível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	31
1.1 OBJETIVO GERAL	32
1.1.1 Objetivos específicos.....	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1 CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA E GEOTÉCNICA.....	35
2.1.1 Classificação pedológica.....	35
2.1.1.1 Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS.....	39
2.1.2 Mapeamento geotécnico	48
2.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO – STANDARD PENETRATION TEST (SPT)	52
2.2.1 Aspectos gerais, execução e representação	52
2.2.2 Utilização, parâmetros e correlações.....	56
2.2.2.1 Fundação superficial	57
2.2.2.2 Fundação por estacas	61
2.2.3 Variabilidade espacial dos parâmetros do solo.....	61
2.3 ANÁLISE ESPACIAL DE SUPERFÍCIES.....	63
2.3.1 Triangulação com interpolação linear – TIN.....	63
2.3.2 Inverso ponderado da distância	64
2.3.3 Krigagem.....	66
2.3.4 Resolução espacial	70
2.4 INSERÇÃO INTERNACIONAL DA PESQUISA.....	72
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	75
4 MATERIAIS E MÉTODOS	81
4.1 LEVANTAMENTO E COLETA DE DADOS PREEXISTENTES	82

4.2 DADOS GRÁFICOS.....	83
4.2.1 Dados gráficos – Avaliação e tratamento dos dados	84
4.2.2 Dados gráficos – Composição e ajustes do banco de dados.....	84
4.2.3 Dados gráficos – Processamentos dos dados	87
4.2.3.1 <i>Modelo Digital do Terreno – MDT</i>	87
4.2.3.2 <i>Superfície de declividade – Slope</i>	89
4.2.3.3 <i>Hidrografia</i> 90	
4.2.3.4 <i>Mapeamento geotécnico</i>	92
4.3 SONDAGENS SPT	101
4.3.1 SPT – Avaliação e tratamento dos dados.....	101
4.3.2 SPT – Composição e ajustes do banco de dados.....	103
4.3.3 SPT – Processamento dos dados.....	112
4.3.3.1 <i>Mapas gerais de aptidão para fundação</i>	113
4.3.3.2 <i>Fundação superficial</i>	116
4.3.3.3 <i>Fundação por estacas</i>	116
4.3.3.4 <i>Perfil estratigráfico das unidades geotécnicas</i>	117
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	119
5.1.1 Mapeamento geotécnico.....	119
5.1.2 Perfil estratigráfico das unidades geotécnicas.....	126
5.1.2.1 <i>Glei substrato sedimentos quaternários</i>	129
5.1.2.2 <i>Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito</i>	130
5.1.2.3 <i>Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse</i>	132
5.1.2.4 <i>Cambissolo substrato gnaisse</i>	134
5.1.2.5 <i>Toposequência típica dos solos de Blumenau</i>	136
5.1.3 Superfície freática	138

5.1.4 Superfície do impenetrável à percussão	146
5.1.5 Orientação para o tipo de fundação	148
5.1.6 Tensão admissível para fundação superficial.....	154
5.1.7 Isovalores de N_{SPT} – IsoSPT	160
5.1.8 Comprimento máximo de estacas.....	172
5.1.9 Validação, limitações e aprimoramentos dos resultados	177
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	187
6.1 CONCLUSÕES.....	187
6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	190
REFERÊNCIAS.....	193
APÊNDICE A – Reuniões de validação dos resultados	203
ANEXO A – PMB: Termo de responsabilidade	205
ANEXO B – IBGE: Termo de cessão de direitos e de uso	207

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na execução de mapeamento dos solos vem se tornando uma realidade permanente de instituições de pesquisa e órgãos de planejamento. A possibilidade de realização de análises multivariáveis a partir de dados georreferenciados ganhou força com o advento de ferramentas tipo SIG, que possibilitam análises simultâneas de um grande número de informações e integração de dados para realização de estimativas, processando informações complexas de forma ágil e eficiente.

Os mapas digitais são fortes aliados no apoio à tomada de decisão, proporcionando aos profissionais os meios necessários para melhorar a eficiência e eficácia nos trabalhos que envolvem geoprocessamento. Devido ao elevado potencial de manipulação e atualização de informações se comparado aos mapas impressos, os mapas digitais constituem um instrumento poderoso para a implementação de metodologias inovadoras que visam à formulação de diagnósticos e à tomada de decisão sobre o meio físico em diferentes instâncias.

As características geotécnicas de um local associadas a uma ferramenta do tipo SIG têm grande influência no planejamento de uso e ocupação do solo, zoneamento, estudo de implantação de novos empreendimentos e implantação de políticas relacionadas. Conforme Lagacherie e McBratney (2007), o mapeamento digital dos solos é pautado na criação e alimentação de sistemas espaciais de informações de solos, por meio de modelos numéricos para inferência das variações espaciais dos tipos de solos ou de suas propriedades.

Todavia, a carência de informações, devido às limitações de custo de aquisição de dados, ao despreparo dos dados existentes em serem manipulados em ambiente SIG e à necessidade de conhecimentos específicos sobre SIG, são motivos que dificultam a ampla adesão da técnica.

Tendo em vista a escassez de dados próprios para utilização em análises em ambiente SIG na região de Blumenau/SC associada à importância dos levantamentos de solos para região, crítica em relação à desastres naturais, o presente estudo objetiva a compatibilização das informações geotécnicas existentes e criação de banco de dados para

análise das informações georreferenciadas em ambiente SIG. O banco de dados utiliza como insumo informações da pedologia e geologia para elaboração do mapeamento geotécnico de Blumenau/SC, bem como incorpora dados de ensaio de campo do tipo *Standard Penetration Test* (SPT) obtidos junto à Prefeitura e empresas da região.

Finalmente, como resultado deste trabalho, tem-se o mapa digital das unidades geotécnicas, geradas a partir da metodologia Davison Dias (1995), e cartas de aptidão para fundações, desenvolvidas mediante análises geoestatística, para Blumenau/SC. Tais resultados visam a fornecer subsídios técnicos aos gestores na tomada de decisão, especialmente no ordenamento do crescimento urbano do município, e para profissionais e empresas privadas, que terão disponíveis informações relevantes para o planejamento, orçamento e pré-análise de localização de novas construções em relação a fundações. O trabalho visa também à constituição de um banco de dados passível de atualização para incorporação contínua de novas sondagens SPT.

1.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo geral a aplicação de ferramenta SIG para o desenvolvimento do mapeamento geotécnico e de cartas de aptidão para fundação para o município de Blumenau/SC, por meio da associação dos dados geotécnicos a laudos de sondagem SPT a partir de dados secundários¹.

1.1.1 Objetivos específicos

- Estruturar um banco de dados geotécnicos e de sondagem SPT para utilização em ambiente SIG para Blumenau/SC;
- Elaborar mapas temáticos da região de estudo: MDT, declividade, hidrografia;
- Desenvolver o mapeamento geotécnico para Blumenau/SC, a partir da pedologia e geologia de Blumenau/SC;
- Correlacionar as unidades geotécnicas de Blumenau com sondagens SPT, por meio de perfis estratigráficos genéricos;

¹ Dados secundários são aqueles que foram coletados com outros propósitos e não o de atender às necessidades da pesquisa em andamento. São informações de baixo custo de aquisição e rápida disponibilização.

- Gerar cartas de aptidão para fundações a partir de sondagens SPT: Profundidade do lençol freático e do impenetrável à percussão, orientação para o tipo de fundação: superficial ou profunda, tensões admissíveis para fundação superficial, mapa de isolinhas de N_{SPT} e mapa de comprimento máximo de estacas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica realizada para o desenvolvimento da pesquisa, contemplando classificação e parâmetros dos solos, modelos matemáticos de interpolação, mapeamento geotécnico e carta de aptidão para fundação, está apresentada na presente seção.

2.1 CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA E GEOTÉCNICA

De acordo com Hachich *et al.* (1998), a diversidade de solos e a enorme diferença de comportamento frente as solicitações de interesse na engenharia, levou ao agrupamento natural dos solos pela semelhança de propriedades. Assim, engenharia classifica em grupos e subgrupos solos diferentes, mas com propriedades e comportamentos similares. Há inúmeros métodos de classificação de solos, sendo alguns em função da sua origem, outros da estrutura, da evolução, da presença de matéria orgânica.

No presente capítulo, dois métodos de classificação de solos serão abordados, nos âmbitos pedológicos e geotécnicos.

2.1.1 Classificação pedológica

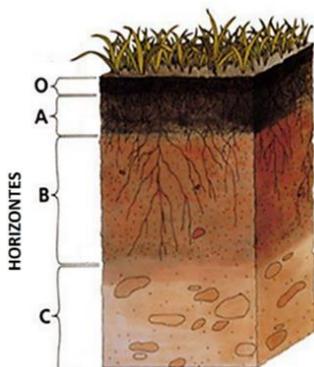
A pedologia é a ciência que estuda a origem, classificação e distribuição de solos na superfície da terra. A classificação pedológica é a classificação do perfil do solo resultante da ação dos fatores e processos de formação do solo, ou seja, das camadas de aspecto e constituição diferentes denominadas horizontes.

Conforme Ageitec (2016), define-se horizonte como uma seção horizontal do perfil do solo, demarcados de acordo com as variações morfológicas como as de cor, estrutura, textura, consistência, presença ou ausência de cascalho, nódulos e concreções, etc. Os atributos identificados nos horizontes abrangem tanto características inerentes como a constituição mineralógica da argila, a textura, como propriedades que dizem respeito às respostas e aos estímulos recebidos (comportamento ou reação evidenciada), como a cor, a consistência no estado molhado, a capacidade de troca de cátions e outros.

Ageitec (2016) apresenta o *pedon* (do grego que significa solo, terra) como sendo a unidade básica do solo, configurando-se desde a

superfície até o material de origem (Figura 1), perfazendo um volume mínimo que possibilite estudar o solo.

Figura 1 – Pedon – Esquema dos horizontes do perfil de solos.



Fonte: Adaptado de nesoil.com/plymouth/formation.html.

De maneira resumida, os horizontes do solo e suas características gerais são apresentados no Quadro 1. As definições das propriedades e horizontes diagnósticos usados na 2ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) publicado pela Embrapa (2006) podem ser consultadas mais detalhadamente nas páginas 33 a 65.

Quadro 1 – Horizontes do solo -Resumo.

Horizonte	Características
O	Conforme Oliveira <i>et al.</i> (1992), o horizonte O é um horizonte superficial de cobertura e orgânico, composto por detritos vegetais e substâncias húmicas acumuladas na superfície em ambientes drenados, consiste em mata morta de acumulação de restos orgânicos não incorporados ao solo mineral, integrada geralmente por folhas, galhos e ramos, podendo haver fragmentos pouco ou semi-decompostos. Compreende materiais depositados em condições de drenagem livre, sem estagnação de água, condicionados pelo clima úmido, como em ambiente altimontano.
H	O material da Embrapa (2006), descreve o horizonte hístico como constituído predominantemente de material orgânico, resultante

Horizonte	Características
	<p>de acumulações de resíduos vegetais depositados superficialmente. O horizonte H pode ocorrer à superfície ou estar soterrado por material mineral.</p> <p>Compreende materiais depositados nos solos sob condições de excesso de água e sua espessura equivale a 10 cm ou mais, dependendo do seu desenvolvimento (EMBRAPA, 2006).</p>
A	<p>É o horizonte mineral, adjacente ao O ou H, que, conforme Oliveira <i>et al.</i> (1992), tem maior atividade biológica e aporte de matéria orgânica, que confere coloração escurecida (melanização), e muito associado à matéria mineral proveniente da atividade. Constituído, basicamente, de rocha alterada e húmus, sendo a região onde se fixa a maior parte das raízes e vivem organismos decompositores e detritívoros, com transformações biológicas intensas.</p> <p>Segundo IBGE (2007) é um horizonte que apresenta perda ou decomposição principalmente de componentes minerais (ferro, alumínio e argila). Sua espessura é de 5 cm ou menos para horizonte A Moderado e Fraco e pode variar de 10 a 25 cm nos casos de A Chernozêmico, A Proeminente, A Húmico, A Antrópico (EMBRAPA, 2006).</p>
E	<p>Camada mineral, resultante de intenso processo de perda (eluviação) de argila, compostos de ferro e alumínio ou matéria orgânica subjacente ao horizonte A. Possui uma coloração mais clara que o horizonte A e quantidade reduzida de matéria orgânica, acúmulo de compostos de ferro e argilo-minerais resistentes, como o quartzo. Pode ser atingido por raízes mais profundas.</p>
B	<p>É um horizonte mineral, originado de acentuadas transformações do material de origem ou ganho de constituintes minerais e/ou orgânicos oriundos dos horizontes acima do B. Trata-se de um horizonte com propriedades pedogenéticas mais estáveis, uma vez que se encontra em uma posição mais protegida e menos vulnerável às ações humanas (OLIVEIRA <i>et al.</i>, 1992).</p> <p>É caracterizado pela presença de argila e de máximo desenvolvimento pedogenético. Possui maior concentração de compostos de ferro e argilo-minerais e menor quantidade de matéria orgânica quando comparado ao horizonte A. Sua espessura é superior 15 cm para o horizonte B Textural e Plânico, acima de 50 cm para o B Latossólico, mínimo 10 cm para B Incipiente, acima de 30 cm para o B Nítico e mínimo de 2,5 cm para o B Espódico (EMBRAPA, 2006).</p>
C	<p>Oliveira <i>et al.</i> (1992) descrevem o horizonte C como camada mineral de material inconsolidado, sob o horizonte A e B, pouco afetado pelos processos pedogenéticos, permanecendo com muitas características herdadas do material de origem (horizonte</p>

Horizonte	Características
	<p>R). O material pode ser oriundo da mesma natureza que os horizontes A e B, mas não é uma regra. Denomina-se como horizonte C a alteração inicial das rochas de origem. Também conhecido como alterita ou saprolito.</p> <p>Conforme a NBR 6502:1995, o saprolito ou saprólito é um material proveniente da alteração <i>in situ</i> da rocha, que se encontra em um estágio avançado de desintegração. Possui a estrutura original da rocha e a ela se assemelha em todos os aspectos visuais perceptíveis, salvo na coloração. Sua constituição é variável, mostrando o conjunto, em geral, anisotropia ou heterogeneidade acentuada, decorrente da presença de núcleos de material consistente entremeados a uma massa com características de solo.</p>
R	<p>Rocha matriz ou rocha inalterada que deu origem ao solo. Camada mineral de material consolidado, que constitui substrato rochoso contínuo ou praticamente contínuo, a não ser pelas poucas e estreitas fendas que pode apresentar (IBGE, 2007).</p>
Transicionais	<p>Possuem propriedades dos dois horizontes principais que se associam em fusão, onde não há individualização de partes distintas de um e de outro. Conforme Lepsch (2010), apesar de os horizontes do solo estarem em uma sequência visível, a transição entre eles nem sempre é bem distinta. A designação dos horizontes de transição é dada pela junção das letras dos horizontes confinantes.</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

O número de horizontes e as especificidades diagnósticas destes, variam de acordo com os diferentes tipos de solo. Enquanto solos maduros apresentam perfis constituídos por cinco horizontes principais (O, A, E, B e C), no qual o solo perdeu toda a estrutura original da rocha mãe e tornou-se relativamente homogêneo; os solos jovens ou pouco desenvolvidos possuem um perfil incompleto, sem presença do horizonte B (horizonte essencial para que o solo seja bem desenvolvido), e mantêm a estrutura original da rocha mãe que sustenta o horizonte superficial orgânico (LEPSCH, 2010).

TEIXEIRA *et al* (2009) esclarece que a coloração mais escura dos horizontes mais superficiais se deve às maiores quantidades de matéria orgânica, enquanto os horizontes subjacentes apresentam uma tonalidade mais clara (em regiões temperadas) e mais avermelhados e amarelados (em regiões tropicais), já que são mais ricos em argilominerais, ferro e alumínio.

O horizonte pedogenético é a classificação do perfil do solo resultante da ação dos fatores e processos de formação do solo. Logo, os horizontes são essenciais para executar o mapeamento dos solos e, para tal, se faz necessário um sistema de classificação. A organização das classes dos solos conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), será apresentada e descrita na seção a seguir.

2.1.1.1 Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS

Segundo a NBR 6502:1995, a classificação pedológica consiste na definição de classes de solos e suas subdivisões, segundo o grau de evolução do solo e desenvolvimento de seu perfil; o modo de alteração definido pela natureza dos sesquióxidos liberados e presença de certos tipos de argila; o tipo de distribuição da matéria orgânica que influi no perfil e a presença de certos fenômenos fundamentais de evolução.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) apresenta os princípios e conceitos básicos do conhecimento atual do recurso natural solos gerados no Brasil e no exterior. Segundo Embrapa (2006), a classificação pedológica nacional vigente consiste em uma evolução do antigo sistema americano, formulado por Baldwin *et al.* (1938), modificada por Thorp & Smith (1949).

A 1ª edição do SiBCS foi iniciada em 1980, com a publicação da sequência de quatro “Aproximações”², e divulgada em 1999. Como resultado do aperfeiçoamento permanente do conhecimento, o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos proposto pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) teve sua segunda e última versão em 2006.

A metodologia de padronização de solos do SiBCS considera características morfológicas do solo obedecendo a designação do horizonte, profundidade e espessura dos horizontes, cor (baseado na notação de cores de Munsell), granulometria e textura das partículas do solo, estrutura das partículas, consistência do material, entre outras (IBGE, 2007).

² Após diversos estudos dos solos brasileiros, na década de 80, foram publicados alguns documentos intitulados “Aproximações”. Foram editadas então, quatro “Aproximações”: em 1980, 1981, em 1988 e a quarta e última em 1997. Geradas pela Embrapa, estas publicações de caráter experimental tinham sua circulação restrita aos pedólogos da Embrapa e de outras instituições nacionais de ensino e pesquisa (AGEITEC, 2016).

A chave de classificação do SiBCS é organizada em seis níveis categóricos, denominados e descritos no Quadro 2:

Quadro 2 – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – Categorias de classificação.

Nível	Categoria	Descrição
1º	Ordens (13 classes)	Normalmente, a definição deste nível categórico é feita a partir de horizontes diagnósticos, preferencialmente horizontes subsuperficiais. A categoria é fundamentada na presença ou ausência de horizontes e de atributos ou propriedades adicionais reconhecíveis no campo.
2º	Subordens (43 classes)	Reflete ainda a gênese do solo, indicando a intensidade do processo de formação do solo ou mesmo, a atuação de outros processos que agiram juntos ou afetaram processos dominantes no primeiro nível. Expressa grau de desenvolvimento de características genéticas, ou seja, o grau de desenvolvimento de características relacionadas aos agentes formadores do solo.
3º	Grandes grupos (188 classes)	Destaca o tipo e arranjo dos horizontes, atividade de argila, condições de saturação do complexo sortivo por bases ou por alumínio ou por sódio e/ou por sais solúveis. A partir deste nível, é evidenciada a presença de horizontes ou propriedades do solo que podem afetar o uso e o manejo dos solos, relacionados ao desenvolvimento das plantas e ao movimento de água no solo.
4º	Subgrupos (747 classes)	Representa o conceito central da classe no caso dos típicos ou ao contrário, os intermediários entre classes nos três primeiros níveis. Podendo também indicar a presença de características extraordinárias.
5º	Família*	Deverá ser definido com base nas características importantes para uso e manejo dos solos, como textura, saturação por alumínio trocável, etc.
6º	Séries*	Será desenvolvido com base em características diretamente relacionadas com o desenvolvimento das plantas, nas características diferenciais que afetam o uso e manejo do solo.

* Nível categórico sob discussão, mas no Sistema é possível classificar um solo de acordo com as definições provisórias atribuídas para estes níveis categóricos.

Fonte: Adaptado de Embrapa (2006) e Ageitec (2016).

No primeiro nível categórico (ordem), os nomes das classes são formados pela associação de um elemento formativo com a terminação “ssolos”. São apresentados a seguir os nomes das classes, em ordem alfabética e seus respectivos elementos formativos e significados (EMBRAPA, 2006).

Quadro 3 – SiCS – Classificação e termos de conotação e memorização das ordens.

Ordem	Elemento formativo	Termos de conotação e de memorização
Argissolo	ARGI	“Argilla”. Acumulação de argila de baixa ou alta atividade, dessaturado de bases (com concentração de alumínio extraível).
Cambissolo	CAMBI	“Cambiare”, trocar ou mudar. Horizonte B incipiente, ou seja, ainda não totalmente transformado, seja pela presença de materiais primários intemperizáveis ou por atividade da argila alta.
Chernossolo	CHERNO	Preto, rico em matéria orgânica.
Espodossolo	ESPODO	“Spodos”, cinza vegetal. Horizonte B espódico, ou seja, com acumulação iluvial de matéria orgânica, associada a complexos de sílica-alumínio ou húmus-alumínio, podendo ou não conter ferro.
Gleissolo	GLEI	Glei. Horizonte Glei, ou seja, horizonte hidromórfico, apresentando evidências de processos de redução, com ou sem segregação de ferro, de cores variegada, acinzentadas, azuladas, esverdeadas, neutras.
Latossolo	LATO	“Lat”, material muito alterado. Horizonte B Latossólico, ou seja, cujos constituintes evidenciam avançado estágio de intemperização, explícita pela alteração quase completa dos minerais primários menos resistentes ao intemperismo e/ou de minerais de argila.
Luvissolo	LUVI	“Luere”, iluvial. Acumulação de argila com alta saturação por bases e alta atividade da fração argila.
Neossolo	NEO	Novo. Pouco desenvolvimento genético.
Nitossolo	NITO	“Nitidus”, brilhante. Horizonte B nítico, ou seja, horizonte não hidromórfico, com superfícies normalmente reluzentes dos agregados, e textura argilosa ou muito argilosa, com pouco ou sem incremento de argila do horizonte superficial para o subsuperficial.
Organossolo	ORGANO	Orgânico. Horizonte H ou O hístico.

Ordem	Elemento formativo	Termos de conotação e de memorização
Planossolo	PLANO	“Planus”. Horizonte B plânico, ou seja, apresenta teores elevados de argila dispersa, apresentando transição abrupta para os horizontes suprajacentes, normalmente associada a mudança textural abrupta.
Plintossolo	PLINTO	“Plinthus”. Horizonte plíntico, ou seja, caracteriza-se pela presença de plintita (argila, pobre em carbono orgânico e rica em ferro ou ferro e alumínio, com grãos de quartzo e outros minerais), de cores vermelhas e acinzentadas ou brancas, com ou sem cores amareladas ou brunadas.
Vertissolo	VERTI	“Vertere”, inverter. Horizonte vértico, ou seja, horizonte de textura típica varia de argilosa a muito argilosa, que, devido à expansão e contração das argilas, apresenta superfícies de fricção.

Fonte: Adaptado de Embrapa (2006).

As ordens são subdivididas em 13 classes, conforme apresentado no Quadro 4. O material também apresenta resumidamente a comparação da atual classificação dos solos vigente desenvolvida pela Embrapa (2006) com a anterior (1999), utilizada na metodologia de mapeamento geotécnico de Davison Dias, conforme será abordado no item 2.1.2.

Quadro 4 – SiBCS – Classificação e descrição das ordens.

Ordem	Descrição do SiBCS (2006)	Classificação do SiBCS (1999)
Argissolo	Compreende solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural ³ de argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa, ou caráter alítico. O horizonte B textural encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o	Podzólico Vermelho-Amarelo argila de atividade baixa ou alta, pequena parte de Terra Roxa Estruturada, de Terra Roxa Estruturada Similar, de Terra Bruna Estruturada e de Terra Bruna Estruturada

³ Solos que possuem o horizonte B textural, são caracterizados por um horizonte B mineral, com textura franco arenosa (que contém mais areia do que partículas de silte ou de argila) ou mais fina, que possui teor de argila mais elevado que os horizontes A ou E e pode ser maior que o teor do horizonte C. (EMBRAPA, 2006).

Ordem	Descrição do SiBCS (2006)	Classificação do SiBCS (1999)
	hístico, sem apresentar, contudo, os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Luvisolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos.	Similar, na maioria com gradiente textural necessário para B textural, em qualquer caso Eutróficos, Distróficos ou Álicos, Podzólico Bruno-Acinzentado, Podzólico Vermelho-Escuro, Podzólico Amarelo, Podzólico Acinzentado e mais recentemente solos que foram classificados como Alissolos com B textural.
Cambissolo	Compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos, Organossolos. Têm sequência de horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R.	Esta classe compreende os solos anteriormente classificados como Cambissolos, inclusive os desenvolvidos em sedimentos aluviais. São excluídos dessa classe os solos com horizonte A chernozêmico e horizonte B incipiente com alta saturação por bases e argila de atividade alta.
Chernossolo	Compreende solos constituídos por material mineral que têm como características diferenciais: alta saturação por bases e horizonte A chernozêmico sobrejacente a horizonte B textural ou B incipiente com argila de atividade alta, ou sobre horizonte C carbonático ou horizonte cálcico, ou ainda sobre a rocha, quando o horizonte A apresentar concentração de carbonato de cálcio. O horizonte A chernozêmico pode ser menos espesso (com 10 cm ou mais) de espessura	Estão incluídos nesta classe a maioria dos solos que eram classificados como Brunizém, Rendzina, Brunizém Avermelhado, Brunizém Hidromórfico e Cambissolos Eutróficos com argila de atividade alta conjugada com A chernozêmico.

Ordem	Descrição do SiBCS (2006)	Classificação do SiBCS (1999)
	quando seguido de horizonte B com caráter ebânico.	
Espodossolo	Compreende solos constituídos por material mineral com horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial E (álbico ou não), ou subjacente a horizonte A, que pode ser de qualquer tipo, ou ainda, subjacente a horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Apresentam, usualmente, seqüência de horizontes A, E, B espódico, C, com nítida diferenciação de horizontes.	Nesta classe estão incluídos todos os solos que foram classificados anteriormente como Podzol e Podzol Hidromórfico.
Gleissolo	Compreende solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte Glei dentro de 150cm da superfície do solo, imediatamente abaixo de horizontes A ou E (com ou sem gleização) ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos; não apresentam textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes dentro dos primeiros 150cm da superfície do solo ou até um contato lítico, tampouco horizonte vértico, ou horizonte B textural com mudança textural abrupta acima ou coincidente com horizonte Glei ou qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte Glei. Horizonte plíntico, se presente, deve estar à profundidade superior a 200cm da superfície do solo.	Esta classe abrange os solos que foram classificados anteriormente como Glei Pouco Húmico, Glei Húmico, parte do Hidromórfico Cinzento (sem mudança textural abrupta), Glei Tiomórfico e Solonchak com horizonte Glei.
Latossolo	Compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico.	Nesta classe estão incluídos todos os antigos Latossolos, excetuadas algumas modalidades anteriormente identificadas como Latossolos plínticos.

Ordem	Descrição do SiBCS (2006)	Classificação do SiBCS (1999)
Luvissolo	compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases alta, imediatamente abaixo de horizonte A ou horizonte E.	Nesta classe estão incluídos os solos que foram classificados pela Embrapa Solos como Bruno Não Cálcicos, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico argila de atividade alta e Podzólico Bruno-Acinzentado Eutrófico e alguns Podzólicos Vermelho-Escuro Eutróficos com argila de atividade alta.
Neossolo	Solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica, ou por influência dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos.	Litossolos e Solos Litólicos, Regossolos, Solos Aluviais e Areias Quartzosas (Distróficas, Marinhas e Hidromórficas).
Nitossolo	Compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico, textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila maiores que 350g/kg de solo a partir do horizonte A), estrutura em blocos subangulares ou angulares, ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva nas superfícies dos agregados.	Nesta classe se enquadram solos que eram classificados, na maioria, como Terra Roxa Estruturada, Terra Roxa Estruturada Similar, Terra Bruna Estruturada, Terra Bruna Estruturada Similar e alguns Podzólicos Vermelho-Escuros e Podzólicos Vermelho-Amarelos.

Ordem	Descrição do SiBCS (2006)	Classificação do SiBCS (1999)
Organossolo	Compreende solos pouco evoluídos, com preponderância de características devidas ao material orgânico, de coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada, resultantes de acumulação de restos vegetais, em graus variáveis de decomposição, em condições de drenagem restrita (ambientes mal a muito mal drenados), ou em ambientes úmidos de altitudes elevadas, saturados com água por apenas poucos dias durante o período chuvoso.	Nesta classe estão incluídos os Solos Orgânicos, Semi-orgânicos, Solos Tiomórficos de constituição orgânica ou semi-orgânica e parte dos Solos Litólicos com horizonte O histórico com 20 cm ou mais de espessura.
Planossolo	Compreende a solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B ou com transição abrupta conjugada com acentuada diferença de textura do A para o horizonte B imediatamente subjacente, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta, constituindo, por vezes, um horizonte pã, responsável pela formação de lençol d'água sobreposto (suspensão), de existência periódica e presença variável durante o ano.	Esta classe inclui os solos que foram classificados como Planossolos, Solonetz-Solodizado e Hidromórficos Cinzentos que apresentam mudança textural abrupta.
Plintossolo	Compreende solos minerais, formados sob condições de restrição à percolação da água, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade, de maneira geral imperfeitamente ou mal drenados, que se caracterizam fundamentalmente por apresentar expressiva plintitização com ou sem petroplintita na condição de que não satisfaçam os requisitos estipulados para as classes dos Neossolos, Cambissolos, Luvisolos, Argissolos, Latossolos, Planossolos ou Gleissolos.	Estão incluídos nesta classe solos que eram reconhecidos anteriormente como Lateritas Hidromórficas de modo geral, parte dos Podzólicos plínticos, parte dos Gleis Húmicos e Glei Pouco Húmico e alguns dos Latossolos plínticos. Estão incluídos também outros solos classificados em

Ordem	Descrição do SiBCS (2006)	Classificação do SiBCS (1999)
		trabalhos diversos como Concrecionários Indiscriminados, Concrecionários Lateríticos, Solos Concrecionários e Petroplintossolos.
Vertissolo	Compreende solos constituídos por material mineral apresentando horizonte vértico e pequena variação textural ao longo do perfil, nunca suficiente para caracterizar um horizonte B textural. Apresentam pronunciadas mudanças de volume com o aumento do teor de água no solo, fendas profundas na época seca, e evidências de movimentação da massa do solo, sob a forma de superfícies de fricção (slickensides). Podem apresentar microrrelevo tipo gilgai e estruturas do tipo cuneiforme, inclinadas e formando ângulo com a superfície horizontal. Estas características resultam da grande movimentação da massa do solo que se contrai e fendilha quando seca e se expande quando úmida. São de consistência muito plástica e muito pegajosa, devido à presença comum de argilas expansíveis ou mistura destas com outros argilominerais.	Nesta classe estão incluídos todos os Vertissolos, inclusive os hidromórficos.

Fonte: Adaptado de Embrapa (2006).

Em alguns métodos de mapeamento geotécnico, são empregados conhecimentos acerca da origem e formação dos solos para estimação de unidades geotécnicas. Desta forma, os conhecimentos da pedologia se fazem necessários para elaboração e análise de estudos geotécnicos, conforme abordado na próxima seção.

2.1.2 Mapeamento geotécnico

A ferramenta de mapeamento geotécnico, surgida há mais de um século em países da Europa, integra dados e informações básicas sobre as características geotécnicas dos terrenos em uma determinada área e suas possíveis interações com as intervenções humanas relacionadas ao processo de uso e ocupação do solo (IPT, 2015).

Segundo Zuquette (1992) o mapeamento geotécnico

[...] é constituído de um conjunto de estudos que deve retratar o meio físico de um ponto de vista pragmático de forma que permita, a diferentes categorias de usuários, obter não só informações básicas para orientação da escolha das áreas mais adequadas aos seus empreendimentos como também os critérios a serem utilizados nas investigações de detalhe que se fizerem necessárias.

Davison Dias (1995), por sua vez, apresenta a cartografia geotécnica como a definição de métodos para enquadrar unidades territoriais homogêneas formulando orientações técnicas para a ocupação destas unidades.

Higashi (2006), define o mapeamento geotécnico como uma metodologia na qual, as principais características geomecânicas do solo são representadas por meio de mapas, que podem ser utilizados na previsão do comportamento das unidades geotécnicas do solo, sendo aplicados a projetos ambientais e de engenharia.

Os componentes significativos para análise da condição geotécnica são: a distribuição das propriedades dos solos e rochas, água, características geomorfológicas e processos geodinâmicos. Um mapeamento geotécnico apresenta a distribuição e a relação espacial desses elementos básicos; reflete a história, bem como a dinâmica do desenvolvimento geotécnico, permite um prognóstico da influência do ambiente nas obras de engenharia, bem como prever de que forma as obras irão interferir no ambiente (UNESCO, 1976).

Conforme IPT (2015), no século XVIII, os dados e informações reunidos no mapeamento geotécnico objetivavam subsidiar a construção de obras de engenharia. Apenas a partir do século XX, as cartas geotécnicas passaram a incluir também conteúdos destinados a

contribuir nas atividades de planejamento e ordenamento territorial, bem como na gestão de riscos e na prevenção de desastres naturais.

Conforme UNESCO (1976), o mapeamento geotécnico possui diversas funções, como planejamento e uso dos solos, para projeto, construção e manutenção de obras civis. Destacam-se ainda, conforme Higashi (2006) o planejamento territorial, erosão, estabilidade de encostas, estudo de compressibilidade de solos, de materiais para pavimentação e mapas geoambientais.

A consolidação do mapeamento geotécnico no Brasil se deu com a criação de metodologias próprias. Conforme Zuquette (1992), no Brasil, diversos trabalhos de mapeamento geotécnico já foram elaborados em diferentes regiões por equipes ligadas às universidades, às empresas, aos institutos isolados de pesquisa e aos órgãos de prestação de serviços. Higashi (2006) apresenta um apanhado de diversas metodologias voltadas às áreas tropicais e seus solos desenvolvidas no Brasil: Metodologia do Instituto de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 1980 – Metodologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), 1987 – Metodologia proposta por Zuquette (EESC-USP), 1995 – Metodologia desenvolvida por Davison Dias (UFRGS).

Sabendo que no Brasil, mais de 80% do território brasileiro é coberto por solos tropicais e subtropicais com comportamento particular diferindo, em muitos aspectos, dos tradicionais solos estudados nas referências bibliográficas (DAVISON DIAS, 1995), por ser empregada na região sul do Brasil, a metodologia Davison Dias (1995) foi escolhida para ser utilizada no presente estudo.

Esta técnica de mapeamento geotécnico é comprovada e validada na aplicação de vários trabalhos, teses, dissertações que utilizaram a metodologia Davison Dias (1995) como base para suas pesquisas. Entre eles Santos (1997), Abitante (1997), Higashi (2006), Reginatto (2013), Christ (2014), Thiesen, Santos e Higashi (2015), Oliveira (2015), Sbroglia (2015).

A metodologia sugere o estabelecimento de unidades geotécnicas por meio do cruzamento dos mapas litológico, extraído do mapa geológico e pedológico.

Conforme Davison Dias (1995),

Para cada unidade geotécnica, a geologia permite inferir as características do horizonte de alteração

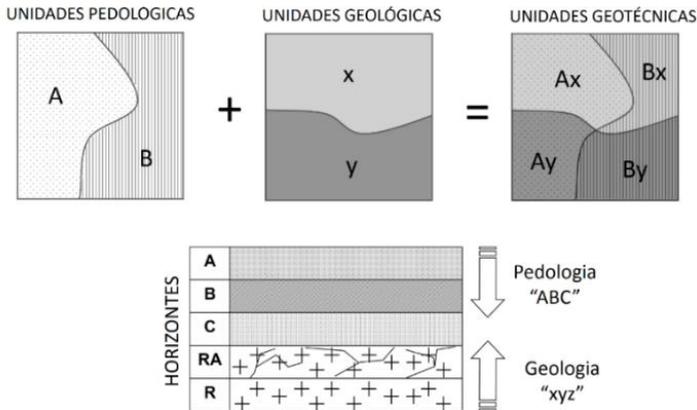
da rocha (horizonte saprolítico) e a pedologia permite inferir características dos horizontes superficiais dos seus perfis típicos.

A autora define as unidades geotécnicas como regiões cujo comportamento geotécnico frente ao uso e à ocupação do solo são semelhantes, delimitando as zonas de ocorrência de solos com perfis de origem e características físicas e morfológicas semelhantes. A topografia auxilia na definição dos limites entre as unidades.

A classificação de uma unidade geotécnica foi definida pela autora da seguinte simbologia: "ABCxyz", onde as letras maiúsculas "ABC" correspondem à classificação pedológica do horizonte superficial (horizontes A e B) e as minúsculas "xyz", identificadoras da geologia, caracterizando os horizontes C, RA e R. Para a 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.

A seguir, a Figura 2 apresenta um modelo esquemático do cruzamento das unidades pedológicas e geológicas (litológicas) para estimação das unidades geotécnicas.

Figura 2 – Conceito das unidades geotécnicas.



Fonte: Adaptado de HIGASHI (2006).

Davison Dias propôs a padronização de nomenclatura para pedologia (Quadro 5) e geologia (Quadro 6). Vale destacar que duas classes de rochas e de solos sem simbologia padronizada por Davison

Dias (2001) foram incorporadas no presente trabalho: solos litólicos (R) e filito (fi).

Quadro 5 – Simbologia simplificada das classes pedológicas.

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areia Quartzosa	PB	Podzóico Bruno-Acidentado
B	Brunizém	PE	Podzóico Vermelho-Escuro
BV	Brunizém Vértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
GH	Glei	PT	Plintossolo
HO	Solo Orgânico	PV	Podzóico 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 Podzóica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

Fonte: Davison Dias (2001).

Quadro 6 – Simbologia simplificada da geologia.

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

* Complexo formado por rochas metamórficas de difícil individualização

Fonte: Davison Dias (2001).

A análise da caracterização geotécnica com o uso de diversos mapas de solos associados aos fatores geomorfológicos auxilia no esclarecimento sobre o comportamento do solo a favor da engenharia. Investigações de solos podem ser incorporadas ao banco de dados a fim de enriquecer as análises realizadas. Neste sentido, a metodologia e os parâmetros advindos das investigações de sondagem de simples reconhecimento dos solos serão abordados na próxima seção.

2.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO – STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

O banco de dados figura como um dos elementos principais na elaboração de cartas geotécnicas (BASTOS, 2005). Tendo em vista o objetivo de desenvolver um banco de dados de sondagens, a presente seção visa a explicar acerca da metodologia de sondagem de simples reconhecimento, também denominada sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) para fins de investigação geológico-geotécnica do solo, bem como dos parâmetros e das correlações do solo relacionado com esse tipo de investigação.

2.2.1 Aspectos gerais, execução e representação

A sondagem é um procedimento que objetiva conhecer as condições naturais do solo, visando, conforme a NBR 6122:2010, a determinação da estratigrafia e classificação dos solos (consistência, compacidade e características físicas tátil-visuais como a coloração e granulometria), a posição do nível d'água e a medida do índice de resistência à penetração.

Sondagem a percussão é um método de investigação de solo cujo avanço da perfuração é feito por meio de trado ou de lavagem, sendo utilizado a cravação do amostrador para a medida de índices de resistência à penetração, obtenção de amostras, determinação do nível d'água e execução de vários ensaios in situ (DELATIM et al., 2013, p. 39).

Sondagens de simples reconhecimento são largamente utilizados na geotecnia nacional, apesar de todos os avanços da engenharia geotécnica. Conforme Schnaid (2000), o *Standard Penetration Test* (SPT)

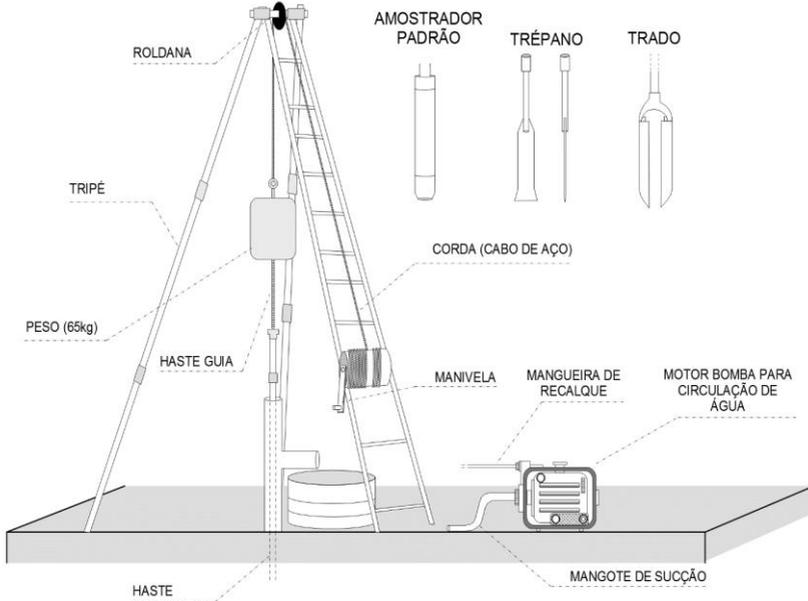
é a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação de solos em praticamente todo o mundo.

Ultimamente, a realização de estimativas de comportamento geotécnico no campo do mapeamento a partir de informações obtidas em sondagens de simples reconhecimento é uma ferramenta que vem crescendo e ganhando espaço (LIMA, 1997; LOLLO, 1999; CULSHAW E NORTHMORE, 2002 *apud* SOARES, 2011).

As incertezas decorrentes do processo de sondagem, relacionadas a erros de contagem de golpes, variação na altura de queda, peso do martelo, por exemplo, podem ser minimizadas, mas não eliminadas. Schnaid (2000) elenca como desvantagem a adoção de procedimentos não padronizados na execução do ensaio, apesar da existência normalização para o ensaio em 1958 pela ASTM. Na América do Sul a normalização norte-americana é utilizada com frequência (SOARES, 2011), enquanto o Brasil tem normalização própria para padronização do ensaio, conforme disposto pela NBR 6484:2001 - Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio.

Para que se tenham resultados confiáveis é necessário que o ensaio siga a padronização descrita pela NBR 6484:2001. O ensaio consiste na cravação no solo de um amostrador padrão do tipo Terzaghi-Peck (diâmetro interno de 34,9 mm e externo de 50,8 mm) utilizando um martelo padronizado (65 kg) e uma altura de queda livre padronizada (75 cm), conforme esquematizado na Figura 3. A cravação ocorre de metro em metro e pode ser manual (mais comum) ou mecanizada. Os resultados são expressos em números de golpes (queda do peso) necessários para cravação de segmentos de 15 cm dos primeiros 45 cm do metro analisado, sendo o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) representado pela soma do número de golpes para a penetração dos últimos 30 cm para cada metro de profundidade.

Figura 3 – Equipamento para ensaio de reconhecimento à percussão SPT.



Fonte: Higashi (2016).

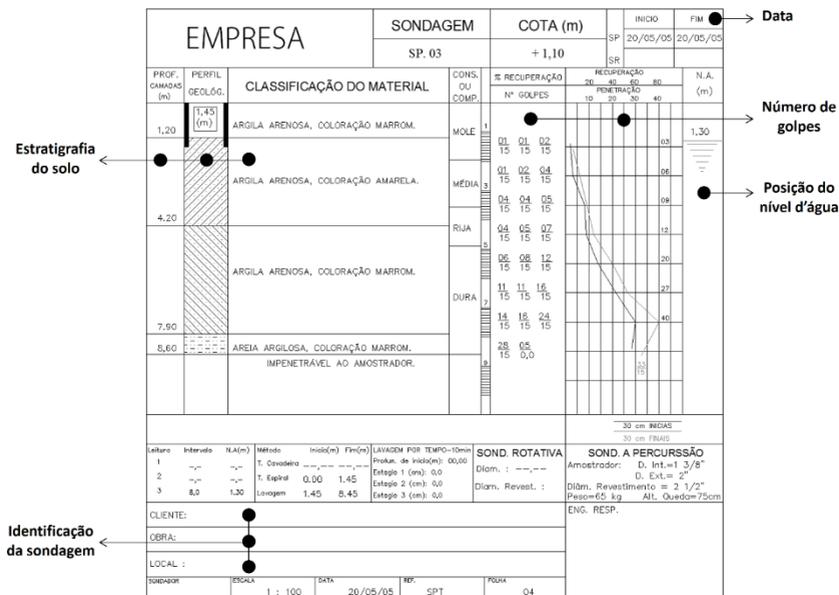
A cravação persiste até o limite de sondagem, especificado pela norma conforme critérios de paralisação previstos na NBR 6484:2001.

- Em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar 30;
- Um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação;
- Não se observar avanço do amostrador-padrão durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo.

Nestas condições o terreno será considerado impenetrável ao ensaio de penetração.

Com base nos dados coletados da sondagem, são desenvolvidos perfis geotécnicos para apresentação dos resultados, individualmente para cada furo de sondagem ou em conjunto para uma seção do subsolo. O perfil geotécnico é parte integrante do relatório de sondagem e pode ser visualizado na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Exemplo de perfil individualizado de sondagem.



Fonte: Acervo próprio.

Por meio do perfil do furo de sondagem exemplificado na Figura 4, informações acerca das camadas dos diferentes solos (argila, silte, areia, entre outros) e suas características (coloração, dureza, compactação), nível de água, profundidade do impenetrável, resistência do solo pelo número de golpes padronizados N_{SPT} , data, local e empresa responsável pela realização do furo de sondagem. Os furos individuais, por sua vez, ainda podem ser unificados para obtenção de perfis estratigráficos de uma região.

A NBR 8036:1983 - Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios – Procedimento fixa o número exigível de sondagens conforme a área de projeção da edificação, conforme elencado a seguir.

- Uma sondagem para cada 200 m² de área da projeção em planta de edificação de até 1200 m²;
- Entre 1200 m² e 24000 m² deve-se fazer uma sondagem para cada 400 m² que excederem os 1200 m²;

- Acima de 2400 m² o número de sondagens deve ser fixado de acordo com o plano particular de construção.

Respeitando em quaisquer circunstâncias o número mínimo de sondagens a seguir:

- Com o mínimo de duas sondagens para área de projeção de até 200 m²;
- Três sondagens para área de projeção entre 200 m² e 400 m².

A NBR 6122:2010 prescreve as sondagens de reconhecimento a percussão como investigação geotécnica preliminar mínima para fins de projeto e execução de fundações. Visto o caráter popular, rotineiro, econômico, simples, rápido (BERBERIAN, 2012) e fundamental desse tipo de investigação do subsolo, o presente estudo utiliza ensaio de campo do tipo SPT para complementação das unidades geotécnicas estimadas e para elaboração de cartas de aptidão para fundação a partir de correlações extraídas dos ensaios.

2.2.2 Utilização, parâmetros e correlações

A primeira aplicação atribuída ao SPT consiste na simples determinação do perfil do subsolo. Schnaid (2000) evidencia que o SPT também pode ser utilizado na prática de engenharia para obtenção de parâmetros a serem adotados na análise de problemas geotécnicos (fundações, obras de contenção, barragens). Devido à ampla utilização do método, correlações do ensaio SPT com características do solo podem ser encontradas em diversas bibliografias e normas.

Marangon (2009) destaca que sondagens a percussão são muito utilizadas nos procedimentos indiretos para obter dados sobre as características *in situ* do solo. Conforme Berberian (2012), há bibliografias para praticamente todas correlações possíveis do ensaio SPT, destacando-se: coesão, ângulo de atrito, densidades, resistências de ponta e lateral, módulo de elasticidade, edométrico, índice de compressão, coeficiente de recalque, de adensamento e de empuxo, razão de sobreadensamento, coeficiente de permeabilidade, etc..

A NBR 6484:2001 apresenta a compacidade dos solos grossos e os estados de consistência dos solos finos em função do N_{SPT} e Godoy (1972, *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) às relaciona com o peso específico, conforme disposto no Quadro 7.

Quadro 7 – Estados de compactidade, consistência e peso específico.

Solo	N _{SPT}	Designação	Peso específico (kN/m ³)
Areia e Silte arenoso	≤ 4	Fofa(o)	18*
	5 a 8	Pouco fofa(o)	18*
	9 a 18	Medianamente compacta(o)	19*
	19 a 40	Compacta(o)	20*
	> 40	Muito compacta(o)	20*
Argila e Silte argiloso	≤ 2	Muito mole	13
	3 a 5	Mole	15
	6 a 10	Média(o)	17
	11 a 19	Rija(o)	19
	> 19	Dura(o)	21

* Peso específico para areia úmida.

Fonte: Adaptado de NBR 6484:2001 e Godoy (1972, *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Schnaid (2000) coloca duas abordagens distintas para interpretação dos resultados SPT: os métodos indiretos, nos quais os resultados dos ensaios são utilizados na previsão de parâmetros constitutivos do solo e os métodos diretos, nos quais os resultados do N_{SPT} são aplicados diretamente na previsão de capacidade de carga, sem a necessidade de determinação de parâmetros intermediários.

2.2.2.1 Fundação superficial

Para determinação da tensão admissível do solo em fundações por sapatas relacionando os resultados dos ensaios SPT, por exemplo, a NBR 6122:2010 prescreve a utilização e interpretação de um ou mais dos três seguintes procedimentos: prova de carga em placa, métodos teóricos e semiempíricos. Foi notado por Cintra, Aoki e Albiero (2011) que as versões anteriores da mesma norma apresentavam tabelas de valores básicos de tensão admissível, de natureza empírica, com base na descrição do terreno. A tabela foi excluída na versão atual, assim como foi desconsiderado o uso de métodos empíricos como procedimento para determinação da tensão admissível. Cintra, Aoki e Albiero (2011) observaram ainda que em compensação, a nova norma alterou a definição de método semiempírico, e fez com que os antes conhecidos métodos empíricos passassem a ser considerados semiempíricos.

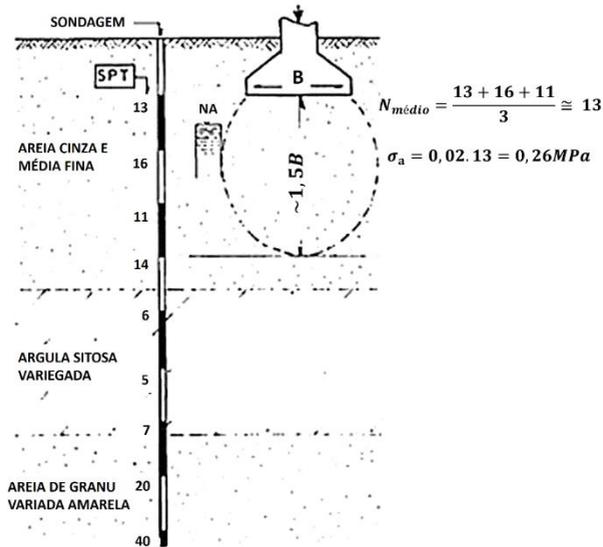
Neste contexto, Hachich *et al.* (1998) apresentam para fundação superficial, o seguinte método semiempírico para o cálculo da tensão admissível válido para qualquer solo natural, conforme apresentado na Equação (1).

$$\sigma_a = 0,02 \cdot N_{SPT} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Válida para qualquer solo natural no intervalo $5 \leq N_{SPT} \leq 20$

Sendo o N_{SPT} o valor médio de golpes no bulbo de tensões (ver Figura 5)

Figura 5 – Estimativa do N_{SPT} médio.



Fonte: Hachich *et al.* (1998).

Mello (1975, *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) relata o uso, na prática profissional de outra correlação que não faz distinção de solo para cálculo de tensão admissível para fundações superficiais, conforme a Equação (2).

$$\sigma_a = 0,1 \cdot (\sqrt{N_{SPT}} - 1) \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Válida para qualquer solo natural no intervalo $4 \leq N_{SPT} \leq 16$

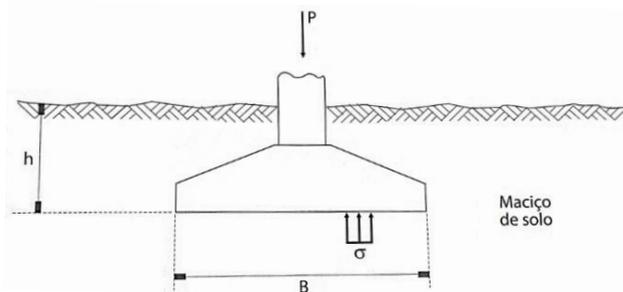
Outras correlações permitem a obtenção da tensão admissível diretamente de ensaios de campo, levando em consideração diferenças entre solos argilosos e arenosos, por exemplo. Todavia, a NBR 6122:2010 alerta que os domínios de validade da aplicação dos métodos bem como as dispersões dos dados e as limitações regionais associadas a cada um dos métodos devem ser observados. A Equação (1), tendo em vista a praticidade de aplicação já que não considera diferença entre os tipos de solos e ser bastante utilizada no meio técnico brasileiro (HACHICH *et al.*, 1998), será utilizada para avaliar a tensão admissível das camadas superficiais do solo no presente trabalho.

Para pré-dimensionamento de uma sapata isolada de concreto armado de largura “B” e comprimento “L”, com reação vertical de compressão do pilar “P”, Cintra, Aoki e Albiero, 2011) calculam a tensão resistente (σ) no maciço de solo, no contato sapata-solo, conforme a Equação (3).

$$\sigma = P/B.L \quad (3)$$

O sistema sapata-solo mencionado está representado na Figura 6, onde a cota de assentamento é representada por “h”.

Figura 6 – Sistema sapata-solo.



Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011).

A profundidade do bulbo de tensões da sapata (representada por “z” na Figura 7), conforme Hachich *et al.* (1998), equivale a aproximadamente 1,5B. Segundo Simons e Menzies (1981 *apud* CINTRA *et al.*, 2003), existem cálculos mais precisos utilizando os conceitos existentes na teoria da elasticidade aplicada à mecânica dos solos,

porém para efeitos práticos, podemos considerar os seguintes valores expostos no Quadro 8 para a profundidade do bulbo de tensões “z”.

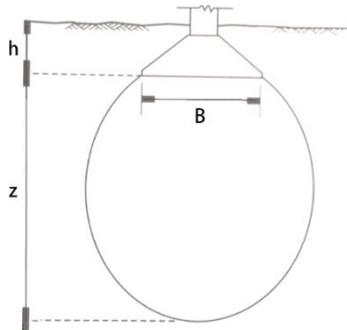
Quadro 8 – Relação entre a geometria da sapata e a profundidade do bulbo de tensões.

Geometria da base da sapata	Profundidade do bulbo de tensões (z)
Sapata circular ou quadrada ($L = B$)	2B
Sapata retangular ($2B \leq L \leq 4B$)	3B
Sapata corrida ($L \geq 5B$)	4B

* Onde B é a base e L o comprimento da sapata

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011).

Figura 7 – Representação do bulbo de tensões.



Fonte: Adaptado de Cintra, Aoki e Albiero (2011).

A decisão do tipo de fundação requer conhecimento do solo, propiciados pela sondagem. Conforme Rebello (2011), para efeito prático, considera-se técnica e economicamente adequado o uso de fundação direta quando do número do SPT for maior ou igual a oito e a profundidade máxima não ultrapassar dois metros.

O primeiro limite indica a resistência mínima necessária para o uso da fundação direta; o limite de profundidade se deve ao custo da escavação e reaterro necessário para execução da fundação, acima do qual o uso da fundação direta torna-se antieconômico (REBELLO, 2011).

2.2.2.2 Fundação por estacas

Conforme Rebello (2011), a fundação profunda é adotada quando a fundação direta não for aconselhada, quando o número de golpes da sondagem SPT maior ou igual a oito estiver a profundidades superiores a dois metros.

Para fundação por estaca, Cintra e Aoki (2010) listam valores limites de N_{SPT} para cota de parada de diversos tipos de estacas, conforme Quadro 9.

Quadro 9 – Valores limites de N_{SPT} para a parada das estacas.

Tipo de estaca		Limite de N_{SPT} para execução
Pré – moldada de concreto	$\Phi < 30$ cm	$15 < N_{SPT} < 25$ $\sum N_{SPT} = 80$
	$\Phi \geq 30$ cm	$25 < N_{SPT} \leq 35$
Perfil metálico		$25 < N_{SPT} \leq 55$
Tubada (oca, ponta fechada)		$20 < N_{SPT} \leq 40$
Strauss		$10 < N_{SPT} \leq 25$
Franki	em solos arenosos	$8 < N_{SPT} \leq 15$
	em solos argilosos	$20 < N_{SPT} \leq 40$
Estação e diafragma, com lama bentonítica		$30 < N_{SPT} \leq 80$
Hélice contínua		$20 < N_{SPT} \leq 45$
Ômega		$20 < N_{SPT} \leq 40$
Raiz		$N_{SPT} \geq 60$ (penetra na rocha sã)

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

2.2.3 Variabilidade espacial dos parâmetros do solo

Além das incertezas advindas dos levantamentos e execução de ensaios, mesmo que minimizadas por processos ótimos, existem ainda incertezas associadas a variabilidade espacial do solo, que são refletidas na modelagem matemática.

Segundo Baecher e Christian (2003, *apud* REINERT, 2011), a variabilidade espacial do solo é responsável por incertezas na engenharia geotécnica, causada por grandezas randômicas, que são definidas como fenômenos que são inerentemente imprevisíveis.

A variável aleatória é uma variável que, não assumindo necessariamente um valor preciso, pode assumir diversos valores, cada

um com certa probabilidade. Mesmo que conhecida a probabilidade associada a cada valor possível de uma variável aleatória, não se pode prever exatamente o valor que esta assumirá em uma experiência, mas se pode prever o seu comportamento em uma série de experiências, com tanto maior precisão quanto maior for esta série (SOBOL, 1983, *apud* REINERT, 2011),

Corá *et al.* (2004) informam que a variabilidade dos atributos do solo pela estatística clássica assume que a média de determinada variável em uma unidade amostral é a esperança do valor da variável em toda a unidade, com a estimativa do erro expressa pela variância⁴. Esta abordagem assume que a variabilidade sobre a média é devida ao acaso e não contém referência sobre a distribuição no espaço de diferenças dentro de unidades amostrais. Entretanto, Corá *et al.* (2004) afirmam que apesar de os métodos tradicionais de classificação do solo e análises estatísticas não considerarem esta questão

[...] estudos têm mostrado que atributos do solo, geralmente, não ocorrem de maneira aleatória no espaço, mas segundo um arranjo estrutural com uma dimensão característica, que é seu domínio, e que corresponde à distância dentro da qual há interdependência dos valores medidos. Ou seja, os atributos do solo podem apresentar-se espacialmente correlacionados em determinada área, podendo o conhecimento desta dependência espacial contribuir para o entendimento sobre a influência dos atributos e do manejo do solo.

Reinert (2011), afirma que o solo apresenta uma variabilidade espacial em diversas de suas características, como, por exemplo, geometria de camadas, propriedades físicas e geomecânicas e outras e mesmo os depósitos relativamente homogêneos podem apresentar alguma variabilidade espacial.

Técnicas de investigação da variabilidade espacial dos atributos do solo, como, por exemplo, o uso da geoestatística, podem contribuir para compreensão da variabilidade espacial dos solos. No estudo

⁴ Variância de uma variável aleatória ou processo estocástico é uma medida da sua dispersão estatística, indicando "o quão longe" em geral os seus valores se encontram do valor esperado, sendo o seu valor o quadrado do desvio padrão.

geoestatístico realizado por Kulhawy e Phoon (2002), por exemplo, as incertezas embutidas nos resultados SPT indicaram coeficiente de variação⁵ entre 25% e 50%.

2.3 ANÁLISE ESPACIAL DE SUPERFÍCIES

A análise espacial envolve a distribuição espacial de dados provenientes de fenômenos ocorridos no espaço, podendo ser aplicada em diversas áreas do conhecimento, seja em geologia, em saúde, em ambiente, em agronomia. Tem como ênfase mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização e o padrão espacial do fenômeno em estudo (INPE, 2004).

Existem diferentes metodologias para a análise espacial de dados, mas a característica comum presente é que os mesmos devem ser georreferenciados, ou seja, que os valores sejam sempre acompanhados das suas respectivas coordenadas geográficas (FERNANDES, 2014). Neste contexto, as interpolações buscam descrever fenômenos por meio de equações. Segundo Landim (2000), é um procedimento matemático de ajuste de uma função a pontos não amostrados, baseando-se em valores obtidos em pontos amostrados.

A modelagem dos fenômenos naturais pode ser dividida em modelos estocásticos (probabilísticos) e determinísticos. A seguir serão apresentados interpoladores determinísticos como a triangulação e o inverso ponderado da distância, e a krigagem no âmbito dos interpoladores estocásticos.

2.3.1 Triangulação com interpolação linear – TIN

A triangulação conecta pontos amostrados através de triângulos e interpola os valores entre eles. Pontos estimados de igual valor (isovalores) entre os dados medidos e posicionados nos vértices dos triângulos são conectados para os intervalos especificados.

Segundo Landim (2000), são considerados métodos de estimação diretos, pois os contornos derivam do padrão original dos dados; não

⁵ O coeficiente de variação é uma maneira de se expressar a variabilidade dos dados tirando a influência da ordem de grandeza da variável. É uma medida de dispersão relativa, empregada para estimar a precisão de experimentos e representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média. Sua principal qualidade é a capacidade de comparação de distribuições diferentes.

permite a extrapolação e as estimativas limitam-se estritamente à área amostrada.

O Quadro 10, definido por Landim (2000), apresenta algumas vantagens e limitações da triangulação.

Quadro 10 – Triangulação – Vantagens e desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de ser entendido; • Rápido; • Fiel aos dados originais; • Bom para uma visualização rápida; • Superfície pode ser interpolada entre os pontos amostrados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores acima ou abaixo dos valores reais não podem ser extrapolados; • Valores além da área de distribuição dos pontos amostrados não podem ser extrapolados; • Contornos podem ser “angulares” nas bordas dos triângulos; • Gera superfícies angulares; • Rede triangular não é única e isso pode distorcer os resultados.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de dados bem regular; • Valores estimados necessários apenas dentro da área amostrada; • Presença de grandes diferenças entre os dados (encostas íngremes, dados de contaminação com grande variabilidade), dados topográficos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ao se desejar um mapa com contornos suaves; • Alguns dados coletados em linhas e outros com distribuição irregular; • Com grande volume de dados a computação pode ser lenta.

Fonte: Adaptado de Landim (2000).

2.3.2 Inverso ponderado da distância

Segundo Landim (2000), este é o mais utilizado dentre os métodos de distância ponderada. Neste método a influência de cada ponto é inversamente proporcional à distância do nó da malha. O modelo baseia-se na dependência espacial e, conforme Soares (2011), o peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó do grid a ser estimado. Assim, quanto mais próximo um ponto está do outro mais seus valores se aproximam (maior será sua correlação espacial). Dessa forma se atribuem pesos maiores para pontos (observações) mais próximos do que para pontos mais distantes.

O Quadro 11, definido por Landim, (2000) apresenta algumas vantagens e limitações deste método de interpolação.

Quadro 11 – Inverso ponderado da distância – Vantagens e desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de entender matematicamente; • Algoritmo bem conhecido e discutido; • Disponível em muitos softwares; • Utiliza pouco tempo de computação; • É razoavelmente fiel aos valores amostrados originais; • Não estima valores de pontos amostrados maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; • Bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas; • Muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente distribuídos; • Bom estimador para propósitos gerais; • Pode interpolar por setor, onde o usuário pode escolher a quantidade de amostras, por setor, que serão levadas em consideração, em uma determinada estimativa de valor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não estima valores maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; • Ruim para estimativas de dados estruturais, isto é, para determinar o topo ou a base de horizontes estratigráficos ou litológicos; • Muito difícil obter a localização precisa de uma determinada isolinha se os valores amostrados não contiverem este valor; • É difícil projetar a curva de altitude zero se os dados não contiverem zero ou valores negativos; • Influência de valores locais anômalos é dificilmente removida; • Dados dispostos em conjuntos de semelhantes podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso; • Cria muitas observações ilusórias devido às limitações do método de interpolação, o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente ou se ocorrer mudanças no expoente utilizando, no tamanho da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Estimativas de propósito gerais; • Distribuição uniforme de dados; • Para destacar anomalias locais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dados agrupados; • Tendência pronunciada presente; • Dados com falhas e distribuídos de forma esparsa; • Não quiser imperfeições no modelo.

Fonte: Adaptado de Landim (2000).

2.3.3 Krigagem

A krigagem é uma aplicação dos procedimentos geoestatísticos (INPE, 2004) e, como tal, leva em consideração as características espaciais de autocorrelação (o quanto valores similares tendem a estar agrupados no espaço) de variáveis regionalizadas, enquanto os métodos determinísticos não consideram esse aspecto, pois utilizam apenas os valores envolvidos nos processos (LANDIM, 2000 *apud* SOARES, 2011).

Segundo Fernandes (2014), os métodos geoestatísticos fornecem um conjunto de técnicas necessárias para entender a aparente aleatoriedade dos dados, os quais apresentam, porém, uma possível estruturação espacial, estabelecendo, desse modo, uma função de correlação espacial. Essa função representa a base da estimativa da variabilidade espacial em geoestatística.

Conforme Landim e Sturaro (2002), de forma geral, a geoestatística

[...] procura extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, as características estruturais probabilísticas do fenômeno regionalizado, ou seja, uma função de correlação entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado. O método de estimativa básico utilizado é o da krigagem.

O termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o pioneiro ao introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos, mapeamento hidrológico, mapeamento atmosférico e outros campos correlatos. 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 (INPE, 2004).

A krigagem pode ser entendida como um processo de estimação por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto consideradas como interdependentes por uma função denominada variograma⁶ (LANDIM e STURARO, 2002), onde o variograma determina o comportamento regionalizado.

As variáveis regionalizadas geralmente apresentam certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido (LANDIM, 2010). As variáveis regionalizadas possuem ligações entre os pontos no espaço, motivadas pela gênese do fenômeno natural.

Segundo Salviano (1996, *apud* ALESSI, 2011) o semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre as amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem.

Landim (2010) destaca que o variograma mede a variabilidade espacial em função da distância. A interpretação do variograma permite obter parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas. A distância dada pelo variograma mede o grau médio de similaridade entre um valor não amostrado e um valor conhecido vizinho. O variograma é utilizado para calcular os valores de variância, para uma dada distância, os quais são necessários para a organização do sistema de equações da krigagem. Conforme o autor, são exemplos de variáveis regionalizadas: variáveis físicas e químicas dos solos, altitude de cotas topográficas, porosidade e permeabilidade de solos, transmissividade hidráulica, concentração de elementos-traço no solo, densidade vegetal em florestas, distribuição espacial de pragas.

A krigagem leva em consideração o número de amostras utilizadas, as posições das amostras na área a ser avaliada, as distâncias

⁶ É uma função que mede a variação do valor de uma variável em relação às restantes da mesma amostragem, comumente utilizado em estatística espacial. Conforme Landim e Sturaro (2002), como no cálculo dessa função a somatória de diferenças ao quadrado é dividida por duas vezes o número de pares de valores, o termo correto seria semivariograma, porém é usual o emprego do termo variograma, mais sintético.

entre as amostras e a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo (LANDIM, 2000). O autor destaca que uma das vantagens primordiais do método de krigagem está relacionada à eliminação, em média, dos erros de excesso devido a ponderação das amostras, e que, com isso tem-se uma melhoria da precisão.

O Quadro 12 dispõe algumas vantagens e limitações deste método de interpolação.

Quadro 12 – Krigagem – Vantagens e desvantagens.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Valores estimados baseiam-se no semivariograma, que, se apropriado, fornece as seguintes informações: <ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; • Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsoide) e, se elipsoide, orientação do eixo principal; • Parâmetros adequados da grade: tamanho, forma e orientação; • Natureza da distribuição espacial da variável investigada uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x causal; • Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada; • Evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; • Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade, o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); • Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; • Precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa; 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode não ser possível a construção de um semivariograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos; • É necessário tempo para preparo do semivariograma e entendimento geoestatístico; • O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto resultados são sempre obtidos; • Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos; • Necessidade de software capacitado.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Interpolador exato: os valores estimados para os nós das células é exatamente igual ao valor amostrado naquela posição; • Estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados; • Modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais; • Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para: quantificar um intervalo de valores (\pm) para os pontos estimados, definindo estimativas realistas; calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade de os valores ocorrerem dentro de um intervalo de ± 2 unidades de desvio padrão da media; variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem. 	
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; • Valores discrepantes: removê-los antecipadamente; • Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado); • Amostras de populações diversas.

Fonte: Adaptado de Landim (2000).

A comparação entre os métodos de interpolação expressos segundo Krajewski e Gibbs (1966, *apud* ALESSI, 2011) estão expostos no Quadro 13.

Quadro 13 – Comparação entre os métodos de interpolação apresentados.

Interpolador	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	3	1	3
Inverso da distância	3	2	2	2
Krigagem	2	1	3	1

Escala: 1 (melhor) e 3 (pior)

Fonte: Adaptado de Krajewski e Gibbs, 1966, *apud* Alessi, 2011

Segundo Alessi (2011), todos os métodos do Quadro 13 apresentam uma estimativa da realidade com a presença de erros e incertezas. A geração de modelos preza pela escolha de um método que resulte em menos erros. Embora não seja possível calcular o erro exato, é aceitável estimar uma incerteza. Essa estimativa é possível de acordo com a análise dos principais fatores que influenciam o erro do modelo, são eles: número de amostras vizinhas, proximidade das amostras, distribuição espacial das amostras, natureza do fenômeno.

A utilização do método de krigagem é reconhecida como sendo uma das melhores estimativas lineares e não tendenciosa (LANDIM, 2000). O mesmo autor ainda defende a krigagem como um método muito aplicado ao mapeamento de solos.

2.3.4 Resolução espacial

Em termos de confiabilidade dos dados, Silva (1999) evidencia que a resolução espacial é um conceito muito importante quando se trabalha com dados espaciais. Segundo INPE (2001), no domínio digital a resolução espacial da base de dados parece ser uma dimensão mais relevante que a escala, de modo que a resolução espacial é, tal e qual a escala o é no domínio analógico, um dos elementos de controle para a generalização. O instituto destaca ainda que a escala também se torna um elemento de controle quando há preocupação com visualização dos dados digitais na tela do computador. Neste caso, exatamente como nos mapas em papel, o objetivo é fazer a comunicação visual dos dados de forma eficiente.

Tobler (1979, *apud* SILVA, 1999) define resolução espacial de dados georreferenciados como o conteúdo do domínio geométrico

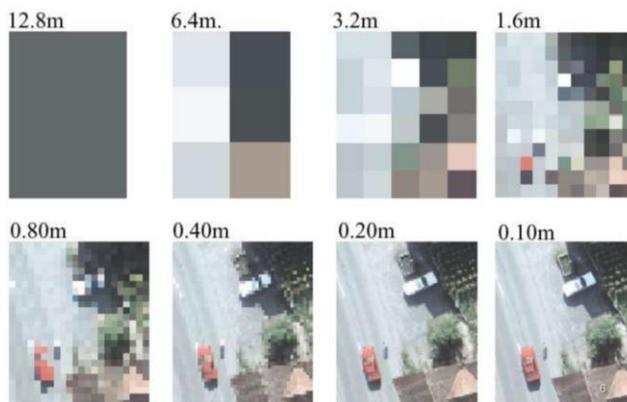
dividido pelo número de observações, normalizadas pela dimensão espacial, conforme Equação (4), no qual o domínio geométrico representa a área coberta pelas observações. Assim, uma alta resolução espacial relaciona-se a um maior nível de detalhes dos elementos, portanto, um número maior de observações.

$$R = \sqrt{\frac{\text{área}}{\text{número de observações}}} \quad (4)$$

Sendo R a resolução espacial

Tradicionalmente conhecida como a mínima distância para distinção de dois objetos, é um parâmetro aplicável à nitidez de uma imagem. A resolução espacial de uma imagem refere-se ao tamanho que um píxel⁷ representa na realidade. Por meio do exemplo da Figura 8, é possível observar o resultado na nitidez da imagem através da variação da resolução espacial de uma mesma imagem.

Figura 8 – Resolução espacial – exemplo.



Fonte: ufjf.br/lga/files/2011/03/10-Character%C3%ADsticas-da-Imagens.pdf

⁷ Pixel, aglutinação de *Picture e Element*, ou seja, elemento de imagem, é o menor elemento em um dispositivo de exibição ao qual é possível atribuir-se uma cor.

Na Figura 8, a resolução espacial varia de 12,8 m a 10 cm, onde gradativamente é possível perceber a melhora na nitidez da imagem. Desta forma, quanto menor for o tamanho real deste píxel, maior será a resolução espacial desta imagem, o que significa que maior será a capacidade de registrar objetos dispostos na superfície terrestre.

2.4 INSERÇÃO INTERNACIONAL DA PESQUISA

Diferentes pesquisas buscam associar a uma região, dados SPT e características de solos. Em maior densidade essas pesquisas ocorrem em países nos quais as atividades sísmicas se fazem presentes com severas consequências como a Índia. Estudos de determinação das propriedades dinâmicas do solo, por meio da associação de dados SPT para obtenção da velocidade de propagação da onda de cisalhamento (V_s), são essenciais em termos de engenharia para prever as respostas do solo sob terremoto. As correlações entre N_{SPT} e V_s foram aplicadas e estudadas por Mhaske e Choudhury (2006) em Yenişehir/Turquia, Anbazhagan e Sitharam (2008) em Bangalore/Índia; Mhaske e Choudhury (2011) em Mumbai/ Índia; Shahri, Rajablou e Ghaderi (2012) em Hamedan/Irã; Sharma, Rahman e Saikia (2013) e Sharma e Rahman (2016) na cidade de Guwahati/Índia, entre outros. Nesse sentido, Noce e Holzer (2003) correlacionaram o CPT (*Cone penetration test*) com a propensão de liquefação do solo em Oakland/Califórnia para análise do risco sísmico.

Países como Malásia, Tailândia, Índia, Turquia, Iraque, Irã, Brasil, Estados Unidos da América (EUA), Austrália se fazem presentes em estudos que visam a representar as superfícies dos solos por meio de parâmetros obtidos de ensaios do tipo SPT, conforme resumido a seguir.

Um estudo de caracterização do solo, utilizando 110 sondagens SPT, foi realizado por Al-Jabban (2013) na cidade de Hilla, no Iraque. Como resultado, foram apresentados indicativos de tendência da resistência do solo em função do N_{SPT} , e uma equação empírica foi desenvolvida para representar a região.

Suwanwiwattana *et al.* (2001), por meio de 200.000 furos de sondagem STP (um dos tipos de ensaios de solo mais utilizados na Tailândia) que cobrem quase a totalidade de Bangkok/Tailândia, realizaram a interpretação das sondagens e interpolação para geração

de perfil tridimensionais do solo, propondo a composição de um banco de dados.

Stalin e Murugan (2014), por sua vez, desenvolveram mapas de isovalores do nível de água e N_{SPT} e mapas de capacidade de carga em diferentes profundidades para região sul de Chennai/Índia. Mapa de aptidão para fundação rasa conforme a tensão admissível e valores de N_{SPT} foi desenvolvido para mesma região por Rajesh, Sankaragururaman e Das em 2003.

Mapa de isovalores de N_{SPT} para *Surfers Paradise*/Austrália, a partir de 35 laudos de sondagem SPT foi desenvolvido por Al-Ani *et al.* (2014). Humyra *et al.* (2012) no mesmo sentido, desenvolveram um mapa de isovalores de N_{SPT} para auxiliar na elaboração de projetos de fundações na cidade de Rajshahi/Bangladesh, com o intuito de auxiliar na elaboração de projetos de estruturas de pequeno porte e baixo custo.

Sharma, Rahman e Saikia (2013) propuseram a elaboração de mapas de isovalores de N_{SPT} e profundidade do lençol freático na cidade de Guwahati/Índia. Estudo esse realizado a partir de uma base de dados de 200 furos de sondagem SPT, cobrindo uma área de 262 km².

Estudos mais próximos ao aqui proposto na presente pesquisa foram encontrados em publicações brasileiras. Soares (2011) elaborou uma análise temporal da superfície freática (refletindo a sazonalidade de períodos de seca e úmidos) e mapas de isovalores de N_{SPT} , impenetrável à percussão, tensão admissível do solo, mapa de uso para fundações (tubulão e estacas) em João Pessoa/Brasil. Mais recentemente, Pimentel (2015) propôs a estruturação de um banco de dados georeferenciado de informações geotécnicas e a elaboração de uma carta preliminar de fundações de uma parte da região centro-norte da cidade de Fortaleza/Brasil. Para tal, foram utilizados 395 furos de sondagens à percussão em empresas locais, cobrindo uma área de aproximadamente 170 km². A previsão do tipo de fundação, superficial ou profunda, profundidade de assentamento e tensão admissível, tipo e diâmetro de estaca, bem como o comprimento aproximado, foi realizado a partir de métodos empíricos e semi-empíricos disponíveis na literatura. Foram gerados mapas de isovalores de N_{SPT} para três diferentes profundidades e mapa de isovalores do nível do lençol freático.

Finalmente, é possível perceber que pesquisas associando dados de sondagens SPT a mapas geotécnicos são mundialmente desenvolvidas e de interesse em âmbito prático e acadêmico. O caráter

inovador do trabalho desenvolvido se faz presente na maneira com que os resultados são apresentados, em forma de mapa (orientação do tipo de fundação, profundidade do impenetrável à percussão e NA, tensão admissível dos solos, isovalores de N_{SPT} e comprimento máximo de estacas), e no esclarecimento dos métodos de elaboração dos mapas e tratamento do banco de dados, nas diferentes possibilidades de utilização dos dados SPT. Ademais, o trabalho possibilita a associação de unidades geotécnicas a perfis de sondagens genéricos, de forma a expandir a compreensão mecânica dos solos além das fronteiras da região abrangida pelos ensaios do tipo SPT. Vale destacar que a proposta metodológica parcial do presente trabalho, desenvolvida para a elaboração de mapas de fundação baseados em sondagens SPT, foi previamente publicada por Santos, Thiesen e Higashi (2015) na Argentina no *15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* e os resultados parciais do estudo de caso, na forma de mapas, foram apresentados por Thiesen, Santos e Higashi (2015) no *International Conference on Geotechnical Engineering* ocorrido no Sri Lanka.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Blumenau (Figura 9) situa-se na região sul do Brasil, no estado de Santa Catarina (SC), abrangendo uma área total de aproximadamente 520,5 km², sendo 207,2 km² de área urbana e 313,3 km² de área rural. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), com 309.011 habitantes em 2010 o município teve um crescimento estimado para 2015 de aproximadamente 10%, atingindo 338.876 habitantes.

Figura 9 – Localização do município de Blumenau/SC.



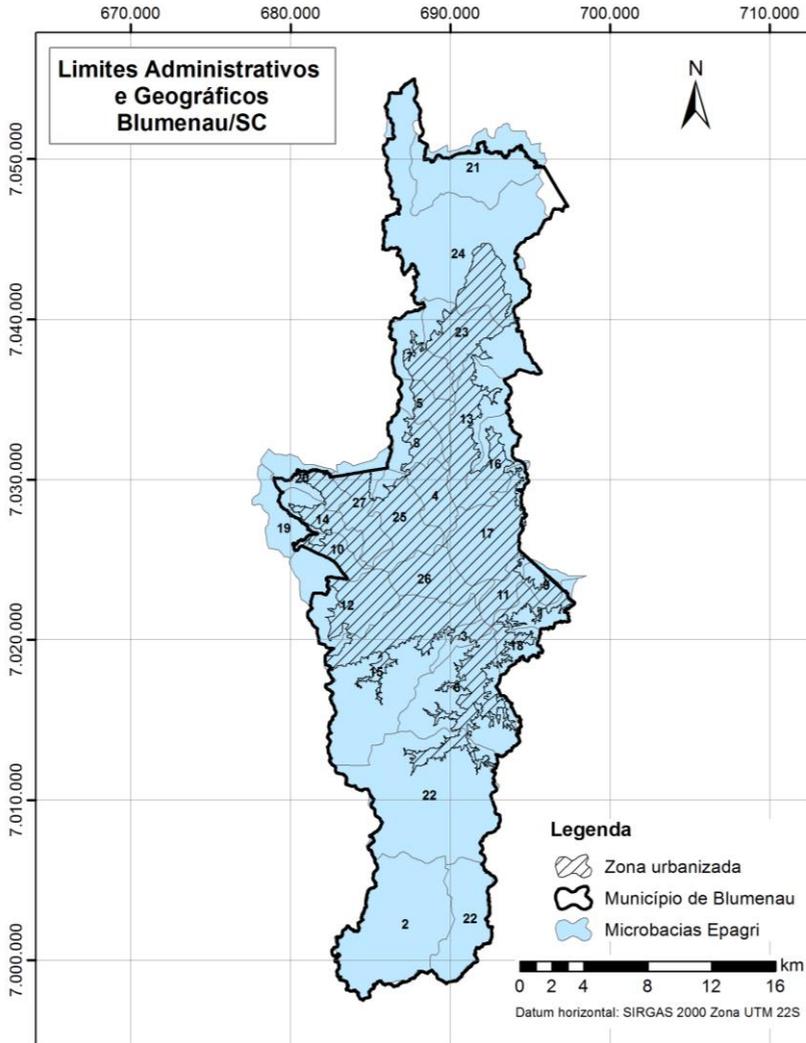
Fonte: Adaptado de wikipedia.org/wiki/Blumenau

Conforme o perfil de municípios publicado pelo IBGE, Blumenau possui relevo acidentado, constituído, sobretudo, por rochas do tipo granito e gnaisses. Relevo esse que viabiliza o surgimento, do ponto de vista da engenharia, de sérios problemas decorrentes da ocupação desordenada, aliado ao fato da região se caracterizar por altos índices de umidade, com precipitações pluviométricas elevadas.

A definição da área de estudo do mapeamento geotécnico foi realizada a partir do limite administrativo do município de Blumenau/SC. Posteriormente, tomando como base as unidades hidrológicas definidas pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) que continham uma grande porcentagem de área dentro do município de Blumenau, levantaram-se as principais microbacias avaliadas no presente trabalho.

Os limites administrativos e geográficos das unidades hidrologicas de Blumenau podem ser acompanhados no Mapa 1.

Mapa 1 – Limites administrativos e geográficos de Blumenau/SC.



Base de dados: Carta Planialtimétrica de Blumenau (2004) 1:10.000
 Unidades Hidrográficas de SC - Epagri (2007) 1:100.000
 Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

O Mapa 1 pode ser associado ao Quadro 14 para identificação das microbacias constantes no município de Blumenau/SC.

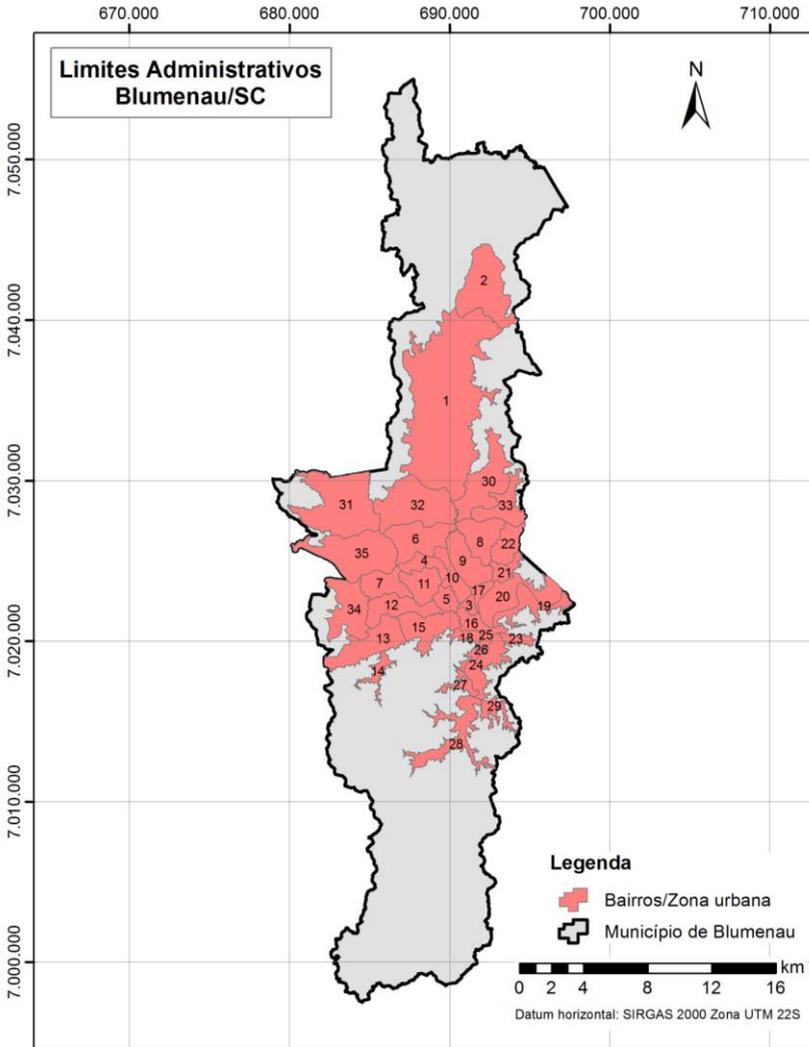
Quadro 14 – Microbacias hidrográficas de Blumenau/SC.

Microbacias de Blumenau/SC			
1	Blumenau	15	Ribeirão da Velha
2	Cabeceiras do Rio Garcia	16	Ribeirão Fidélis
3	Colégio Normal Sagrada Família	17	Ribeirão Fortaleza
4	Córrego Itoupavazinha	18	Ribeirão Fresco
5	Córrego Jensen	19	Ribeirão Kellmann
6	Córrego Rua Brusque	20	Ribeirão Luebke
7	Córrego Tatutiva Três	21	Ribeirão Treze de Maio
8	Córrego Tatutiva Um	22	Rio Garcia
9	Ilha da Bela Vista	23	Rio Itoupava Norte
10	Margem Direita do Rio Itajaí Açu	24	Rio Itoupava Rega
11	Ponta Aguda	25	Rio Salto do Norte
12	Ribeirão Branco, Ribeirão Fundos Pauxfune, Córrego Johann Olf e Salto Weissbach	26	Salto Weissbach
13	Ribeirão Carolina	27	Testo Salto
14	Ribeirão Chelter		

Fonte: Elaborado pela autora.

As análises realizadas no presente trabalho foram aplicadas às zonas urbana e rural de Blumenau/SC, conforme a disponibilidade dos dados. Os dados de topografia, declividade do terreno, hidrografia e mapeamento geotécnico foram aplicados ao município de Blumenau/SC como um todo e os dados das sondagens SPT concentraram-se no limite administrativo dos 35 bairros da zona urbanizada, conforme pode ser visualizado no Mapa 2 e Quadro 15, que identifica os bairros da zona urbanizada do município de Blumenau/SC.

Mapa 2 – Limites administrativos – Blumenau/SC.



Base de dados: Carta Planialtimétrica de Blumenau (2004) 1:10.000
Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

Quadro 15 – Bairros – Zona urbanizada de Blumenau/SC.

Bairros de Blumenau/SC					
1	Itoupava Central	13	Velha Central	25	Jardim Blumenau
2	Vila Itoupava	14	Velha Grande	26	Vila Formosa
3	Victor Konder	15	Velha	27	Valparaíso
4	Salto	16	Centro	28	Progresso
5	Vila Nova	17	Boa Vista	29	Da Glória
6	Salto Norte	18	Bom Retiro	30	Fidélis
7	Salto Weissbach	19	Vorstadt	31	Testo Salto
8	Fortaleza	20	Ponta Aguda	32	Itoupavazinha
9	Itoupava Norte	21	Nova Esperança	33	Fortaleza Alta
10	Itoupava Seca	22	Tribess	34	Passo Manso
11	Escola Agrícola	23	Ribeirão Fresco	35	Badenfurt
12	Água Verde	24	Garcia		

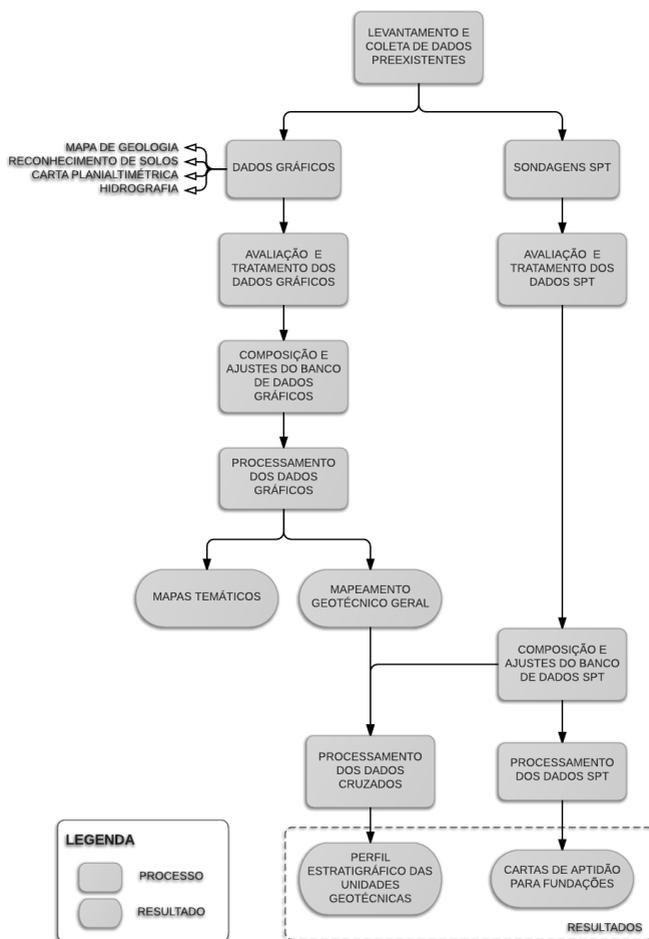
Fonte: Elaborado pela autora.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas de desenvolvimento do trabalho bem como a relação dos dados e processamentos necessários para elaboração dos mapas temáticos, geotécnico e de aptidão para fundações estão apresentadas no presente capítulo.

O método, contemplando desde o levantamento dos dados até o processamento e análise dos resultados, está esboçado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema do método do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

As etapas serão apresentadas e discutidas mais detalhadamente nas seções a seguir.

4.1 LEVANTAMENTO E COLETA DE DADOS PREEXISTENTES

A coleta de dados é uma etapa essencial para o adequado desenvolvimento do trabalho, uma vez que a acurácia e o nível de detalhamento desejados como resultado estão diretamente relacionados com os dados iniciais de entrada. Restringiu-se então o trabalho a fontes de dados obtidas junto a bibliografias e a órgãos oficiais, tendo em vista a maior facilidade de obtenção dos dados para replicação do trabalho associada a maior confiabilidade dos mesmos.

A primeira etapa do método consistiu no levantamento dos dados preexistentes em bibliografias e órgão oficiais. Os dados utilizados para o desenvolvimento dos mapas foram obtidos junto às fontes constantes no Quadro 16:

Quadro 16 – Dados, fontes e escalas.

Prefeitura Municipal de Blumenau (PMB)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri)	Empresas privadas (Construtoras e Empresas de sondagem)
Levantamento planialtimétrico* Escala 1:10.000	Cartas de geologia Escala 1:100.000	Bacias hidrográficas Escala 1:100.000	Laudos de sondagem SPT 50 laudos, 224 furos
Laudos de sondagem SPT 54 laudos, 313 furos	Cartas de solos Escala 1:100.000		

* Outras informações: Limite do município, bairros, curvas de nível e hidrografia

Fonte: Elaborado pela autora.

O banco de dados geotécnico foi coletado em duas etapas: a primeira ocorreu junto a órgãos públicos como a Prefeitura Municipal de Blumenau (PMB), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), que disponibilizaram dados essenciais para elaboração do

Mapeamento Geotécnico Geral. A segunda etapa de coleta teve por objetivo enriquecer o banco de dados de sondagens, e ocorreu junto a empresas privadas do município de Blumenau, Florianópolis e Joinville.

Os levantamentos gráficos obtidos junto à PMB, IBGE e Epagri apresentavam-se no sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator (UTM) - Meridiano Central 51°, Zona UTM 22S, *datum* Horizontal: SAD 69 Chuá (MG), *datum* Vertical: Marégrafo de Imbituba/SC.

Os dados utilizados obtidos junto à PMB e ao IBGE foram cedidos sob Termo de responsabilidade e Termo de cessão de direitos e de uso (Anexos A e B, respectivamente). Os dados da Epagri encontram-se atualmente disponibilizados na web e das empresas privadas foram obtidos via e-mail, contato pessoal e telefônico.

Após o levantamento e coleta dos dados preexistentes, partiu-se para as etapas de avaliação, tratamento e processamento dos dados. Todo processo foi dividido em duas vertentes independentes: a avaliação e o tratamento dos dados gráficos coletados (curvas de nível, hidrografia e limites das zonas administrativas de Blumenau da carta planialtimétrica, mapa de geologia e reconhecimento de solos) e dos laudos de sondagem SPT, conforme apresentado respectivamente nos subitens 4.2 e 4.3.

Os dados do trabalho foram aplicados conforme a disponibilidade de dados. Os dados gráficos concentraram-se no município de Blumenau/SC e os dados das sondagens SPT no limite administrativo dos 35 bairros da zona urbanizada de Blumenau.

4.2 DADOS GRÁFICOS

Inicialmente, a avaliação contemplou verificar a viabilidade de aplicação de ferramentas do tipo SIG nos dados coletados. A análise permitiu filtrar os dados passíveis de serem utilizados para o desenvolvimento dos mapas geotécnico e temáticos e descartar o material dúbio ou inviável de utilização. Após o filtro e conhecendo as necessidades de manipulação, realizou-se o tratamento dos dados para compatibilização com o ambiente SIG.

A metodologia selecionada para desenvolvimento do Mapa Geotécnico Geral de Blumenau foi a de Davison Dias (1995) que, por

meio da superposição de mapas de pedologia com a geologia, interpretada em unidades litológicas, possibilitou a delimitação do solo em estimativa das unidades geotécnicas.

4.2.1 Dados gráficos – Avaliação e tratamento dos dados

Apesar dos dados se apresentarem como vetores (desta forma, manipuláveis), não estavam preparados para serem utilizados em ambiente SIG. Assim, a rotina de tratamento dos mapas previamente publicada por Santos, Thiesen e Higashi (2015) foi utilizada visando a compatibilização dos formatos DGN/DWG (extensão utilizada pelo AutoCAD®) para SHP (extensão utilizada pelo ArcGIS®). Um grande esforço foi dedicado nesta etapa, no qual foram executados os seguintes ajustes:

- Agrupar por temas os elementos homogêneos;
- Dar continuidade às linhas interrompidas/descontínuas;
- Redefinir como polígonos os elementos fechados representados como linhas;
- Efetuar o fechamento dos polígonos;
- Eliminar os elementos duplicados;
- Efetuar o georreferenciamento dos elementos gráficos a partir de coordenadas conhecidas.

Vale destacar que o material obtido junto ao IBGE se encontrava dividido em duas cartas distintas denominadas Blumenau e Botuverá⁸ e o levantamento planialtimétrico estava dividido em 28 articulações, as quais foram unificadas ao final dos tratamentos.

A rotina de tratamento descrita foi aplicada para ajustar principalmente as curvas de nível do levantamento planialtimétrico e as cartas de pedologia e geologia. Após estas adequações, os mapas estavam aptos a serem manipulados em ambiente SIG.

4.2.2 Dados gráficos – Composição e ajustes do banco de dados

De posse dos arquivos e formato DGN/DWG devidamente tratados, determinou-se a projeção a ser utilizada: o sistema de referência geodésico horizontal definido foi o Sistema Universal

⁸ Denominação da divisão administrativa do Projeto Gerenciamento Costeiro (GERCO) do IBGE.

Transverso de Mercator (UTM) na zona 22S, utilizando-se o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas datado em 2000, SIRGAS 2000. O datum vertical utilizado foi o referencial do marégrafo de Imbituba/SC.

Para o desenvolvimento do trabalho, importaram-se os dados gráficos georreferenciados listados no Quadro 17 para o *software* SIG.

Quadro 17 – Informações gráficas tratadas e importadas para o SIG.

Informação gráfica	Descrição	Origem
Bairros	Feições geométricas dos limites geográficos dos bairros de Blumenau.	Levantamento planialtimétrico de Blumenau (PMB)
Hidrografia	Linhas de georreferenciamento dos rios existentes no município de Blumenau.	Levantamento planialtimétrico de Blumenau (PMB)
Curvas de nível	Linhas representando as curvas de nível do município de Blumenau de 5 em 5 m.	Levantamento planialtimétrico de Blumenau (PMB)
Limite do município	Limite geográfico do município de Blumenau.	Levantamento planialtimétrico de Blumenau (PMB)
Limite urbano	Limite geográfico da região urbana de Blumenau.	Levantamento planialtimétrico de Blumenau (PMB)
Microbacias	Feições geométricas das microbacias que se localizam no município de Blumenau.	Bacias hidrográficas (Epagri)
Geologia	Polígonos representando as formações geológicas existentes no município de Blumenau.	Cartas de geologia de Blumenau e Botuverá (IBGE)
Litologia	Unidades geométricas relacionadas com os processos de litificação do solo, obtidas a partir da geologia.	Cartas de geologia de Blumenau e Botuverá (IBGE)
Pedologia	Geometria associada à classificação dos solos de acordo com as suas características físicas, condições hidrogeológicas, geomorfológicas, fenômeno geodinâmico.	Cartas de solos de Blumenau e Botuverá (IBGE)

Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de possibilitar a elaboração do Mapeamento Geotécnico Geral, a cada feição geométrica (descrita no Quadro 17) foram associadas informações relativas à Geologia (Quadro 18) e Pedologia (Quadro 19). Como etapa complementar, informações da Litologia, geradas a partir da Geologia, foram adicionadas ao banco de dados. O procedimento esquemático da análise da Litologia pode ser observado na Figura 11 e o resultado, por meio do Mapa 8.

Quadro 18 – Informações de Geologia e Litologia incorporadas ao banco de dados.

Geologia	Descrição da geologia	Litologia	Sigla
Complexo Luiz Alves (Ala)	Gnaisses granulíticos ortoderivados, de composição cálcio-alcálica predominantemente básica, com porções restritas de formações ferríferas, paragnaisses e outros tipos de rochas.	Gnaisse	gn
Complexo Luiz Alves (Alactc)	Gnaisses granulíticos ortoderivados, de composição cálcio-alcálica predominantemente básica, com porções restritas de formações ferríferas, paragnaisses e outros tipos de rochas, inclusive cataclasitos (ctc).	Gnaisse	gn
Suíte Intrusiva Guabiruba (PSyg)	Sienogranitos, monzogranitos e granodioritos de granulação média ou fina.	Granito	g
Grupo Brusque (PSb)	Rochas metamórficas do fácies xistos verdes (filitos).	Filito	fi
Grupo Itajaí (Psit)	Siltitos, folhelhos silticos, ardósias, arenitos finos, arcósios, arenitos conglomeráticos e conglomerados.	Siltito, folhelho e arenito	s,f,a
Sedimentos Quaternários (QHa)	Sedimentos aluvionares-cascalheiras, areias e sedimentos siltico-argilosos.	Sedimentos quaternários	sq
Sedimentos Quaternários	Sedimentos indiferenciados, colúvio-alúvio-elúvio.	Sedimentos quaternários	sq

Fonte: Elaborado pela autora.

Cadastraram-se, além da formação geológica, a descrição com detalhamento dessa formação, o éon, a era, o período e a época em que ocorreram.

Conforme Davison Dias (1995), nas classificações pedológicas são suprimidas as características húmico (h), álico (a), eutrófico (e) ou distrófico (d), pertencentes ao horizonte A. Devido ao grande número de subdivisões, foi realizada uma generalização taxonômica das unidades de solos, compondo o mapa pedológico por Cambissolo (C), Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) e Litólico (R).

Quadro 19 – Informações de Pedologia incorporadas ao banco de dados.

Unidade pedológica original	Descrição da pedologia	Unidade pedológica generalizada	Generalização pedológica
Ca	Cambissolo álico	C	Cambissolo
Cd	Cambissolo distrófico	C	Cambissolo
PVa	Podzólico Vermelho-Amarelo álico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
PVd	Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
PVLa	Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico álico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
Ra	Solos Litólicos álicos	R	Solos Litólicos

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Dados gráficos – Processamentos dos dados

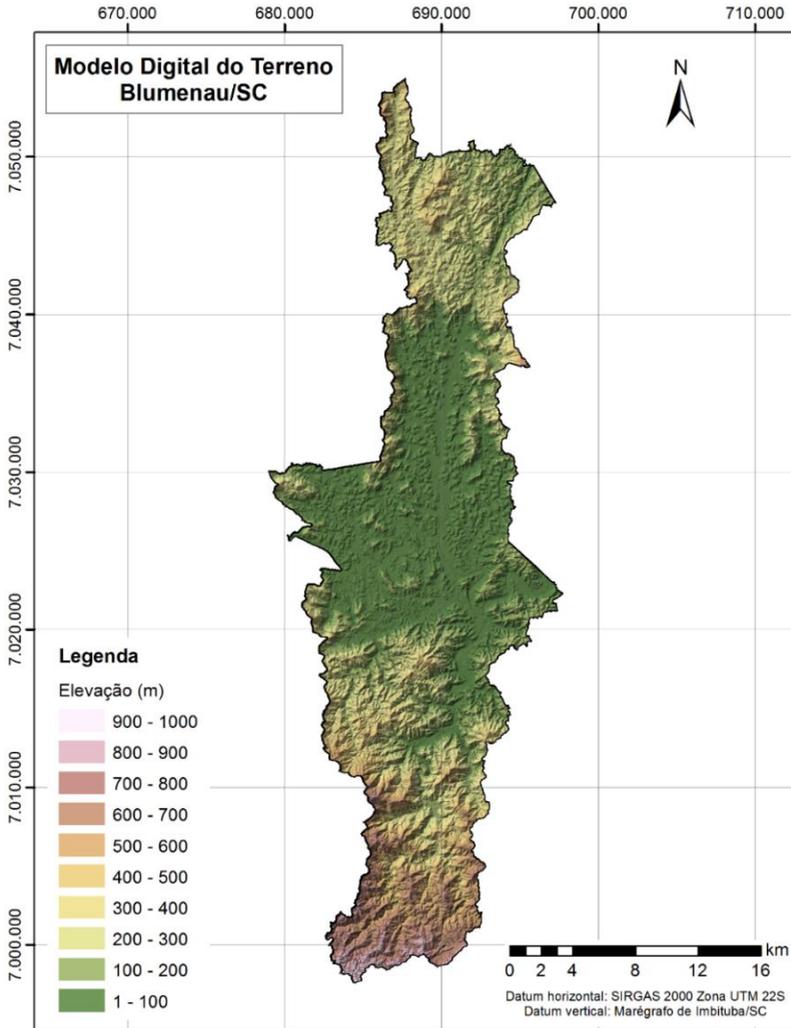
Com todas as informações inseridas no banco de dados SIG, foi possível processar os mapas temáticos e o mapeamento geotécnico, conforme apresentado a seguir.

4.2.3.1 Modelo Digital do Terreno – MDT

O Modelo Digital do Terreno (MDT) foi elaborado para auxiliar na aferição dos resultados obtidos para o Mapeamento Geotécnico Geral e para elaboração dos Mapas de Aptidão para Fundação.

Elaborado a partir do levantamento planialtimétrico fornecido pela PMB, o Mapa 3 apresenta o Modelo Digital do Terreno para Blumenau/SC.

Mapa 3 – Modelo Digital do Terreno – Blumenau/SC.



Base de dados: Carta Planialtimétrica de Blumenau (2004) 1:10.000
Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

O MDT foi desenvolvido por interpolação dos valores de altitude das curvas de nível, com espaçamento da malha⁹ equivalente a 1 m. Em

⁹ Para definição do espaçamento máximo da malha, considerou-se o critério de erro cartográfico admissível equivalente a 0,2 mm, recomendado para desenhos feitos

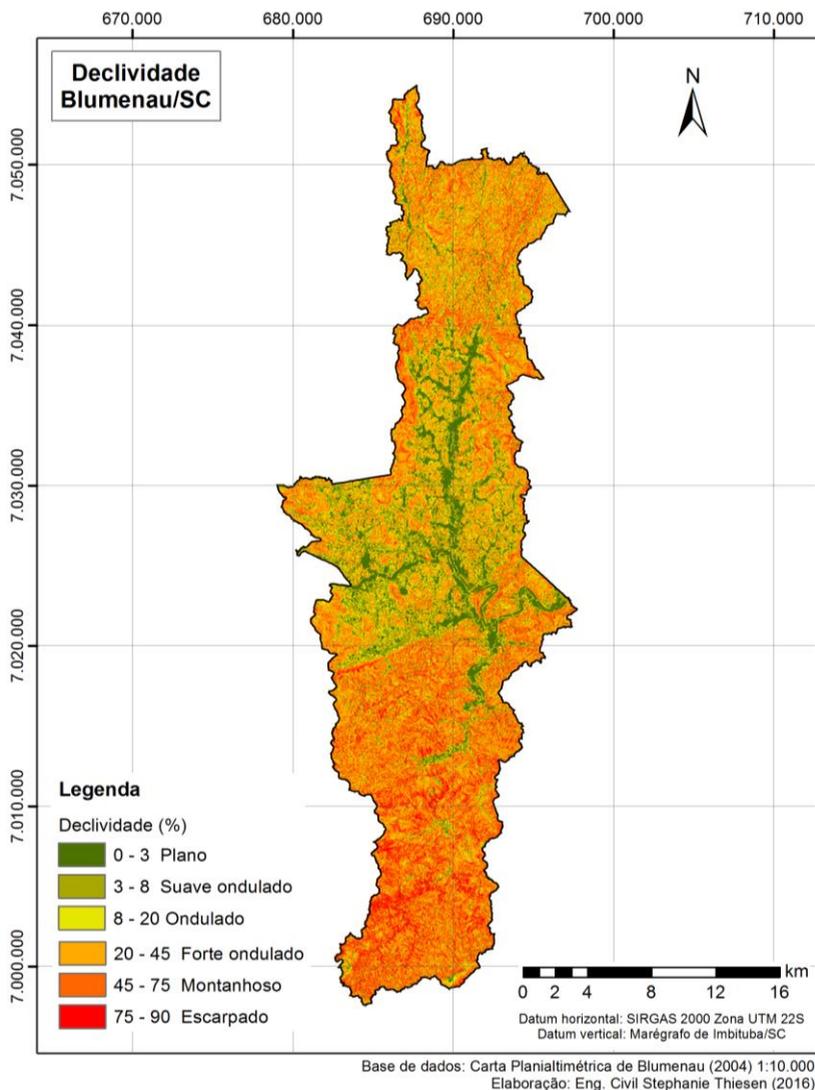
ambiente SIG, a interpolação foi gerada por meio da geração de uma Rede Triangular Irregular (TIN) – triângulos que representam um modelo matemático com valores de altitude.

4.2.3.2 Superfície de declividade – Slope

O mapa de declividade é funcional quando utilizado em conjunto com os demais mapas, permitindo, por exemplo, a verificação da viabilidade de mobilização de equipamentos em um determinado local, análise do risco de deslizamentos do solo, ratificação de informações de composição e origem dos solos. Segundo Higashi (2006), a ocorrência dos solos pode ser estimada também em função da declividade ou cota de elevação.

O mapa de declividade foi gerado a partir da Rede Triangular Irregular das curvas de nível, e pode ser acompanhado no Mapa 4. As declividades do MDT para Blumenau são apresentadas em porcentagem e foram classificadas em seis intervalos distintos conforme sugerido pela Embrapa (1999).

Mapa 4 – Declividade – Blumenau/SC.

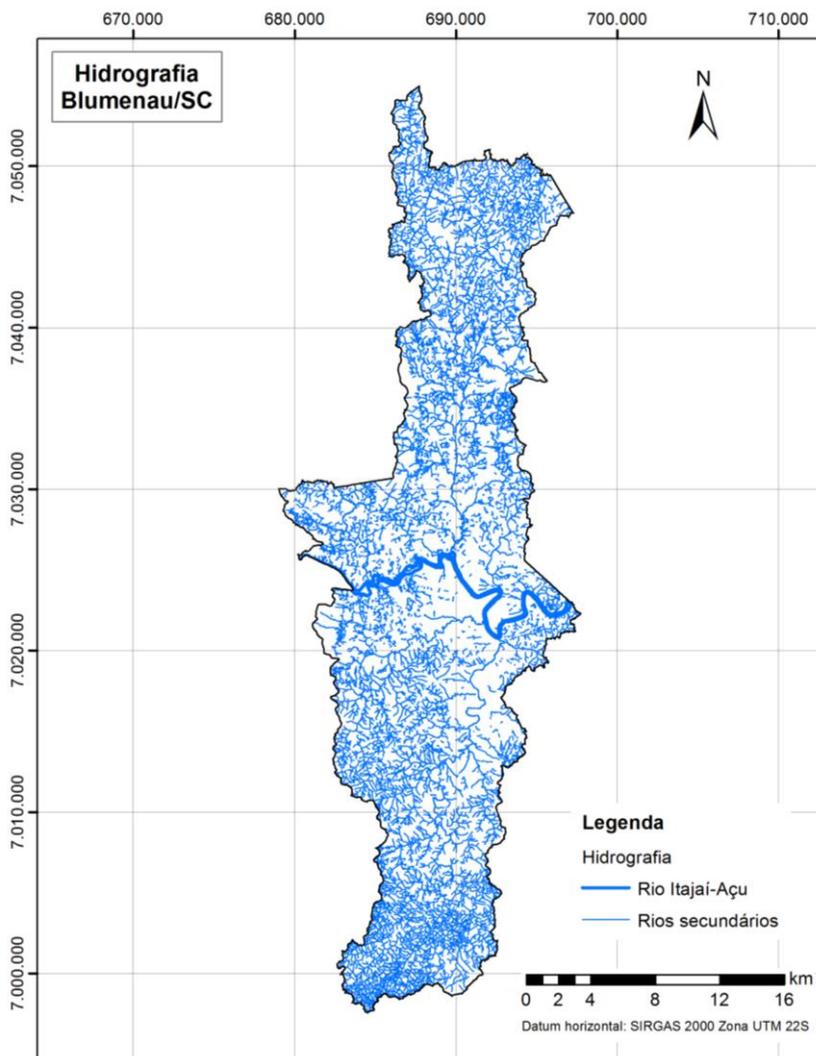


4.2.3.3 Hidrografia

O Mapa de Hidrografia foi utilizado para ratificação de informações de composição e origem dos solos. Para elaboração do

mesmo, importam-se os contornos dos rios, corretamente georreferenciados, para o ambiente SIG, conforme apresentado no Mapa 5.

Mapa 5 – Hidrografia – Blumenau/SC.



Base de dados: Carta Planialtimétrica de Blumenau (2004) 1:10.000
Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

No presente estudo, não houve necessidade de processamento em ambiente SIG para a representação gráfica da hidrografia. As linhas que delimitavam os rios foram importadas diretamente de arquivos vetoriais tipo DGN. Tendo em vista que o rio Itajaí-Açu é o rio de ordem primária da região estudada, apenas esse foi nomeado no banco de dados.

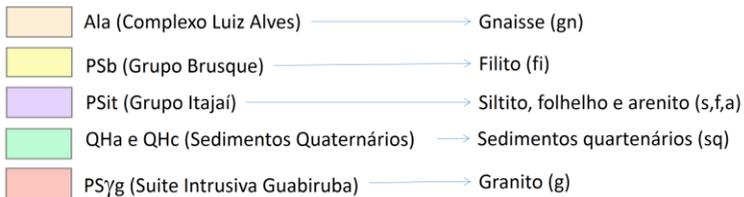
4.2.3.4 Mapeamento geotécnico

A metodologia selecionada para desenvolvimento do mapa geotécnico de Blumenau foi a de Davison Dias (1995) que, por meio da superposição da pedologia com a geologia (litologia predominante), faz a estimativa das unidades geotécnicas.

Os mapas pedológico (Mapa 6), geológico (Mapa 7) e litológico (Mapa 8) foram desenvolvidos em ambiente SIG e estão apresentados a seguir.

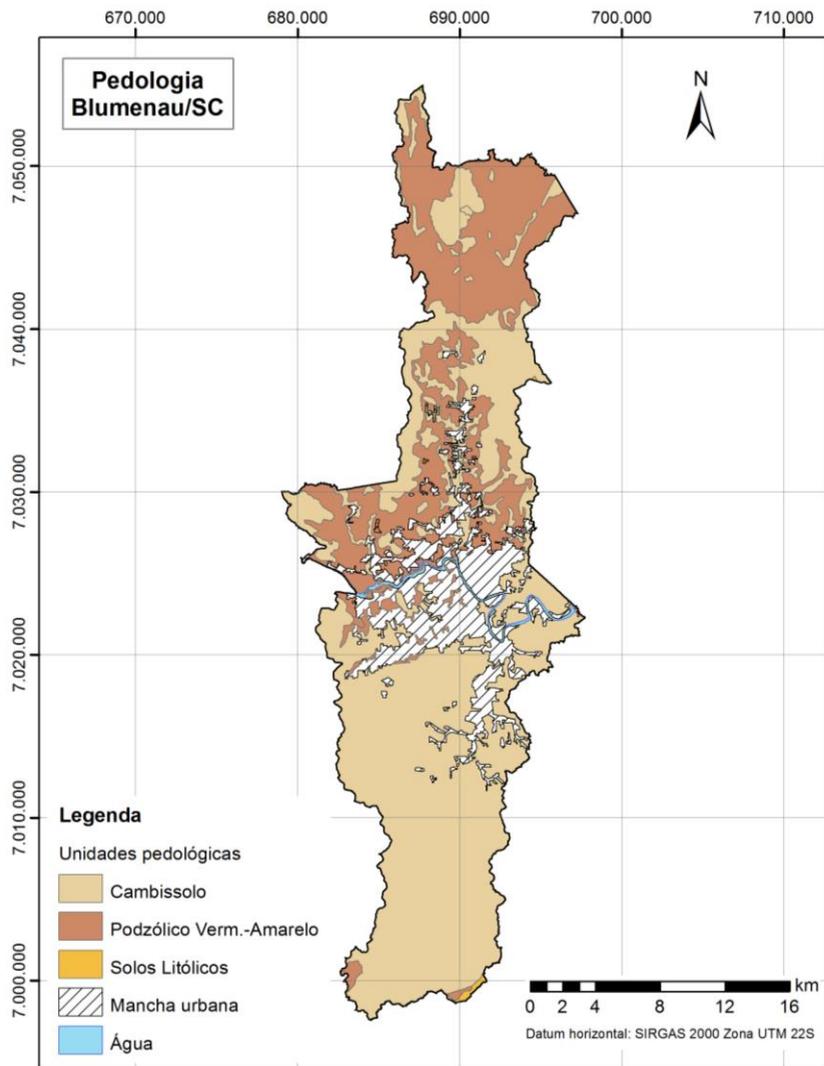
O mapa da litologia (Mapa 8) foi obtido pela decomposição da litologia predominante das formações geológicas apresentadas no Mapa 7, conforme esquemático da Figura 11.

Figura 11 – Associação entre Geologia e Litologia.



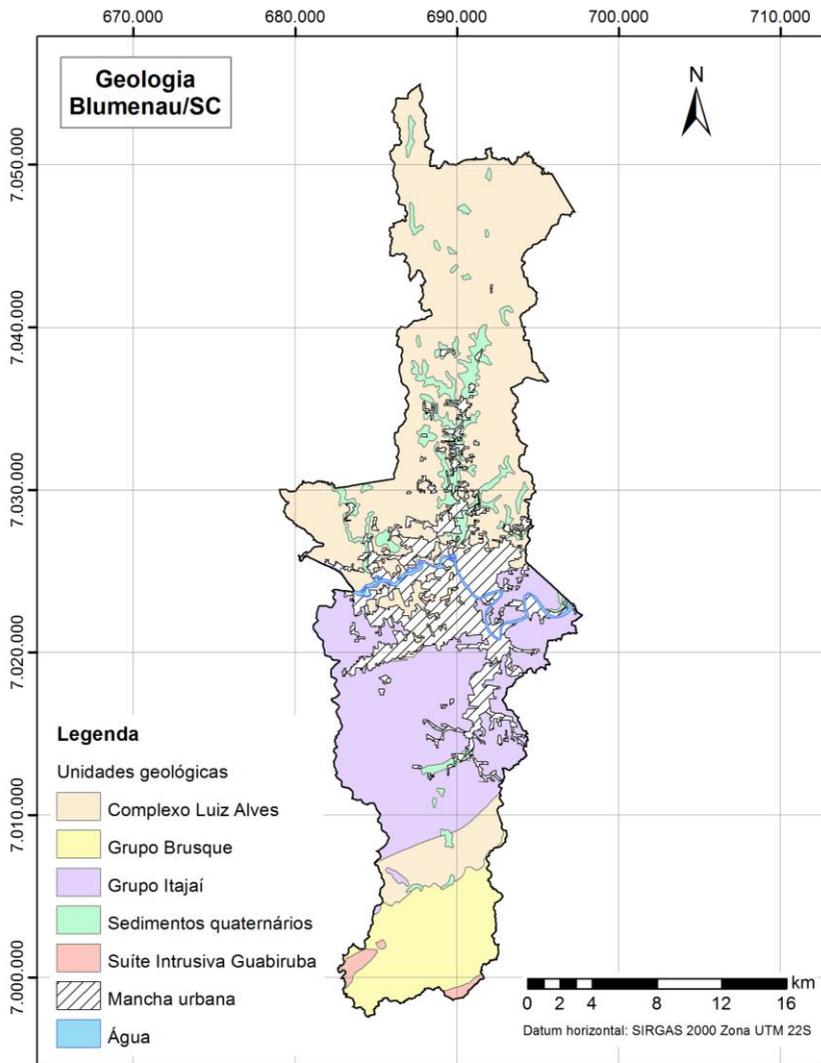
Fonte: Elaborado pela autora.

Mapa 6 – Pedologia – Blumenau/SC.



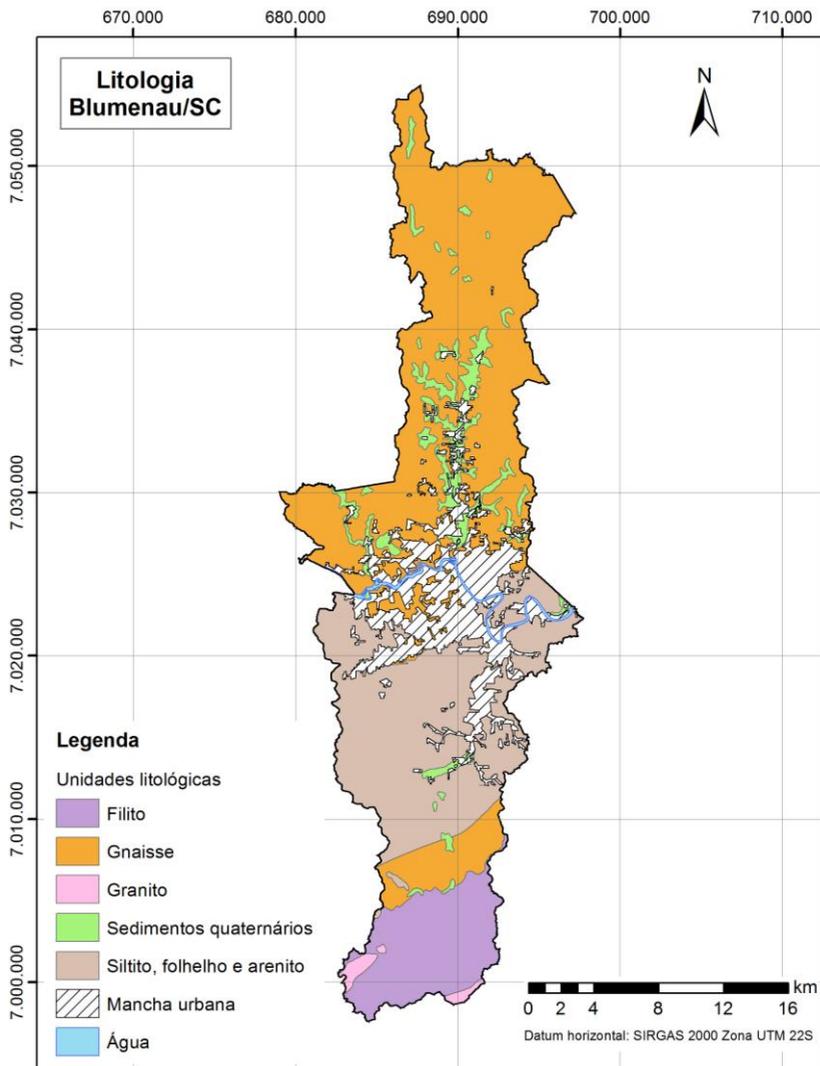
Base de dados: Reconhecimento de Solos Blumenau e Botuverá - Projeto GERCO IBGE (2003) 1:100.000
Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

Mapa 7 – Geologia – Blumenau/SC.



Base de dados: Geologia Blumenau e Botuverá - Projeto GERCO IBGE (2003) 1:100.000
 Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

Mapa 8 – Litologia – Blumenau/SC.



Base de dados: Geologia Blumenau e Botuverá - Projeto GERCO IBGE (2003) 1:100.000
Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

Após o cruzamento, com a obtenção do mapa geotécnico preliminar, procedeu-se com os ajustes finos do mapa. Nesta etapa, buscou-se por inconsistências na união dos dados pedológicos com os litológicos quanto ao tipo de solo originado da rocha.

As unidades inconsistentes identificadas no trabalho somaram 5,1% da área total do município e estão listadas e discutidas no Quadro 20.

Quadro 20 – Unidades inconsistentes do Mapa Geotécnico Preliminar.

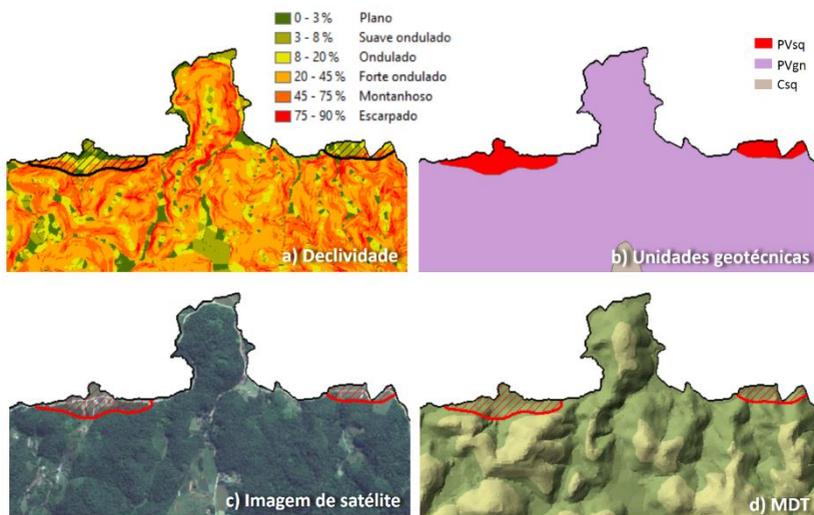
Unidade geotécnica	Área	Sobre a inconsistência
Cambissolo substrato sedimentos quaternários (Csq)	26,2 km ² (5%)	<p>O Cambissolo, por apresentar um horizonte B incipiente e possuir um elevado teor de minerais primários em seu horizonte C, normalmente não é originado de sedimentos quaternários. Este substrato se faz presente no Cambissolos, como característica de solos aluvionares e coluvionares.</p> <p>No caso deste estudo, espera-se que o Cambissolo seja proveniente de granito, gnaiss, filito, siltito, folhelho ou arenito. Em situações específicas, em sopé de encostas por depósitos coluvionares ou talvegues secos por depósitos aluvionares, é possível que o Cambissolo apresente substrato composto de sedimentos quaternários.</p>
Podzólico Vermelho-Amarelo substrato sedimentos quaternários (PVsq)	0,7 km ² (0,1%)	<p>Solos da classe Podzólico Vermelho-Amarelo possuem um horizonte B textural e possuem um elevado teor de minerais primários em seu horizonte C, normalmente não é originado de sedimentos quaternários. Este substrato se faz presente no Podzólicos, como característica de solos aluvionares e coluvionares.</p> <p>No presente estudo, espera-se que essa classe seja proveniente de granito, gnaiss, filito, siltito, folhelho ou arenito. Em situações específicas, em sopé de encostas por depósitos coluvionares ou talvegues secos por depósitos aluvionares, é possível que o Podzólico Vermelho-Amarelo apresente substrato composto de sedimentos quaternários.</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo Higashi (2006), a existência destas unidades geotécnicas não é comum e, portanto, foram analisadas individualmente nesta dissertação. Conforme prescrito por Davison Dias (1995), as variações do relevo e a geologia servem como indicadores das unidades geotécnicas. Assim, para a análise de regiões de interseção que apresentaram inconsistência, feições topográficas (Mapa 3), declividade (Mapa 4), imagens de satélite, hidrografia (Mapa 5), litologia (Mapa 8), pedologia (Mapa 6) e laudos de sondagem SPT auxiliaram no tratamento das inconsistências.

As unidades de solo Podzólico Vermelho-Amarelo substrato sedimentos quaternários (PVsq) localizadas em sopé de encostas, por serem classificadas como de origem coluvionar, foram reclassificadas para a unidade Podzólico Vermelho-Amarelo substrato depósito de encostas (PVde). As análises realizadas e a visão geral de um exemplo da unidade estão esquematicamente ilustradas na Figura 12.

Figura 12 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – PVsq → PVde.



Fonte: Elaborado pela autora.

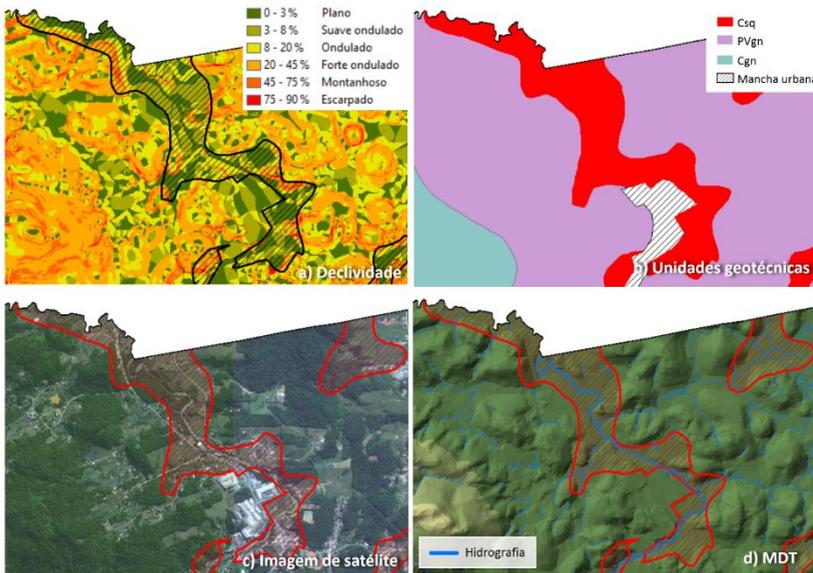
As unidades de Cambissolo substrato sedimentos quaternários (Csq), em sua grande maioria, foram encontradas nas seguintes condições: localizadas em regiões com declividade de plana a ondulada,

com entorno composto por PVgn, em sopé de encostas e seguindo talvegues de rios (canal de drenagem).

Para corrigir a inconsistência, foram analisadas as sondagens de regiões próximas a estes locais (Csq) ou em locais com características semelhantes de declividade e relevo (Figura 14), que confirmavam se tratar de um solo de baixo N_{SPT}^{10} , nível de água próximo da superfície, solos de coloração marrom e cinza. Finalmente, pelas características gerais de localização e declividade associadas às informações de sondagens, tais unidades foram reclassificadas como Gleis substrato sedimentos quaternários (GHSq).

A Figura 13 apresenta uma exemplificação da situação analisada e a Figura 14 laudos de sondagem de locais com características semelhantes às mencionadas.

Figura 13 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – Csq → GHSq.



Fonte: Elaborado pela autora.

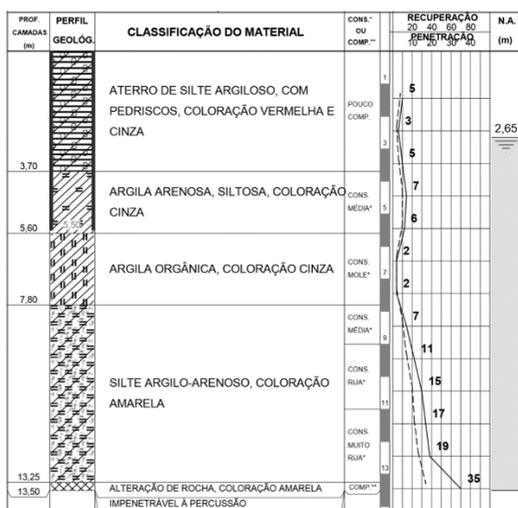
¹⁰ N_{SPT} : abreviatura do índice de resistência à penetração do SPT, cuja determinação se dá pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm (NBR 6484:2001).

Figura 14 – Sondagens SPT em região de condição semelhante à unidade Csq.

Sondagem SPT (Grupo 41)



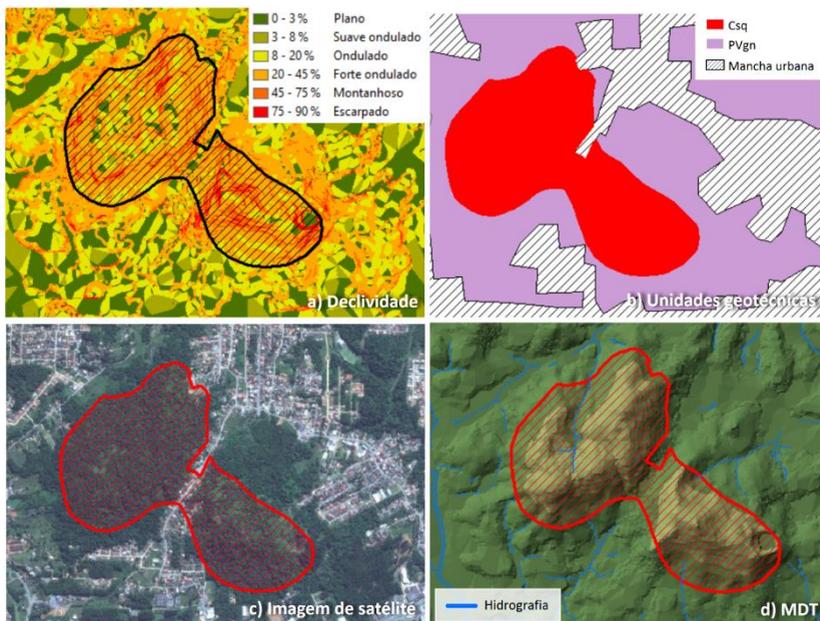
Sondagem SPT (Grupo 81)



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma área que se apresentava como Cambissolo substrato sedimentos quaternários (Csq) foi reclassificada como Cambissolo substrato gnaiss (Cgn). A região englobava toda elevação de um morro, confirmando a pedologia Cambissolo, que se repetia nos arredores, e desconfigurando a possibilidade de colúvio, e estava envolta por substrato gnaiss, conforme pode ser ratificado na Figura 15.

Figura 15 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – Csq → Cgn.



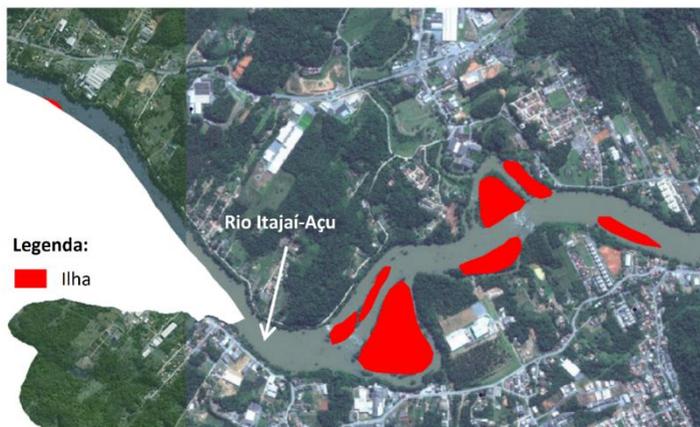
Fonte: Elaborado pela autora.

Uma unidade denominada Ilha (Figura 16) foi adicionada ao mapeamento geotécnico para identificar os depósitos de sedimentos localizados no meio do rio, pré-classificados anteriormente como Cambissolo ou Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato sedimentos quaternários pelos mapas de geologia e reconhecimento de solos do GERCO/IBGE (Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro).

Devido a funcionalidade do mapeamento geotécnico de auxiliar o entendimento das cartas de fundação no presente trabalho, não foi necessário realizar ajustes finos de contorno das unidades geotécnicas conforme relevo. A decisão foi tomada uma vez que o tempo despendido em tal etapa não compensaria os benefícios do ajuste para a análise aqui desenvolvida.

Finalmente, após os devidos ajustes, obteve-se a versão final do mapeamento geotécnico para o município de Blumenau/SC.

Figura 16 – Ajustes do mapeamento geotécnico preliminar – Csq/PVsq → Ilha.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 SONDAGENS SPT

Os procedimentos utilizados para composição e organização do banco de dados de sondagem SPT bem como para o desenvolvimento dos mapas de aptidão para fundação estão detalhados a seguir.

4.3.1 SPT – Avaliação e tratamento dos dados

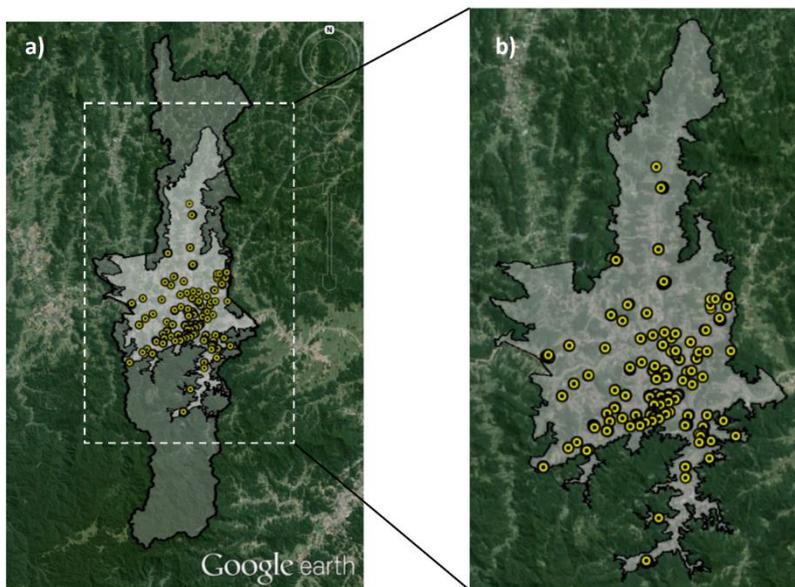
Especificamente para as sondagens SPT, houve a necessidade de um tratamento preliminar anterior à montagem do banco de dados. Por se tratarem de dados disponibilizados em diferentes formatos (em versão digital como PDF, DWG e JPG e também em versão impressa), houve a necessidade de avaliação e tratamento de cada laudo de sondagem individualmente.

Tendo em vista que a maioria dos laudos não continha as coordenadas geográficas, a primeira triagem do material foi realizada por meio do georreferenciamento de todos os furos de sondagem com o auxílio do Google Earth®. Para esta etapa, utilizou-se o endereço, o croqui e muitas vezes o nome do empreendimento constante nas informações de cabeçalho do laudo como referência para obtenção da localização mais provável do furo. A ferramenta de linha do tempo do Google Earth®, combinada com a data da realização do furo de

sondagem, também foi empregada em alguns casos. Em média, cada laudo era composto por um grupo de 5 furos de sondagem.

Do total de 568 furos obtidos na coleta de dados, 31 (5%) foram descartados devido à falta de informação para o adequado georreferenciamento ou porque tratavam-se de furos que foram interrompidos por atingirem um matacão ou interrompidos antes de atingir o impenetrável. O resultado obtido para os 537 furos selecionados após os procedimentos citados pode ser observado no Mapa 9.

Mapa 9 – Georreferenciamento dos 537 furos de sondagem. a) Blumenau/SC. b) Zona urbana de Blumenau/SC.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da plotagem dos furos em um mapa contendo os limites do município (Mapa 9a), foi possível visualizar que todas as sondagens selecionadas se encontravam dentro limite urbano de Blumenau/SC (Mapa 9b). Observação essa esperada, uma vez que o maior volume de obras civis ocorre na zona urbanizada do município e que os laudos se tratavam de sondagens de edificações.

Tendo em vista a comprovação visual da concentração das informações no limite urbano de Blumenau/SC, definiu-se essa região como a área de abrangência do trabalho em termos de cartas de fundação. O maior interesse e potencial de construção na região urbanizada também corroborou tal decisão.

Com os furos georreferenciados, partiu-se para a elaboração e organização de um banco de dados de sondagem SPT, conforme exposto na subseção 4.3.2.

4.3.2 SPT – Composição e ajustes do banco de dados

A composição do banco de dados depende diretamente dos resultados almejados e sua estrutura deve garantir que o *software* no qual os dados serão processados faça a leitura desses dados de entrada (*inputs*) adequadamente.

Assim, para o processamento dos dados de sondagem, foi necessária a criação de um banco de dados alfanumérico compatível com ambiente SIG, contendo dados que permitissem o desenvolvimento das análises desejadas. Informações como as coordenadas geográficas do furo, localização do impenetrável e nível de água foram *inputs* básicos para o desenvolvimento de mapas que reflitam superfícies de profundidade do impenetrável à percussão e do nível de água.

Para análises mais detalhadas, como a elaboração de cartas de indicativo de fundação ou mapas de isovalores de tensão admissível do solo, por exemplo, fez-se necessário inserir o N_{SPT} dos furos para cada metro de profundidade de forma que, por interpolação, se pudesse obter uma superfície a partir dos pontos de entrada.

O banco de dados foi elaborado em dois momentos. O primeiro ocorreu após o georreferenciamento dos furos, onde os dados exclusivamente constantes dos laudos de sondagem foram digitalizados manualmente em uma planilha eletrônica e posteriormente associados às coordenadas geográficas da etapa de georreferenciamento. Esse material foi organizado conforme apresentado e descrito no Quadro 21.

Quadro 21 – Composição inicial do banco de dados de sondagem – Estrutura e descrição dos campos.

Campo	Descrição
ID_furo	Número de identificação de cada furo contido no laudo de sondagem.
Grupo	Número de identificação do laudo, ou seja, do grupo de furos em um mesmo laudo, representando um terreno. A cada grupo está associado um furo que representa o laudo como um todo.
X	Coordenadas UTM da longitude em WGS-84 ¹¹ do furo (em metros).
Y	Coordenadas UTM da latitude em WGS-84 do furo (em metros).
Data	Data do furo de sondagem (DD/MM/AAAA).
h_Impen	Profundidade do impenetrável no furo de acordo com a NBR 6484. Obtida considerando a cota inicial do furo igual a zero (em metros).
h_NA	Profundidade do nível de água do furo de acordo com a NBR 6484. Obtida considerando a cota inicial do furo como igual zero (em metros).
Obs	Utilizado para inserir informações do furo que possam auxiliar a compreensão do comportamento dos resultados. Normalmente utilizado para casos que necessitam de uma análise mais criteriosa no pós-processamento.
Nspt23_Xm	Número de golpes dos 30 cm finais (N_{SPT}) da sondagem SPT para a profundidade X do furo. Com X variando de 1 m até a profundidade do impenetrável do furo.
Prof_Xm	Profundidade do furo. O valor está associado ao Nspt23_Xm, representando o "X" (a profundidade onde ocorreu o Nspt23_Xm). Com X variando de 1 m até a profundidade do impenetrável do furo.

Fonte: Elaborado pela autora.

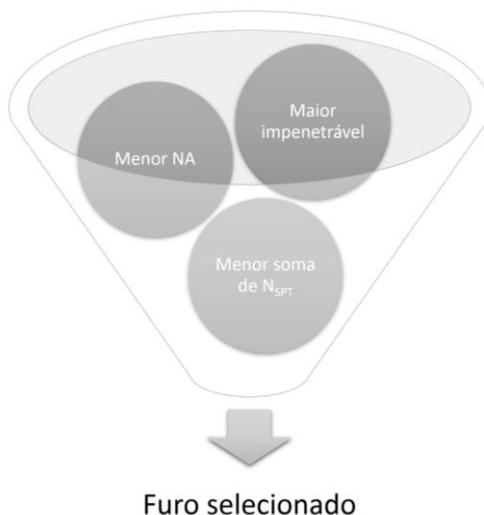
A fim de garantir uma interpolação consistente e que todas as sondagens fossem consideradas nas diferentes profundidades analisadas, adotou-se por padrão um $N_{SPT} = 50$ abaixo do impenetrável. Desta forma, os campos de N_{SPT} abaixo do impenetrável não permaneceram vazios no banco de dados. A intenção foi considerar todas as sondagens no modelo matemático, mesmo que já se tivesse atingido o impenetrável, independentemente da profundidade analisada nos mapas. O valor teve como base o critério de paralisação da sondagem que prevê o impenetrável quando um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação.

¹¹ Sistema de coordenadas adotado pelo Google Earth®

Cada laudo de sondagem é composto por um conjunto de furos, que representam um terreno. Dentre os furos de cada laudo, selecionou-se um que representasse esse grupo de furos para posterior simulação. Esta etapa foi necessária pois a concentração de pontos em um único terreno, frente à distância dos demais terrenos, não favorece a modelagem numérica das superfícies. Assim, a fim de possibilitar a utilização de pontos de sondagem com uma melhor distribuição espacial, a seleção do furo representativo de cada Grupo ocorreu em um cenário mais conservador, considerando o furo crítico em termos de fundação, conforme os critérios elencados e esquematizados na Figura 17.

- Selecionar o furo com maior profundidade de impenetrável;
- No caso de semelhança, dentre os furos com maior profundidade de impenetrável, selecionar o furo com NA de menor profundidade;
- No caso de semelhança da maior profundidade de impenetrável e menor profundidade de NA, selecionar o furo com menor soma de NSPT em toda a extensão do furo.

Figura 17 – Critérios de seleção do furo crítico do Grupo.



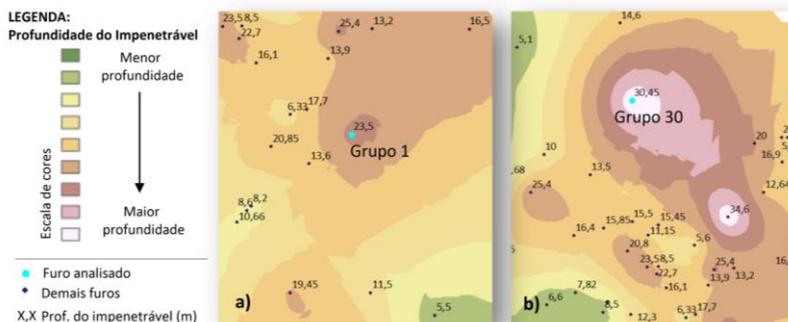
Fonte: Elaborado pela autora.

No total, os 357 furos de sondagens foram resumidos em 104 grupos.

Durante e após a digitalização desses campos no banco de dados, prosseguiu-se com a realização de ajustes finos, conforme explanado a seguir. Nesse processo de ajuste, buscou-se contato com as empresas que executaram as sondagens para esclarecimento de dúvidas. Nos casos em que não se teve retorno, algumas decisões de padronização para evitar o descarte dos dados foram realizadas.

Em relação aos relatórios de sondagem que não atingiram o impenetrável, utilizou-se como referência para o impenetrável o limite da sondagem. Adotou-se o procedimento em dois grupos de furos (Grupo 1 e 30), uma vez que essas sondagens chegaram a uma profundidade acima da média em comparação aos demais furos (23,5 m e 30,45 m, respectivamente, sendo a média 9 m) e N_{SPT} nesta profundidade última também com valores relativamente elevados (27 golpes e acima de 30 golpes, respectivamente). Ademais, conforme pode ser analisado na Figura 18, os valores de impenetrável na região de entorno desses grupos apresentaram um impenetrável menos profundo que o dos furos em questão. Em termos de compreensão do comportamento do impenetrável na região, a manutenção desses grupos no banco de dados eleva o valor da profundidade do impenetrável nesses trechos, uma vez que, pelos valores numéricos e pela escala de cores da Figura 18, é possível perceber que os dois grupos apresentam um impenetrável mais profundo que o seu entronos, o que acarreta em um melhor ajuste à realidade da superfície do impenetrável se comparado à opção de não incluir esses dados. Quando da incorporação de novos dados próximos aos Grupos 1 e 30, é então justificável a remoção dos mesmos do banco de dados.

Figura 18 – Análise dos furos que não atingiram o impenetrável. a) Furo do grupo 1. b) Furo do grupo 30.



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma atenção especial foi dada aos furos que apresentavam a profundidade do NA como sendo igual a zero (ou seja, NA se apresentava aflorando na superfície do terreno), uma vez que esse valor poderia representar uma falha de preenchimento do laudo do furo. Nesses casos, o NA dos furos duvidosos foram comparados com o dos furos das proximidades e combinado com o perfil de elevação do terreno. Dois grupos de furos apresentaram tal característica, em um deles (Grupo 15) o furo foi mantido com NA=0,01 m, uma vez que o terreno estava em um local plano, sendo possível então que o nível de água estivesse aflorando na superfície do terreno. No segundo caso houve ratificação de todos os NA dos furos do Grupo 70, com análise baseada no perfil do terreno e NA dos furos adjacentes. Tendo em vista que o terreno estava localizado em uma região inclinada e que os arquivos recebidos estavam em formato vetorial (DWG) e apresentavam demarcação do NA no desenho a 3,5 m de profundidade, alterou-se o valor do NA para essa profundidade.

Para os furos nos quais não foi encontrado nível do lençol freático por toda a profundidade de escavação (furo “seco”), adotou-se como NA a profundidade do impenetrável. Este ajuste foi necessário para que todos os furos coletados fossem considerados no modelo matemático, ou seja, para que o “furos secos” não estivessem no banco de dados com parâmetros vazios de NA. A decisão foi tomada uma vez que as análises desenvolvidas no presente trabalho não ultrapassam a profundidade do

impenetrável, aliado ao fato de que a alocação do NA dos furos secos junto ao impenetrável resulta no maior valor de profundidade conhecido do furo, não prejudicando a malha da superfície do NA em termos de orientação.

Após esses ajustes finais, em um segundo momento, novos campos foram adicionados ao banco de dados SPT em ambiente SIG. Tomando como referência a localização planimétrica dos furos de sondagem, para cada furo foram extraídas a respectiva cota topográfica (a partir do MDT, Mapa 3), as características de declividade (a partir da superfície de declividade, Mapa 4) e as unidades geotécnicas (a partir do mapeamento geotécnico, Mapa 10). Por meio deste cruzamento, os parâmetros “Z”, “SlopePerc”, “MAP_GEOTEC” foram diretamente obtidos. Estes novos campos foram incorporados à estrutura do banco de dados SPT do Quadro 21, conforme identificado no Quadro 22.

Quadro 22 – Composição do banco de dados de sondagem SPT – Estrutura e descrição dos campos adicionais.

Campo	Descrição
Z	Cota/Nível do terreno na localização planimétrica do furo (em metros), com <i>datum</i> vertical no marégrafo de Imbituba/SC. Obtido pelo cruzamento da localização do furo de sondagem com o MDT, o parâmetro representa a cota inicial do furo.
z_Impen	Cota/Nível do impenetrável do furo (em metros), com <i>datum</i> vertical no marégrafo de Imbituba/SC. Obtida pela subtração da cota inicial do furo com a profundidade do impenetrável do furo (Z - h_Impen).
z_NA	Cota/Nível da água do furo (em metros), com <i>datum</i> vertical no marégrafo de Imbituba/SC. Obtida pela subtração da cota inicial do furo com a profundidade do nível de água do furo (Z - h_NA).
SlopePerc	Declividade do terreno (em %). Obtida pelo cruzamento da localização do furo de sondagem com Mapa de declividade.
MAP_GEOTEC	Unidade geotécnica do furo. Obtida pela intersecção das informações do Mapeamento Geotécnico com as coordenadas geográficas do furo.

Fonte: Elaborado pela autora.

Um campo direcionado para anotações de observações que se julgavam importantes, como os ajustes finos realizados nos furos secos

e furos que não atingiram o impenetrável, foi criado no banco de dados SPT. Tal iniciativa teve por finalidade facilitar o controle e o acesso à informação, manter um histórico e possibilitar uma possível análise cruzada em processamentos futuros. A tabela de atributos final é apresentada no Quadro 23.

Quadro 23 – “Tabela de atributos” das sondagens extraída no ArcGIS®.

JoinSPTtotal4_MG									
ID_furo	Grupo	X	Y	Data	h Impen	h NA	Obs	Prof 1m	Nspt23 1m
D_furo184	30	69041	702923	14/07/2010	26,6	0,6		1	5
D_furo185	30	69044	702923	05/07/2010	20,65	0,7		1	4
D_furo186	30	69042	702925	06/07/2010	20,18	1,3		1	4
D_furo187	30	69039	702927	30/06/2010	30,45	0,5	não atingiu o impenetrável	1	4
D_furo188	30	69043	702928	07/07/2010	20,2	0,8		1	4
D_furo189	30	69038	702932	05/07/2010	30,45	0,4	não atingiu o impenetrável	1	4
D_furo190	30	69043	702932	02/07/2010	30,45	0,45	não atingiu o impenetrável	1	2
D_furo191	30	69040	702931	01/07/2010	30,45	1	não atingiu o impenetrável	1	3
D_furo192	30	69047	702931	08/07/2010	24,8	24,8		1	4
D_furo193	30	69048	702928	09/07/2010	24,5	24,5		1	5
D_furo194	30	69052	702930	12/07/2010	20,6	20,6		1	5
D_furo195	30	69046	702926	12/07/2010	30,45	0,01	não atingiu o impenetrável	1	6

JoinSPTtotal4_MG						
ID_furo	Z	SlopePerc	Zimp	Zna	UNID_MG	MAP GEOTEC
D_furo184	15	8,891459	-11,6	14,4	Mancha urbana	Mancha urbana
D_furo185	22,735895	133,387482	2,0859	22,0359	Mancha urbana	Mancha urbana
D_furo186	15,727058	44,190434	-4,45294	14,4271	Mancha urbana	Mancha urbana
D_furo187	14,360636	3,38245	-16,08939	13,8606	Mancha urbana	Mancha urbana
D_furo188	20,241587	57,376598	0,041587	19,441601	Mancha urbana	Mancha urbana
D_furo189	19,368343	27,590441	-11,0817	18,9683	Csa	Cambissolo substrato sedimentos aluvionares
D_furo190	14,770981	3,230017	-15,679	14,321	Pv/gn	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss
D_furo191	15,71175	27,590504	-14,7382	14,7118	Csa	Cambissolo substrato sedimentos aluvionares
D_furo192	25,382854	14,24797	0,582854	0,582854	Pv/gn	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss
D_furo193	28,521404	14,935974	4,0214	4,0214	Mancha urbana	Mancha urbana
D_furo194	28,236752	11,224442	7,63675	7,63675	Pv/gn	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss
D_furo195	29,223051	26,165752	-1,22695	29,2131	Mancha urbana	Mancha urbana

Fonte: Elaborado pela autora.

Na estruturação do banco de dados sugerida (Quadro 23), cada linha representa um furo de sondagem que está associado às seguintes informações: código identificador; coordenadas geográficas; data da sondagem; cota do furo; profundidade e cota do impenetrável e nível de água; N_{SPT} e respectiva profundidade; declividade do terreno no local do furo; unidade geotécnica no local do furo.

Informações como número de identificação do furo, grupo e observação foram utilizadas para facilitar o gerenciamento dos furos recebidos e reduzir erros de manipulação e processamento.

Alguns campos não foram utilizados para obtenção de resultados no presente trabalho, mas foram incorporados a fim de viabilizar análises futuras, quando um maior número de laudos for disponibilizado para a região. É o exemplo da data da realização do laudo de sondagem,

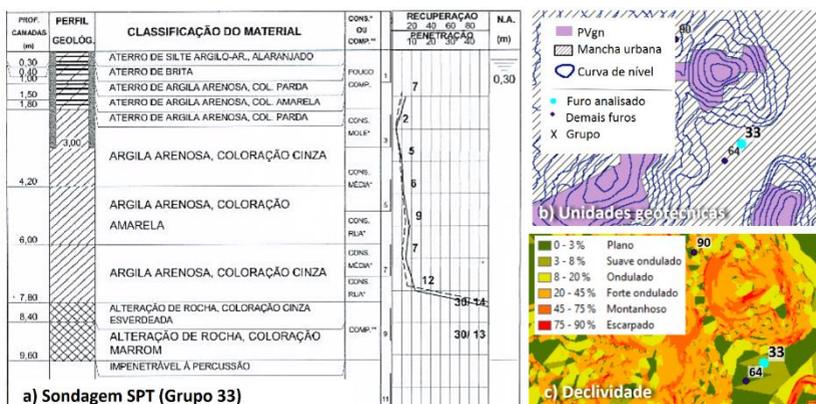
informação crucial para análise temporal da linha de nível de água, caso fosse estudada. Vale salientar que, conforme o interesse de análise e resultados, outros campos podem ser incorporados ao banco de dados, como as características de cor, compacidade e granulometria das amostras de solo da sondagem.

Tendo em vista o interesse em associar as informações de mapeamento geotécnico com o comportamento geomecânico obtido pelos laudos de sondagem, os furos onde não houve informações de pedologia e litologia para identificação geotécnica automática por localização, por se tratarem de pontos situados em Mancha urbana, foram classificados manualmente e individualmente. Assim, para os pontos cuja classificação obtida no campo “MAP_GEOTEC” foi “Mancha urbana”, análises mais detalhadas do perfil do furo de sondagem SPT foram realizadas.

Para a classificação da Mancha urbana com base no perfil do solo, observaram-se a composição e cor do solo, a profundidade do impenetrável, o nível de água do lençol freático, o relevo e a unidade geotécnica do entorno mais próximo. No total, 83 dos 104 grupos (80%) não possuíam classificação geotécnica, pois encontravam-se localizados em Mancha urbana.

A Figura 19 apresenta um esquema deste tipo de análise.

Figura 19 – Análise para classificação geotécnica pelo laudo de sondagem.



Fonte: Elaborado pela autora.

O Grupo 33 exposto na Figura 19, por exemplo, foi classificado como Glei substrato sedimentos quaternários conforme a seguinte análise. O laudo de sondagem (Figura 19a) indicou solo de baixa resistência N_{SPT} , nível de água próximo à superfície e solos de coloração parda e cinza, características associadas a solos do tipo Glei substrato sedimentos quaternários. Considerando que o relevo e declividade indicam os limites de abrangência das unidades geotécnicas, esse grupo encontrava-se fora da possível abrangência da unidade PVgn, por estar localizado além das curvas de nível que delimitam tal unidade (Figura 19b) e em região de declividade plana a suave ondulada (Figura 19c). A mesma análise foi realizada para cada um dos 83 grupos que se encontravam em Mancha Urbana.

Realizou-se também a conferência da classificação automática dos demais furos (classificados em unidades geotécnicas diferentes da “Mancha urbana”) para averiguar a existência de inconsistências. Devido a inviabilidade de classificação de algumas sondagens, uma vez que apresentavam características de solos residuais e sedimentares concomitantemente ou porque não condiziam com a classificação do cruzamento com o Mapeamento Geotécnico, sete grupos de sondagem foram desconsiderados para elaboração do perfil estratigráfico das unidades geotécnicas.

O quantitativo das classificações realizadas pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação geotécnica da sondagem SPT.

Unidade geotécnica	Quantidade de Grupos	
	Inicial*	Final**
GHsq	5	57
PVgn	5	21
Cs,f,a	6	16
Cgn	4	2
PVs,f,a	1	1
Mancha urbana	83	0
TOTAL	104	97

* Classificação automática pelo cruzamento do Mapeamento Geotécnico com os laudos de sondagem SPT

** Após a classificação manual das sondagens

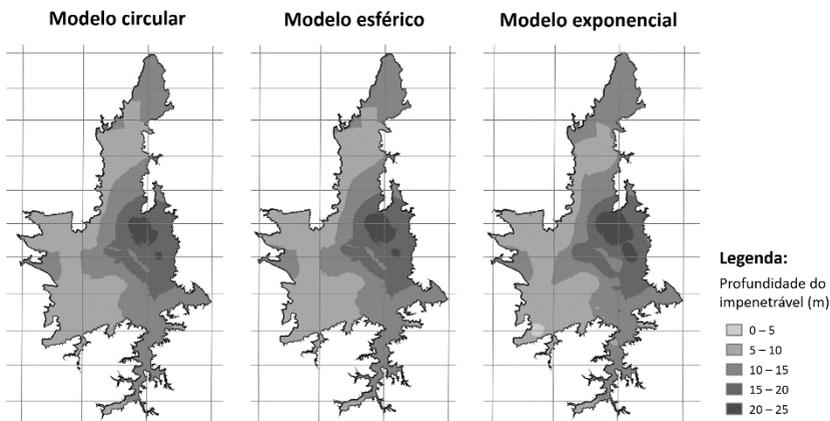
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.3 SPT – Processamento dos dados

As interpolações de superfícies do solo (nível de água, profundidade do impenetrável e mapas de tensões) foram baseadas no modelo de krigagem exponencial, por ser um dos modelos muito utilizados na literatura de ciências do solo (PESCIM, URBANO e DEMÉTRIO, 2010).

Conforme as características dos dados a serem analisados, outros modelos de krigagem podem ser adotados. A título de exemplificação, a Figura 20 permite comparar qualitativamente os resultados obtidos para a interpolação realizadas por meio de krigagem circular, esférica e exponencial. Devido ao melhor ajuste desse tipo de interpolação aos dados de solos para o presente trabalho e, conforme as vantagens e desvantagens discutidas na seção 2.3, as interpolações por triangulação e inverso da distância, apesar de realizadas, não serão apresentadas.

Figura 20 – Comparação entre interpoladores para o mesmo conjunto de amostras – Krigagem circular, esférica e exponencial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Comparativamente, é possível observar a pouca representatividade na variação dos resultados obtidos entre os modelos de krigagem para a escala do trabalho, destacando-se apenas a suavização crescente das regiões de mesmo valor de impenetrável respectivamente para o modelo circular, esférico e exponencial. Assim,

associado ao fato de ser um dos modelos mais utilizados na literatura em relação à solos, conforme citado anteriormente, a análise visual das interpolações observadas na Figura 20 reforça a utilização da krigagem exponencial para os dados em questão, tendo em vista a maior suavização apresentada pelo modelo, que se acredita refletir melhor os contornos das superfícies em estudo.

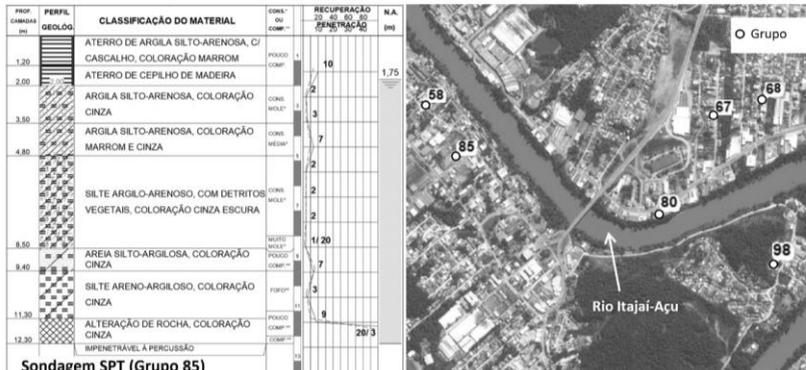
4.3.3.1 Mapas gerais de aptidão para fundação

Os mapas de profundidade do impenetrável e lençol freático foram gerados com base na localização espacial dos furos de sondagem e profundidade do nível de água (h_{NA}) e impenetrável (h_{Impen}).

Dois mapas foram gerados para representar o nível de água, o primeiro considerando puramente a profundidade do lençol freático nos 104 grupos de sondagem e o segundo adicionando informações extras obtidas por meio da hidrografia da região. Na consideração da hidrografia, novos pontos foram incorporados para representar o rio Itajaí-Açu, principal rio da região.

Considerando, conforme consta no SiBCS (EMBRAPA, 2006), que o solo tem como limites laterais os contatos com corpos d'água superficiais, procedeu-se à inclusão de pontos ao longo do rio que representassem o solo do seu entorno. Esses pontos foram adicionados com profundidade do lençol freático equivalente a 1,75 m, profundidade referente à menor profundidade de NA encontrada nas sondagens próximas ao rio Itajaí-Açu (Figura 21). Ademais, o grupo selecionado para definição da profundidade do NA estava localizado na região plana, próxima ao rio, local característico de interesse de urbanização e construção de novas edificações, validando, desta forma, a escolha do NA do entorno do rio, uma vez que a aplicação do estudo é voltada à aptidão para fundações.

Figura 21 – Estudo do nível de água na região próxima ao rio Itajaí-Açu.



Fonte: Elaborado pela autora.

A opção de incorporar o principal rio da região na análise teve o intuito de melhorar a qualidade do mapa de superfície do lençol freático com adição de novos dados onde o nível da água pode ser estimado.

Com relação ao mapa de profundidade do impenetrável, um único mapa foi gerado, considerando puramente a profundidade do impenetrável nos 104 grupos de sondagem.

Para o mapa de orientação acerca do tipo de fundação a ser adotada (superficial ou por estaca), considerando a viabilidade econômica da fundação de Rebello (2011) – ver seção 2.2.2.1 – e os limites da Equação (1) para fundações rasas, os seguintes critérios foram estabelecidos para gerar o mapa:

- Limite máximo de quatro metros¹² de profundidade para assentamento de fundação superficial;
- $N_{STP} \geq 5$ na profundidade analisada e abaixo dela¹³, evitando assentamento de fundação superficial sobre solo mole ou fofo;
- Regiões fora dos critérios anteriores foram direcionadas para fundação profunda;

¹² Apesar de Rebello (2001) indicar o assentamento de fundações rasas até 2 m e profundidade, garantindo a viabilidade econômica, adotou-se 4 m como parâmetro a fim de contemplar a escavação de até 2 m de subsolo.

¹³ Apesar de Rebello (2001) indicar fundação rasa em locais com $NSTP \geq 8$, utilizou-se como o limite inferior o parâmetro Equação (2), compatibilizando análises posteriores realizadas a partir da mesma equação.

- Tendo em vista que o nível de água é fundamental na avaliação do tipo de fundação, para cada profundidade analisada foi adicionada a informação da presença do NA.

Os mapas de orientação de fundação superficial ou profunda apresentados no presente trabalho são válidos para situações onde a reação do pilar apresenta-se na grandeza de 500 kN (50 tf) e sapatas isoladas de base e comprimento de até 2,2 m, conforme apresentado a seguir em que a Equação (1) foi utilizada para calcular a tensão admissível do solo e a Equação (3) para pré-dimensionar a geometria da sapata:

$$N_{SPT} = 5$$

$$\sigma_a = \sigma$$

$$P = 500 \text{ kN}$$

$$\sigma_a = 0,02.5 = 0,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 0,02. N_{SPT} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\sigma_a = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma = P/A_b \quad \text{Equação (3)}$$

$$B^2 = P/\sigma = 500/100$$

$$A_b = B.L = B^2 \rightarrow \text{quadrada}$$

$$B \cong 2,2 \text{ m}$$

Sendo:

σ_a : tensão admissível do solo

B: base da sapata quadrada

N_{SPT} : índice de resistência à penetração do ensaio SPT

L: comprimento da sapata

A_b : área da base da sapata;

σ : tensão no contato solo-sapata

No total, quatro mapas simulando o assentamento da fundação superficial nos primeiros quatro metros de profundidade de solo no terreno foram gerados. Para tal, interpolaram-se os valores do N_{SPT} de cada furo para cada profundidade analisada e o resultado foi dividido em duas zonas: $N_{SPT} \geq 5$ (orientação para fundação rasa) e $N_{SPT} < 5$ (orientação para fundação profunda).

Finalmente, apesar da apresentação desta sugestão, tendo em vista a existência de um banco de dados SPT estruturado, é possível que novos mapas sejam apresentados considerando diferentes situações de carga e geometria de fundação.

4.3.3.2 *Fundação superficial*

Para gerar as superfícies de isovalores de tensão admissível do solo, para cada metro de profundidade foram obtidos os valores de tensão admissível, calculados segundo a Equação (1). Sendo a equação limitada a $5 \leq N_{SPT} \leq 20$, adotou-se a isobárica de 0,4 MPa (4 kgf/cm²) como limite superior de tensão admissível, e 0,1 MPa (1 kgf/cm²) como o limite inferior.

Realizou-se a análise de assentamento da fundação superficial até quatro metros de profundidade, e não dois metros (conforme recomendado por Rebello (2011) e descrito em 2.2.2.1), considerando-se a possível existência de um subsolo na edificação e para favorecer o cálculo da média da tensão admissível no bulbo de tensões.

Uma vez que a profundidade do bulbo de tensões depende diretamente da geometria da sapata, a fim de garantir resultados aplicáveis a diferentes situações e não a um caso específico, optou-se por não definir uma geometria padrão de fundação superficial. Assim, em vez de utilizar a média de N_{SPT} no bulbo de tensões, simplificou-se o valor para o N_{SPT} na profundidade na cota de assentamento da sapata. Neste caso, o valor médio pode ser obtido calculando-se a média das tensões admissíveis nas profundidades de abrangência do bulbo de tensão estudado.

4.3.3.3 *Fundação por estacas*

Para a aptidão para fundação por estacas, curvas que representam regiões de mesmo valor de N_{SPT} foram elaboradas, denominadas de isoSPT. Para melhor compreensão, as curvas de isovalores de N_{SPT} foram divididas então em faixas de abrangência, variando de 5 em 5 golpes. Com base neste resultado e considerando o limite de N_{SPT} de parada (cotas de apoio) de estacas apresentado no Quadro 9, mapas de comprimento máximo de estacas foram elaborados. Como exemplo, os dois tipos de estaca mais utilizados na região de Blumenau/SC foram analisados: hélice contínua (cuja parada ocorre no intervalo de $20 < N_{SPT} \leq 45$), pré-moldada com diâmetro menor que 30 cm (cuja parada ocorre no intervalo de $15 < N_{SPT} < 25$) e maior que 30 cm (cuja parada ocorre no intervalo de $25 < N_{SPT} \leq 35$).

4.3.3.4 Perfil estratigráfico das unidades geotécnicas

Para as unidades geotécnicas associadas a, pelo menos, dois grupos de laudos de sondagem, elaborou-se um perfil estratigráfico genérico para representar a unidade. A finalidade desses perfis é correlacionar, de forma genérica, as características das unidades geotécnicas com o comportamento geomecânico das sondagens.

Para elaboração dos perfis, selecionaram-se de dois a três furos por unidade geotécnica, preferencialmente alinhados e na mesma delimitação de unidade (dada pelo relevo), e foram observadas as informações relacionadas a: variação de nível de água, profundidade do impenetrável, N_{SPT} , composição do solo, coloração, granulometria, elevação, declividade.

Dentre as unidades apresentadas na Tabela 1, as unidades para as quais se obtiveram dados para elaboração do perfil estratigráfico foram: Glei substrato sedimentos quaternários (GHsq), Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse (PVgn), Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito (Cs,f,a) e Cambissolo substrato gnaisse (Cgn).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

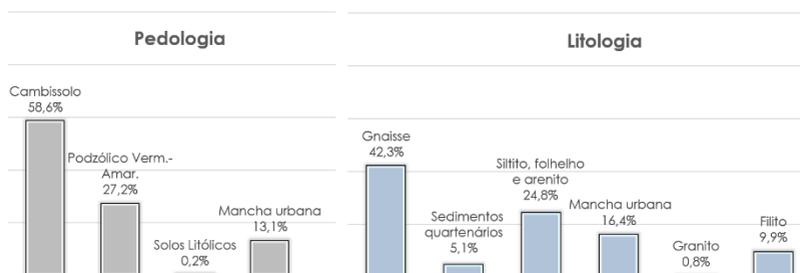
O presente capítulo tem por objetivo apresentar os resultados alcançados da pesquisa em termos de mapeamento geotécnico, perfis estratigráficos generalizados para as unidades geotécnicas estimadas, superfície do lençol freático, superfície de impenetrável à percussão, cartas de orientação para fundações rasas e profundas, de isovalores de tensão admissível do solo para fundação rasa, de isovalores de N_{SPT} orientado para fundação profunda e de indicativo do comprimento máximo de estacas aplicadas ao município de Blumenau/SC.

5.1.1 Mapeamento geotécnico

Por se tratarem de resultados parciais, necessários para elaboração do mapeamento geotécnico geral e do perfil estratigráfico das unidades geotécnicas estimadas, os mapas temáticos de MDT (Mapa 3), declividade (Mapa 4), hidrografia (Mapa 5), pedologia (Mapa 6), geologia (Mapa 7) e litologia (Mapa 8) foram apresentados anteriormente na seção 4.2.3.

Resumidamente, as composições percentuais litológica e pedológica de Blumenau/SC estão apresentadas na Figura 22.

Figura 22 – Composição pedológica e litológica de Blumenau/SC.



Fonte: Elaborado pela autora.

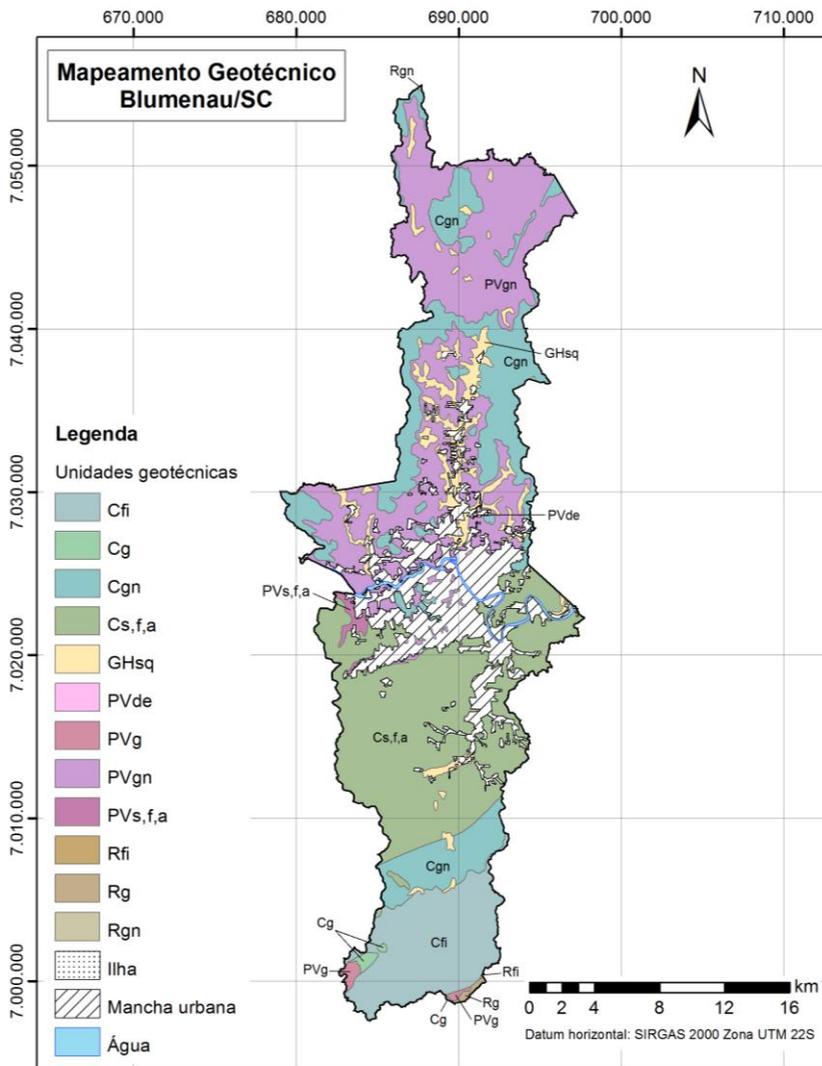
O resultado da manipulação dos dados de solos provenientes das cartas do IBGE, resultaram em uma composição pedológica, na qual 59% da área é classificada como Cambissolo (ao norte e, principalmente, ao sul do município), seguido por 27% de Podzólico Vermelho-Amarelo (ao

norte). Devido à urbanização, cerca de 13% da área da região não foi passível de classificação pedológica, sendo então identificada como Mancha urbana.

Com a elaboração do mapa de litologia, foi possível extrair que 42% da região é formada por gnaisse (principalmente ao norte do município), seguido por 25% de siltito, folhelho e arenito e 10% de filito (todos ao sul de Blumenau/SC). Aproximadamente 16% da área foi classificada como Mancha urbana.

Após o cruzamento dos mapas de pedologia e litologia e a realização dos ajustes de inconsistências, apresentados na seção 4.2.3.4, o Mapeamento Geotécnico de Blumenau/SC foi finalizado e o resultado pode ser visualizado por meio do Mapa 10.

Mapa 10 – Mapeamento Geotécnico – Blumenau/SC.



Base de dados: Geologia Blumenau e Botuverá - Projeto GERCO IBGE (2003) 1:100.000
 Reconhecimento de Solos Blumenau e Botuverá - Projeto GERCO IBGE (2003) 1:100.000
 Elaboração: Eng. Civil Stephanie Thiesen (2016)

O Mapa 10 permite extrair que o município de Blumenau/SC ao sul é formado predominantemente por Cambissolos de substrato gnaisse, filito, siltito, folhelho e arenito; enquanto ao norte é formado

predominantemente por Cambissolos e Podzólicos Vermelho-Amarelo, ambos de substrato gnaissê.

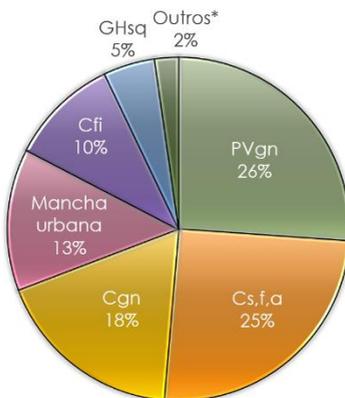
Quantitativamente, as porcentagens do universo geotécnico encontrado na região estudada estão detalhadas na Tabela 2 e são apresentadas graficamente na Figura 23.

Tabela 2 – Frequência das unidades geotécnicas estimadas – Blumenau/SC.

Sigla	Unidade geotécnica	Área (km²)	Área (%)
PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaissê	135,9	26,11%
Cs,f,a	Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito	131,4	25,24%
Cgn	Cambissolo substrato gnaissê	92,9	17,86%
Cfi	Cambissolo substrato filito	53,7	10,31%
GHsq	Glei substrato sedimentos quaternários	25,2	4,84%
PVs,f,a	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato siltito, folhelho e arenito	2,7	0,51%
PVg	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granito	1,8	0,35%
Cg	Cambissolo substrato granito	1,4	0,27%
Rg	Solos Litólicos substrato granito	0,9	0,17%
PVde	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato depósito de encostas	0,2	0,03%
Rgn	Solos Litólicos substrato gnaissê	0,2	0,03%
Rfi	Solos Litólicos substrato filito	0,1	0,01%
Ilha	Sedimentos localizados no meio do rio	0,5	0,09%
Mancha urbana	Mancha urbana	69,7	13,39%
Água	Água	4,0	0,77%
Total		520,5	100%

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 – Unidades geotécnicas de Blumenau/SC.



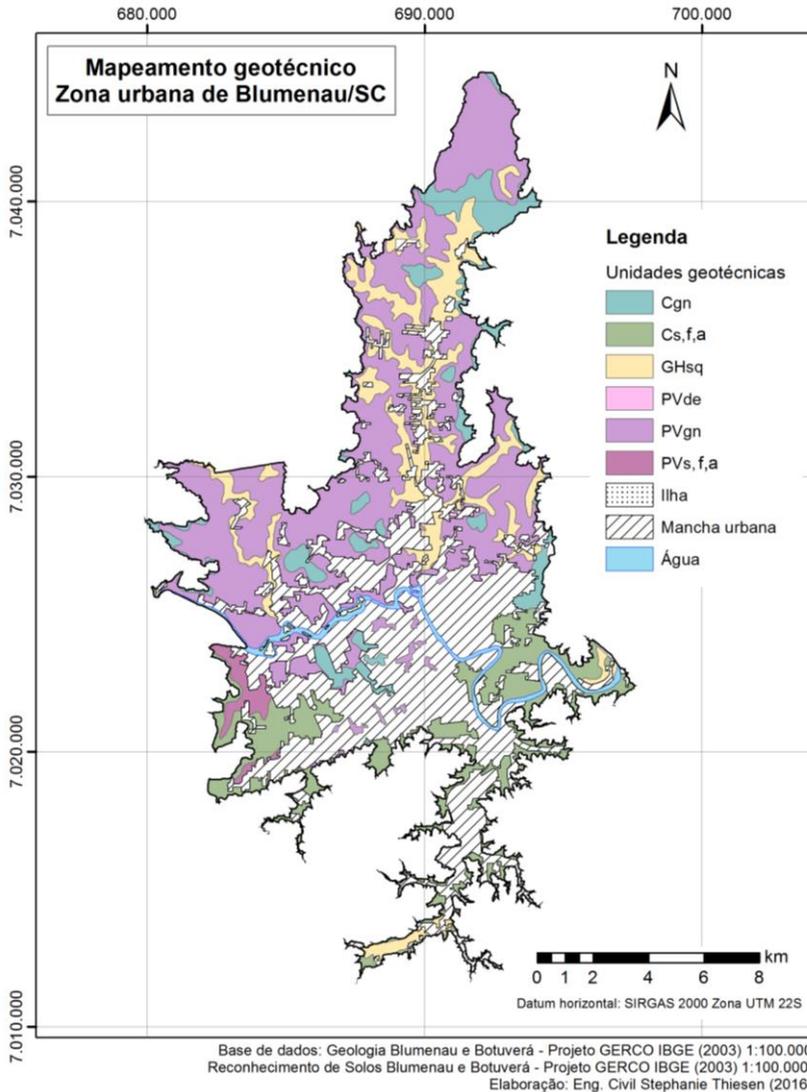
* PVg; PVs,f,a; Cg; Rg; Ilha; PVde; Rgn; Rfi

Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio dos resultados apresentados, é possível perceber que a região é representada principalmente pelas unidades Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse (PVgn) e Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito (Cs,f,a), que juntas compõem aproximadamente 50% das áreas do município, seguidas de aproximadamente 18% de Cambissolo substrato gnaisse (Cgn) e 10% Cambissolo substrato filito (Cfi), totalizando, assim, 80% de solos residuais. Considerando toda a área do município de Blumenau/SC, cerca de 13% da área encontra-se em Mancha urbana.

O Mapa 11 apresenta o mapeamento ampliado para zona urbana de Blumenau/SC.

Mapa 11 – Mapeamento Geotécnico – Zona urbana de Blumenau/SC.



Por meio do Mapa 11, percebe-se que as unidades estimadas para a zona urbana de Blumenau/SC constituem-se em grande parte de regiões de Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse, Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito e Gleí substrato sedimentos quaternários. Quantitativamente, a Tabela 3 apresenta a frequência

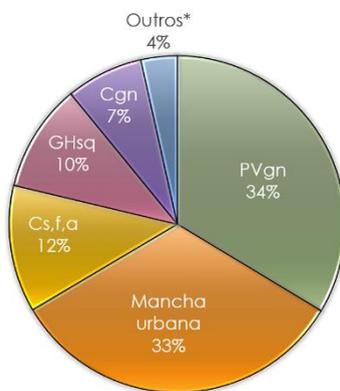
percentual das unidades geotécnicas para zona urbana de Blumenau/SC e as respectivas áreas. Graficamente, os resultados podem ser acompanhados através da Figura 24.

Tabela 3 – Frequência das unidades geotécnicas estimadas – Zona urbana de Blumenau/SC.

Sigla	Unidade geotécnica	Área (km ²)	Área (%)
PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaïsse	69,6	33,61%
Cs,f,a	Cambissolo substrato silito, folhelho e arenito	25,3	12,20%
GHsq	Glei substrato sedimentos quaternários	21,5	10,36%
Cgn	Cambissolo substrato gnaïsse	15,5	7,46%
PVs,f,a	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato silito, folhelho e arenito	2,7	1,29%
Ilha	Sedimentos localizados no meio do rio	0,5	0,24%
PVde	Podzólico Vermelho-Amarelo substrato depósito de encostas	0,0	0,02%
Mancha urbana	Mancha urbana	68,2	32,90%
Água	Água	4,0	1,93%
Total		207,2	100%

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 – Unidades geotécnicas na zona urbana de Blumenau/SC.



* PVs,f,a; Ilha; PVde

Fonte: Elaborado pela autora.

Mais de 50% da zona urbanizada de Blumenau/SC é composta por solos residuais, sendo cerca de 30% classificados como Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss (PVgn). Solos sedimentares (GHsq) chegam a 10% da área e, comparando a Tabela 2 com a Tabela 3, percebe-se que estão quase em sua totalidade localizados na zona urbana (21,5 km² do total de 25,2 km²), por se tratar de uma região plana próxima a rios e em encosta de morros. Pela mesma comparação, é possível extrair também que a região sem classificação geotécnica, denominada por Mancha urbana, apresenta-se quase em sua totalidade na zona urbana de Blumenau/SC (68,2 km² do total de 69,7 km²), resultado esse esperado, por se tratar de uma área densamente edificada.

5.1.2 Perfil estratigráfico das unidades geotécnicas

Os perfis estratigráficos aqui gerados visam a aproximar a realidade do mapeamento geotécnico para uma linguagem mais acessível ao engenheiro, em termos da associação da pedologia e litologia às tradicionais sondagens do tipo SPT. E, apesar da descrição empírica realizada pelo ensaio de SPT, informações importantes para o conhecimento dos universos geotécnicos podem ser extraídas dos perfis estratigráficos.

Devido às limitações de dados expostas na seção 4.3.3.4, apenas os perfis estratigráficos das seguintes unidades geotécnicas foram analisados, conforme apresentado na Tabela 1: Cs,f,a; PVgn; Cgn; GHsq.

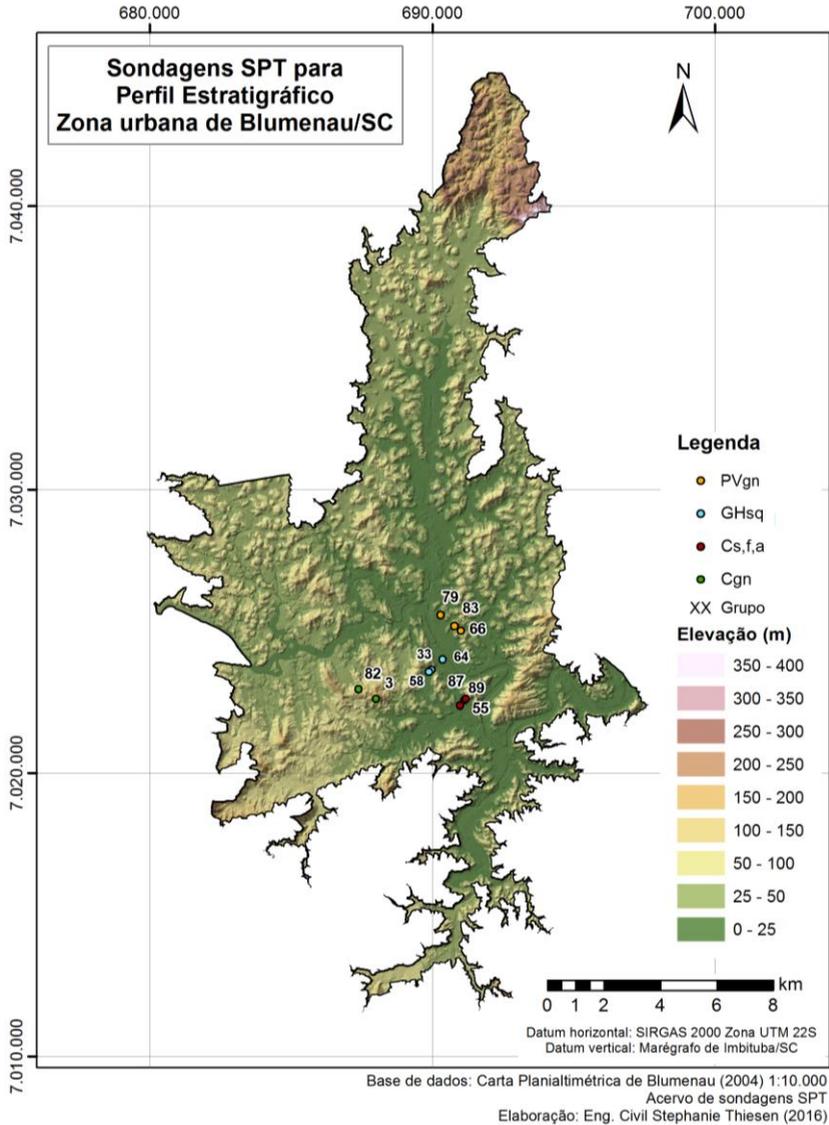
Os grupos selecionados para elaboração do perfil estratigráfico de cada unidade geotécnica estimada estão localizados no Mapa 12. Por meio do mapa, é possível verificar que os perfis do solo foram elaborados a partir de sondagens localizadas próximas entre si dentro da unidade geotécnica estimada, buscando abranger uma unidade geotécnica relativamente homogênea. Os furos de sondagem selecionados para elaboração do perfil estratigráfico estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Identificação das sondagens SPT utilizadas nos perfis estratigráficos.

Unidade geotécnica	Grupos selecionados para elaboração dos perfis	Total de grupos na unidade geotécnica	Total de furos SPT na unidade geotécnica
GHsq	64	2	8
	33		
	58		
Cs,f,a	89	16	81
	55		
	87		
PVgn	79	21	112
	83		
	66		
Cgn	82	2	8
	3		

Fonte: Elaborado pela autora.

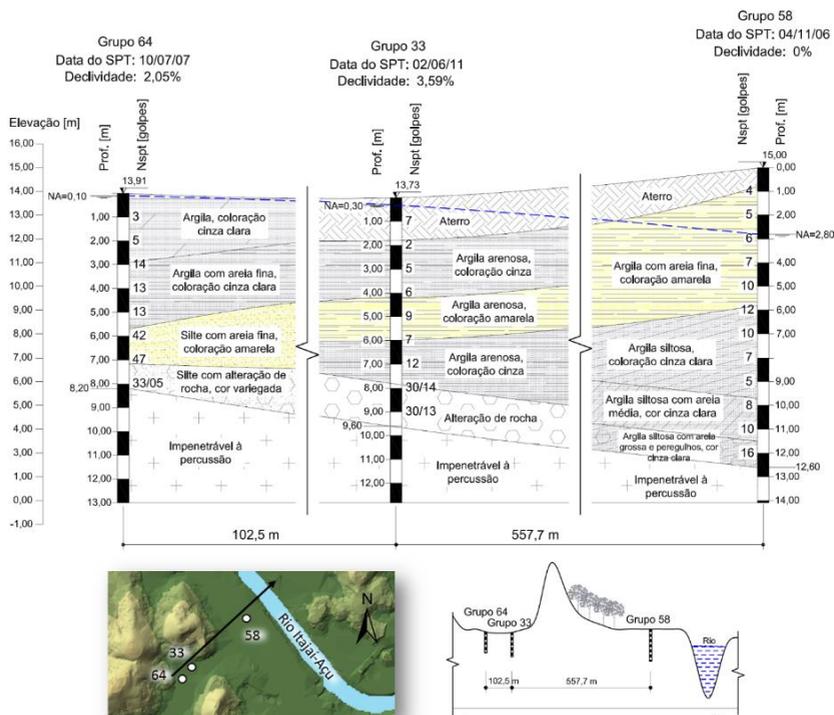
Mapa 12 – Localização dos grupos SPT dos perfis estratigráficos – Zona urbana de Blumenau/SC.



5.1.2.1 Glei substrato sedimentos quaternários

O solo do tipo Glei substrato sedimentos quaternários (GHsq) abrange 21,5 km² (10,4%) da zona urbana de Blumenau/SC e 25,2 km² (4,8%) do município. O perfil estratigráfico típico da unidade GHsq está apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Perfil estratigráfico – Glei substrato sedimentos quaternários.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o perfil, os valores da profundidade para atingir o impenetrável à percussão variam de 8,20 m a 12 m em uma distância de cerca de 660 m. Conforme os demais furos de sondagem classificados para unidade GHsq, a profundidade média do impenetrável para unidade encontra-se próxima aos 12 m.

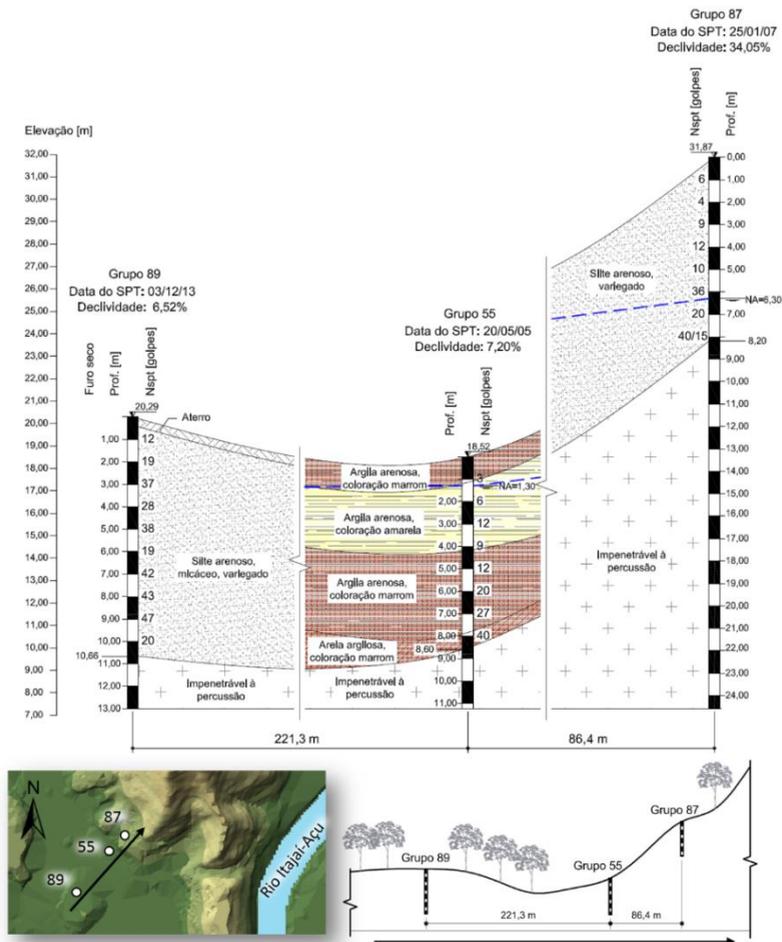
Em termos de declividade, a unidade está localizada em relevos com inclinação média de 5,5%, variando de plano (0% - 3%) a suave ondulado (3% - 8%), com poucos locais com inclinação maior). Em média, tendo como base os demais furos de sondagem classificados para unidade, os furos SPT dessa região apresentaram profundidade média do lençol freático equivalente a 3 m.

Complementarmente, percebe-se a tendência de uma baixa resistência do solo (em termos de N_{SPT}) nos horizontes mais superficiais, adquirindo maior resistência nas proximidades do impenetrável. A elevação média da unidade equivale a 21 m e os solos apresentam coloração predominantemente cinza, característica dos solos de ambiente onde houve redução de ferro.

5.1.2.2 Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito

A unidade Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito (Cs,f,a) abrange 25,3 km² (12,2%) da zona urbana de Blumenau/SC e 131,4 km² (25,2%) do município. O perfil estratigráfico típico da unidade Cs,f,a está apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Perfil estratigráfico – Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o perfil, os valores da profundidade para atingir o impenetrável à percussão, ponto onde se estima que o siltito, o folhelho ou o arenito sejam encontrados, variam de 8,20 m a 10,66 m em uma distância de cerca de 300 m. Conforme os demais furos de sondagem classificados para unidade Cs,f,a, a profundidade do impenetrável média para unidade encontra-se próxima aos 10 m.

Em termos de declividade, a unidade está localizada em relevos que variam de suave ondulado (3% - 8%) a forte ondulado (20% - 45%). Em média, tendo como base os demais furos de sondagem classificados para unidade Cs,f,a, os ensaios SPT dessa região apresentaram profundidade do lençol freático maiores que 8 m, com poucos locais onde o mesmo encontra-se mais superficial (podendo estar associados a declividade da região do entorno, delimitando canais de drenagem – talvegues –, regiões de relevo plano ou data de realização da sondagem). Complementarmente, percebe-se a tendência de ganho de resistência (mensurada pelo N_{SPT}) com a profundidade do furo. A elevação média da unidade em relação ao marégrafo de Imbituba equivale a 64 m.

5.1.2.3 Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse

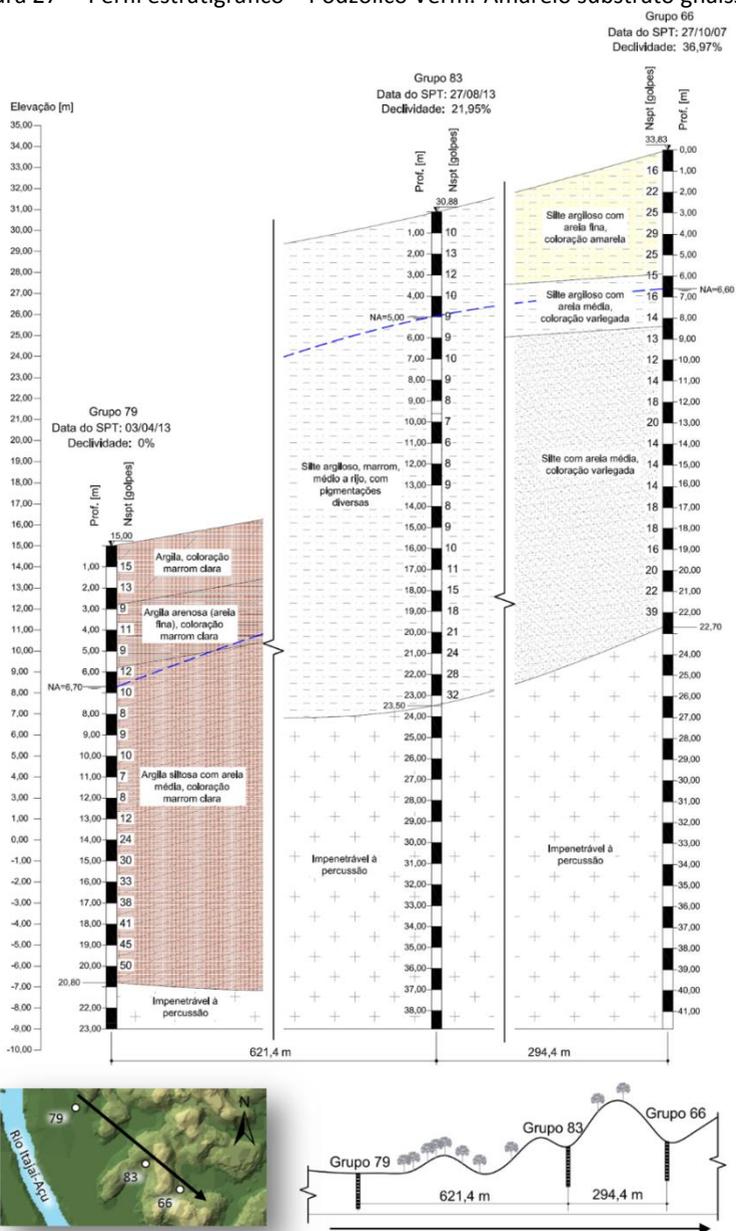
O solo Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaisse (PVgn) abrange 69,6 km² (33,6%) da zona urbana de Blumenau/SC e 135,9 km² (26,1%) do município. O perfil estratigráfico típico do PVgn está apresentado na Figura 27.

Perfil semelhante ao Cs,f,a em termos de declividade, a unidade está localizada em relevos que variam de plano (0% - 3%) a forte ondulado (20% - 45%). A elevação média da unidade equivale a aproximadamente 33 m, frente aos 64 m do Cs,f,a.

No perfil analisado (Figura 27), a profundidade do lençol freático varia entre 5,0 m a 6,6 m em uma distância de aproximadamente 900 m. Em média, tendo como base os demais furos de sondagem classificados para unidade PVgn, os furos SPT dessa região apresentaram o lençol freático a profundidades maiores que 10 m. Locais onde o NA encontra-se mais superficial, como dito anteriormente, podem estar associados à declividade da região do entorno, delimitando canais de drenagem – talvegues –, ou devido à sazonalidade das estações mais chuvosas na época da sondagem, por exemplo.

O impenetrável à percussão da unidade PVgn apresenta uma tendência de maior profundidade quando comparado ao Cs,f,a. Conforme os demais furos de sondagem classificados para unidade PVgn, a profundidade do impenetrável média para unidade encontra-se próxima aos 14 m. Percebe-se ainda uma tendência de a resistência do solo, em termos de N_{SPT} , não apresentar variação significativa nas camadas mais superficiais, adquirindo maior resistência nas proximidades do impenetrável.

Figura 27 – Perfil estratigráfico – Podzólico Verm.-Amarelo substrato gnaisse.



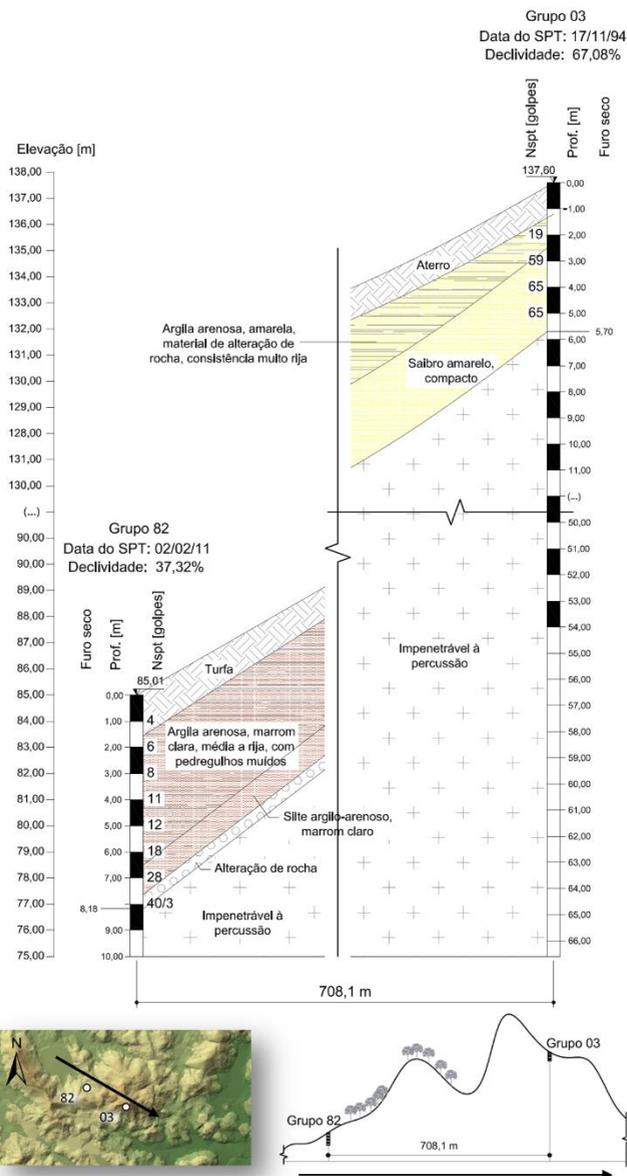
Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2.4 Cambissolo substrato gnaisse

O Cambissolo substrato gnaisse (Cgn) abrange 15,5 km² (7,5%) da zona urbana de Blumenau/SC e 92,9 km² (17,9%) do município. O perfil stratigráfico da unidade (Cgn) está apresentado na Figura 28.

Apesar de apenas duas sondagens serem classificadas na unidade, é possível extrair algumas tendências a partir do perfil stratigráfico gerado por meio da Figura 28 e do comportamento esperado para Cambissolos obtido pelo perfil da Figura 26, analisado anteriormente. Assim como o Cs,f,a, a unidade Cgn apresenta tendência de profundidades do impenetrável mais rasas que as unidades PVgn e GHsq. As sondagens não apresentaram presença de água (furo seco) e encontravam-se em declividades mais altas, semelhante ao Cs,f,a. As maiores elevações e a tendência de ganho de resistência (mensurada pelo N_{SPT}) com a profundidade, são comportamentos esperados e também encontrados no Cs,f,a.

Figura 28 – Perfil estratigráfico – Cambissolo substrato gnaiss.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2.5 Toposequência típica dos solos de Blumenau

Com a elaboração dos perfis orientativos para cada unidade geotécnica, realizou-se a consolidação das informações coletadas por meio dos ensaios SPT, conforme apresentado no Quadro 24.

Quadro 24 – Perfis estratigráficos – Resultado geral.

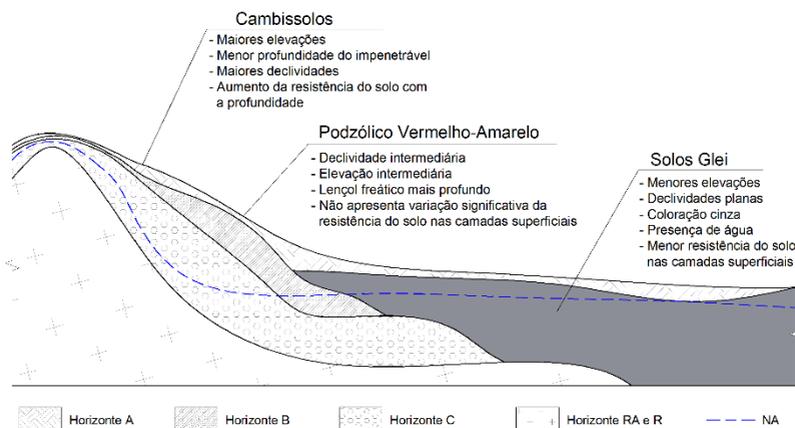
	Cs,f,a	PVgn	GHSq	Cgn*
Quantidade	16 grupos	21 grupos	57 grupos	2 grupos
Área: Blumenau (B) Z. urbana (U)	B: 131,4 km ² (25,2%) U: 25,3 km ² (12,2%)	B: 135,9 km ² (26,1%) U: 69,6 km ² (33,6%)	B: 25,2 km ² (4,8%) U: 21,5 km ² (10,4%)	B: 92,9 km ² (17,9%) U: 15,5 km ² (7,5%)
Prof. média do Imp.	10 m	14 m	12 m	Semelhante Cs,f,a
Prof. média do NA	8 m	10 m	3 m	Semelhante Cs,f,a
Elevação média	64 m	33 m	21 m	Semelhante Cs,f,a
Variação da declividade	Ondulado a forte ondulado (3% a 45%)	Plano a forte ondulado (0% - 45%)	Plano a suave ondulado (0% - 8%)	Semelhante Cs,f,a
Coloração	Diversa (vermelho, amarelo, roxo, marrom)	Vermelho e amarelo	Cinza	Semelhante Cs,f,a
N_{SPT}	Ganho de resistência com a profundidade	Não apresentar variação significativa nas camadas superficiais, com maior resistência nas proximidades do imp.	Tendência de uma baixa resistência nos horizontes superficiais, com maior resistência nas proximidades do imp.	Semelhante Cs,f,a
Perfil orientativo	Figura 26	Figura 27	Figura 25	Figura 28

Obs.: A unidade Cgn não foi apresentada em termos de média, tendo em vista a baixa quantidade de grupos classificados para a unidade. Vale destacar que a unidade apresentou tendências semelhantes ao Cs,f,a.

Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio das características gerais dos perfis estratigráficos típicos das unidades geotécnicas estimadas apresentadas anteriormente, elaborou-se a toposequência típica dos solos do município de Blumenau/SC (Figura 29).

Figura 29 – Toposequência típica dos solos de Blumenau/SC.



Fonte: Elaborado pela autora.

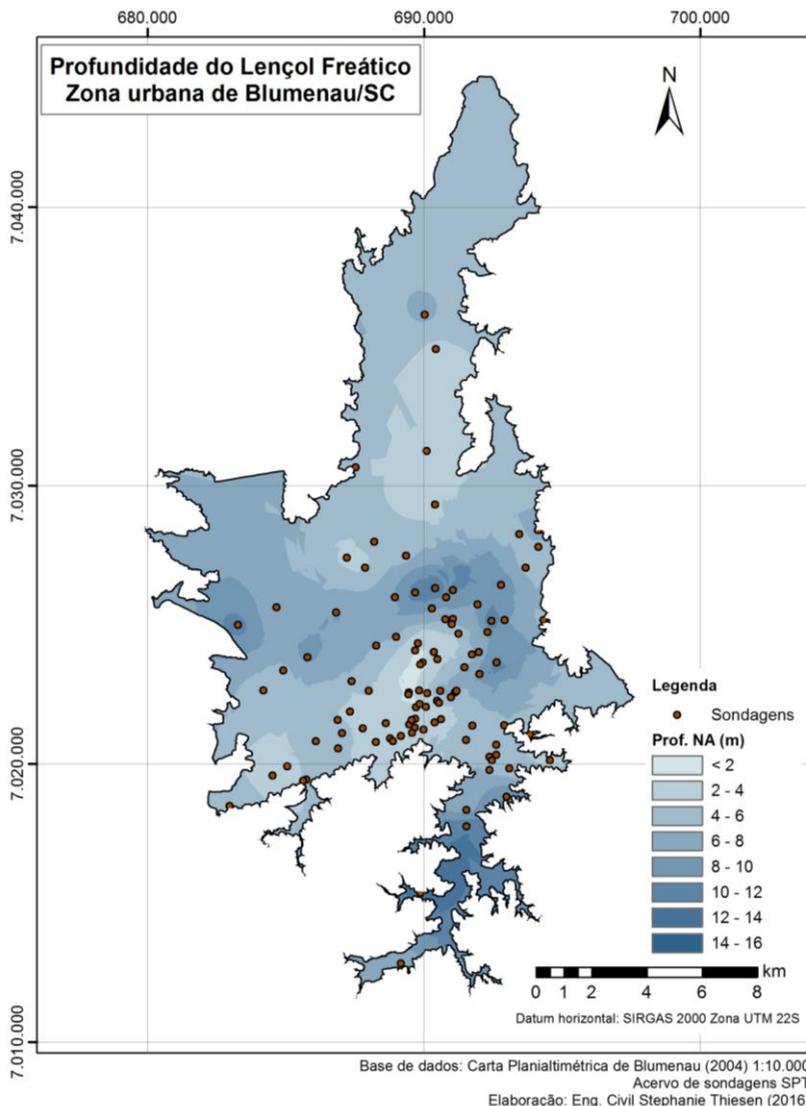
A toposequência apresentada na Figura 29 resume as principais características encontradas nas unidades geotécnicas estimadas que apresentaram sondagens SPT. Em termos de elevação, os Cambissolos foram as unidades que se apresentam localizados nas maiores elevações e em regiões montanhosas, enquanto os solos do tipo Glei estão em menores elevações e relevos mais planos. O impenetrável apresenta-se mais superficial para os Cambissolos e a resistência do solo (em termos de N_{SPT}) é mais elevada para Cambissolos e solos Podzólico Vermelho-Amarelo em comparação com solos Glei. O nível de água apresenta-se mais superficial para os solos Glei, que também apresentam coloração cinza, característica de solo sedimentar, enquanto para os Cambissolos e Podzólico Vermelho-Amarelo as tonalidades mais quentes são as que predominam.

5.1.3 Superfície freática

As superfícies freáticas foram desenvolvidas em duas etapas, a primeira com dados exclusivamente advindos das sondagens SPT (Mapa 13) e posteriormente com a incorporação de informações do rio Itajaí-Açu ao banco de dados (Mapa 14), conforme detalhado na seção 4.3.3.1.

Para cada situação foi gerado um MDT para representar tridimensionalmente os resultados obtidos. A Figura 30 representa a superfície freática gerada a partir de dados exclusivamente advindos das sondagens SPT, enquanto a Figura 31 o modelo digital representa a superfície freática gerada pelos dados das sondagens SPT com incorporação de pontos no entorno do rio Itajaí-Açu. Vale destacar que os modelos digitais foram gerados em relação às cotas (tendo como nível de referência o marégrafo de Imbituba/SC) e não em termos de profundidade.

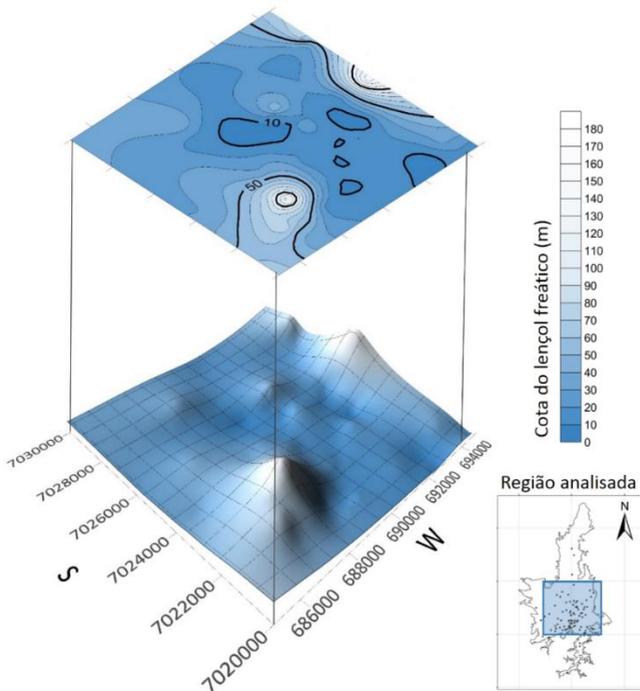
Mapa 13 – Profundidade freática (dados SPT) – Zona urbana.



As zonas menos densas de sondagens (regiões mais próximas ao limite administrativo do Mapa 13), apresentam um contorno para as faixas de profundidade do NA mais suavizado. A região mais densa de pontos (região central, entre as coordenadas 7.020.000S e 7.030.000S e

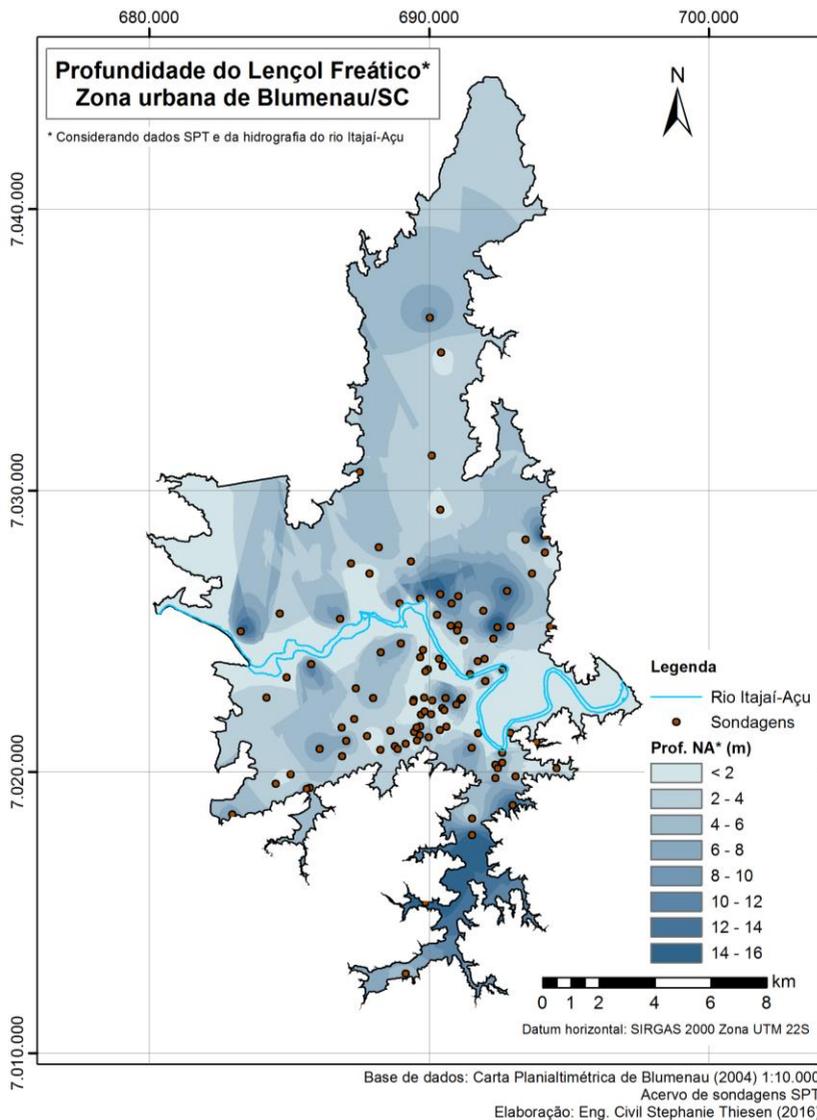
no entorno da coordenada 690.000W) pode ser visualmente dividida, conforme a intensidade das cores, em duas grandes áreas: uma com profundidade do nível d'água mais superficial (entre 0 e 6 m, contemplando os bairros de Vila Nova, Velha e Itoupava Seca) e outra mais profunda (entre 6 e 12 m, abrangendo os bairros de Fortaleza, Nova Esperança e ao norte de Itoupava Norte). Estas regiões também podem ser visualizadas em termos de cota, por meio da Figura 30.

Figura 30 – MDT do lençol freático (dados SPT) – Zona urbana de Blumenau/SC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Mapa 14 – Profundidade freática (dados SPT e do rio Itajaí-Açu) – Zona urbana.

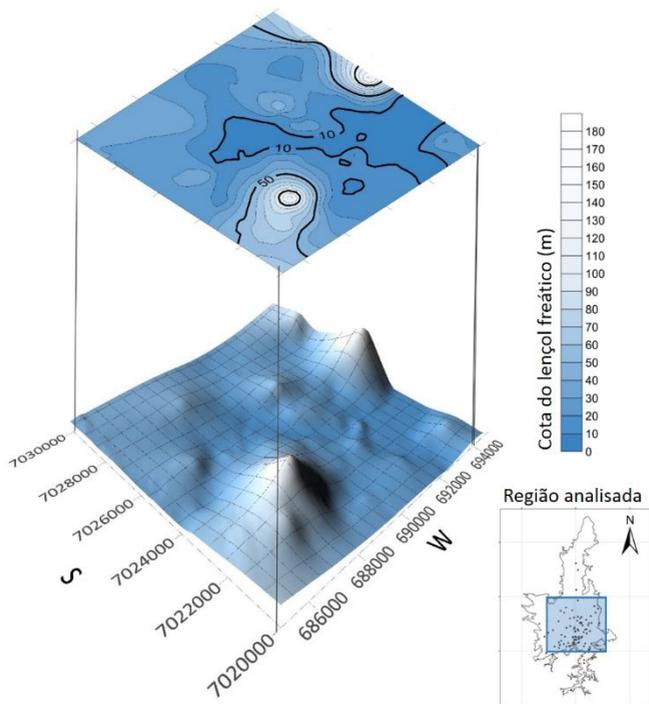


Para o Mapa 14, as zonas menos densas de sondagens continuam apresentando faixas de profundidade do NA mais suavizadas e na mesma ordem de grandeza da situação do Mapa 13. A região mais densa

de pontos (entre as coordenadas 7.020.000S e 7.030.000S e no entorno da coordenada 690.000W) é atravessada pelo rio Itajaí-Açu na situação do Mapa 14. No entorno do rio, a profundidade do NA diminuiu representativamente. Resultado esperado, uma vez que para essa situação novos pontos de profundidade do NA foram adicionados no entorno do rio Itajaí-Açu.

Mesmo com menor contraste visual, ainda é possível perceber divisão da zona mais densa de sondagens, onde ao norte do rio apresenta NA mais profundo (nos bairros de Fortaleza, Nova Esperança e ao norte de Itoupava Norte) e ao sul do rio mais superficial (bairros de Vila Nova, Velha e Itoupava Seca). Estas regiões também podem ser visualizadas em termos de cota, por meio da Figura 31.

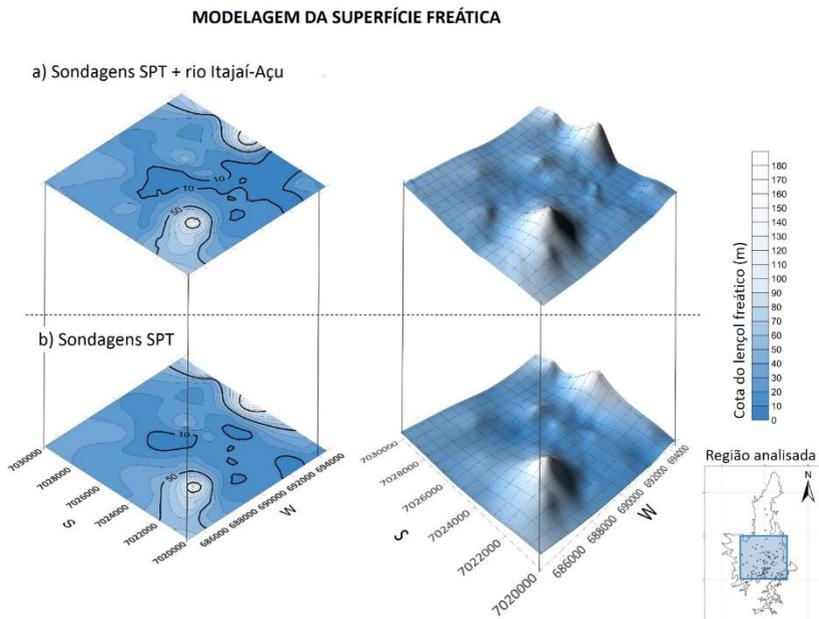
Figura 31 – MDT do lençol freático (dados SPT e do rio Itajaí-Açu) – Zona urbana de Blumenau/SC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Finalmente, a Figura 32 permite a análise visual comparativa dos resultados obtidos para ambas situações.

Figura 32 – Comparação entre MDTs: a) a partir dos dados SPT e do rio Itajaí-Açu b) a partir dos dados SPT.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio da imagem, é possível verificar qualitativamente o maior detalhamento da superfície gerada com a incorporação de novos dados relativos ao rio Itajaí-Açu (Figura 32a) em relação à modelada exclusivamente pelos 104 grupos SPT (Figura 32b), uma vez que a superfície se apresenta menos suavizada com a adição dos novos pontos. Tal situação era esperada, pois a opção de incorporar o principal rio da região na análise teve o intuito de melhorar a qualidade do mapa de superfície do lençol freático com adição de novos dados, onde o nível da água pode ser estimado.

Em termos quantitativos, elaborou-se a Tabela 5 com a porcentagem de área que se enquadrou nas faixas de profundidade do lençol freático para as duas situações simuladas.

Tabela 5 – Frequência da profundidade do lençol freático – Zona urbana de Blumenau/SC.

% de área		
Prof. do NA (m)	Situação 1 (dados SPT)	Situação 2 (dados SPT + rio Itajaí-Açu)
< 2	0,5%	20,8%
2 - 4	16,0%	32,4%
4 - 6	46,8%	29,4%
6 - 8	23,6%	7,5%
8 - 10	8,1%	3,5%
10 - 12	3,7%	2,5%
12 - 14	1,3%	2,0%
14 - 16	0,0%	1,9%
Total	100%	100%
Mapa	Mapa 13	Mapa 14

Fonte: Elaborado pela autora.

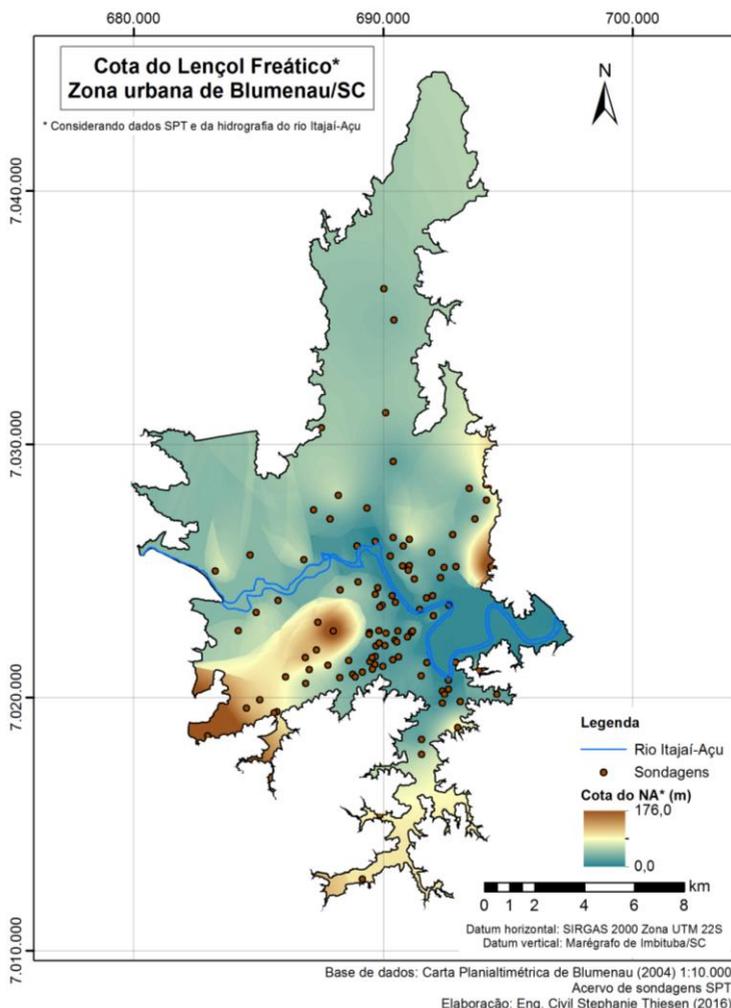
A partir da Tabela 5 tem-se, para as duas situações, cerca de 90% da área urbana de Blumenau/SC com o nível do lençol freático até 8 m de profundidade. Todavia, é possível perceber uma redistribuição para áreas com menor profundidade de NA para a Situação 2, aumentando consideravelmente as áreas com NA mais aflorado: aumentando aproximadamente 20% da área com $NA < 2$ m e 15% da área com $2 m \leq NA < 4$ m. Conforme visto na seção 4.3.3.1, os pontos do rio Itajaí-Açu foram adicionados com profundidade do lençol freático equivalente a 1,75 m (situação mais desfavorável encontrada nas sondagens próximas ao rio), corroborando este resultado. Em contrapartida, as situações mais favoráveis em termos de fundação ($8 \leq NA < 16$) reduziram sua participação, com frequência total de 13% para a Situação 1 frente a 10% para modelagem da Situação 2.

Finalmente, a partir dos dados de profundidade do NA apresentados no Mapa 14, foi desenvolvido o Mapa 15, representando a superfície do lençol freático em termos de cotas (obtidas pela subtração da elevação do terreno da profundidade do NA).

Por meio do gradiente de cores do Mapa 15, é possível avaliar o fluxo das águas subterrâneas na zonar urbana de Blumenau/SC, as quais tendem a correr das regiões mais elevadas (coloração marrom) para as regiões de menor elevação (coloração verde). Quanto mais curta for a transição das cores no mapa (do marrom para o azul), maior é o

gradiente hidráulico. Conforme o mapa, as águas subterrâneas tendem a fluir para o rio Itajaí-Açu, contribuindo também para o acréscimo do fluxo de água no principal rio do município, além do escoamento das águas superficiais. Os maiores gradientes hidráulicos são encontrados nos bairros Velha Central, Água Verde e Escola Agrícola (à sudoeste do mapa, na coloração marrom), que são regiões com maiores elevações.

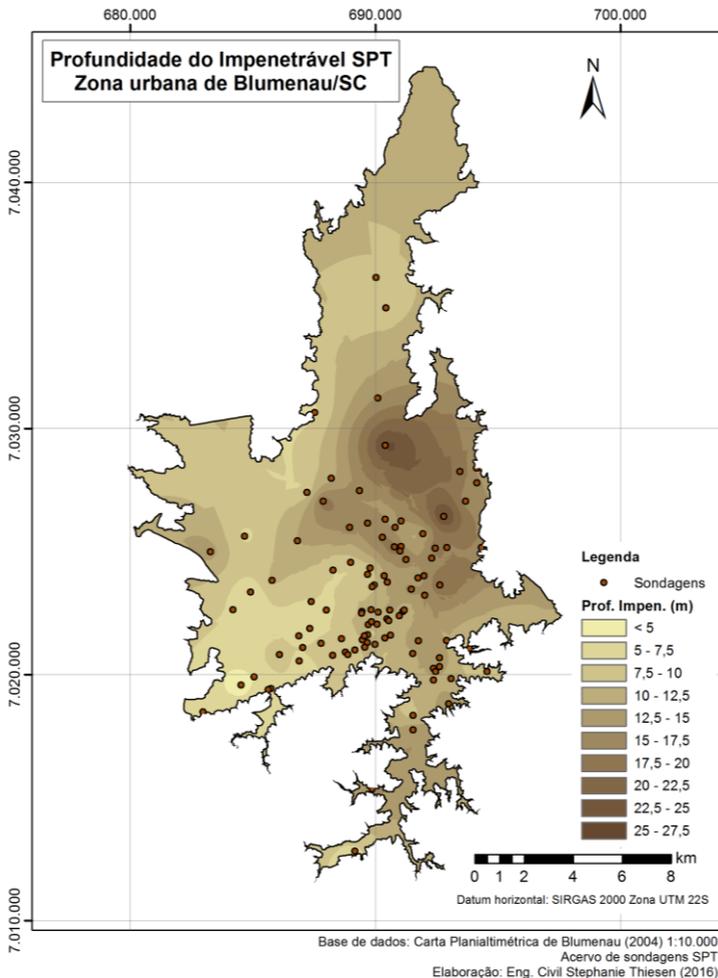
Mapa 15 – Cota freática (dados SPT e do rio Itajaí-Açu) – Zona urbana.



5.1.4 Superfície do impenetrável à percussão

A superfície do impenetrável à percussão foi gerada exclusivamente a partir dos dados dos 104 grupos de sondagens. O Mapa 16 apresenta o resultado final da profundidade do impenetrável à percussão. Contribuindo para a análise visual, também foi elaborado o MDT da cota do impenetrável, exposto na Figura 31.

Mapa 16 – Superfície do impenetrável à percussão – Zona urbana.

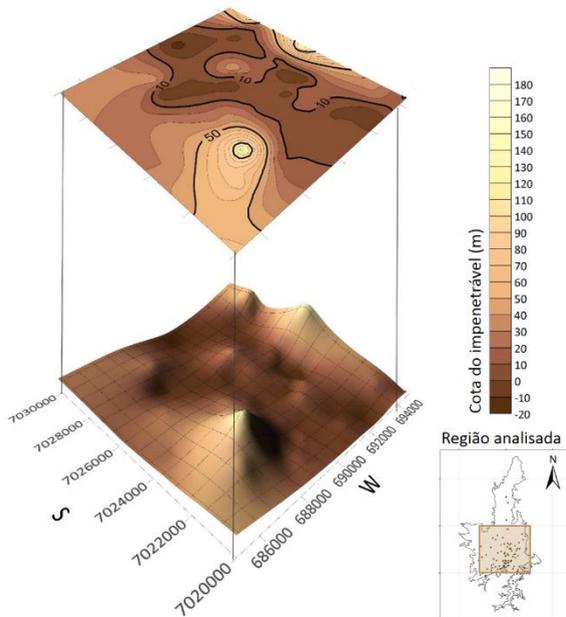


As zonas menos densas de sondagens (regiões mais próximas aos limites do Mapa 16), apresentam um contorno para as faixas de profundidade do impenetrável mais suavizado, abrangendo maiores áreas e possuindo um impenetrável mais raso quando comparadas às regiões mais densas de sondagem.

As regiões com impenetrável mais profundo (entre 20 e 27,5 m de profundidade) estão localizadas à nordeste da zona urbana de Blumenau/SC, nos bairros como Fidélis, Fortaleza Alta, Fortaleza, Tribess e Nova Esperança. As regiões com impenetrável mais raso (profundidade até 7,5 m) contemplam os bairros de Passo Manso, Salto Weissbach, Água Verde e Velha Central, à sudoeste da zona urbana de Blumenau/SC.

A região mais densa de pontos (região central, entre as coordenadas 7.020.000S e 7.030.000S e no entorno da coordenada 690.000W) apresenta resultados que variam de um impenetrável mais superficial (5 m de profundidade) até regiões com impenetrável mais profundo (17,5 m). Em termos de cota, por meio da Figura 30, é possível analisar o MDT do impenetrável à percussão.

Figura 33 – MDT do impenetrável à percussão – Zona urbana de Blumenau/SC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quantitativamente, através da Tabela 6 é possível observar que apenas 5% da área urbana de Blumenau/SC apresenta profundidade de impenetrável maior que 20 m, e, conforme evidenciado pelo Mapa 16, encontra-se em regiões com baixa densidade de sondagens. Os resultados também apontam que mais de 80% da zona urbana possui o impenetrável com profundidade de até 15 m, com maior frequência (cerca de 55%) para profundidade entre 7,5 m e 12,5 m.

Tabela 6 – Frequência da profundidade impenetrável – Zona urbana de Blumenau/SC.

Prof. do impenetrável (m)	% da área
< 5	0,5%
5 - 7,5	10,1%
7,5 - 10	28,3%
10 - 12,5	28,3%
12,5 - 15	13,7%
15 - 17,5	9,3%
17,5 - 20	5,2%
20 - 22,5	3,4%
22,5 - 25	1,1%
25 - 27,5	0,1%
Total	100%
Mapa	Mapa 16

Fonte: Elaborado pela autora.

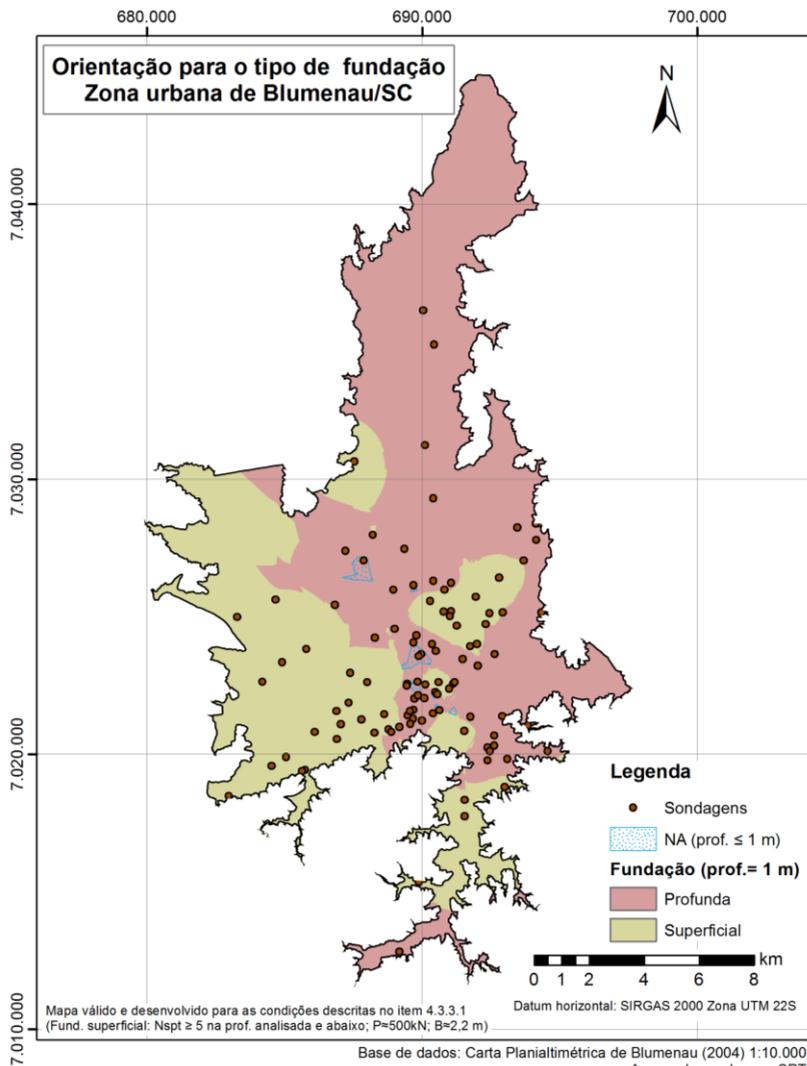
5.1.5 Orientação para o tipo de fundação

Os mapas de orientação para o tipo de fundação foram desenvolvidos para 1 m (Mapa 17), 2 m (Mapa 18), 3 m (Mapa 19) e 4 m de profundidade (Mapa 20), uma vez que a viabilidade econômica das fundações rasas apresenta-se até dois metros de profundidade (REBELLO, 2011) e que foi considerado a adição de mais dois metros de escavação de subsolo. Quantitativamente, os resultados podem ser acompanhados por meio da Tabela 7.

O nível de água ponderando a contribuição do rio Itajaí-Açu também é apresentado nos mapas, tendo em vista que a presença ou não do lençol freático pode ser fator decisivo na escolha do tipo de fundação, superficial ou profunda.

Os mapas de orientação para o tipo de fundação apresentados no presente item, têm aplicação específica conforme demonstrado no item 4.3.3.1.

Mapa 17 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 1 m.



O Mapa 17 divide a zona urbanizada de Blumenau/SC em duas grandes regiões, o sudoeste, orientado para fundações rasas (coloração verde) e o noroeste tendendo em sua grande maioria aptidão para fundação profunda (coloração vermelha) com bolsões orientando fundação rasa, nos bairros de Itoupava Central e Itoupavazinha e Itoupava Norte e Fortaleza. Por meio da Tabela 7, percebe-se que, a 1 m de profundidade, 60,9% da área urbana de Blumenau/SC foi orientada para fundação profunda, enquanto 39,1% para fundação superficial. Outra observação que pode ser realizada é que não há presença considerável de água para a profundidade analisada.

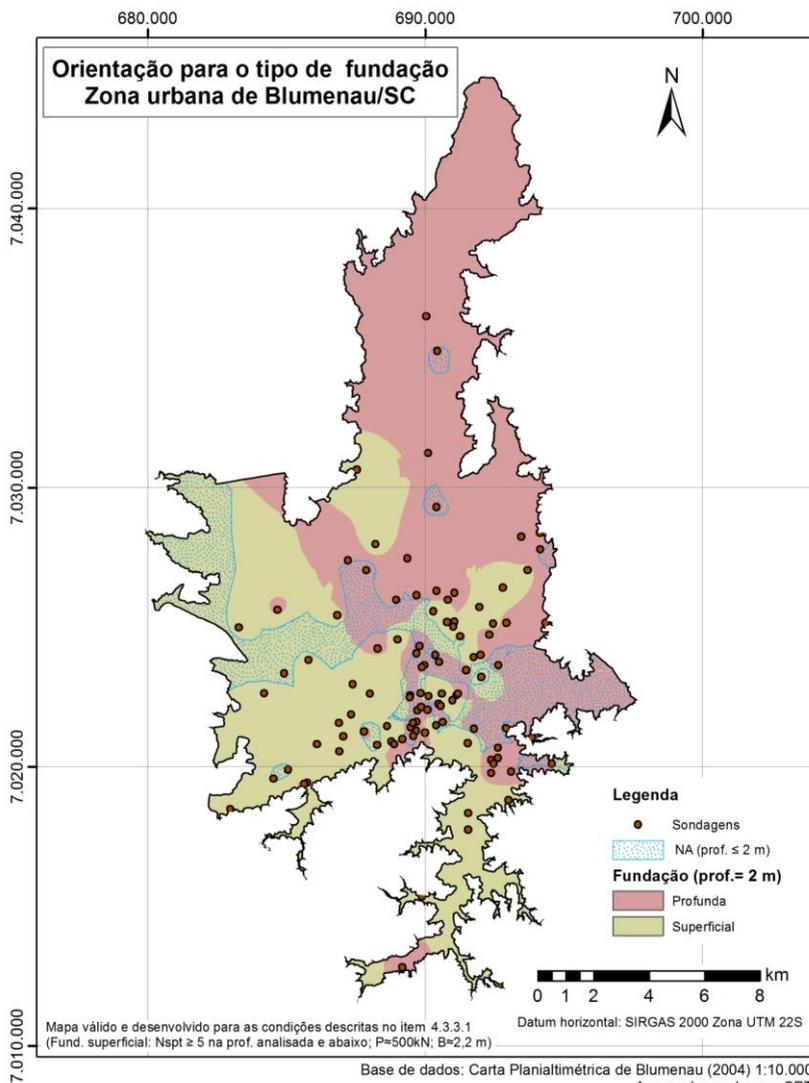
O Mapa 18 apresenta as orientações de fundação rasa e profunda com zonas semelhantes ao Mapa 17, apresentado anteriormente. Todavia, a presença do lençol freático mostra-se mais representativa para a profundidade de 2 m aqui analisada, sendo encontrada principalmente plana do entorno do rio Itajaí-Açu. A área coberta por água, a 2 m de profundidade, abrange 20,8% da zona urbanizada do município, conforme exposto anteriormente na Tabela 5.

Por meio da Tabela 7, é possível extrair que, a 2 m de profundidade, 54,1% da área urbana de Blumenau/SC foi orientada para fundação profunda, enquanto 45,9% para fundação superficial.

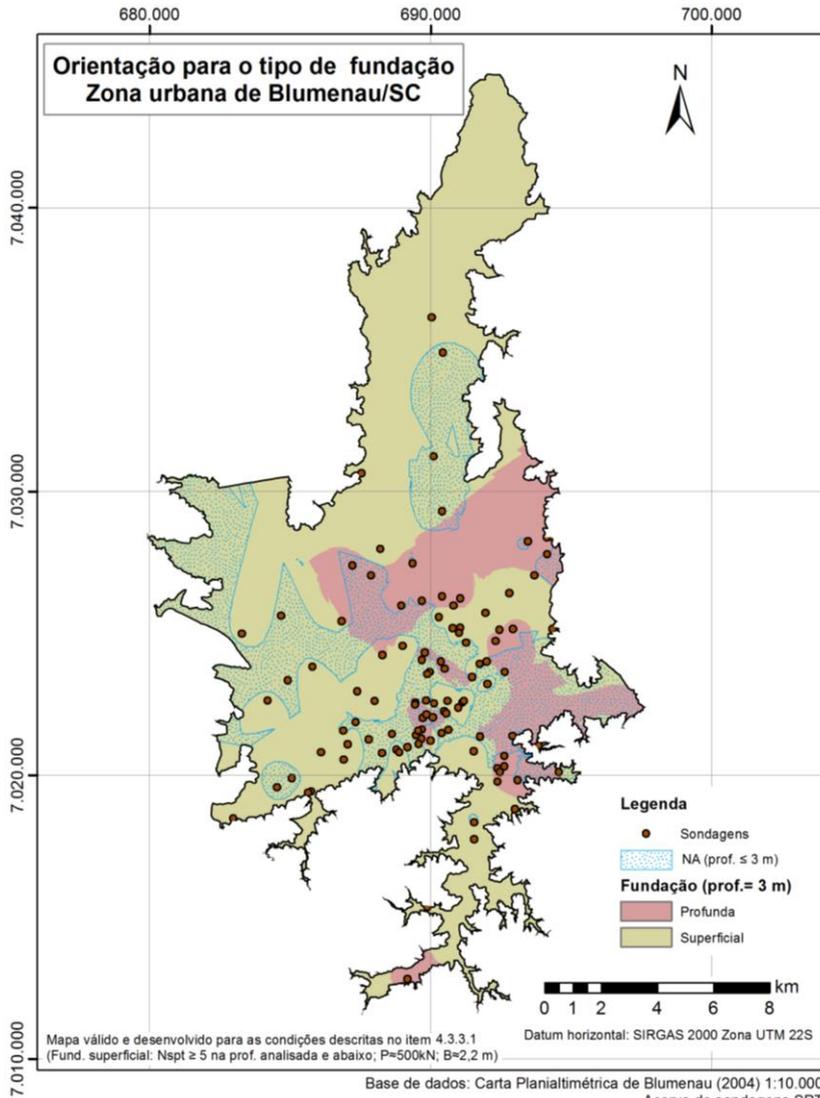
O Mapa 19 possui em sua maioria orientação para fundação superficial. Zonas com orientação para fundação profunda ainda são encontrados nos bairros de Salto do Norte, Salto, Fidélis e Fortaleza Alta (bairros ao norte) e Vila Nova, Velha, Nova Esperança, Ponta Aguda, Vorstadt, Ribeirão Fresco e Garcia (bairros ao sul). Conforme a Tabela 7, a 3 m de profundidade, 21,0% da área urbana de Blumenau/SC foi orientada para fundação profunda frente a 79,0% orientada para rasa.

Visualmente, pode-se perceber que a presença de água aumentou em relação ao mapa anterior analisado, e agora abrange áreas além do entorno do rio Itajaí-Açu, avançando para o sentido norte.

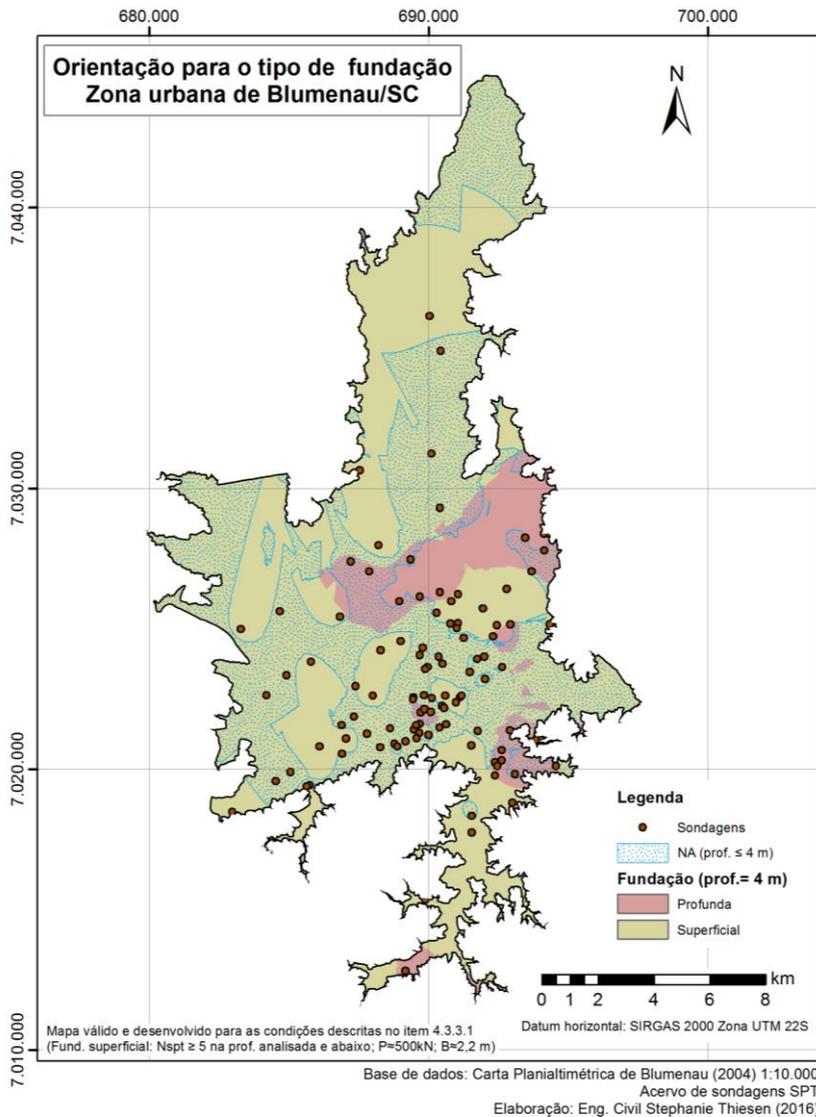
Mapa 18 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 2 m.



Mapa 19 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 3 m.



Mapa 20 – Orientação para fundação – Zona urbana – Prof. = 4 m.



O Mapa 20 apresenta, em grande extensão, orientação para fundação superficial. As zonas nos bairros de Salto do Norte, Fidélis e Fortaleza Alta (bairros ao norte) e Vila Nova, Velha, Ribeirão Fresco e

Garcia (bairros ao sul) mantêm-se com a previsão de utilização de fundação profunda. Por meio da Tabela 7, percebe-se que, a 4 m de profundidade, 13,5% da área urbana de Blumenau/SC foi orientada para fundação profunda, enquanto 86,5% para rasa.

A área coberta por água, a 4 m de profundidade, abrange 53,2% da zona urbanizada do município, conforme já apresentado na Tabela 5.

Tabela 7 – Porcentagem da área x Tipo de fundação – Zona urbana de Blumenau/SC.

Orientação para fundação	% área			
	Prof. = 1 m	Prof. = 2 m	Prof. = 3 m	Prof. = 4 m
Profunda	60,9%	54,1%	21,0%	13,5%
Superficial	39,1%	45,9%	79,0%	86,5%
Total	100%	100%	100%	100%
Mapa	Mapa 17	Mapa 18	Mapa 19	Mapa 20

Fonte: Elaborado pela autora.

Quantitativamente, por meio da Tabela 7, é possível perceber que a orientação para fundações rasas cresce com o aumento da profundidade, passando de 39,1% na profundidade de 1 m para 86,5% na profundidade de 4 m. Comportamento esse esperado, uma vez que o método prevê a utilização dos valores de N_{SPT} como parâmetro de definição da utilização de fundações rasas ou profundas e que há predominância de solos residuais na região, cujo comportamento esperado é de ganho de resistência do solo com o aumento da profundidade.

Finalmente, destaca-se que apesar da especificidade de aplicação dos mapas apresentados, uma vez da existência do banco de dados, é possível a elaboração de novos cenários considerando diferentes grandezas de carga e parâmetros para definição do tipo de fundação, superficial ou profunda.

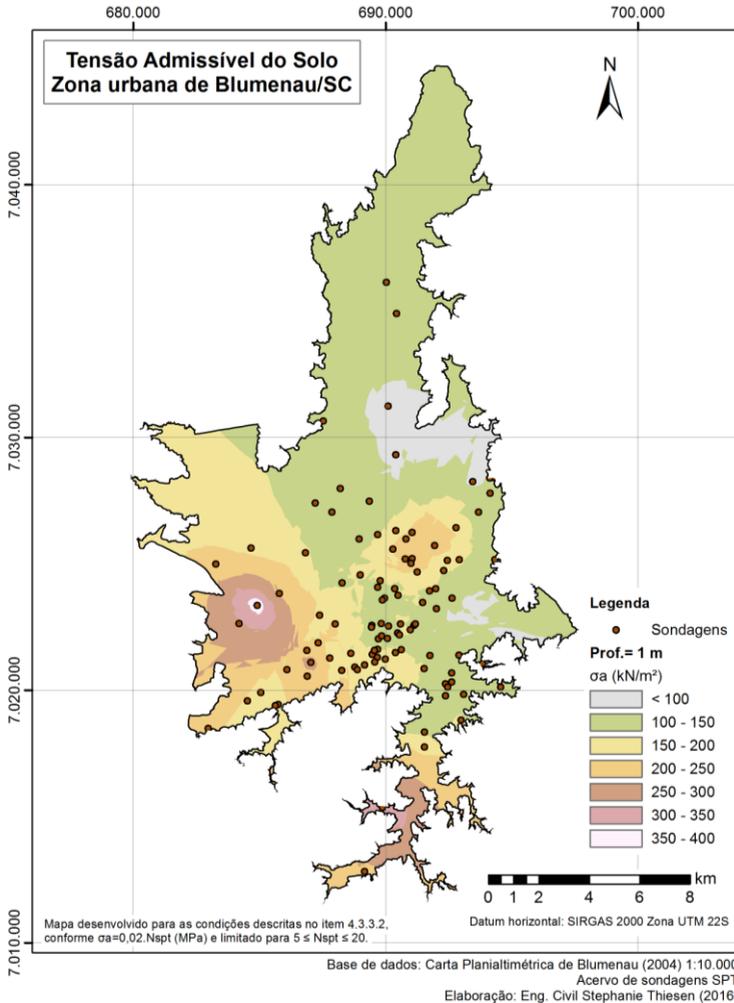
5.1.6 Tensão admissível para fundação superficial

Tendo em vista a aplicação exclusiva para fundação superficial, âmbito de validade da equação a partir da qual os mapas foram desenvolvidos (exposto no item 4.3.3.2), estudou-se apenas as profundidades onde há viabilidade econômica para tal solução. Desta

forma, os mapas foram desenvolvidos para 1 m (Mapa 21), 2 m (Mapa 22), 3 m (Mapa 23) e 4 m de profundidade (Mapa 24). Quantitativamente, a porcentagem de área por faixa de valor de tensão admissível podem ser acompanhada após apresentação dos mapas, na Tabela 8.

As regiões acinzentadas, zonas onde a $\sigma_a < 100 \text{ kN/m}^2$, ou seja, $N_{\text{SPT}} < 5$, são áreas fora do domínio de aplicação da Equação (1) e por isso não tem validade nos mapas apresentados. Valores de $N_{\text{SPT}} > 20$, limite superior da equação, por segurança, foram considerados na faixa de tensão mais elevada, $350 \text{ kN/m}^2 < \sigma_a \leq 400 \text{ kN/m}^2$. Destaca-se que o cálculo da tensão admissível não se deu pela média dos N_{SPT} no bulbo de tensões, conforme recomendado pela Equação (1), e sim para cada profundidade analisada. Dessa forma, há uma maior flexibilidade na utilização dos mapas desenvolvidos, não restringindo sua utilização para uma geometria única pré-definida. Os valores médios nesse caso, ainda podem ser obtidos pela simples média das tensões admissíveis nas profundidades que compõem o bulbo de tensões.

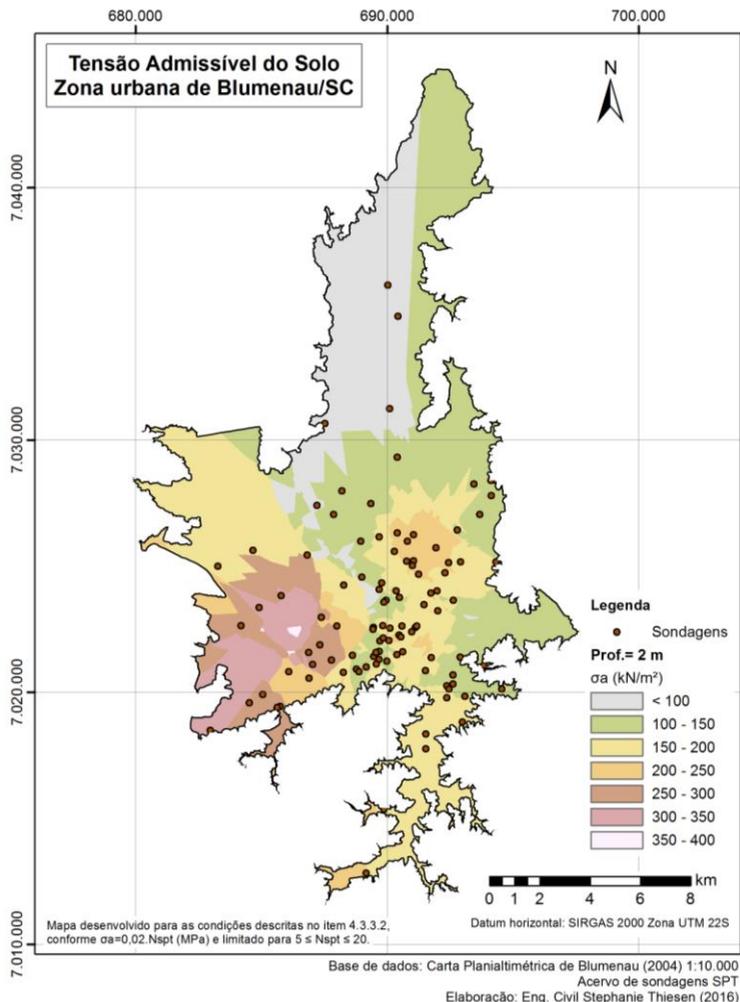
Mapa 21 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 1 m.



Por meio do Mapa 21 é possível perceber regiões com maiores tensões admissíveis a sudoeste da zona urbana de Blumenau/SC, enquanto a nordeste e norte, apresenta regiões com menores tensões na profundidade de 1 m. Conforme a Tabela 8, mais de 90% da área do Mapa 21 apresenta tensão admissível inferior a 250 kN/m² na

profundidade de 1 m, sendo 52,1% do total concentrado na faixa entre 100 e 150 kN/m².

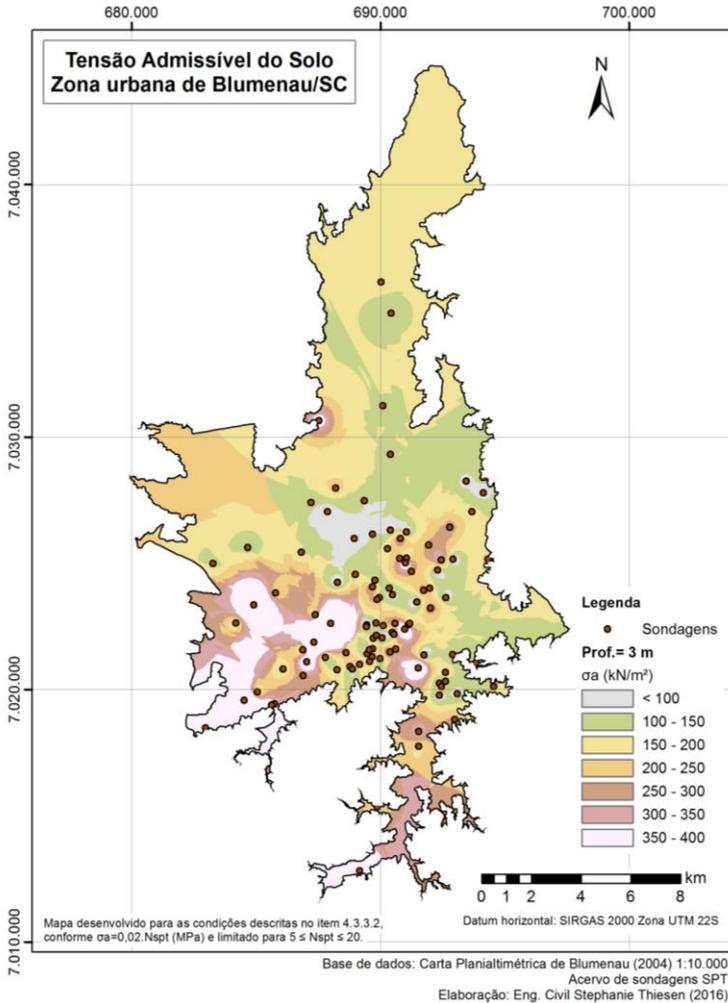
Mapa 22 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 2 m.



Apesar de um pouco alterado, o comportamento de mantém semelhante para a profundidade de 2 m (Mapa 22) em relação a de 1 m (Mapa 21), ou seja, com maiores tensões admissíveis asudoeste e menores a nordeste e norte. Conforme Tabela 8, mais de 90% da área

do Mapa 22 apresenta tensão admissível inferior a 300 kN/m² na profundidade de 2 m, sendo 61,3% do total concentrado na faixa entre 100 e 200 kN/m².

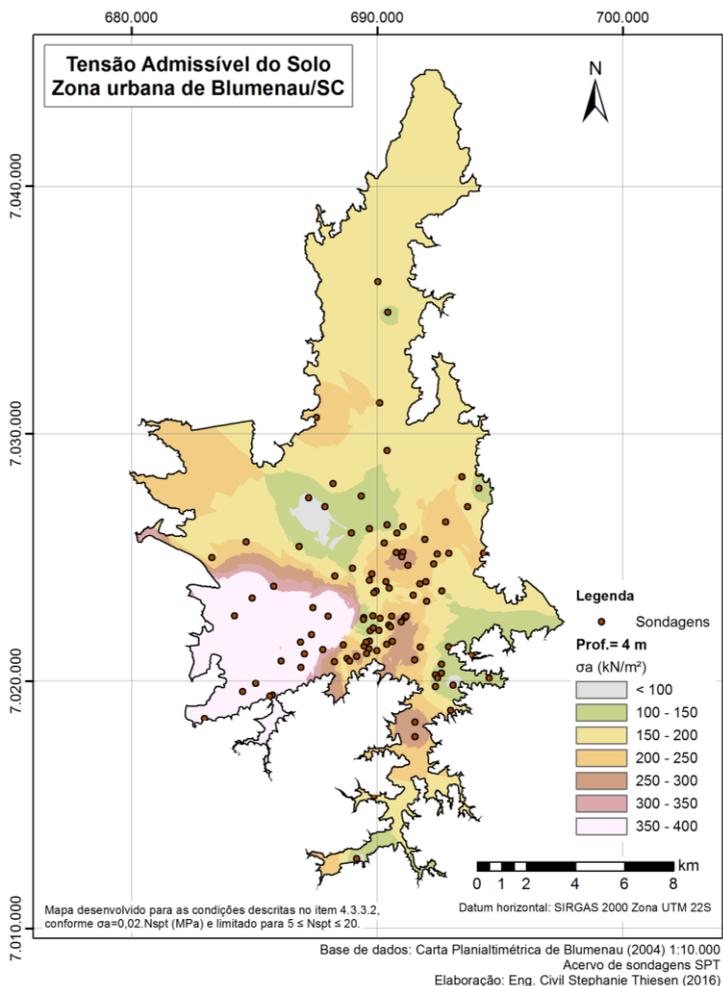
Mapa 23 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 3 m.



Para a profundidade de 3 m (Mapa 23), percebe-se visualmente a incorporação acentuada de áreas com valores de tensão admissível mais elevados. Quantitativamente, a Tabela 8 apresenta um aumento de

aproximadamente 10% na frequência das áreas compreendidas na faixa de tensão admissível entre 150 – 200 kN/m², 8% entre 200 – 250 kN/m², 9% entre 350 – 400 kN/m² e decréscimo de aproximadamente 16% para a faixa de tensão admissível < 100 kN/m² e 10% para a faixa entre 100 – 150 kN/m², em relação às mesmas faixas na profundidade de 2 m. 52,9% do total da área está concentrado na faixa entre 150 e 250 kN/m².

Mapa 24 – σ_a para Fundação Superficial – Zona urbana – Prof. = 4 m.



O Mapa 24 apresenta no sudoeste da zona urbana de Blumenau/SC regiões com maiores tensões admissíveis (coloração rosada, nos bairros de Salto Weissbach, Escola Agrícola, Água Verde, Passo Manso, Velha Central e Velha Grande), resultado que, comparado com as mesmas regiões no mapa de impenetrável à percussão (Mapa 16), apresentam profundidade de impenetrável mais raso. Conforme esperado, na profundidade de 4 m, houve um ganho de tensão admissível em relação às profundidades inferiores. Segundo a Tabela 8, 67,9% do total da área está concentrado na faixa entre 150 e 250 kN/m² e 13,2% entre 350 e 400 kN/m².

Tabela 8 – Porcentagem da área x σ_a para fundação superficial – Zona urbana.

σ_a (kN/m ²)	% de área			
	Prof. = 1 m	Prof. = 2 m	Prof. = 3 m	Prof. = 4 m
< 100	6,6%	19,5%	3,7%	1,2%
100 - 150	52,1%	32,2%	21,8%	11,5%
150 - 200	21,7%	29,1%	38,6%	49,6%
200 - 250	12,4%	6,8%	14,3%	18,3%
250 - 300	5,8%	6,9%	7,9%	4,5%
300 - 350	1,4%	5,5%	4,7%	1,6%
350 - 400	0,1%	0,1%	8,9%	13,2%
Total	100%	100%	100%	100%
Mapa	Mapa 21	Mapa 22	Mapa 23	Mapa 24

Fonte: Elaborado pela autora.

Por segurança, as camadas inferiores da cota de apoio das fundações superficiais devem apresentar maior resistência que a própria camada de apoio. Vale destacar então, a importância de associar as tensões admissíveis à resistência do solo nas camadas inferiores à profundidade analisada. Desta forma, para a compreensão da resistência do solo com a profundidade, os mapas de isovalores de N_{SPT} , apresentados a seguir, podem ser aplicados.

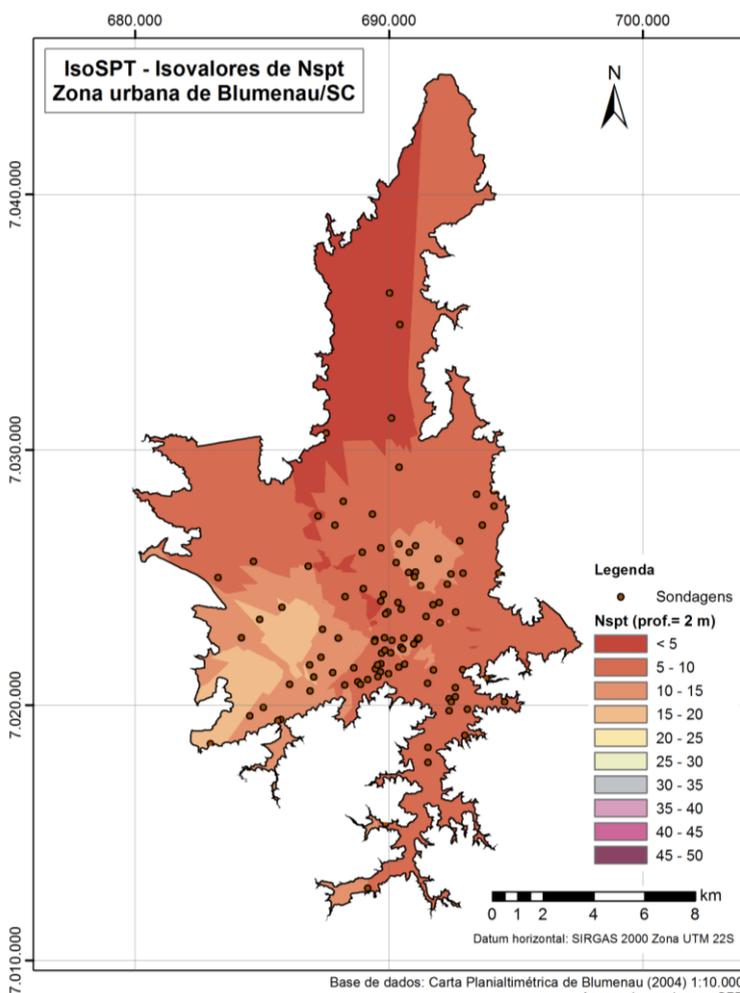
5.1.7 Isovalores de N_{SPT} – IsoSPT

Os mapas de isovalores de N_{SPT} foram desenvolvidos a cada dois metros de profundidade, iniciando a 2 m de profundidade (Mapa 25) e finalizando a 20 m de profundidade (Mapa 34), quando, para a faixa de valores de N_{SPT} escolhida, por contraste visual, houve certa predominância de cores entre os mapas desenvolvidos. Destaca-se,

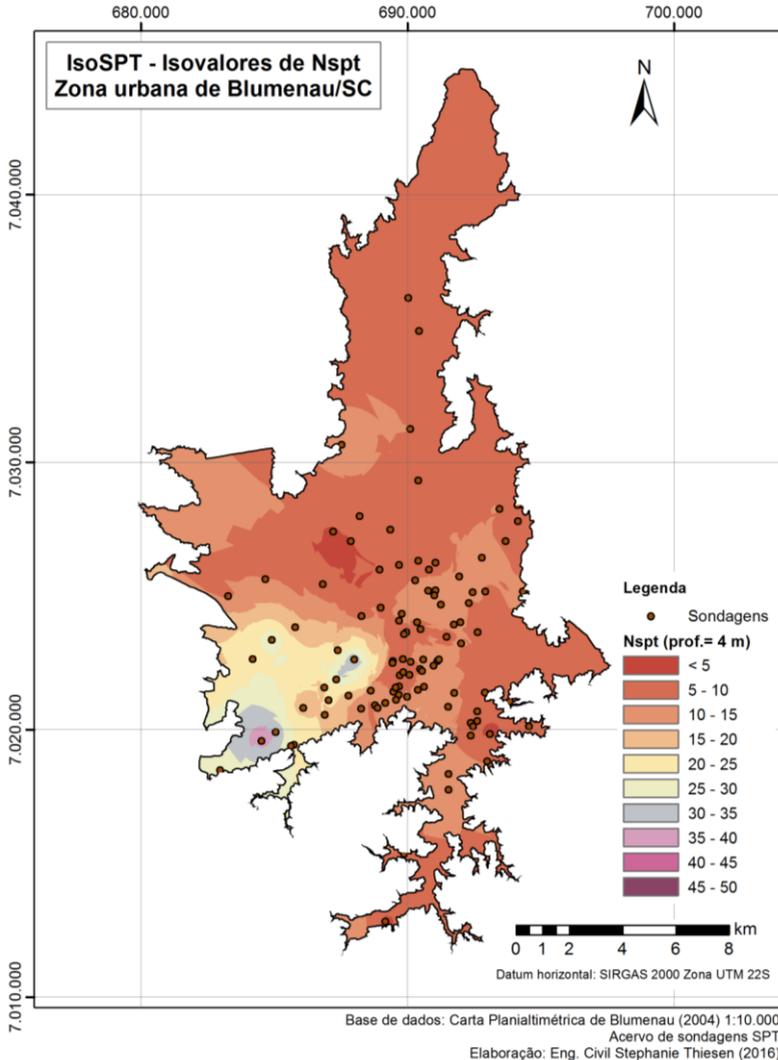
porém, que, apesar de os mapas de isovalores terem sido desenvolvidos a cada dois metros de profundidade, é possível o desenvolvimento do mesmo para qualquer profundidade desejada e ainda alterar as faixas de valores, conforme interesse.

A Tabela 9 apresenta ao final da seção, por sua vez, discrimina a frequência de áreas para cada faixa de valores de N_{SPT} .

Mapa 25 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 2 m.



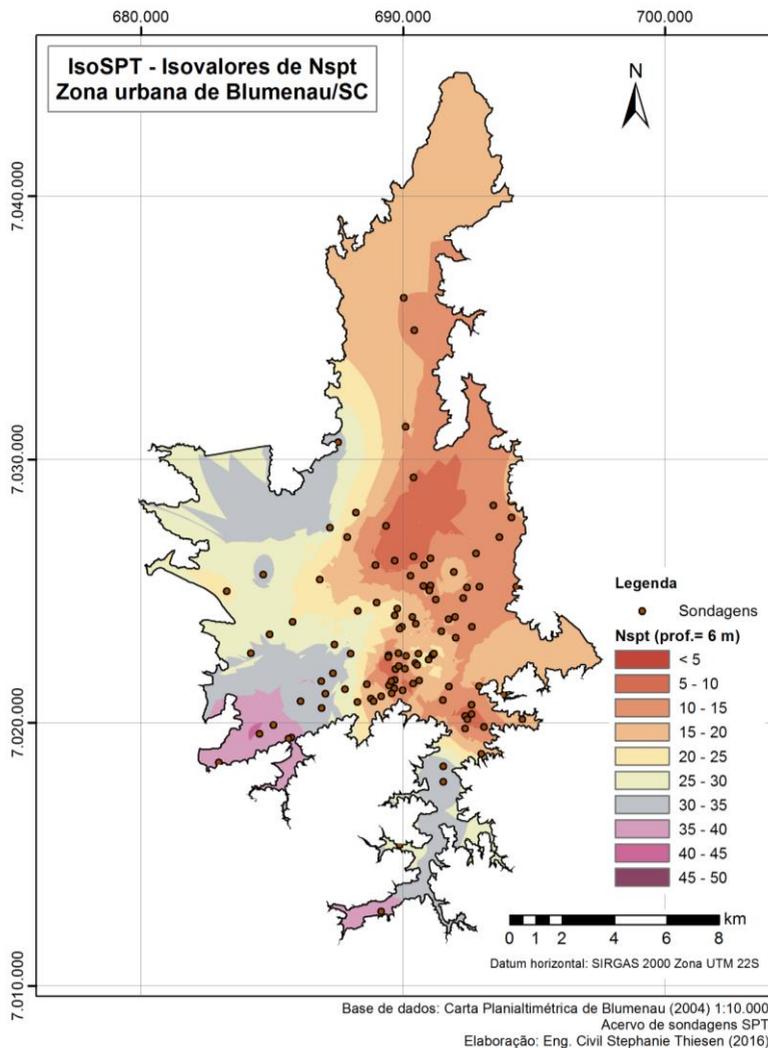
Mapa 26 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 4 m.



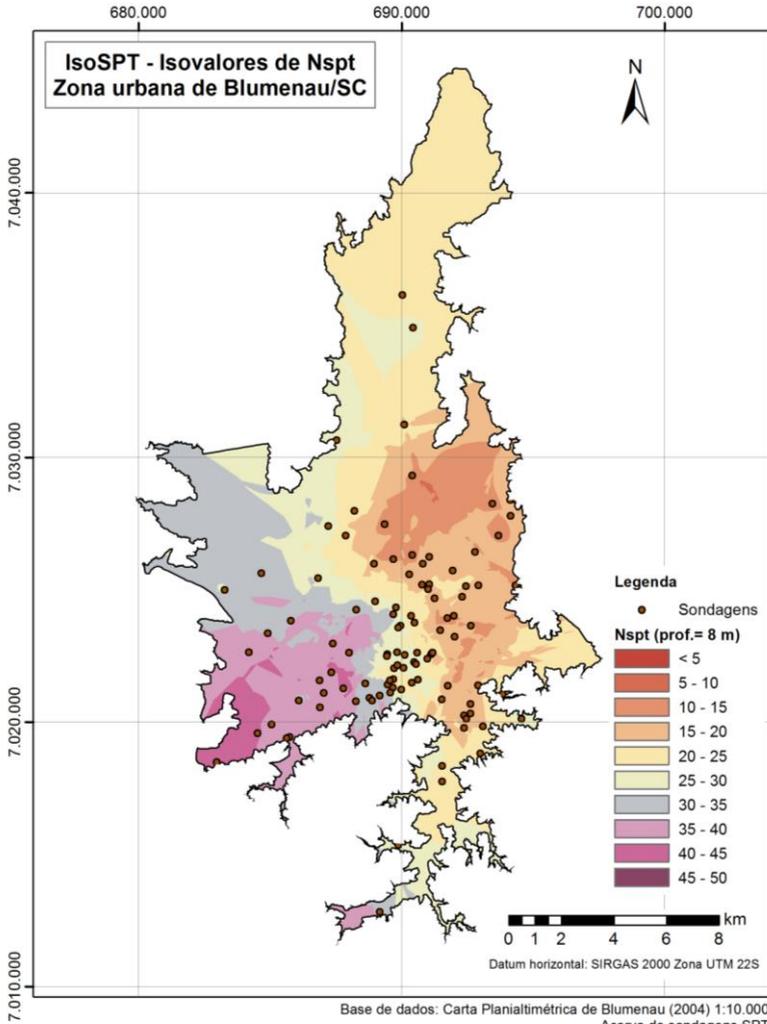
Por contraste visual, a 2 m de profundidade (Mapa 25), é possível perceber tonalidades mais avermelhadas/alaranjadas (faixas de menor valor de N_{SPT}) por toda a zona urbana de Blumenau/SC, avançando para tonalidades de valores de N_{SPT} intermediário (laranja claro/amarelo) na

região sudoeste a 4 m de profundidade (Mapa 26). Conforme a Tabela 9, em ambos os mapas, mais de 60% da área encontram-se entre $5 \leq N_{SPT} < 10$.

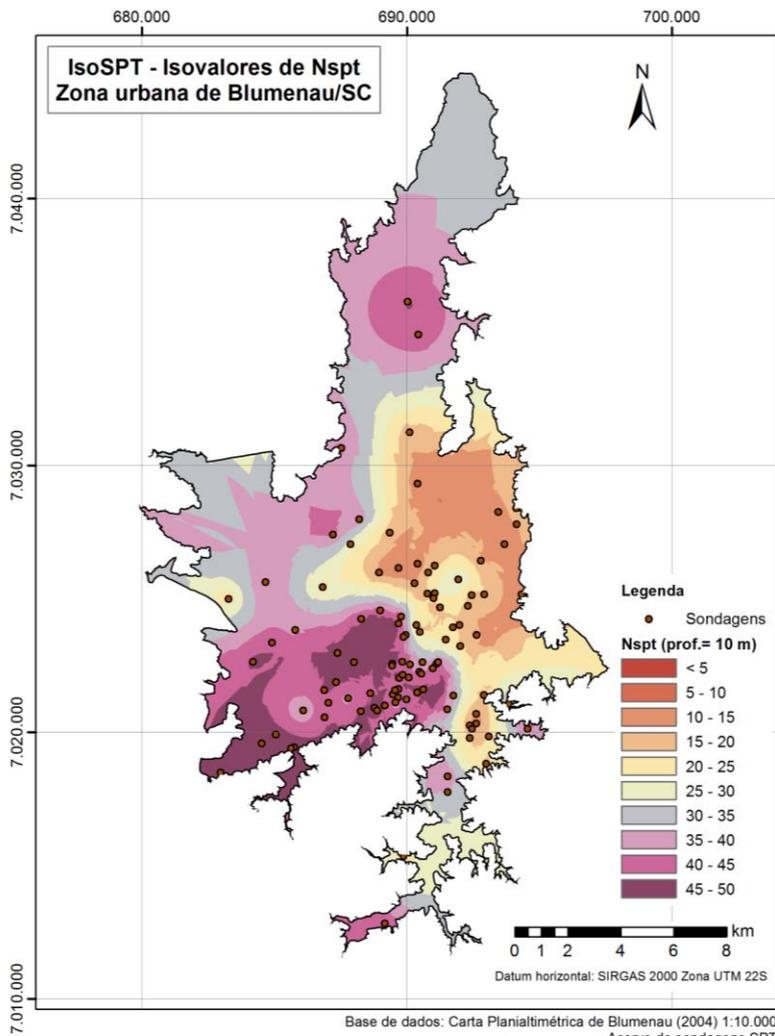
Mapa 27 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 6 m.



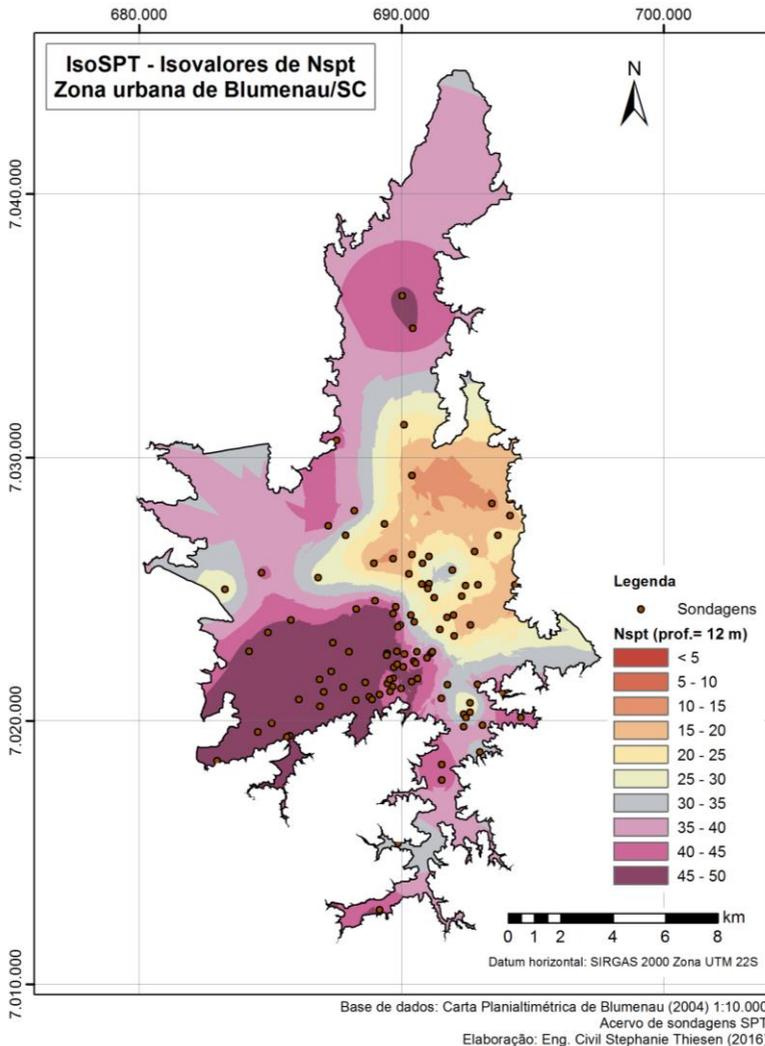
Mapa 28 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 8 m.



Mapa 29 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 10 m.



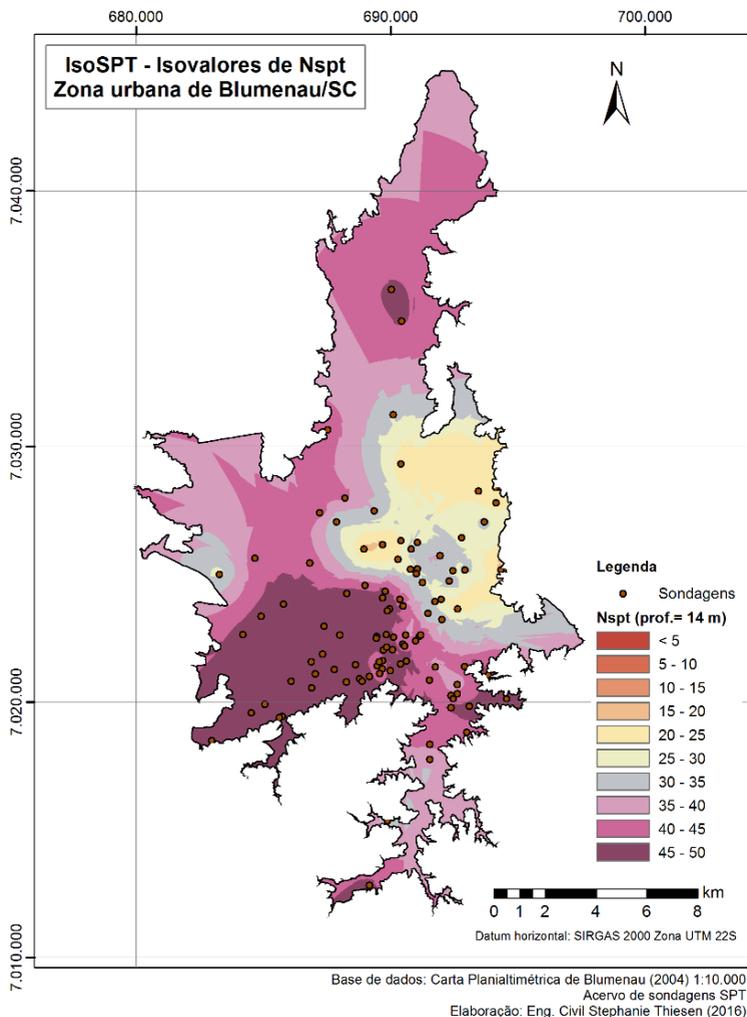
Mapa 30 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 12 m.



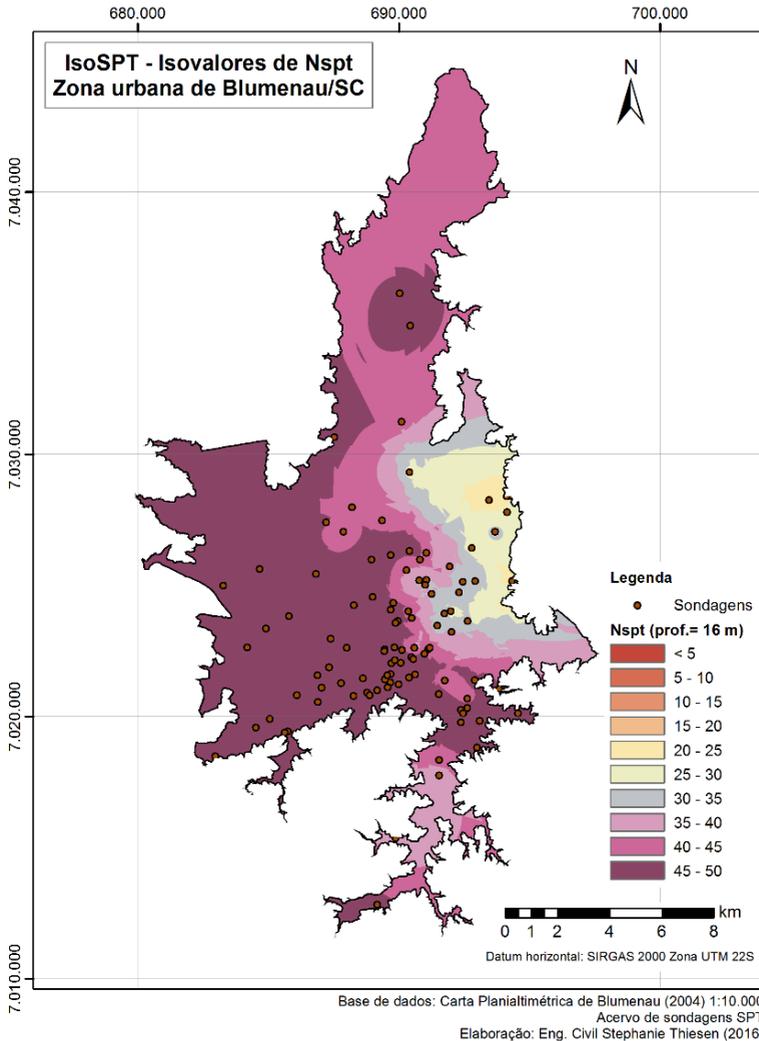
As zonas com maior N_{SPT} , a 6 m (Mapa 27), 8 m (Mapa 28), 10 m (Mapa 29) e 12 m de profundidade (Mapa 30), avançam da região sudoeste para nordeste, melhorando a resistência do solo da zona urbanizada como um todo. Numericamente, é possível perceber um acréscimo de área nas zonas com maiores valores de N_{SPT} . Conforme a

Tabela 9, mais de 50% da área concentram-se com N_{SPT} entre 10 – 20, 15 – 30, 30 – 45 e 35 – 50 a 6, 8, 10 e 12 m de profundidade, respectivamente.

Mapa 31 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 14 m.



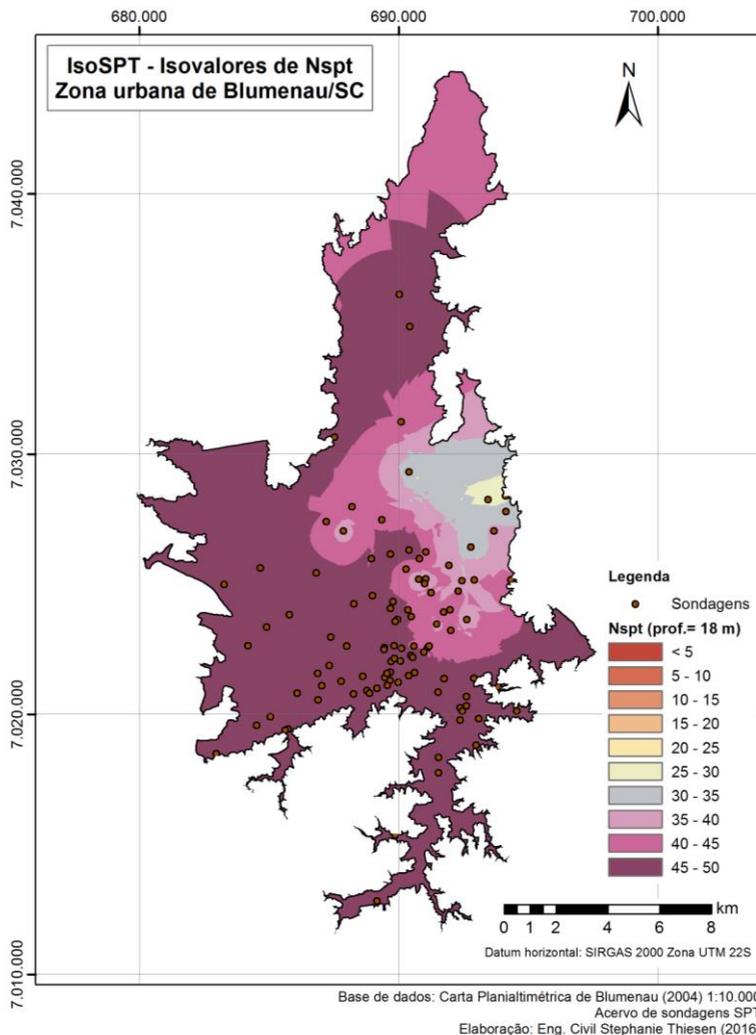
Mapa 32 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 16 m.



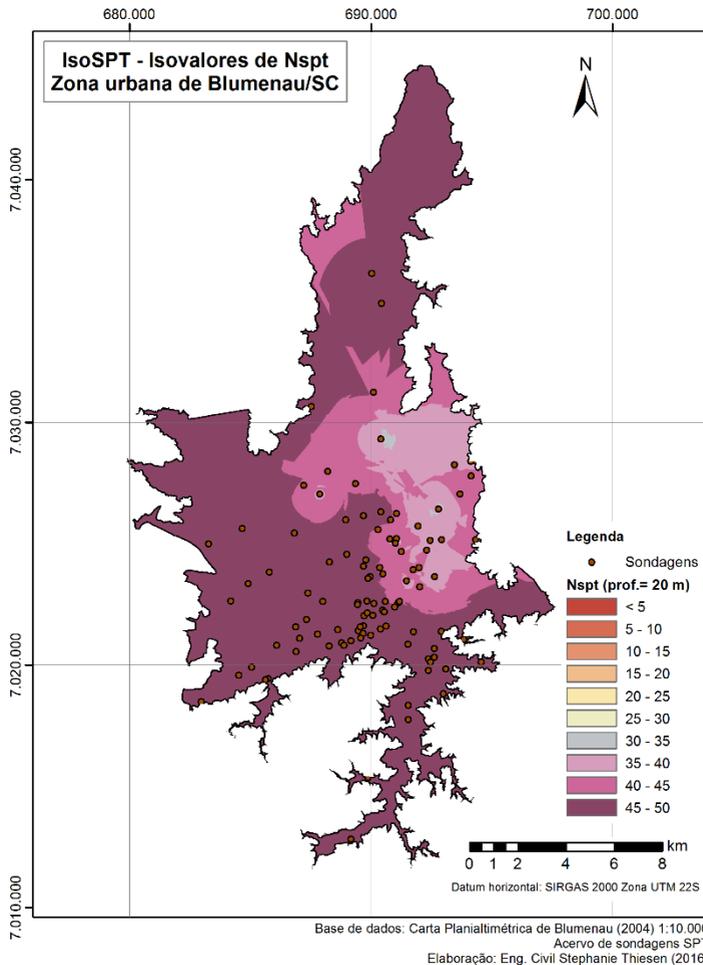
Por contraste visual, a 14 m (Mapa 31) e 16 m de profundidade (Mapa 32) é possível perceber que a última área a apresentar melhoria na resistência do solo, em termos de N_{SPT} , é a região nordeste, correspondente aos bairros de Fidélis, Fortaleza Alta, Tribess e Nova Esperança. Conforme a Tabela 9, mais de 50% da área concentram-se

com N_{SPT} entre 35 – 45 e 40 – 50 a 14 e 16 m de profundidade, respectivamente. Para ambos os mapas, os valores mínimos de N_{SPT} equivale a 20 golpes.

Mapa 33 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 18 m.



Mapa 34 – Isovalores de SPT (isoSPT) – Zona urbana – Prof. = 20 m.



Uma estabilização de altos valores de N_{SPT} começa a se iniciar a 18 m (Mapa 33) e é completamente atingida a 20 m de profundidade (Mapa 34), quando os valores de N_{SPT} do último apresentam-se superiores a 35 golpes (coloração rosada). Quantitativamente, por meio da Tabela 9, é possível afirmar que, para ambos os casos, aproximadamente 90% da área apresenta valores de N_{SPT} entre 40 e 50, valores considerados elevados e próximos ao impenetrável a sondagem à percussão.

Qualitativamente, independentemente da profundidade analisada, o subsolo de Blumenau/SC apresenta um decréscimo de valores de N_{SPT} de sudoeste a nordeste. Quantitativamente, por meio da Tabela 9, é possível perceber que enquanto a 2 m de profundidade os resultados concentram-se em até 20 golpes, a 20 m os dados apresentam-se 30 e 50 golpes, com aproximadamente 70% da área entre 45 e 50 golpes. A partir de 14 m de profundidade não há presença de áreas com $N_{SPT} < 15$ golpes.

De forma geral, é possível notar o crescimento das áreas com maior N_{SPT} conforme o aumento da profundidade. Comportamento esse esperado, considerando o ganho de resistência do solo com o aumento da profundidade para os solos residuais, predominantes na região.

Tabela 9 – Porcentagem da área x N_{SPT} – Zona urbana de Blumenau/SC.

$N_{SPT}/Prof.$	% de área				
	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m
< 5	19,0%	1,2%	-	-	-
5 - 10	61,3%	61,1%	4,7%	0,1%	-
10 - 15	14,2%	22,9%	20,8%	6,9%	8,5%
15 - 20	5,6%	3,9%	30,8%	15,9%	8,3%
20 - 25	-	5,7%	7,7%	32,8%	9,2%
25 - 30	-	3,5%	15,6%	15,7%	9,7%
30 - 35	-	1,5%	15,8%	15,2%	20,9%
35 - 40	-	0,3%	4,5%	10,6%	21,2%
40 - 45	-	-	0,1%	2,8%	13,8%
45 - 50	-	-	-	-	8,4%
Mapa	Mapa 25	Mapa 26	Mapa 27	Mapa 28	Mapa 29
$N_{SPT}/Prof$	12 m	14 m	16 m	18 m	20 m
< 5	-	-	-	-	-
5 - 10	-	-	-	-	-
10 - 15	2,0%	-	-	-	-
15 - 20	8,7%	0,1%	-	-	-
20 - 25	7,3%	6,5%	1,1%	-	-
25 - 30	8,0%	8,5%	6,1%	0,7%	-
30 - 35	12,1%	10,6%	5,9%	5,6%	0,2%
35 - 40	31,6%	25,1%	9,8%	6,7%	9,5%
40 - 45	14,5%	29,5%	28,6%	22,3%	18,4%
45 - 50	15,8%	19,7%	48,5%	64,7%	71,9%
Mapa	Mapa 30	Mapa 31	Mapa 32	Mapa 33	Mapa 34

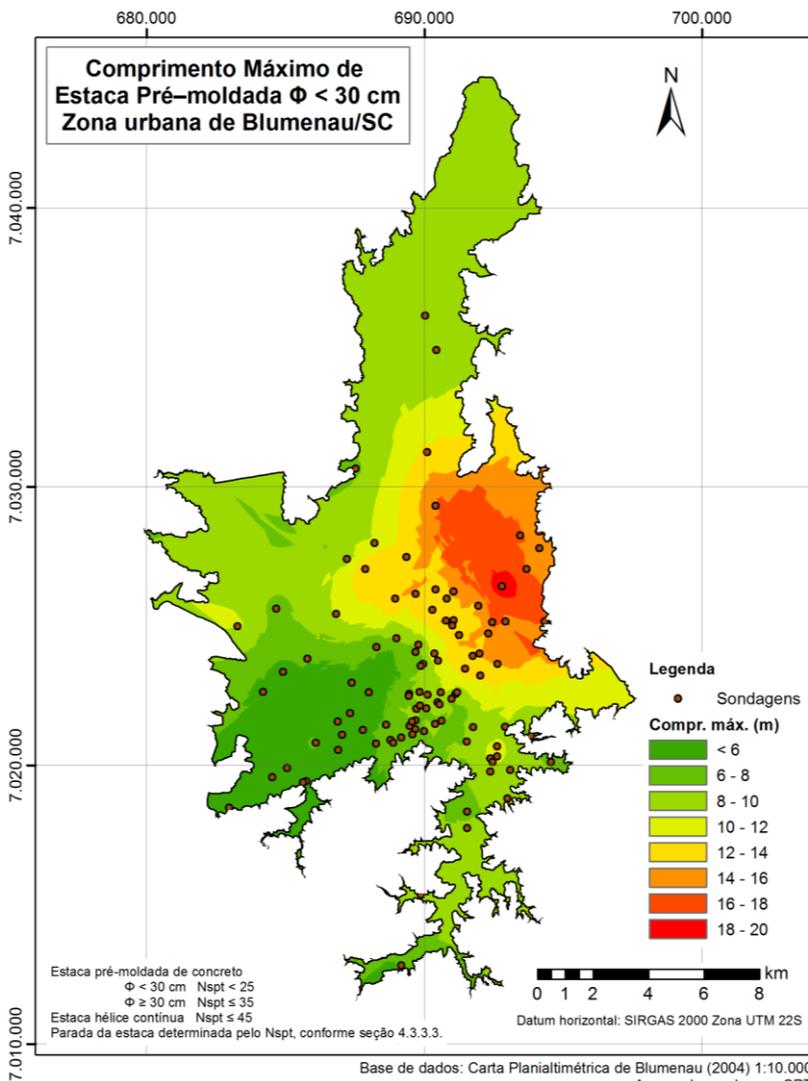
Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.8 Comprimento máximo de estacas

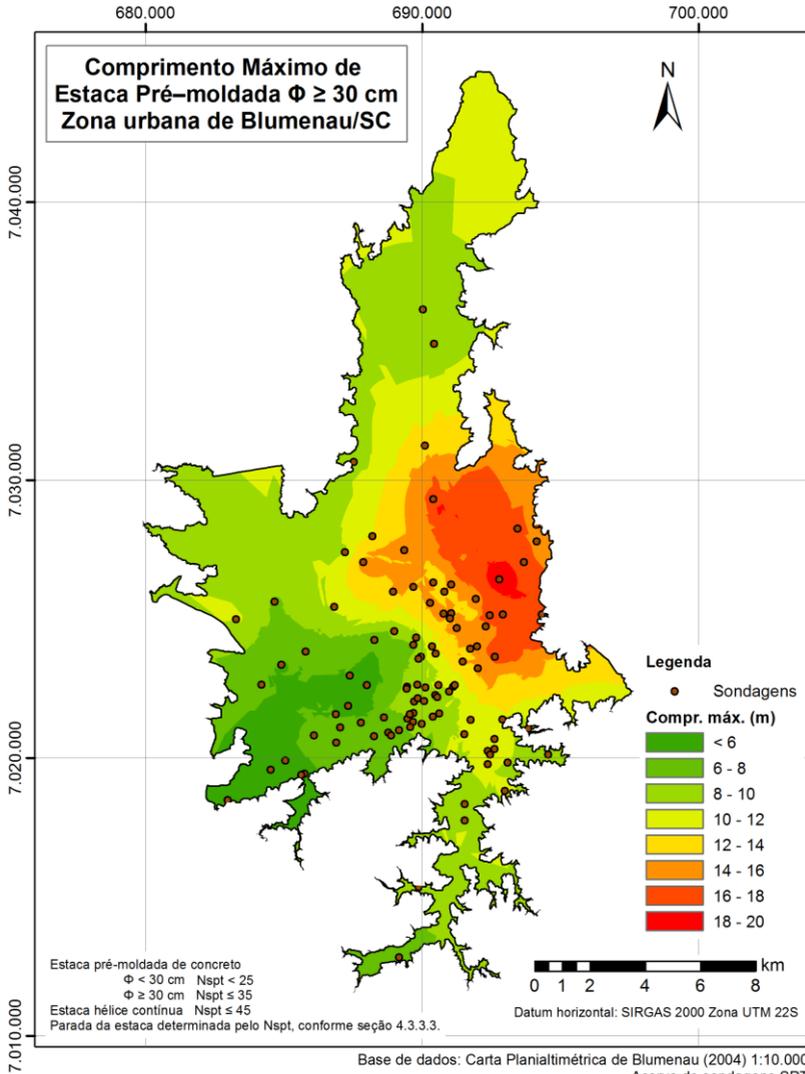
Os mapas de comprimento máximo de estacas foram desenvolvidos para os tipos de estacas mais comuns na prática de fundações de Blumenau/SC: estacas hélice contínua e pré-moldada. No algoritmo desenvolvido para obtenção dos mapas, o comprimento máximo de cada estaca considerou a profundidade onde o limite superior para execução das estacas, em termos de N_{SPT} (conforme Quadro 9), foi encontrado.

Os resultados são apresentados para estaca pré-moldada com diâmetro inferior a 30 cm (Mapa 35), estaca pré-moldada com diâmetro igual ou superior a 30 cm (Mapa 36) e estaca hélice contínua (Mapa 37). Conforme a faixa de comprimento, as regiões verdes tendem a apresentar estacas mais curtas (até 12 m de comprimento) e as regiões alaranjadas e vermelhas estacas mais longas (variando de 12 a 20 m de comprimento).

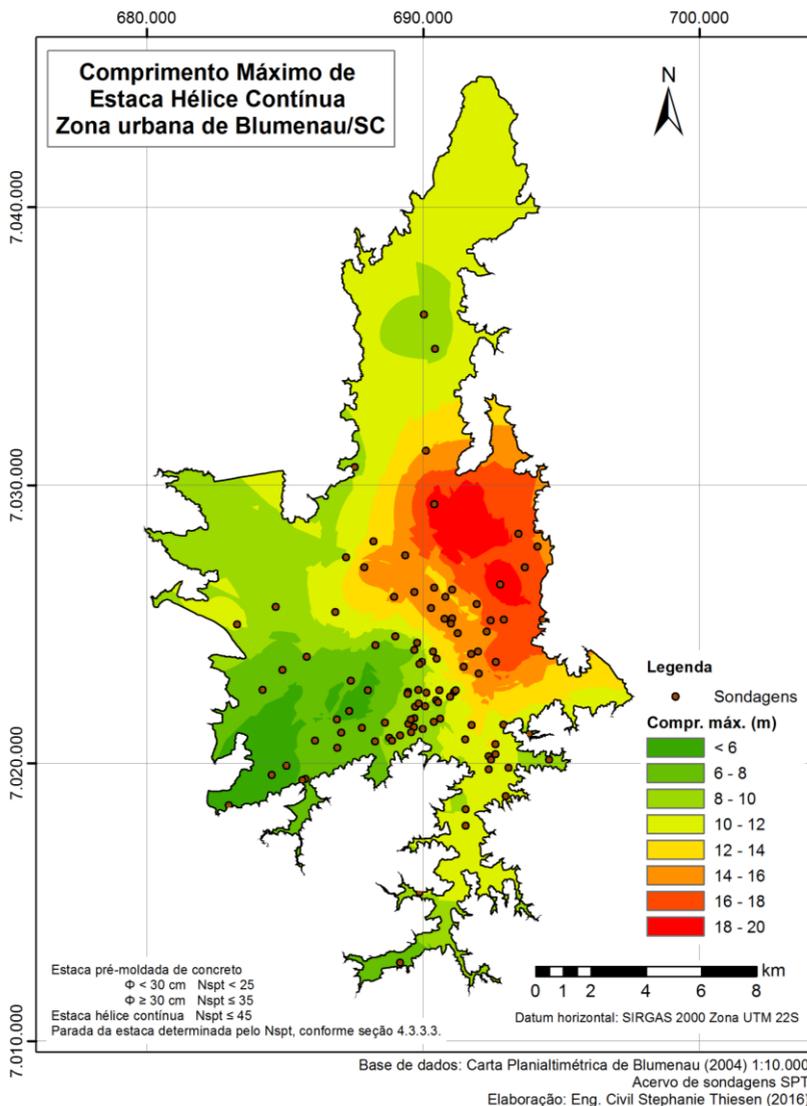
Os bairros que apresentaram a condição impenetrável à percussão mais profundo, como os bairros de Fidélis, Fortaleza Alta, Fortaleza, Tribess e Nova Esperança, à nordeste da zona urbana de Blumenau/SC, também apresentaram maior previsão de comprimento máximo da estaca nos três cenários apresentados. A região sudoeste, contemplando os bairros de Passo Manso, Salto Weissbach, Água Verde, Velha Central, Escola Agrícola e Velha, demonstrou ser uma área com previsão de menor comprimento de estaca.

Mapa 35 – Comprimento de estaca pré-moldada ($\Phi < 30$ cm) – Zona urbana.

Mapa 36 – Comprimento de estaca pré-moldada ($\Phi \geq 30$ cm) – Zona urbana.



Mapa 37 – Comprimento de estaca hélice contínua – Zona urbana.



Tendo em vista que os resultados dependem dos valores de N_{STP} , percebe-se que não houve variação das regiões de maiores e menores comprimentos de estacas, havendo apenas alteração da área de

abrangência das faixas de comprimento das estacas analisadas. Quantitativamente, a Tabela 10 apresenta as porcentagens de área nas faixas de comprimento para cada estaca analisada.

Tabela 10 – Porcentagem da área x Comprimento máximo da estaca – Zona urbana de Blumenau/SC.

Comprimento máximo da estaca (m)	% de área		
	Pré-moldada ($\phi < 30$)	Pré-moldada ($\phi \geq 30$)	Hélice contínua
< 6	10,2%	7,3%	4,9%
6 - 8	10,9%	11,2%	11,3%
8 - 10	45,6%	35,5%	22,2%
10 - 12	9,8%	20,0%	33,4%
12 - 14	8,9%	9,2%	8,4%
14 - 16	6,9%	8,4%	8,7%
16 - 18	5,2%	7,8%	7,6%
18 - 20	2,4%	0,6%	3,6%
Total	100%	100%	100%
Mapa	Mapa 35	Mapa 36	Mapa 37

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme os resultados numéricos, percebe-se que a estaca pré-moldada $\phi < 30$ tem maior ocorrência (45,6%) no comprimento entre 6 e 8 m, enquanto a pré-moldada $\phi \geq 30$ e a hélice contínua apresentam maior frequência entre os comprimentos de 8 a 12 m, 55,5% e 55,6%, respectivamente. Uma vez que o limite da execução da estaca hélice contínua ($N_{SPT}=45$) é maior que os demais analisados, esse tipo de estaca apresentou frequências mais elevadas nas faixas de maior comprimento máximo de estacas.

Conforme informado por profissionais da região, é comum em Blumenau/SC a utilização de estacas pré-moldadas quando o comprimento do elemento de fundação não ultrapassa 12 m, após esse valor, a solução passa a necessitar de luvas, que encarecem a sua execução. A partir daí, passa a ser mais comum a utilização de estacas do tipo hélice contínua. Estacas metálicas são soluções caras para a região, mas apresentam viabilidade na região quando o comprimento máximo da estaca varia entre 4 e 6 m. Em termos de frequência, para comprimentos até 12 m, as estacas pré-moldadas apresentaram

ocorrência de aproximadamente 75%, enquanto acima dos 12 m, a estaca hélice contínua apresentou cerca de 30%.

Finalmente, apesar de estas informações não definirem o comprimento real da estaca em si, elas auxiliam na previsão de custos e análise de viabilidade de projetos de fundações.

5.1.9 Validação, limitações e aprimoramentos dos resultados

Os mapas de aptidão para fundação foram desenvolvidos com o objetivo de direcionar os usuários em termos da profundidade do lençol freático e do impenetrável à percussão, orientação para fundação superficial ou profunda, tensões admissíveis para fundação superficial, mapa de isovalores de N_{SPT} e comprimento máximo de fundação por estacas.

Dentre as considerações realizadas no modelo, podem-se citar as seguintes limitações que podem acarretar em alguma imprecisão:

- Devido à quantidade de dados, as sondagens não foram segregadas de acordo com a data, logo, não fizeram distinção da sazonalidade, por exemplo, no que se refere ao nível d'água em épocas de maior e menor precipitação;
- A classificação geotécnica dos laudos de sondagem localizados na mancha urbana apresenta certa subjetividade, já que foi realizada por meio de análise visual dos laudos, apesar de possuir referências e padronização;
- Tendo em vista o volume de trabalho, não foram cadastrados no banco de dados os tipos de solo das camadas do ensaio SPT, inviabilizando análises que necessitam diferenciação entre solos arenosos e argilosos, por exemplo;
- Como a maioria dos laudos de sondagem não dispunham da localização geográfica dos furos, as coordenadas horizontais das sondagens foram obtidas visualmente pela autora através do croqui. Tendo em vista que as coordenadas verticais das sondagens não estavam disponíveis nos laudos, as mesmas foram obtidas pelo cruzamento das suas coordenadas horizontais com o MDT;
- Tendo em vista que as sondagens foram adquiridas de fontes secundárias, não houve um planejamento da localização e distribuição da coleta dos dados.

Devido a sua importância e com o intuito de parametrizar o banco de dados SPT, utilizou-se a resolução espacial do presente trabalho para comparação com estudos já realizadas. Sendo a área da zona urbanizada 207,2 km² e 104 o número de Grupos de sondagem SPT (2,0 sondagens/km²), a Equação (4) fornece a seguinte resolução espacial para o estudo.

$$R_{\text{Zona urbana}} = \sqrt{\frac{207 \text{ km}^2}{104}} = 1,41 \text{ km} = 1.410 \text{ m}$$

Este valor é válido para os mapas desenvolvidos para a zona urbanizada (impenetrável, nível do lençol freático, orientação para fundação, isovalores de tensão, N_{SPT} e comprimento máximo de estacas). Uma exceção é feita para o mapa de nível do lençol freático que considerou a contribuição do rio Itajaí-Açu, uma vez que, devido à incorporação de novos dados, presume-se que esse apresenta uma melhor resolução.

A título de comparação, no trabalho desenvolvido por Fonteles *et al.* (2006), os autores trabalharam com uma resolução de 591 m (44 km² e 126 furos de sondagem, ou seja, 2,9 sondagens/km²) para modelagem do lençol freático no nordeste de Fortaleza/CE, enquanto Soares (2011) trabalhou com uma resolução de 260 m (10,7 km² e 158 furos de sondagem, ou seja, 14,8 sondagens/km²) para análise espacial do lençol freático e 276 m (13,8 km² e 181 furos de sondagem, ou seja, 13,1 sondagens/km²) para análise espacial do N_{SPT} em João Pessoa/PB. Fucker *et al.* (2007) consolidam algumas referências de resolução espacial que apontaram que, quanto maior a heterogeneidade da imagem, maior deve ser a resolução espacial para redução dos erros:

Ponzoni e Rezende (2002) observaram que, para a estimativa de áreas florestais na Amazônia, as maiores discrepâncias em termos quantitativos ocorreram nos mapas gerados a partir das imagens com 200 metros de resolução espacial, e as categorias que dominavam a cena em termos espectrais e espaciais aumentaram em área à medida que a resolução espacial foi degradada. Os resultados obtidos no trabalho de Costa e Souza Júnior (2005) mostram que as imagens MODIS

com resolução de 250 metros possuem elevada acurácia para detectar desmatamento em áreas maiores que três hectares. Além disso, as imagens MODIS podem ser usadas para estimar a área desmatada de incrementos maiores que 70 hectares, com erro menor que 5% relativo às estimativas de área obtidas com imagens Landsat.

O Quadro 25 apresenta um resumo da resolução espacial utilizada nos estudos apresentados anteriormente.

Quadro 25 – Consolidação da resolução espacial de estudos realizados.

Autores	Descrição da aplicação do estudo	Resolução espacial (m)	Sondagens SPT/km²
Fonteles <i>et al.</i> (2006)	Modelagem do lençol freático no nordeste de Fortaleza/CE	591	2,9 furos/km ² (44 km ² e 126 furos SPT)
Soares (2011)	Análise espacial do lençol freático em João Pessoa/PB	260	14,8 furos/km ² (10,7 km ² e 158 furos SPT)
Soares (2011)	Análise espacial do N _{SPT} em João Pessoa/PB	276	13,1 sondagens/km ² (13,8 km ² e 181 furos SPT)
Ponzoni e Rezende (2002)	Estimativa de áreas florestais na Amazônia	200	Não se aplica*
Costa e Souza Júnior (2005)	Detectar o desmatamento em áreas maiores que três hectares	250	Não se aplica*
Thiesen (2016, presente trabalho)	Modelagem do lençol freático, impenetrável à percussão e N _{SPT} para zona urbanizada de Blumenau/SC	1.410	2,0 furos/km ² (207,2 km ² e 104 grupos SPT)

Fonte: Elaborado pela autora.

Comparando com as publicações listadas no Quadro 25, apesar da baixa resolução apresentada no presente estudo (1.410 m), vale destacar que a qualidade desses dados está diretamente relacionada à distribuição e heterogeneidade do elemento em estudo (no caso, nível do lençol freático, impenetrável, N_{SPT}). Conforme Silva (2011), as interpolações devem verificar as seguintes limitações: distância, homogeneidade, tipificação e seleção de atributos, objetividade, escala. Assim, apesar de a analogia se mostrar válida como parâmetro de comparação, optou-se pela realização de uma análise adicional da representatividade espacial com base nas referências publicadas por Zuquette (1993).

O Quadro 26 apresenta uma referência do número mínimo de observações por km^2 e distância entre os pontos observados.

Quadro 26 – Número mínimo de observações.

Finalidade do mapeamento geotécnico	Escala	Atributos					
		Qualitativos				Quantitativos	
		Metamórficas e Ígneas		Sedimentares		Geral	
		Observações/ km^2	Distância entre os pontos observados (m)	Observações/ km^2	Distância entre os pontos observados (m)	Observações/ km^2	Distância entre os pontos observados (m)
Básico	1:250.000	1/10	3162	1/10	3162	1/10	3162
	1:100.000	4/10	1581	3/10	1826	2/10	2236
Regional	1:50.000	6/5	913	1/1	1000	3/10	1826
	1:25.000	3/1	577	2/1	707	1/1*	1000
Detalhe	1:25.000	5/1	447	4/1	500	4/1*	500
	1:10.000	15/1	258	15/1	258	10/1	316
	1:5.000	25/1	200	20/1	224	15/1	258
	1:2.000	40/1	158	35/1	169	25/1	200

* Valores alterados conforme contato realizado com Prof. Zuquette em 29/4/2016

Fonte: Modificado de Zuquette (1993).

Conforme o Quadro 26, a resolução espacial (mínima distância para distinção de dois objetos) de 1.410 m obtida para o presente estudo por meio da Equação (4) apresenta representatividade de observações para escala 1:50.000 se comparado ao recomendado por Zuquette (1993), cuja resolução equivale a 1.826 m.

Apesar da menor distância entre pontos, quando comparado com o recomendado por Zuquette (1993), deve-se ressaltar que a distribuição dos levantamentos é fator importante a ser levado em consideração. Dados agrupados em pequenas áreas e/ou muito espaçados entre si acabam por piorar a resolução espacial, apesar de poderem apresentar um mesmo valor de "R". Por esta razão, optou-se pela utilização dos

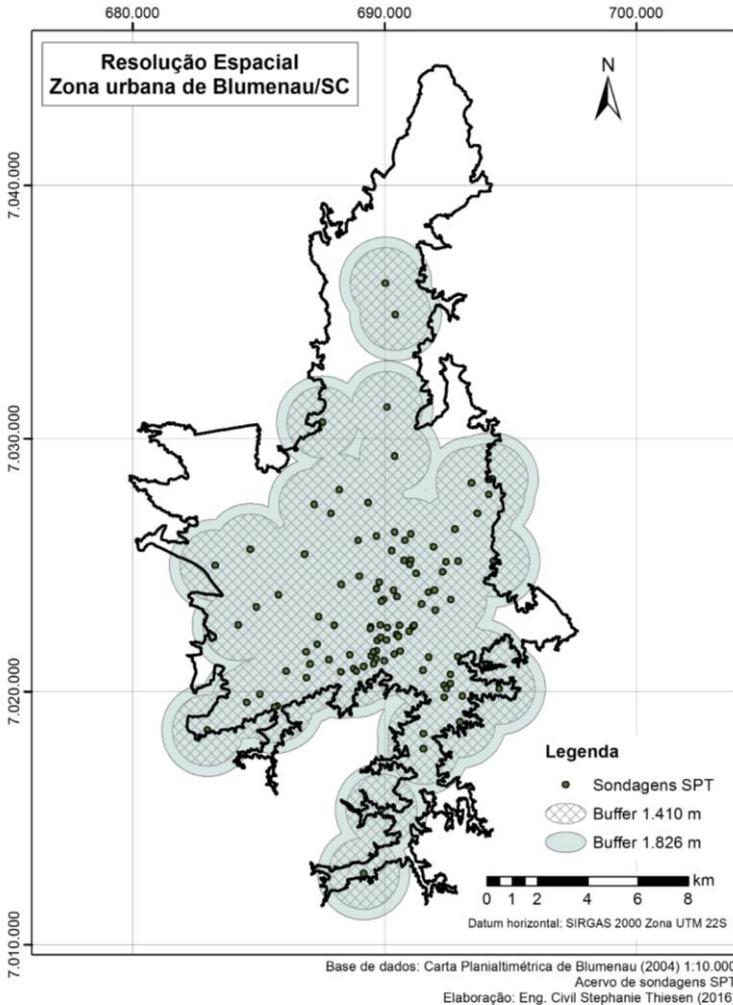
furos representativos de cada laudo de sondagem (104) no lugar de utilizar os 537 furos de sondagem obtidos e tratados para a pesquisa, uma vez que a utilização do total de furos camuflaria a real resolução espacial das interpolações realizadas, tendo em vista que a distribuição das mesmas não é homogênea.

Considerando as análises realizadas, o espaçamento entre observações de 1.410 m (obtido para os dados do trabalho) e 1.826 m (sugerido por Zuquette, 1987) foram aplicados na forma de *buffer* às 104 observações de sondagem SPT. O resultado pode ser visualizado no Mapa 38.

Por meio do Mapa 38, é possível extrair visualmente a cobertura de abrangência das sondagens SPT segundo o estudo de resolução espacial apresentado anteriormente. Quantitativamente, o *buffer* de 1.410 m abrange 170,4 km², dos quais 133,2 km² encontram-se dentro da área da zona urbanizada (contemplando 65% dos 217,2 km² da área urbana) e o *buffer* de 1.826 m abrange 211,5 km², sendo que 152,1 km² encontra-se dentro da zona urbanizada (73% dos 217,2 km² da área urbana). Finalmente, conforme o Quadro 26 proposto por Zuquette (1993), a escala do presente trabalho se enquadraria entre 1:25.000 e 1:50.000.

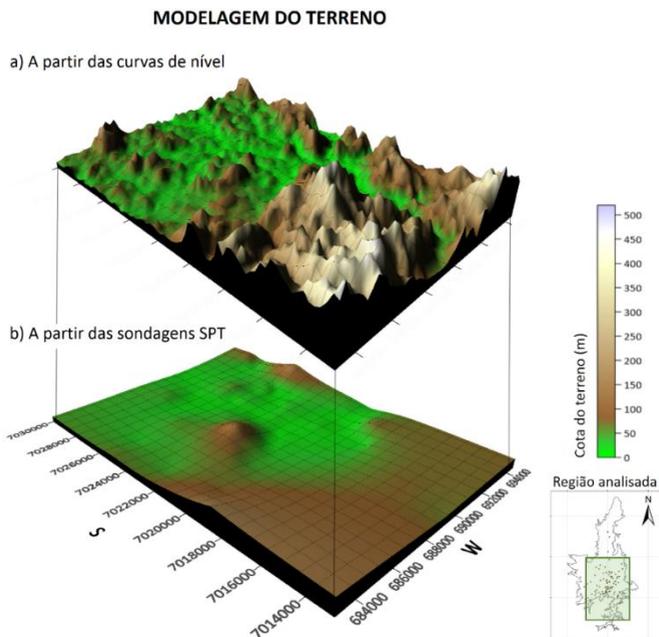
Tendo em vista a distribuição das sondagens, conclui-se que algumas regiões apresentam uma resolução espacial maior que 1.410 m, onde os furos de sondagem encontram-se mais próximos uns dos outros, e outras regiões apresentam resolução espacial menor que 1.826 m, onde o Mapa 38 apresenta-se vazio. O ideal nessa situação de menor resolução espacial seria incrementar o banco de dados com novas sondagens nas áreas onde a zona de influência do *buffer* não conseguiu atingir, a fim de garantir a cobertura da zona urbanizada como um todo com uma resolução espacial mínima. Análises regionalizadas, por bairro, por exemplo, também poderiam ser desenvolvidas para obtenção de uma maior precisão dos resultados.

Mapa 38 – Sondagens SPT e Resolução Espacial – Zona urbana.



Complementarmente à análise de representatividade espacial, a Figura 34 foi desenvolvida para permitir a comparação, por contraste visual, da robustez da nuvem de pontos SPT frente às curvas de nível.

Figura 34 – Representatividade espacial – Comparação visual de dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 34a foi realizada uma superfície topográfica a partir dos dados de curva de nível obtidas junto à PMF (milhões de pontos de cotas), enquanto Figura 34b a partir das 104 sondagens SPT (104 pontos de cotas). Por simplificação, a região modelada apresenta apenas uma parte da zona urbanizada de Blumenau/SC.

Apesar de a Figura 34b possuir uma superfície com contornos e forma mais suavizados frente a Figura 34a, por meio da escala de cores é possível perceber que o comportamento do modelo tende a ser o mesmo em ambos os MDTs, com coincidência das zonas verdes, representando as elevações mais baixa, e marrons, representando as elevações mais altas. Uma base de dados mais robusta permitiria dispor de informações cada vez mais próximas da realidade. Neste contexto, um maior número de dados SPT permitiriam a elaboração de análises em escalas mais detalhadas.

Além da avaliação numérica e visual da representatividade espacial apresentadas anteriormente, uma última validação dos

resultados foi realizada por meio de reuniões junto à Prefeitura Municipal de Blumenau e três empresas privadas atuantes na região de estudo. Estas reuniões, embora sem caráter científico, legitimaram os resultados da pesquisa – perfis estratigráficos, toposequência, superfície do lençol freático e impenetrável à percussão, resistência do solo em termos de N_{SPT} –, confrontando a experiência de sete profissionais com vasta experiência acerca do subsolo de Blumenau/SC com os resultados das análises numéricas obtidos no presente trabalho. Informações mais detalhadas sobre as reuniões estão consolidadas no Apêndice A.

Folle *et al.* (2006) sustentam que os níveis de incertezas dos projetos geotécnicos devem ser incorporados ao painel de tomada de decisão. Deve-se então considerar que a distribuição dos 104 grupos de sondagem não considerou a heterogeneidade dos dados estudados, uma vez que foram obtidos de fontes de dados secundárias e não coletados especificamente para o presente trabalho.

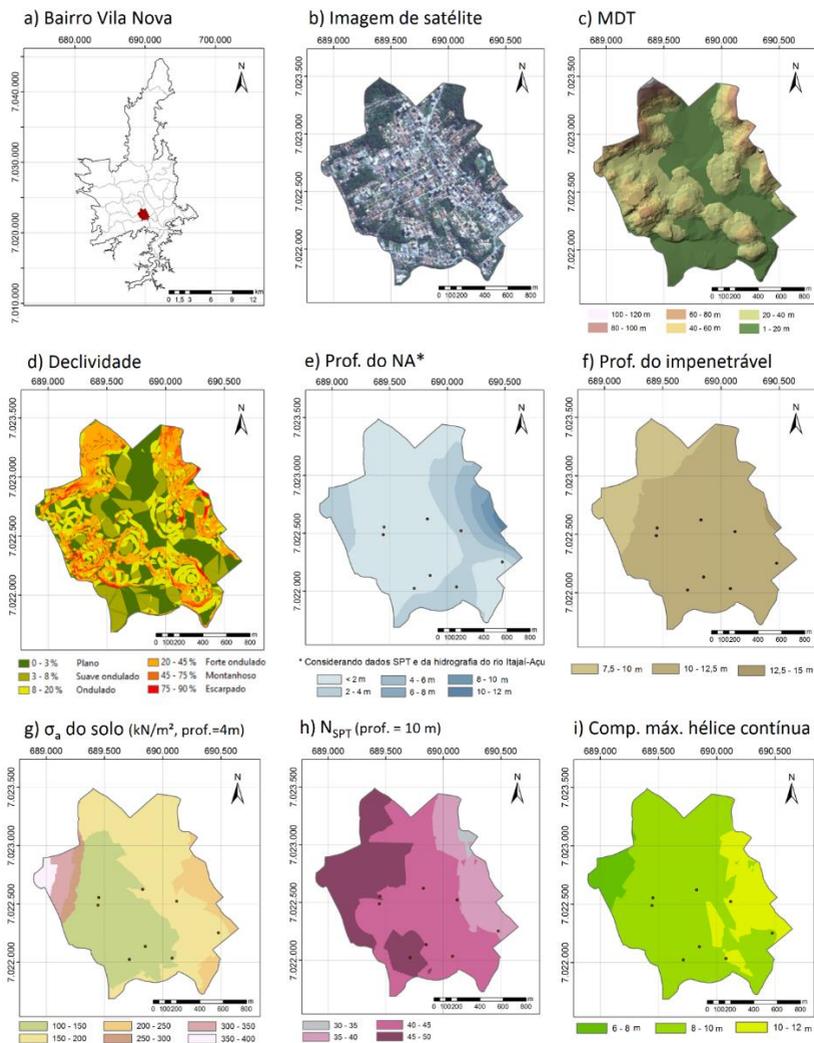
Finalmente, as comparações realizadas representam uma forma de validação dos resultados obtidos. A amostragem utilizada na pesquisa alcançou 104 grupos (537 sondagens SPT), representando uma quantidade considerável de dados quando comparada a trabalhos com caráter semelhante. Assim, tendo em vista o caráter orientativo do trabalho e a boa representatividade espacial, quando comparada com os parâmetros para mapeamento geotécnico de Zuquette (1987) para escala regional de 1:50.000, os resultados mostram-se válidos. Complementarmente, deve-se considerar ainda que o presente trabalho se apresenta como uma proposta com um banco de dados passível de atualização e incorporação incremental de dados para geração mapas melhorados. Em termos de resolução espacial e número de observações, o trabalho apresenta-se como um instrumento eficaz para auxiliar na tomada de decisão e encontra-se validade pelos profissionais da área. Análises regionalizadas, por bairro, por exemplo, poderiam ser desenvolvidas para obtenção de uma maior confiança dos resultados, conforme explanado a seguir.

A título de exemplificação da aplicabilidade do estudo em diferentes regiões, alguns mapas foram desenvolvidos para o bairro Vila Nova de Blumenau/SC, que abrange 1,90 km² e apresenta 8 grupos de sondagens SPT dentro de sua área. O bairro apresenta uma resolução espacial equivalente a 487 m.

$$R_{\text{Vila Nova}} = \sqrt{\frac{1,90 \text{ km}^2}{8}} = 0,487 \text{ km} = 487 \text{ m}$$

Parte dos mapas desenvolvidos podem ser acompanhados na Figura 35.

Figura 35 – Aplicação exemplo – Bairro Vila Nova.



Fonte: Elaborado pela autora.

A ampliação do bairro Vila Nova teve por objetivo destacar a flexibilidade de aplicação do estudo em diferentes regiões e as possibilidades de expansão para outras localidades, conforme disponibilidade dos dados. Ademais, por se tratar de um banco de dados, diferentes análises e cenários são passíveis de estudos, conforme disponibilidade dos dados e interesse.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O presente capítulo visa a apresentar as conclusões do trabalho desenvolvido, por meio de uma reflexão sobre os objetivos do trabalho e recomendações para estudos posteriores.

6.1 CONCLUSÕES

O meio físico é a base para a implementação de qualquer tipo de ocupação. Zuquette (1992) destaca que o conhecimento do meio físico tem importância fundamental no planejamento adequado de uma área, seja na orientação da ocupação, na elaboração de EIA/RIMA e mesmo na recuperação de áreas degradadas. Conhecimento esse dado pelas informações extraídas dos mapas aqui desenvolvidos. A importância do mapeamento geotécnico é ressaltada pelo IPT (2015), quando a entidade afirma que:

É obrigatório que o município tenha uma carta geotécnica, especialmente aqueles incluídos no cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

Coutinho *et al.* (2015) evidencia que as cartas geotécnicas servem como norteadoras de instrumentos importantes para áreas suscetíveis a deslizamentos e, ao serem elaboradas, podem gerar alterações nos mapeamentos de risco e nos planos diretores preexistentes, configurando um importante instrumento de gestão municipal.

Evidencia-se, desta forma, o caráter crucial do estudo geotécnico em municípios como Blumenau/SC, com vistas ao planejamento urbano. O presente trabalho, por meio do desenvolvimento do mapeamento geotécnico a partir da metodologia Davison Dias (1995), afirma-se como uma ferramenta auxiliar para complementação ou mesmo atualização do plano diretor do município. Associados ao mapa de declividade e aos ensaios de caracterização dos solos, a ferramenta corrobora a definição das restrições ao uso e ocupação do solo e de susceptibilidade aos processos que possam trazer riscos à população.

Além dos resultados parciais obtidos como modelo digital do terreno, mapa de declividade, hidrografia, que auxiliaram na elaboração

e nos ajustes do mapeamento geotécnico, o perfil estratigráfico associado às unidades geotécnicas estimadas objetivou aproximar o mapeamento geotécnico à realidade do engenheiro civil. Por meio de sondagens SPT, observou-se tendências de comportamento para as unidades Cambissolo substrato siltito, folhelho e arenito (Cs,f,a), Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss (PVgn), Cambissolo substrato gnaiss (Cgn) e Glei substrato sedimentos quaternários (GHsq), que foram representadas por meio de perfis estratigráficos genéricos. Elevações e declividades típicas, profundidade média do impenetrável e nível de água, comportamento de resistência do solo em termos de N_{SPT} e coloração foram características extraídas das sondagens SPT e associadas a cada uma das unidades. Ao final, por meio do mapeamento geotécnico e dos perfis estratigráficos das unidades geotécnicas estimadas, foi possível elaborar a toposequência típica dos solos do município de Blumenau/SC, com: Cambissolos em maiores elevações e declividades, apresentando maior profundidade do impenetrável, aumento da resistência do solo com a profundidade e coloração mais quente; Podzólico Vermelho-Amarelo em declividade e elevação intermediárias, lençol freático mais profundo, ganho de resistência do solo com a proximidade do impenetrável e coloração mais quente; e solos do tipo Glei em regiões planas e de elevações mais baixas, presença de água, menor resistência do solo nas camadas superficiais e coloração cinza.

Em outra vertente, considerando a elaboração do banco de dados utilizando as 537 sondagens SPT obtidas, cartas de aptidão para fundação foram desenvolvidas para representar o comportamento do subsolo da zona urbana de Blumenau/SC. Por meio desses resultados, algumas características da região puderam ser extraídas, tais como:

- Superfície freática, variando de 0 a 16 m de profundidade, com 90% da área com nível de água até 8 m de profundidade e regiões rasas localizadas próximas aos corpos de água, como o rio Itajaí-Açu;
- Superfície do impenetrável à percussão apresentando 80% da área com impenetrável localizado a até 15 m de profundidade, com maior ocorrência (aproximadamente 55%) no intervalo entre 7,5 m e 12,5 m de profundidade;

- Mapa de orientação para o tipo de fundação, indicando zonas propícias, em um cenário específico, para fundação superficial e profunda;
- Mapas de resistência dos solos em termos de tensão admissível para fundação superficial, que a 4 m de profundidade demonstrou um ganho de tensão admissível em relação às profundidades inferiores;
- Mapas de isovalores de NSPT, que demonstraram decréscimo de valores de NSPT de sudoeste a nordeste e ganho de resistência com o aumento da profundidade;
- Mapas estimando o comprimento máximo de estacas indicaram regiões com maior comprimento de estaca a nordeste da zona urbana do município e menor comprimento a sudoeste.

O presente estudo apresentou o potencial do uso de banco de dados geotécnicos em ambiente SIG e algumas análises passíveis de serem realizadas mediante manipulação das informações dos ensaios SPT, associando os dados disponíveis à métodos semiempíricos e empíricos disponíveis na literatura. Ambas vertentes de resultados propostos, o mapeamento geotécnico e as cartas de aptidão para fundação, foram validadas por geólogos e engenheiros da Prefeitura Municipal de Blumenau e por empresas privadas da região, cumprindo assim, com êxito, a proposta de estudo.

Considerando a variabilidade inerente do solo, a necessidade de sondagens do terreno não pode ser descartada. Logo, os documentos aqui produzidos apresentam um caráter orientativo acerca da aptidão dos terrenos em termos de fundação e, portanto, não substituem a necessidade de investigações geotécnicas pontuais. Reforçado por Zuquette (1992), o mapeamento geotécnico tem sempre o objetivo de orientar e não substituir as investigações geotécnicas locais. Complementarmente, para UNESCO (1976),

Mapas geotécnicos são modelos simplificados dos fatos e a complexidade dos vários fatores geológicos nunca poderá ser inteiramente representada. O grau de simplificação depende principalmente da finalidade e escala do mapa, da importância relativa dos fatores geotécnicos específicos ou relacionados, da precisão das informações e técnicas de representação usada.

Os resultados do estudo visam a fornecer subsídios técnicos de apoio à tomada de decisão por parte dos gestores do município de Blumenau/SC e demais interessados. O banco de dados geotécnicos elaborado permite conhecer geograficamente a geologia, a litologia e a pedologia da região, além de possibilitar a elaboração do mapeamento geotécnico, que fornece informações de geotecnia para diversos usos no âmbito do planejamento urbano e dos trabalhos da engenharia.

Destaca-se ainda que a utilização da base de dados SIG permite o gerenciamento e processamento de grande volume de dados de forma fácil e rápida. E o banco de dados e os mapas temáticos gerados servem como ferramentas básicas e eficazes, fornecendo orientação sobre a continuidade espacial das propriedades geotécnicas da zona urbana de Blumenau/SC.

No âmbito empresarial da construção civil, em termos práticos, visa-se a aplicação dos resultados para orientação de compra de terrenos, escolha do tipo de fundação, análise preliminar de investimentos e dimensionamento de fundações rasas e profundas, estimativa preliminar de tempo, previsão de profundidade de sondagens, de forma a melhorar estimativas, reduzir tempo e custos durante a análise de viabilidade dos projetos.

Por fim, destaca-se que o trabalho desenvolvido contribui para fundamentar as ações de planejamento e gestão de uso do solo e a instalação de empreendimentos civis no município de Blumenau/SC, a medida que contempla informações acerca da ocorrência e distribuição espacial de aspectos e parâmetros de geologia de engenharia, geomorfologia e pedologia, incluindo ainda parâmetros da mecânica dos solos e rochas.

6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Apesar da abrangência e aplicação do presente estudo, tendo em vista as limitações de recursos, sugere-se o aprofundamento do trabalho no que se refere às seguintes questões:

- Utilizar as informações dos dados SPT e da topografia da região para complementar a carta de mapeamento geotécnico e melhorar a escala do mesmo;

- Considerar a sazonalidade de períodos secos e de chuvas para os estudos de superfície freática, com a incorporação de novos dados SPT;
- Aprofundar os estudos geostatísticos especificamente para os solos da região de Blumenau/SC, a fim de definir o modelo mais adequado para situação analisada;
- Realizar estudos específicos do plano diretor de Blumenau/SC, considerando os dados SPT e propondo atualização e melhorias onde jogar-se necessário;
- Cadastrar o solo de cada camada no banco de dados SPT, possibilitando a simulação de fundações superficiais e profundas por métodos específicos para cada tipo de solo;
- Aprimorar o mapa potenciométrico, com a análise vetorial do fluxo de água subterrâneo de Blumenau/SC (volume e direção);
- Realizar análises locais, em regiões mais densas de sondagens SPT, a fim de melhorar a resolução espacial e conseqüentemente a escala do estudo.

Sabendo-se que a maior robustez do banco de dados relaciona-se diretamente com a precisão das análises geradas, a atualização continuada e incorporação de novas informações é recomendada. Novos atributos podem ser associados ao banco de dados para análises futuras, visto que são manipuláveis mediante a utilização de ferramentas do ambiente SIG.

REFERÊNCIAS

ABITANTE, E. **Proposta Metodológica de Mapeamento Geotécnico com uso de Pedologia em Solos Tropicais Visando Obras Rodoviárias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 1997.

ALLESSI, C. C. **Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO₂, CH₄, Rn e microbiota em um campo petrolífero do recôncavo baiano (BA)**. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. 218p.
Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18300/18300_1.PDF>.
Acesso em: 01 mai. 2016.

AL-ANI, H. OH, E.; CHAI, G.; AL-UZAIRY, B. N. GIS- Interpolated Geotechnical Zonation Maps in Surfers Paradise, Australia. **GEOProcessing 2014: The Sixth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services**, 2014.

AL-JABBAN, W. J. M. Estimation of Standard Penetration Test (SPT) of Hilla City-Iraq by Using GPS Coordination. **Jordan Journal of Civil Engineering**, Volume 7, No. 2, 2013.

ANBAZHAGAN, P.; SITHARAM, T. G. Site characterization studies of Bangalore using a geophysical method. **Geotechnical and Geophysical Site Characterization – Huang & Mayne**, Taylor & Francis Group, London, 2008. ISBN 978-0-415-46936-4

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003. 165 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio - Elaboração**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. ABNT. **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. (Cancelada)

_____. ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. ABNT. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. ABNT. **NBR 13441: Rochas e solos – Simbologia**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. ABNT. **NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1983.

_____. ABNT. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. ABNT. **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Hamada, E. **Sistema de Informações Geográficas**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agricultura_e_meio_ambiente/arvore/CONTAG01_66_410200710544.html>. Acesso em: 01 mai. 2016.

BAECHER, G.B. e CHRISTIAN, J.T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. Inglaterra: John Wiley and Sons, 2003.

BALDWIN, M.; KELLOGG, C. E.; THORP, J. **Soil classification**. Department of Agriculture. Soils and men. Washington, D.C., 1938. p. 979-1001. (Agriculture Yearbook, n. 1938).

BASTOS, C. A. B.; DAVISON DIAS, R. Unidades geotécnicas de solos de Porto Alegre. **Rev. Inst. Geol**, vol.16, 1995. p. 85-89. ISSN 0100-929X.

Disponível em:

<http://turmalina.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-929X1995000200012&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 01 mai. 2016.

BASTOS, G. **Estruturação de banco de dados a partir do mapeamento geotécnico aplicado à região de Ribeirão Preto (SP)**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

BERBERIAN, D. **Sondagens e Ensaios In Situ para Engenharia**. 8. ed., Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro: COPE, 2012. ISBN: 85-7238-011-6

CHIOSSI, N. J. **Geologia aplicada à engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9AZlCgAAQBAJ&pg=SA4-PA18&lpg=SA4-PA18&dq=chiossi+solos+sedimentar>>

+brasil&source=bl&ots=FCnTjmvds&sig=1F5kQbBQYBopd3PoKprwA6Zwiz0&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwajNCByqXMAhUCI5AKHYj0BsgQ6AEIHTAA#v=onepage&q=chiossi%20solos%20sedimentar%20brasil&f=false>. Acesso em: 01 mar. 2016.

CHRIST, C. E. **Mapeamento de áreas suscetíveis ao colapso na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. Dissertação de mestrado.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2014.

CINTRA, J. C. A., AOKI, N. **Fundações por Estacas - Projeto Geotécnico.** São Paulo: Oficina de textos, 2010. 96 p. ISBN 978-85-7975-004-5

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas - Projeto Geotécnico.** São Paulo: Oficina de textos, 2011. 140 p. ISBN 978-85-7975-035-9

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade Espacial de Atributos do Solo para Adoção do Sistema de Agricultura de Precisão na Cultura de Cana-de-Açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.28 n. 6, Viçosa, nov./dez. 2004. ISSN 1806-9657
Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v28n6/22923.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

COUTINHO, M. P.; LONDE, L. R.; SANTOS, L. B. L.; LEAL, P. J. V. Instrumentos de planejamento e preparo dos municípios brasileiros à Política de Proteção e Defesa Civil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, vol.7, n. 3., set./dez. Curitiba: Epub, 2015. ISSN 2175-3369
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.007.003.AO06>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

DELATIM, I. J.; OLIVEIRA, E.; MONTICELI, J. J., VAZ, L. F. **Manual de Sondagens.** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, Boletim nº 3, 5. ed. São Paulo, 2013. 203 p. ISBN: 978-85-7270-059-7

DAVISON DIAS, R. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico (IG)**. Vol. Especial. São Paulo, 1995. p. 51-55.
Disponível em: <<http://ppegeo.igc.usp.br/pdf/rig/v16nesp/v16nespa07.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

DAVISON DIAS, R. Proposta de uma metodologia de estudos geotécnicos para implantação de rodovias, estradas rurais e vicinais em solos brasileiros. In: **Reunião Anual de Pavimentação**, Florianópolis, 2001, Anais...

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 2ª edição, Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2016.

_____. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412 p.

_____. EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.
Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_6_2212200611537.html>. Acesso em: 01 fev. 2016.

FERNANDES, T. T. **Krigagem indicativa para elaboração de mapas probabilísticos em agricultura de precisão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2014.
Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/110365/000790290.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

FUCKER, M. A.; FREITAS, R. M.; SANTOS, P. S.; FORMAGGIO, A. R. Avaliação de técnicas de reamostragem de dados de uso e cobertura da terra para resolução espacial moderada (MODIS). **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, INPE, 2007. p.5763-5770.
Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.17.35.49/doc/5763-5770.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

FOLLE, D.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C.; RASPA, G. Metodologias de Quantificação de heterogeneidades do solo para uso na engenharia geotécnica. **Revista Solos e Rochas**. São Paulo, 2006. p. 297 - 310.

FONTELES, H. R. N.; YAMAMOTO, J. K.; ROCHA, M. M.; GANDOLFI, N. Geoestatística aplicada à modelagem do lençol freático a partir de dados de nível estático: o caso da porção nordeste de Fortaleza (CE). **Revista Solos e Rochas**. São Paulo, 2006. p. 331 - 339.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Departamento Nacional da Produção Mineral. Brasília, 1988.

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. O.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações: Teoria e Prática**, ISBN 85-7266-098-4, 2ª ed., São Paulo: Editora PINI, 1998.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2006.

HIGASHI, R. A. R. **Notas de aulas**. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2016. 161p.

HUMYRA, T.; AWALL, MD. R.; MOFIZ, S. A.; SOBHAN, MD. A. Preparation of SPT Contour Map of Rajshahi City Area and its Application to Foundation Design. **International Journal of Civil & Environmental**. Engineering, Vol: 12 No: 02, 11-17, 2012.

INPE - Instituto nacional de pesquisas espaciais. **Introdução à ciência da geoinformação**. Julio Cesar Lima D'Alge. INPE, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.14.47/doc/cap6-cartografia.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

_____. INPE. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004. ISBN: 85-7383-260-6
Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Noções básicas de cartografia**. Apostila. Rio de Janeiro, 1998.
Disponível em:
<ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/cartografia/nocoos_basicas_cartografia.pdf acesso 28/03/2016>. Acesso em: 01 mar. 2016.

_____. IBGE. **Manual Técnico de Pedologia** – 2. ed. Rio de Janeiro, 2007.
Disponível em:
<<http://www.agrolink.com.br/downloads/manual%20t%C3%A9cnico%20de%20pedologia.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

_____. IBGE. IBGE. **Ferramenta Cidades@ - dados estatísticos dos municípios brasileiros**, Rio de Janeiro, 2010.

Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=420240>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

IPT– Instituto de pesquisas tecnológicas. **Guia Cartas geotécnicas**. Omar Yazbek Bitar, 2015. ISBN 978-85-09001841

Disponível em: <www.ipt.br/guia_cartas_geotecnicas.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2016.

ISAAKS ,E. H. **Applied geostatistics**. Oxford University Press, 1989.

JENNY, H. **Factors of soil formation - A system of quantitative pedology**.

University of California, Berkeley. DOVER PUBLICATIONS, INC. Nova Iorque, 1994.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. Paperback, 1978.

KULHAWY, F. H.; PHOON, K. K. Observations on geotechnical reliability-based design development in North America. In: **Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance**, 2002.

Disponível em: <http://azul.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/fundaciones/CPaper_IWSKa_makura_2002a.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2016.

LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B. Spatial soil information system and spatial soil inference system: perspectives for Digital Soil Mapping. In: **Digital Soil Mapping: an introductory perspective**. Elsevier: Amsterdam, 2007.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Lab. Geomatemática, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 2000.

LANDIM, P.M.B; STURARO, J.R. **Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Geomatemática, Texto Didático 6, DGA, IGCE,UNESP/Rio Claro, 2002.

Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~edson/Artigos/Paulo%20M%20Barbosa%20Landim.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2010.

Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfZyMAE/livro-fomacao-conservacao-dos-solos-2-ed>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

LEUANGTHONG, O.; KHAN, K. D.; DEUTSCH, C. V. **Solved Problems in Geostatistics**. Ed. Wiley–Interscience, 2008.

LIMA, R. H. C. **Configuração geológico-geotécnica da Região de Americana/SP: Utilizando Sondagens à Percussão de Simples Reconhecimento**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro – UNESP, 1997. 115p.

MASSAD, F. **Obras de Terra - Curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina dos Textos. 2010.

MARANGON, M. **Geotecnia de fundações**. Notas de aula. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Juiz de Fora, 2009.
Disponível em <<http://www.ufjf.br/nugeo/pagina-do-aluno/notas-de-aula/geotecnia-de-fundacoes/>>. Último acesso: 19 de abril de 2016.

MHASKE S. M.; CHOUDHURY, D. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment** **66**, 2007.

MHASKE S. M.; CHOUDHURY, D. Geospatial contour mapping of shear wave velocity for Mumbai city. **Natural Hazards**, Volume 59, Issue 1, 2011. p. 317-327.

MILITITSKY, J. Provas de carga estáticas. In: **Seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia**. II SEFE. Anais, v.2. São Paulo: ABEF e ABMS, 1991, p. 203-228.

NOCE, T. E.; HOLZER, T. L. Subsurface exploration with the cone penetration testing truck. **U.S. Geological Survey**, Fact Sheet 028-03, 2003.

OLIVEIRA, J.B., JACOMINE, P.K.T., CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

OLIVEIRA, F. S. S. **Diagnóstico e banco de dados das propriedades geotécnicas da duplicação do lote 4 da BR-470/SC com auxílio de um SIG**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Dissertação (Mestrado). Florianópolis, 2015.

PANOOT, S.; KORCHOKE, C.; WARAKORN, M.; PAKORN, A. The Development of Geotechnical Database of Bangkok Subsoil Using GRASS-GIS. **Geo-Informatics and Space Technology Development Agency**, Bangkok, Thailand, 2001.

PESCIM, E. E.; URBANO, M. R.; DEMÉTRIO, C. G. B. Estimacão da densidade do solo em uma região da Amazônia para o cálculo de estoques de carbono do solo. **19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística – SINAPE**. São Pedro/SP, 2010. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/resumo%20estendido_geo.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2016.

PIMENTEL, H. W. **Banco de dados georeferenciado e carta geotécnica preliminar de fundaoes da região centro-norte de Fortaleza-CE**. Dissertao (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-Graduao em Engenharia Civil. Fortaleza, 2015.

RAJESH, S.; SHANKARAKURURAMAN, D.; DAS, A. A GIS / LIS Approach for study on suitability of Shallow Foundation at Southern Chennai, India. **Proc. 2nd Annual Asian Conference**, MAPASIA 2003, Oct 13-15, Kuala Lumpur, Malaysia, 2003.

REBELLO, Y. C. P. **Fundaoes: guia prático de projeto, execuo e dimensionamento**. 3. ed. São Paulo: Ed. Ziguarte, 2011. 239 p. ISBN 978-85-85570-10-1

REGINATTO, G. M. P. **Caracterizao de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros-SC, com ênfase em escorregamentos translacionais**. Dissertao (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduao em Engenharia Civil. Florianópolis, 2013.

REINERT, J. **Estudo do comportamento das fundaoes profundas de obra industrial no litoral fluminense usando abordagem probabilística**. Dissertao (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. **Geologia de Engenharia – Sexto Capítulo**. São Paulo: Associao Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

SANTOS, J. V.; THIESEN, S.; HIGASHI, R. R. Geographic Information System: Methodological Proposal for the Development of Foundation Maps Based on SPT Investigation. In: **15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Buenos Aires/Argentina, 2015. ISBN 978-1-61499-602-6 (print) ISBN 978-1-61499-603-3 (online)

SANTOS, G. T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao solo urbano em obras de engenharia**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2015.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 189p.

SHAHRI, A.; RAJABLOU, R.; GHADERI, A. An improved method for seismic site characterization with emphasis on liquefaction phenomena. **Open Journal of Earthquake Research**, Vol. 1 No. 2, 2012, pp. 13-21.

SHARMA, B.; RAHMAN, S. K.; SAIKIA, B. D. Use of contour maps for preliminary assesment of subsoil of Guwahati city. **Proceedings of Indian Geotechnical Conference**, Roorkee, december 22-24, 2013.

SHARMA, B.; RAHMAN, S. K. Use of GIS Based Maps for Preliminary Assessment of Subsoil of Guwahati City. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, 4, 2016, p. 106-116

SILVA, A. B. **Sistemas de informações georreferenciadas: conceitos e fundamentos**. UNICAMP, São Paulo, 1999. 236p.

SILVA, C. P. L. **Cartografia geotécnica tridimensional do setor noroeste de Brasília**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2011.
Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/downloads/teses/072-2011.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

SOARES, W. C. **Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens a percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa/PB**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2011. 215 p.

SOBOL, I. **O método de Monte Carlo**. Trad. De M. DOMBROVSKY. Moscou: Editora Mir Moscou, 1983. 64 p.

STALIN, V. K.; ARUN MURUGAN, R. B. Geographic information system for the development of soil suitability map in south Chennai, India. **Arabian Journal of Geosciences**, Volume 8, Issue 3, pp 1415-1437, 2015.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional. 2009.
Disponível em: <<http://www.geografando.com/2013/12/decifrando-terra-download.html>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

THIESEN, S.; SANTOS, J. V.; HIGASHI, R. R. Application of GIS Tools for Geotechnical Mapping - a Case Study in Brazil. **In: International Conference on Geotechnical Engineering**. ICICGEColombo2015, Colombo/Sri Lanka, 2015. ISBN 978-955-1411-01-5

THORP, J.; SMITH, G. D. Higher categories for soil classification. *Soil Science*, Baltimore, v. 67, p. 117-126, 1949.

UNESCO/IAEG - Organização das Nações Unidas para a educação, a ciência e a cultura/Associação internacional de geologia de engenharia e ambiental. **Engineering Geological Maps**. A Guide to Their Preparation. Paris: The Unesc Press, 1976. 79p.
Disponível em:
<<http://unesdoc.unesco.org/images/0001/000165/016580eo.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. Algumas reflexões sobre o mapeamento geotécnico. **Anu. Inst. Geocienc**, vol.15, 1992. p. 181-184. ISSN 0101-9759.
Disponível em: <<http://papegeo.igc.usp.br/pdf/anigeo/v15/v15a23.pdf>>.
Acesso em: 01 mai. 2016.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 1993.

APÊNDICE A – REUNIÕES DE VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Em junho de 2016, os resultados do presente trabalho foram validados em reuniões junto a Prefeitura Municipal de Blumenau, com auxílio do diretor da Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais e do geólogo da Secretaria de Obras de Blumenau, e quatro engenheiros civis e uma arquiteta de empresas privadas de Blumenau/SC, sendo duas de sondagem e uma construtora. A ratificação dos resultados se deu pela análise visual e numérica dos resultados, destacando-se: a profundidade do lençol freático considerando os dados do rio Itajaí-Açu, a profundidade do impenetrável à percussão, resistência dos solos em termos de N_{SPT} e tensão admissível.

Em termos numéricos, informou-se que geralmente as sondagens SPT de Blumenau/SC realizadas têm o impenetrável entre 8 m e 15 m de profundidade, valor esse ratificado quantitativamente pelos resultados do estudo, no qual mais de 70% da área urbanizada encontra-se entre 7,5 m e 15 m. Para profundidade do lençol freático, a informação de que 90% da área urbanizada de Blumenau/SC apresenta NA até 8 m de profundidade também foi validada com base nos resultados mais comuns das sondagens SPT realizadas pela empresa. Durante a reunião com uma das empresas de sondagem, ensaios realizados pela empresa foram verificados aleatoriamente, confirmando por meio de diferentes ensaios a tendência dos resultados de NA e impenetrável à percussão obtido no trabalho em diferentes bairros.

Validou-se também o mapeamento geotécnico e os perfis estratigráficos genéricos das unidades geotécnicas nele estimadas, bem como a interpretação da toposequência desenvolvida para Blumenau/SC, com Cambissolos em regiões mais elevadas, seguido de Podzólicos Vermelho-Amarelo em elevação intermediária e Gleis nas regiões planas de baixa elevação.

Durante a reunião com a PMB, foi evidenciado que a distribuição dos furos não se apresenta de forma aleatória, uma vez que está condicionada ao processo de ocupação urbana, já que as sondagens utilizadas são voltadas para construção de edificações. Desta forma, os resultados são válidos e aplicáveis principalmente para zona de controle do SPT, ou seja, locais com maior tendência e densidade de urbanização. Complementarmente, conforme informado pelo membro da PMB, as regiões planas de Blumenau/SC possuem maior valor imobiliário, uma

vez que o zoneamento da cidade no plano diretor apresenta maior flexibilidade de construção para tais áreas, enquanto nas regiões mais elevadas, há maior limitação em termos de construção.

Durante as reuniões com as empresas de sondagem e com o geólogo da PMB, esclareceu-se que, devido a alguns problemas com fundações da região, principalmente entre os bairros do Centro e Velha, atualmente, para as grandes edificações, está cada vez mais usual a realização de sondagens rotativas, já que as mesmas avançam além do impenetrável ao SPT. A sondagem rotativa também se faz prioritária na região quando o solo apresenta sólidos com granulometria maior que 2,5 cm, a fim de evitar um falso impenetrável SPT.

Finalmente, os sete profissionais contatados defenderam que o trabalho desenvolvido reflete a realidade do subsolo de Blumenau/SC em termos de tendência de comportamento. Destacaram ainda o caráter técnico, as distintas aplicações possíveis e a maneira com que o mesmo foi apresentado.

ANEXO A – PMB: TERMO DE RESPONSABILIDADE



Prefeitura Municipal de Blumenau

Secretaria Municipal de Planejamento Urbano
Diretoria de Cartografia, Cadastro Multifinalitário e Informações

Termo de Responsabilidade SEPLAN/GCCM

Blumenau, 18 de novembro de 2013

TERMO DE RESPONSABILIDADE

Comprometo-me pelo uso do conteúdo relacionado abaixo, rubricado pelas partes, que faz parte integrante e inseparável deste termo, e sujeitando-me a responder perante a Instituição em caso de repasse a outros ou utilização indevida do conteúdo.

Declaro ter conferido o conteúdo em anexo e que o mesmo encontra-se em perfeitas condições de uso.

Obs: O requerente se compromete em dar a esta secretaria uma cópia do trabalho resultante do material solicitado.

Secretaria de Planejamento Urbano
Diretoria de Cartografia, Cadastro Multifinalitário e Informações

Nome: STEPHANIE THIESEN

CPF - 057995759-46

Data da Retirada: 18/11/2013

Assinatura: STEPHANIE THIESEN

Responsável pelo Setor: _____

Conteúdo:

- Pranchas Planialtimétricas no formato dwg do ano 2003 na escala 1:10.000

ANEXO B – IBGE: TERMO DE CESSÃO DE DIREITOS E DE USO



TERMO DE CESSÃO DE DIREITOS E DE USO RELATIVO A CÓPIAS DE ARQUIVOS CONTENDO MAPAS DE GEOLOGIA, PEDOLOGIA, VEGETAÇÃO e COBERTURA E USO DA TERRA PRODUZIDOS PELA FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE

1 - O presente Termo tem por objetivo regular a cessão de direitos e de uso, com restrições, de cópias de arquivos digitais, na escala 1:100 000, no formato "DGN", referentes aos Mapas de Geologia, Pedologia e Vegetação das folhas Blumenau, Botuverá e Itajaí e aos mapas de Cobertura e Uso da Terra na escala 1:50 000 das Folhas Blumenau, Botuverá e Gaspar, produzidos pela **FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE**.

2 - As cópias fornecidas somente poderão ser utilizadas com a finalidade única de emprego no Trabalho final da disciplina de Mestrado, Mapeamento Geotécnico da Universidade Federal de Santa Catarina, ressalvando que sua aplicação deverá ser compatível com o nível de detalhamento da escala, sendo proibida qualquer outra utilização ou transferência a terceiros, a qualquer título e sob qualquer forma, no todo ou em parte, das cópias em cessão.

3 - Os produtos gerados, resultantes da finalidade estabelecida no item anterior, seja por meio gráfico ou magnético, relativos à utilização das informações fornecidas, deverão conter "Nota de Crédito" alusiva ao documento elaborado pela **Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE**.

4 – As **MESTRANDAS** se obrigam e comprometem a tomar todas as providências necessárias para a manutenção do sigilo do material cedido, inclusive junto a seus funcionários, empregados, associados e prestadores de serviços que a ele devam ter acesso, ressalvando-se a eventual publicidade decorrente do seu uso, observados os limites expressos nos itens 2 e 3 deste Termo.

5 - No caso de se ter necessidade de alterar, incluir ou excluir informações nas cópias cedidas, as **MESTRANDAS** se comprometem somente a fazê-las mediante autorização expressa por escrito do IBGE, além de citá-las em nota de crédito.

6 - As **MESTRANDAS** colocarão, à disposição do IBGE, as informações e os produtos decorrentes que serão gerados na elaboração dos trabalhos estabelecidos no item 2, e que venham a servir de insumo e apoio às atividades desenvolvidas pelo IBGE.

Florianópolis, 22 de outubro de 2013.



 Juliana Vieira dos Santos – RG 4882253
 Stephanie Thiesen – RG 4888641