

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Carolina Rosa

**ANÁLISE TEMPORAL DA EXPANSÃO DA MANCHA URBANA E MAPEAMENTO
DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NO
MUNICÍPIO DE TUBARÃO - SC**

Florianópolis

2020

Carolina Rosa

**ANÁLISE TEMPORAL DA EXPANSÃO DA MANCHA URBANA E MAPEAMENTO
DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NO
MUNICÍPIO DE TUBARÃO - SC**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Geologia do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.
Orientador: Prof., Dr. Murilo da Silva Espindola
Coorientador: Prof., Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Florianópolis

2020

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

Rosa, Carolina
ANÁLISE TEMPORAL DA EXPANSÃO DA MANCHA URBANA E
MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS
DE MASSA NO MUNICÍPIO DE TUBARÃO - SC / Carolina Rosa ;
orientador, Murilo da Silva Espindola, coorientador,
Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2020.
102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Geologia. 3. Estabilidade de Taludes.
4. Susceptibilidade a movimentos de massa.. 5. Mapeamento
geotécnico. I. da Silva Espindola, Murilo . II. dos Reis
Higashi, Rafael Augusto. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Geologia. IV. Título.

Carolina Rosa

**ANÁLISE TEMPORAL DA EXPANSÃO DA MANCHA URBANA E MAPEAMENTO
DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NO
MUNICÍPIO DE TUBARÃO - SC**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Coordenador do Curso de Geologia.

Florianópolis, 04 de dezembro de 2020.

Prof. Neivaldo Araújo de Castro, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Murilo da Silva Espindola, Dr
Orientador
UFSC

Prof. Juan Antônio Altamirano Flores, Dr.
Avaliador
UFSC

Milena Arruda Silva

Milena Arruda Silva, M.Sc.
Avaliadora
STCP Engenharia de Projetos LTDA.

Dedico esse trabalho a minha família, aos meus amigos e a todos profissionais da área de Geociências.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais Evaldo Jose Rosa e Maria Regina Lourenceti Rosa por todo apoio e suporte financeiro na decisão de sair de casa para iniciar os estudos em uma universidade pública, oportunidade essa que eles não tiveram quando jovens. Espero um dia poder retribuir tudo que fizeram por mim.

A minha irmã, Karina Rosa, que sempre me incentivou e me apoiou em todas as minhas decisões. Ao meu orientador, professor Murilo da Silva Espindola, que desde as primeiras aulas despertou em mim a curiosidade e interesse pela área. Agradeço por todas as conversas, correções e sugestões que enriqueceram o trabalho, também pela amizade e conselhos profissionais.

Ao meu coorientador, professor Rafael Augusto dos Reis Higashi por disponibilizar alguns produtos e shapefiles utilizados neste trabalho.

A todos os professores da Geologia por sempre se esforçarem ao máximo para transmitir o conhecimento de forma genuína.

Aos meus amigos do IFC, em especial Bruna, Bianca e Jéssica que mesmo trilhando caminhos tão diferentes do meu se fazem presente na minha vida compartilhando momentos e comemorando minhas conquistas.

Ao Gilberto que foi um dos meus primeiros amigos na ilha, obrigada por toda ajuda em cálculo e GA, todas as festinhas, almoços e conselhos. E ao Lucas que teve um papel muito importante durante toda minha trajetória.

As amigas, Cristiane, Sandyla, Karen, Nay, Raquel e Gabi por todas as jantas, vinhos, filmes e festinhas. Vocês tornaram meus dias mais leves e especiais aqui em Florianópolis.

Aos meus colegas da Geologia, em especial ao Alysson, Giovana, Dani, Bruna, Stefany e Ale pela parceria em trabalhos, saídas de campo e festinhas.

Aos parceiros Heloá, Gabriel, Thales e Artur, pelas saídas de campo no projeto e pelo apoio nos ensaios de laboratório que levaram aos resultados deste trabalho.

Aos meus colegas da Enactus UFSC Florianópolis pela oportunidade de atuar como voluntária nessa organização com um propósito tão especial.

A Universidade Federal de Santa Catarina pela estrutura e a Secretaria Nacional de Acessibilidade e Programas Urbanos do Ministério das Cidades pelo suporte financeiro para realização do campo.

“Knowing a great deal is not the same as being smart; intelligence is not information alone but also judgement, the manner in which information is coordinated and used.”

(Carl Sagan, 1980).

RESUMO

O desenvolvimento acelerado de grandes cidades expõe a necessidade da realização de estudos geotécnicos e ambientais para o adequado planejamento urbano, bem como para a resolução de problemas já existentes pela carência desses estudos. Os mesmos podem evitar a ocupação de áreas de risco a deslizamentos, danificação de obras, problemas ocasionados por enchentes, entre outros. Logo, a disponibilização desses resultados é um fator fundamental no direcionamento do crescimento das cidades, que é realizado através de técnicas de mapeamento geotécnico. O objetivo central do trabalho é analisar a evolução temporal da expansão da mancha urbana do município de Tubarão, nos últimos 18 anos, e confeccionar cartas de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa. Para alcançar a proposta, seguiu-se uma metodologia que consiste em estudos prévios, análise dos dados cartográficos já existentes, confecção de mapas bases para a saída de campo, estruturação de um banco de dados geotécnico, coleta de amostras, realização de ensaios laboratoriais, obtenção dos parâmetros estatísticos a níveis de confiança de 90%, 95% e 99% e determinação das declividades limites.

As cartas para os três níveis de confiança foram confeccionadas por meio de análises probabilísticas que utilizou como base o método determinístico de Bishop. A metodologia foi desenvolvida pelo grupo de estudos do Laboratório de Geotecnia Aplicada da Universidade Federal de Santa Catarina com o intuito de diminuir a probabilidade de erros nos parâmetros de resistência das unidades através do desenvolvimento de um aplicativo capaz de analisar estatisticamente os dados de um banco de dados gerados. Como resultado deste trabalho, apresentam-se dados de ensaio de cisalhamento direto e as cartas para os 3 intervalos de confiança, indicando no município de Tubarão as áreas de susceptibilidade baixa, média e alta e também uma análise dos vetores de crescimento do município que indicam que nos últimos anos a mancha urbana se expandiu principalmente para áreas de baixa susceptibilidade. A partir do presente trabalho, o município dispõe de um instrumento de apoio para técnicos e pesquisadores que tem como alvo o correto direcionamento do crescimento populacional na cidade de Tubarão bem como no apoio ao cumprimento dos objetivos do Plano Diretor.

Palavras-chave: Mapeamento Geotécnico. Susceptibilidade a Movimentos de Massa. Mancha Urbana.

ABSTRACT

The accelerated development of large cities exposes the need to carry out geotechnical and environmental studies for adequate urban planning, as well as for solving existing problems due to the lack of these studies. They can prevent the occupation of areas at risk of landslides, damage to works, problems caused by floods, among others. Therefore, the availability of these results is a fundamental factor in directing the growth of cities, which is accomplished through geotechnical mapping techniques. The main objective of the work is to analyze the temporal evolution of the expansion of the urban spot in the municipality of Tubarão, in the last 18 years and to produce susceptibility charts to mass gravitational movements. To achieve the proposal, a methodology was followed which consists of previous studies, analysis of existing cartographic data, preparation of base maps for the field trip, structuring of a geotechnical database, data collection, laboratory tests, obtaining the statistical parameters at 90%, 95% and 99% confidence levels and determination of limit slopes. The charts for the three confidence levels were made using probabilistic analyzes that use Bishop's deterministic method as a basis. The methodology was developed by the study group of the Laboratory of Applied Geotechnics of the Federal University of Santa Catarina in order to decrease the probability of errors in the resistance parameters of the units through the development of an application capable of statistically analyzing data from a database generated. As a result of the work, direct shear test data and charts for the 3 confidence intervals are presented, indicating in the municipality of Tubarão as areas of low, medium and high susceptibility and also an analysis of the growth vectors of the municipality that indicates that in recent years the urban area has expanded mainly to areas of low susceptibility. As of the present work, the municipality has a support instrument for technicians and researchers that aims to direct population growth in the city of Tubarão as well as to support the fulfillment of the objectives of the Master Plan.

Keywords: Geotechnical Mapping. Landslide Susceptibility. Urban Spot.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Localização da área de estudos	23
Figura 2: Componentes do SIG.	27
Figura 3: Definição das Unidades Geotécnicas.	34
Figura 4: Tipos de movimentos de massa.	39
Figura 5: Representação do critério de Mohr.	42
Figura 6: Representação do critério de Coulomb.	42
Figura 7: Determinação da envoltória de Mohr-Coulomb	43
Figura 8: Fatia genérica e polígono de forças.....	45
Figura 9: Método de Bishop Simplificado.	46
Figura 10: Modelo de Janbu.	47
Figura 11: Esquema do equipamento para cisalhamento direto.	48
Figura 12: Distribuição normal dos dados.....	52
Figura 13: Exemplo de uma representação Box Plot.	53
Figura 14: Tabela t <i>Student</i>	54
Figura 15: Classificação climática de Santa Catarina.	57
Figura 16: Mapa do Escudo Catarinense e suas principais feições geológicas e estruturais....	59
Figura 17: Gráfico da porcentagem das unidades litológicas do Município de Tubarão.	60
Figura 18: a) Instabilidade de talude no bairro Quilômetro Sessenta. b) Detalhe da instabilização.	62
Figura 19: Vetores de crescimento da mancha urbana de Tubarão.	63
Figura 20: Vetores de crescimento principais do município de Tubarão.	64
Figura 21: Unidades geotécnicas do município de Tubarão.....	66
Figura 22: Etapa de amostragem de corpo de prova indeformado.	67
Figura 23: Interface do aplicativo desenvolvido.	69
Figura 24: Interface do Software Sv Slope.....	70
Figura 25: Modelo com inclinação de 25° utilizado para obtenção do FS.	80
Figura 26: Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Tubarão com o nível de confiança de 90%.....	89
Figura 27: Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Tubarão com o nível de confiança de 95%.....	90
Figura 28: Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Tubarão com o nível de confiança de 99%.....	91

Figura 29: Vetores de crescimento principais do município de Tubarão.....92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características geoambientais relacionadas à geotecnia.	25
Quadro 2: Elementos considerados na elaboração de mapas geotécnicos.	29
Quadro 3: Classificação de produtos cartográficos conforme IAEG.	31
Quadro 4: Unidades nos quais os terrenos são agrupados.	32
Quadro 5: Simbologia das classes pedológicas.	35
Quadro 6: Simbologia das classes litológicas.	35
Quadro 7: Classificação do 1º nível categórico dos solos.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados de ensaios de cisalhamento direto.....	49
Tabela 2: Unidades pedológicas.....	61
Tabela 3: Parâmetros utilizados na consolidação no ensaio.....	68
Tabela 4: Índices físicos dos pontos estudados.....	72
Tabela 5: Parâmetros de resistência dos solos amostrados.....	77
Tabela 6: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica PVg.....	77
Tabela 7: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica PVa.....	77
Tabela 8: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica Cg.....	78
Tabela 9: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica Cd.....	78
Tabela 10: Peso específico natural para cada amostra.....	79
Tabela 11: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica PVg.....	79
Tabela 12: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica PVa.....	79
Tabela 13: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica Cg.....	79
Tabela 14: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica Cd.....	80
Tabela 15: Declividades limites para cada unidade geotécnica em seu respectivo nível de confiança.....	87
Tabela 16: Porcentagem da área estudada para cada classe de susceptibilidade por nível de confiança.....	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (PVa).....	73
Gráfico 2: Envoltória de ruptura (PVa).....	73
Gráfico 3: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (PVg).....	74
Gráfico 4: Envoltória de ruptura (PVg).....	74
Gráfico 5: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (Cd).....	75
Gráfico 6: Envoltória de ruptura (Cd).....	75
Gráfico 7: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (Cg).....	76
Gráfico 8: Envoltória de ruptura Cg.....	76
Gráfico 9: Correlação entre declividade e FS para PVg ao nível de confiança de 90%.....	81
Gráfico 10: Correlação entre declividade e FS para PVg ao nível de confiança de 95%.....	82
Gráfico 11: Correlação entre declividade e FS para PVg ao nível de confiança de 99%.....	82
Gráfico 12: Correlação entre declividade e FS para PVa ao nível de confiança de 90%.....	83
Gráfico 13: Correlação entre declividade e FS para PVa ao nível de confiança de 95%.....	83
Gráfico 14: Correlação entre declividade e FS para PVa ao nível de confiança de 99%.....	84
Gráfico 15: Correlação entre declividade e FS para Cg ao nível de confiança de 90%.....	84
Gráfico 16: Correlação entre declividade e FS para Cg ao nível de confiança de 95%.....	85
Gráfico 17: Correlação entre declividade e FS para Cg ao nível de confiança de 99%.....	85
Gráfico 18: Correlação entre declividade e FS para Cd ao nível de confiança de 90%.....	86
Gráfico 19: Correlação entre declividade e FS para Cd ao nível de confiança de 95%.....	86
Gráfico 20: Correlação entre declividade e FS para Cd ao nível de confiança de 99%.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ca – Cambissolo de arenito

Cd – Cambissolo de diorito

Cg – Cambissolo de granito

Cf – Clima mesotérmico úmido

Cfa – Clima subtropical

Cfb – Clima temperado

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

EC – Escudo Catarinense

EESC– Escola de Engenharia de São Carlos

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FS – Fator de Segurança

GL – Grau de liberdade

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

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

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

JKsg– Formação Serra Geral

LGA – Laboratório de Geotecnia Aplicada

LI – Limite infeior

LMS – Laboratório de Mecânica dos Solos

LS – Limite superior

MDT – Modelo Digital de Terreno

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NNE – Norte-nordeste

PIBIC –Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

Prs–Formação Rio do Sul

PSpg– Suíte Intrusiva Pedras Grandes

PSt– Suíte Intrusiva Tabuleiro

PUCE – *Pattern, Unit, Component and Evaluation*

Pva – Podzólico vermelho-amarelo de arenito

Pvg – Podzólico vermelho-amarelo de granito

Q1 – Quartil 1

Q2 – Quartil 2

Q3 – Quartil 3

QHa – Sedimentos aluvionares, siltico-argilosos, areias e calheiras

QHca – Sedimentos colúvio-eluviais indiferentes

QHfl – Sedimentos argilo-arenosos contendo matéria orgânica de origem fluvio-lagunar

QHl – Sedimentos siltico-arenosos de lagunas e baías

SC – Santa Catarina

SDS – Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SSW – Sul-sudoeste

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UTM – Universal Transversa de Mercator

ZCI – Zona de cisalhamento Itajaí-Perimbó

ZCMG – Zona de cisalhamento Major Gercino

LISTA DE SÍMBOLOS

c = Coesão

σ = Tensão normal do plano de ruptura

φ = Ângulo de atrito interno

τ = Resistência ao cisalhamento

γ_{nat} = Peso específico natural do solo

γ_d = Peso específico aparente seco

W = Teor de umidade

W_w = Peso de água

W_s = Peso do material

μ = Média populacional

\bar{x} = Média amostral

CV = Coeficiente de variação

s^2 = Variância amostral

α = Intercepto da reta

β = Inclinação da reta

ε = Erro aleatório

R^2 = Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO GERAL.....	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3	JUSTIFICATIVA	21
1.4	LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	24
2.1.1	Aspectos Geoambientais.....	24
2.1.2	Aspectos Legais	26
2.2	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	26
2.3	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	28
2.3.1	Metodologias de Mapeamento Geotécnico	30
2.3.1.1	<i>Metodologia IAEG.....</i>	30
2.3.1.2	<i>Metodologia PUCE</i>	32
2.3.1.3	<i>Metodologia IPT.....</i>	32
2.3.1.4	<i>Metodologia EESC</i>	33
2.3.1.5	<i>Metodologia da UFRGS de Davison Dias</i>	33
2.4	PEDOLOGIA	36
2.5	MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	38
2.6	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	39
2.6.1	Parâmetros de resistência	40
2.6.1.1	<i>Ângulo de atrito interno.....</i>	40
2.6.1.2	<i>Intercepto Coesivo</i>	41
2.6.2	Critério de ruptura Mohr-Coulomb	41
2.7	ESTABILIDADE DE TALUDES	43
2.7.1.1	<i>Método de Fellenius</i>	45

2.7.1.2	<i>Método de Bishop Simplificado</i>	45
2.7.1.3	<i>Método de Janbu Simplificado</i>	46
2.8	ENSAIOS GEOTÉCNICOS	47
2.8.1	Cisalhamento Direto	47
2.8.1.1	<i>Resultados anteriores</i>	49
2.9	ESTATÍSTICA	50
2.9.1	Medidas de Tendência Central	50
2.9.2	Medidas de dispersão	51
2.9.3	Medidas de posição	52
2.9.4	Box Plot	52
2.9.5	Distribuição t de Student	53
2.9.6	Regressão Linear	54
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	56
3.1	CLIMA	56
3.2	GEOLOGIA REGIONAL	58
3.3	GEOLOGIA LOCAL	59
3.4	PEDOLOGIA	60
3.5	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E AMBIENTAIS	61
3.6	MANCHA URBANA.....	63
4	METODOLOGIA	65
4.1	ESTUDO PRÉVIO	65
4.2	ETAPA DE CAMPO.....	67
4.3	ENSAIO DE LABORATÓRIO.....	68
4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	68
4.5	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	69
4.6	CLASSIFICAÇÃO DOS MAPAS	70
4.7	ANÁLISE TEMPORAL DA EVOLUÇÃO DA MANCHA URBANA	71

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	72
5.2	CISALHAMENTO DIRETO	72
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	77
5.4	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	78
5.4.1	Determinação das declividades limite.....	80
5.4.2	Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa.....	88
5.5	MANCHA URBANA E VETORES DE CRESCIMENTO.....	92
6	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

O planejamento das cidades é um tema amplamente discutido e ganhou destaque nos últimos anos tendo em vista o expressivo aumento do uso e ocupação de solos. Pesquisadores como Zuquette (1993), Prandini (1995), Higashi (2006), Correia (2018), Fornasa (2018) enfatizam em suas pesquisas a necessidade do mapeamento geotécnico no planejamento ordenado das cidades. Higashi (2006) aponta que o mapeamento geotécnico é de suma importância na elaboração do Plano Diretor. Freitas & Campanha (2007) apontam que as cartas de susceptibilidade são instrumentos de análise que permitem o conhecimento e a abordagem de problemas que podem ocorrer frente a atividades com modificação significativa do ambiente.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma análise do meio físico permitindo uma avaliação da expansão urbana do Município de Tubarão e da elaboração de cartas de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa, indicando, do ponto de vista geotécnico, áreas mais aptas à ocupação.

A elaboração dos vetores de crescimento, que é a expressão da tendência da expansão da mancha urbana é denominada por Higashi (2006) de “análise temporal da evolução da mancha urbana”. O procedimento adotado para elaboração dos vetores de crescimento é denominado na metodologia de Higashi (2006) de “análise temporal da evolução da mancha urbana”. A tendência da expansão da mancha urbana é expressa por vetores de crescimento. A interpretação de mapas é necessária para observar a tendência do comportamento de crescimento dos municípios, resultando em estudos de diferentes épocas do centro urbano.

O Laboratório de Geotecnia Aplicada (LGA) desenvolveu uma metodologia que será aplicada no presente trabalho. Ela consiste em utilizar uma interface probabilística de dados para a análise de áreas de riscos e utiliza parâmetros físicos de unidades geotécnicas já conhecidas de estudos prévios, analisando o comportamento da distribuição normal e desvio padrão dos dados, com grau de confiança.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a evolução temporal da mancha urbana do município de Tubarão, nos últimos 18 anos, com base em imagens aéreas e mapas existentes e confeccionar cartas de

susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa com base na metodologia proposta pelo LGA.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender as características da área de estudos;
- Determinar estatisticamente os parâmetros de resistência;
- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com trabalhos anteriores;
- Gerar cartas de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa para a cidade de Tubarão com níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

1.3 JUSTIFICATIVA

Cardoso (2015) destaca a importância da engenharia geotécnica, como um dos primeiros domínios técnico-científicos a intervir em qualquer projeto de infraestruturas ou de desenvolvimento urbano. As cidades não conseguem oferecer infraestrutura básica para a ocupação humana, pelo excesso de concentração da população, falta de áreas livres, espaços de lazer, poluição e riscos de acidentes naturais ou provocados pelo homem. Isso ocorre devido ao rápido crescimento da área urbana e pela falta de políticas eficazes para o ordenamento do território (BORTOLUZZI, 2004).

Em geral o desenvolvimento das cidades ocorre de forma desordenada, não respeitando as limitações impostas pelo meio físico, o que acarreta graves problemas de administração territorial nos centros urbanos (TORRES *et al.*, 2015). Nesse contexto vale destacar que os problemas decorrentes desse crescimento acelerado, e muitas vezes, irregular, levam a uma série de problemas do ponto de vista geotécnico e ambiental, causando risco a população e prejuízos econômicos. Portanto, como apontado por Valente (1995) para planejar o crescimento das cidades é de suma importância o estudo multitemporal das tendências de expansão da mancha urbana e sua interação com o meio físico.

Higashi (2006) ressalta que a desconsideração de fatores geotécnicos e ambientais frente a aceleração da expansão urbana vem apresentando problemas consideráveis para as cidades. Ele ressalta ainda, a possibilidade de direcionar o crescimento do território para áreas mais seguras através da análise de mapas que apresentam características geotécnicas dos

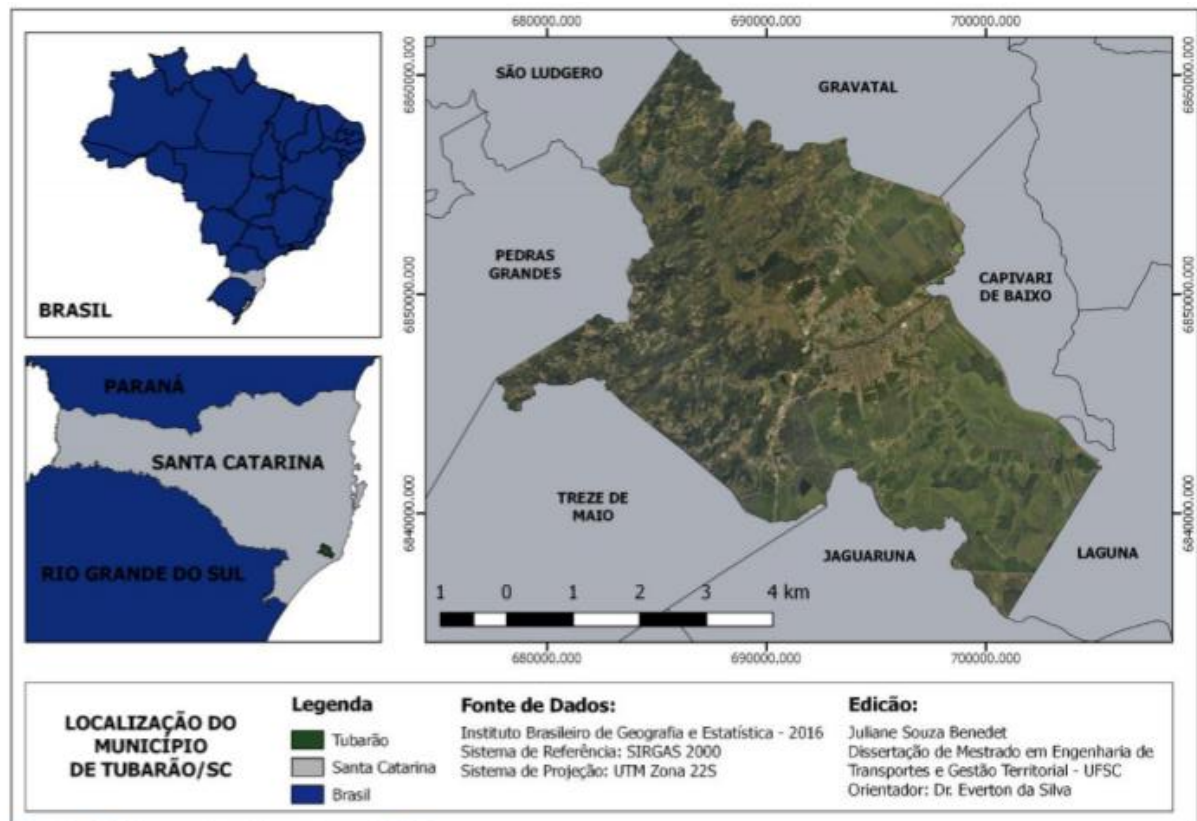
solos. Um dos objetivos gerais do plano diretor do município de Tubarão é: “Assegurar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade garantindo aos cidadãos o direito a uma cidade sustentável, entendido este como o acesso à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte, à circulação, aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, com a defesa do meio ambiente ecologicamente equilibrado para as presentes e futuras gerações”. Para que esse objetivo seja alcançado é imprescindível que mapeamentos de ordem geotécnica sejam efetuados na cidade, visando o crescimento urbano sustentável.

Justifica-se o tema em face ao aumento populacional e expansão dos centros urbanos nas últimas décadas. Há necessidade de sistematizar os estudos da mancha urbana das cidades e de elaborar cartas de susceptibilidade para efetuar um planejamento do crescimento considerando os resultados obtidos através de ensaios de campo, ensaios laboratoriais e do uso de técnicas de Sensoriamento Remoto aliado ao Sistema de Informações Geográficas. Com o desenvolvimento da pesquisa, realizou-se além de uma atualização dos estudos da mancha urbana no município de Tubarão e a elaboração de carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa, proporcionar ao município a possibilidade de desenvolvimento sustentável do ponto de vista geotécnico e ambiental, permitindo assim, que a prefeitura conheça os resultados deste trabalho e possa investir esforços no ordenamento territorial e na recuperação de áreas degradadas.

1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

O município de Tubarão está localizado no sul do estado de Santa Catarina, aproximadamente 138 km da capital catarinense, Florianópolis. Situa-se na latitude de 28°28'00" S e na longitude de 49°00'25" W de Greenwich. Possui uma área de 301.705 km², com população de 104.937 habitantes. Possui como limites políticos ao norte os municípios de Gravatal e Capivari de Baixo, ao sul, Treze de Maio e Jaguaruna, a leste, Laguna, a oeste, Pedras Grandes e São Ludgero. As rodovias de acesso ao município são a rodovia federal BR-101, sendo a principal via de acesso da cidade, a SC-370 (antiga SC-438), que liga Tubarão ao Planalto Serrano, e a SC-390 (antiga SC-440), que liga Tubarão a Pedras Grandes e Orleans. A Figura 1 ilustra a localização do município de Tubarão.

Figura 1: Mapa de Localização da área de estudos



Fonte: BENEDET (2018)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta um levantamento bibliográfico de alguns conceitos que fundamentam o trabalho e que serão utilizados na discussão dos resultados.

2.1 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Prandini, *et al.* (1995) apontam que a concentração de habitantes ocorre principalmente pela crescente especulação de mercado, bem como pela falta de conhecimento das limitações e potencialidades das áreas a serem ocupadas. Esses fatores acabam levando a ocupação de áreas inadequadas, podendo gerar grandes desastres que poderiam ser evitados caso houvesse um planejamento de ocupação adequado, evitando-se instalações em áreas propícias a esses acidentes. O embate entre urbanização, desenvolvimento e ambiente se expressam no aumento de riscos e na rápida expansão da mancha urbana, sem a infraestrutura básica para atender as necessidades da população (MARANDOLA *et al.*, 2013).

De acordo com Higashi (2006) dois aspectos são importantes e determinam o uso e ocupação de solos: os aspectos geoambientais, que impactam nos recursos naturais e estruturas de obras civis dos municípios, e os aspectos legais, que definem normas e limitações quanto ao uso correto do solo.

2.1.1 Aspectos Geoambientais

O desenvolvimento acelerado aliado a ausência da conservação dos solos e das águas por parte do ser humano, resulta em processos negativos, tais como o assoreamento de rios, a contaminação dos lençóis subterrâneos e processos de instabilidade de encostas. A falta de planejamento urbano, de logística nas áreas de expansão dos municípios e a ocupação desordenada do solo pela população, em geral, de baixa renda são expressas em áreas impróprias nos municípios recebendo uma grande concentração de habitantes.

Fatores como resistência do solo de fundação, o comportamento dos solos no estado compactado para a aplicação em vias públicas, a estabilidade de taludes pela ocupação de áreas íngremes, a caracterização da suscetibilidade dos solos a processos erosivos são

características geoambientais (Quadro 1) que devem ser levadas em consideração no que diz respeito ao planejamento dos centros urbanos (HIGASHI, 2006).

Quadro 1: Características geoambientais relacionadas à geotecnia.

ASPECTO GERAL	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS E GEOTECNIA	PROBLEMAS GEOAMBIENTAIS
Fundações	A posição do lençol freático, compressibilidade e resistência ao cisalhamento das camadas de apoio da fundação condicionam e determinam a execução e estabilidade de fundações de edificações.	Apresentar recalque e ruptura na superestrutura.
Pavimentação	O estudo prévio da viabilidade de implantação de estradas requer dados geotécnicos como as propriedades de compactação do solo, sua capacidade de suporte, expansão e as características do terreno para fundações.	Vias inadequadas para o tráfego de veículos em razão das deformações do pavimento.
Estabilidade de Encostas e Taludes	Determinada por fatores como parâmetros de resistência do solo, geometria do talude ou encosta, pressões de água no maciço, peso do talude, empuxos de terra, distribuição das descontinuidades e estados das tensões internas no maciço, método executivo considerado, entre outros.	Suscetibilidade a deslizamentos de massa.
Erosão	A ocupação de áreas em cotas mais altas, sem um devido planejamento, gera instabilidade e de ordem geotécnica das encostas, agravadas pela ocorrência de chuvas intensas.	Erosões no solo, intensificando o processo de assoreamento dos córregos e rios de baixadas.
Poluição Ambiental	A poluição do meio ambiente pode ser causada de diversas formas e por diferentes processos.	Contaminação de aquíferos através de forças de percolação.

Fonte: Extraído de Fornasa (2018).

2.1.2 Aspectos Legais

Um instrumento legal para auxiliar no adequado planejamento territorial é a Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto das Cidades), ela estabelece que é obrigatório a elaboração do Plano Diretor para cidades com mais de 20 mil habitantes, integrantes de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas, integrantes de áreas de especial interesse turístico, inseridas na área de influência de empreendimentos ou atividades com significativo impacto ambiental de âmbito regional ou nacional, incluídas no cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos, sendo o último incluído pela Lei Nº 12.608 de 2012. O plano diretor é o instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana.

2.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Segundo Valente (1999), o geoprocessamento é um conjunto de tecnologias capazes de realizar a coleta, processamento e manipulação de informações espaciais. O termo abrange diferentes sistemas para o tratamento das informações espaciais, sendo eles o Sistema de Digitalização, Sistema de Conversão de Dados, Sistema de Informações Geográficas (SIG), Sistema de Modelagem Digital de Terreno e Sistema de Processamento e Classificação Digital de Imagens (RODRIGUES, 1991).

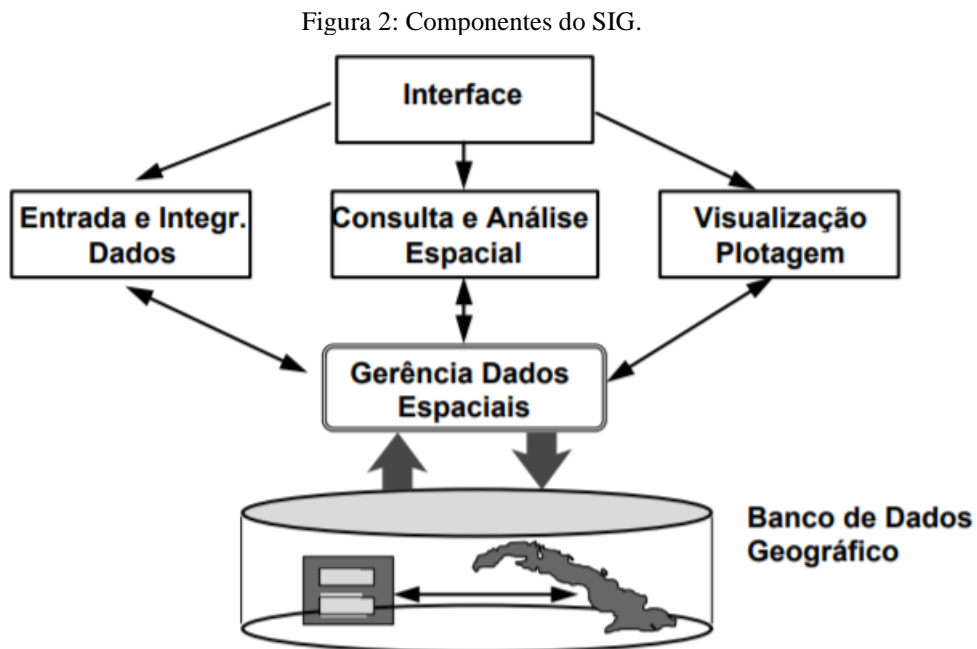
Algumas áreas do conhecimento como a cartografia, análise de recursos naturais, geotecnia, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional estão cada vez mais influenciadas pelo geoprocessamento por apresentar técnicas para o tratamento de informações geográficas. Dentro do Geoprocessamento, o SIG é uma poderosa ferramenta para realizar análises complexas, pois permite integrar dados de diversas fontes e criar um banco de dados georreferenciados, admitindo a automação de processos e produção de documentos cartográficos (HIGASHI, 2006).

Segundo Burrough & McDonnell (1998), o SIG é um conjunto de ferramentas que possibilita armazenar, acessar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real. É uma tecnologia que através da aquisição, armazenamento, estruturação, manipulação, análise e exibição gráfica de dados, permite a descrição e análise do espaço geográfico (CEREDA JUNIOR, 2006).

A evolução do computador (*hardware*), e de programas específicos (*software*) levou ao desenvolvimento do SIG para resolver problema de quantificação de maneira rápida e eficaz. Sendo assim, há a necessidade de uma base de dados georreferenciados, que são os dados associados a um sistema de coordenadas conhecido, além de um meio computacional (FITZ, 2008).

Câmara& Felgueiras (1993) apontam as principais funções de um SIG: integrar informações espaciais de dados cartográficos, censitários e de cadastramento, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno, numa única base de dados; cruzar informações por meio de algoritmo de manipulação para formar mapeamentos derivados; consultar, recuperar, visualizar e permitir saídas gráficas para o conteúdo da base de dados geocodificados.

Segundo Câmara *et al.* (2001) os componentes do SIG são a interface com o usuário, entrada e integração de dados, possuindo ferramentas para conversão dos dados; consulta e análise espacial, visualização e plotagem e armazenamento e recuperação de dados. A Figura 2 indica a relação desses componentes.



Fonte: CÂMARA *et al.*(2001).

O SIG tem uma ampla aplicação, podendo ser utilizado nas mais diversas áreas do conhecimento. Vale citar algumas aplicações de maneira geral: planejamento urbano, agricultura, pecuária, gestão ambiental, medicina e geociências.

Dentro do Mapeamento Geotécnico, o SIG permite a elaboração de mapas temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análise de risco, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental, propiciando fatores que melhoram a tomada de decisões. Essa produção de informações a partir de um banco de dados geográficos é crucial para aplicar no ordenamento territorial, nos estudos de impacto ambiental e outros casos em que a informação final deve ser deduzida e compilada a partir de levantamentos básicos (HIGASHI, 2006).

2.3 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Vários autores caracterizam o termo mapeamento geotécnico. A UNESCO (1976) define o mapeamento geotécnico como um tipo de mapa geológico que representa, de forma geral, os componentes do ambiente geológico de relevância no planejamento do uso da terra, em projetos, construções e manutenção, aplicados a obras de Engenharia Civil e de Minas. Conforme Zuquette (1987), o mapeamento geotécnico pode ser utilizado como fonte para o planejamento regional e urbano e como uma ferramenta de orientação e suporte a atividades antrópicas capazes de modificar o meio físico. Para Higashi (2006), é uma metodologia de composição de um mapa, no qual são representadas as principais características geomecânicas do solo, permitindo obter uma previsão do seu comportamento diante a aplicações de projetos ambientais e de engenharia.

O mapeamento geotécnico é de suma importância para o planejamento urbano, as prefeituras, através de informações geológicas e geotécnicas podem orientar o vetor ocupacional, tendo uma maior efetividade na utilização dos espaços e reduzindo os custos de urbanização e riscos de ocupação (COTTAS, 1983).

A diferença entre o mapeamento geotécnico e a cartografia geotécnica é que o primeiro é um conjunto de processos sistemáticos de investigação dos atributos, cruciais para estabelecer as unidades geotécnicas, podendo ser representados em documentos cartográficos. A cartografia geotécnica por sua vez, estabelece as unidades através de levantamentos feitos a priori, sem a fase de investigação (CERRI, 1990).

O mapa geotécnico representa os atributos geotécnicos sem realização de análises e em escala menor que 1:10.000. Já a planta geotécnica é uma representação em escalas grandes, maiores que 1:10.000, em geral, em locais onde serão realizadas obras específicas. Por fim a carta geotécnica é a representação dos resultados com a interpretação dos atributos presentes num mapa (ZUQUETTE, 1987).

Zuquette & Gandolfi (1990) descreveram os elementos a serem considerados na elaboração de mapas geotécnicos que serão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Elementos considerados na elaboração de mapas geotécnicos.

ELEMENTO	CARACTERÍSTICA
Características das rochas e dos materiais consolidados	Englobam a distribuição dos materiais rochosos e de cobertura, gênese, estrutura, homogeneidade e propriedades físicas e mecânicas.
Condições geodinâmicas internas	Incluem características associadas aos fenômenos sísmicos e vulcânicos.
Condições geodinâmicas externas	Relacionam-se aos processos erosivos, e de sedimentação, dinâmica das encostas, escorregamentos e desmoronamentos.
Condições hidrogeológicas	Nível piezométrico, direção de fluxos, pH, teor de sais, corrosividade e resíduos dos materiais poluidores.
Condições geomorfológicas	Importante para o planejamento urbano, contribuindo na avaliação das áreas para construção civil.
Modificações artificiais do meio físico e materiais de construção	Identificam as ocorrências de materiais utilizados na construção civil e um levantamento dos impactos ambientais.

Fonte: ZUQUETTE & GANDOLFI (1990)

Segundo Freitas & Campanha (2007), a carta de susceptibilidade é um instrumento importante para gerenciar o uso e ocupação de solo, inclusive sendo referência para a elaboração do plano diretor. Ela permite análises sistemáticas dos atributos do meio, possibilitando o conhecimento prévio de problemas ao se implementar atividades com modificações expressivas do ambiente. Segundo Bitar *et al.* (1992), as cartas de susceptibilidade indicam o potencial de ocorrência de processos geológicos naturais e

induzidos em áreas de uso urbano do solo, expressas segundo classes de probabilidade de ocorrência.

De acordo com Higashi (2006), a história do mapeamento geotécnico no Brasil iniciou-se, em 1907 com o primeiro documento de geologia aplicada as obras de engenharia, um mapa geológico, relacionado ao prolongamento da estrada de ferro Nordeste Brasil. Para Rodrigues (2008) foi entre as décadas de 60 e 70, que surgem trabalhos mais consistentes na área de mapeamento geotécnico no Brasil, baseados em metodologias estrangeiras. A intensificação do desenvolvimento de metodologias nacionais ocorreu a partir da década de 80, principalmente com as publicações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/SP) e da Universidade Estadual Paulista (UNESP/Rio Claro).

2.3.1 Metodologias de Mapeamento Geotécnico

Após a década de 1950 muitos países desenvolveram metodologias de mapeamento geotécnico que eram pensadas para atender as necessidades e características da região de interesse a ser mapeada. Algumas dessas metodologias vêm sofrendo modificações e adaptações até hoje (RODRIGUES, 2008).

Nesta seção serão expostas algumas das principais metodologias internacionais e nacionais: metodologia da *International Association of Engineering Geology* (IAEG), francesa, *Pattern, Unit, Component and Evaluation* (PUCE), IPT, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) e a Metodologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) de Davison Dias.

2.3.1.1 Metodologia IAEG

Feita por uma comissão de membros da IAEG em 1968, sendo os resultados publicados em 1970 (HIGASHI, 2006). Segundo Rodrigues (2008), o objetivo principal da comissão foi criar um modelo de orientação e uniformização do mapeamento geotécnico, sendo considerados fatores como caráter de solos e rochas, condições hidrogeológicas, geomorfológicas e fenômenos geodinâmicos. Ele aponta também, que os resultados devem ser apresentados de forma acessível, para que outros profissionais que não atuam efetivamente na área possam compreender. Segundo Zuquette (1993), o objetivo da metodologia foi criar um

sistema de orientação para mapas geotécnicos onde diferentes países conseguissem aplicar de forma técnica e com viabilidade econômica.

A metodologia sugere uma classificação para os produtos cartográficos gerados de acordo com a finalidade desejada. Essas classificações são apontadas no Quadro 3.

Quadro 3: Classificação de produtos cartográficos conforme IAEG.

Finalidade	Mapa de finalidade especial	Trata de aspectos específicos do meio físico, ou de condições geotécnicas para construção de determinado tipo de obra.
	Mapa multifinalidade	Apresenta informações geotécnicas variadas, usadas para diversas finalidades.
Conteúdo	Mapa analítico	Carta de aspectos individuais.
	Mapa compreensivo	Analisa todos os componentes possíveis do meio físico, podendo ser de dois tipos: mapa de condições geotécnicas ou mapa de zoneamento geotécnico.
Escala	Grande	1:10.000 ou maior, para finalidades específicas.
	Média	1:10.000 a 1:100.000 para planejamento regional.
	Pequena	1:100.000 ou menores, para mapeamento de caráter amplo.
Litogênese	Tipo geologia de engenharia	Uniformiza as características litológicas, no estado de alteração.
	Tipo litológico	Prevê heterogeneidade quanto a alteração e homogeneidade em relação a estruturas, texturas e composição.
	Complexo litológico	Litologias relacionadas geneticamente, desenvolvidas em condições geotécnicas e paleogeográficas específicas.
	Suíte litológica	Associação de complexos litológicos.

Fonte: ZUQUETTE & NAKAZAWA (1998).

2.3.1.2 Metodologia PUCE

Desenvolvida por Aitchinson e Grant (1976) na Austrália, também sendo conhecida como metodologia australiana, ela utiliza mapas geológicos, topográficos, solos e vegetação, feições de relevo e drenagens para obter uma classificação dos terrenos para uso no desenvolvimento regional e urbano. Os terrenos são agrupados em unidades denominadas de província, padrão, unidade e componente que estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4: Unidades nos quais os terrenos são agrupados.

UNIDADE	CARACTERÍSTICA
Província	Definida através da geomorfologia considerando aspectos geológicos e climáticos.
Padrão	Definido com base na amplitude de relevo, padrão e densidade de drenagem.
Unidade	Baseado em critérios geomorfológicos, associação de solos e formações vegetais.
Componente	Baseado nos tipos e ângulos de escorregamentos, tipo de perfil de solo, uso da terra ou da superfície de cobertura, associação vegetal e a litologia do substrato rochoso.

Fonte: Higashi (2006)

2.3.1.3 Metodologia IPT

Os primeiros trabalhos realizados pelo IPT em 1980 foram os mapas do morro de Santos e morro de São Vicente; em 1984 a carta da Região Metropolitana de São Paulo e em 1989 da Região Metropolitana de Guarujá.

Segundo Zuquette (1993) a metodologia é aplicada com poucas amostragens e ensaios de laboratório, reduzindo assim o tempo empregado. Prandini *et al.* (1995) indica os passos para o mapeamento conforme essa metodologia através de levantamento dos recursos e problemas, conhecimento das características e dos condicionantes dos fenômenos.

As precauções principais dessa metodologia são elaborar condicionantes mapeáveis a partir de problemas significativos do meio físico; determinar o desempenho dos terrenos considerando fatores como as formas de ocupação do solo e solicitações do meio físico; fazer uma coleta objetiva e orientada de dados para definir unidades de terreno de mesmo

comportamento; elaborar cartas geotécnicas dinâmicas que agrupem novos dados do meio físico e novas técnicas de uso e ocupação dos solos (ZUQUETTE & GANDOLFI, 2004).

2.3.1.4 Metodologia EESC

Baseada nos trabalhos realizados na elaboração de mapas geotécnicos, pelo grupo de pesquisadores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Tem o objetivo de identificar unidades de solo cada vez menores nas áreas de interesse que apresentam uniformidade em função das características do relevo. Essa identificação se dá através de geoprocessamento, identificação de fotografias aéreas e de trabalho de campo com visitas *in loco* (HIGASHI, 2006). Segundo Zuquette & Gandolfi (2004) possui como princípio a integração de todos os dados, desde os atributos até a elaboração de cartas específicas para os usuários, em escalas variáveis de 1:100.000 até 1:10.000. Bastos *et al.* (2005) afirma que a metodologia é baseada na avaliação do meio físico para a implantação de novas formas de ocupação.

Segundo Zuquette & Gandolfi (1990), a metodologia segue os seguintes critérios: menor custo possível; emprego na diversidade do meio físico e grande extensão territorial; conceder dados úteis; possibilitar o aumento de informação; aproveitar para multifinalidades; auxiliar na produção de projetos específicos; realizar amostragem dirigida.

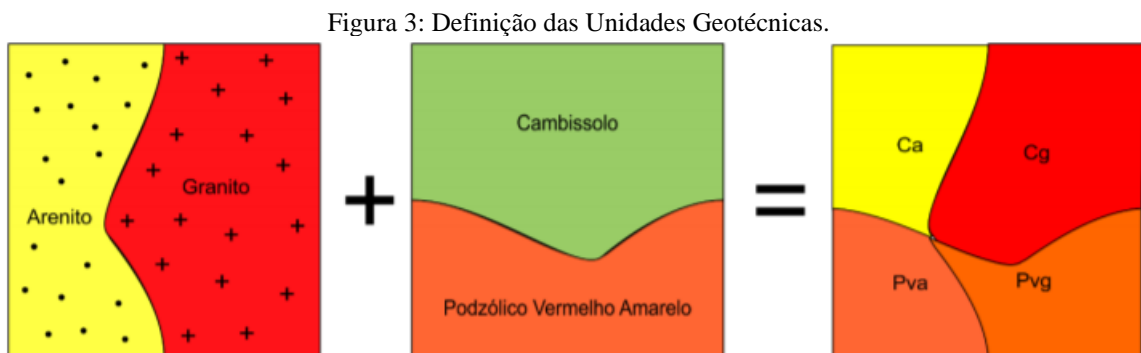
É dividida em três fases: na 1ª fase ocorre o equacionamento do problema investigado, definindo hipóteses de trabalho e estabelecendo os atributos do meio físico a analisar, de acordo com a finalidade. Na 2ª fase criam-se teorias por meio das hipóteses, dividindo área em unidades, em função das propriedades e relações dos atributos antecipadamente escolhidos. E por fim, na 3ª fase a comprovação das hipóteses no mapeamento geotécnico, através de ensaios, envolvendo métodos estatísticos (ZUQUETTE, 1993).

2.3.1.5 Metodologia da UFRGS de Davison Dias

O Brasil apresenta grande parte de seu território formado por solos tropicais e subtropicais. De acordo com Davison Dias (1995), muitos tipos de rocha são encontrados no Brasil e processos geológicos e pedogenéticos que ocorrem para formação de perfis de solo não são considerados pelas metodologias estrangeiras. Isso levou o grupo de Geotecnia da

UFRGS a desenvolver a Metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas, proposta por Davison Dias (1995).

A metodologia primeiramente foi pensada para o estudo de fundações de linhas de transmissão no Rio Grande do Sul. As pesquisas de Davison Dias (1987, 1988, 1991) foram importantes na caracterização da metodologia. O objetivo é a definição de áreas com comportamento geotécnico semelhante. A determinação das unidades geotécnicas é baseada na superposição de unidades geológicas, pedológicas e topográficas (Figura 3).



Fonte: Muller (2015).

As unidades pedológicas (Quadro 5) são utilizadas para caracterização do solo, com objetivos predominantemente agrônômicos. As unidades geotécnicas tratam o comportamento em face da utilização do solo em obras de engenharia, para a obtenção de parâmetros que possam mensurar características do comportamento hidráulico e mecânico do material (HIGASHI, 2006).

As unidades geotécnicas seguem uma simbologia, onde as letras em maiúsculo simbolizam a pedologia e letras minúsculas simbolizam a geologia, considerando a rocha dominante. Se existir mais de uma litologia dominante, adotam-se as siglas dessas unidades separadas por vírgulas. O Quadro 6 mostra a simbologia das unidades litológicas.

Quadro 5: Simbologia das classes pedológicas.

Sigla	Classe	Sigla	Classe
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areias Quartzosas	PB	Podzólico Bruno-Acizentado
B	Brunizém	PE	Podzólico 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	Podzólico Vermelho-Amarelo
LA	Latossolo Amarelo	R	Litolito
LB	Latossolo Bruno	TR	Terra Roxa Estruturada
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	TB	Terra Bruna-Estruturada
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	TBR	Terra Bruna-Roxa
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TBV	Terra Bruna Podzólica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

Fonte: Davison Dias (2001).

Quadro 6: Simbologia das classes litológicas.

Sigla	Classe	Sigla	Classe
a	Arenito	g	Granito
ag	Argilito	gl	Granulito
an	Andesito	gn	Gnaisse
ar	Ardósia	gd	Granitóide
b	Basalto	ma	Mármore
br	Brecha	p	Pelito
c	Conglomerado	q	Quartzito
ca	Calcáreo	r	Riolito
cm	Complexo metamórfico	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos terciários
f	Folhelho	x	Xisto

Fonte: Davison Dias (2001).

2.4 PEDOLOGIA

Pedologia é uma palavra de origem grega que significa ciência que estuda o solo. Ela estuda a sua origem, morfologia e classificação. É fortemente influenciada pela geologia, ou seja, pelo substrato que através de processos pedogenéticos dará origem ao solo. Segundo Porto (2003), solo é todo material inconsolidado que recobre o substrato rochoso inalterado, formado por material intemperizado localizado sobre a rocha de origem (solo residual) ou transportado (solo sedimentar). Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Brasileira (NBR) 6502 (1995) o solo é o material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica.

A NBR 6502 da ABNT (1995) define classes de solos e subdivide de acordo com os seguintes critérios:

- Grau de evolução do solo e o desenvolvimento do seu perfil;
- Modo de alteração e a presença de tipos específicos de argila;
- Tipo de distribuição de matéria orgânica que influi no perfil;
- Presença de certos fenômenos fundamentais de evolução.

Os níveis adotados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos são seis: 1º nível categórico (ordens), 2º nível categórico (subordens), 3º nível categórico (grandes grupos), 4º nível categórico (subgrupos), 5º nível categórico (famílias) e o 6º nível categórico (séries), este último ainda carecendo de definição de conceitos. A identificação das ordens (Quadro 7) é feita mediante a presença ou ausência de determinados atributos, horizontes diagnósticos ou diferenças no tipo e grau de desenvolvimento dos processos que atuaram na formação do solo, logo essa divisão ocorre através de indícios deixados no solo de processos considerados preponderantes no seu desenvolvimento (EMBRAPA, 2006). Os termos técnicos utilizados para descrição das ordens não serão aqui explicados, mas encontram-se disponíveis no trabalho da Embrapa (2006).

Quadro 7: Classificação do 1º nível categórico dos solos.

ORDEM	DESCRIÇÃO
Argissolos	Compreendem solos constituídos por material mineral. Tem como característica a presença do horizonte B textural de argila de atividade baixa ou atividade alta. Nesta classe, estão incluídos os solos que foram classificados anteriormente como Podzólico Vermelho-Amarelo.
Cambissolos	Solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial.
Chernossolos	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, ambos com argila de atividade alta ou sobrejacente a horizonte C carbonático, horizonte cálcico ou petrocálcico ou ainda sobrejacente à rocha, quando o horizonte A apresentar alta concentração de carbonato de cálcio
Espodossolos	Solos constituídos por material mineral com horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial E (álbico ou não), ou horizonte A, que pode ser de qualquer tipo, ou ainda a horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Esses solos apresentam, usualmente, sequência de horizontes A, E, B espódico, C, com nítida diferenciação de horizontes.
Gleissolos	Solos minerais hidromórficos
Latossolos	Solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico.
Luvissolos	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.
Neossolos	Solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso que não apresenta alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos.
Nitossolo	Solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico, textura argilosa ou muito argilosa desde a superfície do solo, estrutura em blocos subangulares ou angulares ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil.
Organossolo	Solos pouco evoluídos, com preponderância de características devidas ao material orgânico, de coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada.
Planossolo	Solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B imediatamente subjacente, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta.
Plintossolo	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, e se caracterizam fundamentalmente por apresentar expressiva plintitização.
Vertissolo	Solos constituídos por material mineral apresentando horizonte vértico e pequena variação textural ao longo do perfil. 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

Fonte: EMBRAPA (2006).

2.5 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Conforme Christofolletti (1979), os movimentos de massa são processos naturais, que ocorre transporte de volumes de solo e rochas pela vertente sob influência da gravidade. Segundo Hutchinson (1988) eles são influenciados por fatores como a litologia, estruturas geológicas, hidrogeologia, topografia, clima, vegetação, erosão e atividade sísmica. Vanâcor (2006) aponta que os movimentos de massa, através de processos geomorfológicos são responsáveis pela evolução do relevo.

Existem diversas propostas de classificação de movimentos de massa, no qual, cada um com objetivo de enfatizar determinada característica. De acordo com Varnes (1978), critérios como o tipo de movimento, tipo de material, taxa de movimento, geometrias da área colapsada e o depósito resultante, idade, mecanismos de deflagração, grau de integridade da massa deslocada, relação ou falta de relação da geometria do deslizamento com a estrutura geológica local, localização geográfica, estado de atividade são utilizados para identificação e classificação.

A classificação do IPT (1991) divide os movimentos como rastejos, corridas de massa, escorregamentos e quedas/tombamentos.

Os rastejos são movimentos muito lentos e contínuos, avançando de camadas superficiais para camadas mais profundas do solo. São causados por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas (AUGUSTO FILHO, 1994; HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).

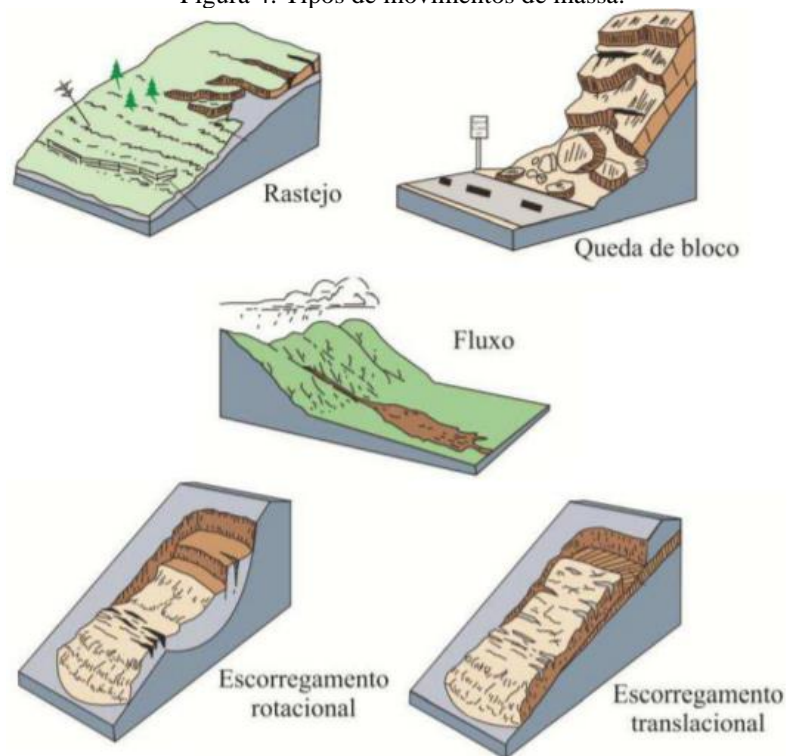
Os fluxos ou corridas de massa são movimentos rápidos com material viscoso. Tem um grande poder de destruição, podendo agregar grandes massas de solo em um curto período deslocando em altas velocidades e grandes distâncias. Frequentemente, há uma gradação de mudança de deslizamentos para fluxos, dependendo do conteúdo de água, mobilidade e evolução do movimento (SELBY, 1993; HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).

Segundo Guidicini & Neible (1984) as quedas de blocos são movimentos rápidos, pela ação da gravidade, de blocos de rochas com volume e geometria variáveis. Ocorrem geralmente em áreas de relevo íngreme e paredões rochosos. Conforme Fernandes & Amaral (2003), a presença de descontinuidades e intemperismo químico e físico favorecem sua ocorrência.

Segundo Terzaghi (1950), o deslizamento é um rápido deslocamento de uma massa de rocha, solo residual ou sedimentos adjacentes a uma encosta, no qual o movimento do centro de gravidade avança para baixo e para fora. São divididos quanto a forma do plano de ruptura em rotacionais e translacionais.

Conforme Augusto Filho (1994), os deslizamentos rotacionais são caracterizados por possuírem uma superfície de ruptura curva, côncava, no qual o movimento ocorre em função de um eixo central. Já os deslizamentos translacionais ocorrem principalmente em solos pouco desenvolvidos associados a altas declividades. O deslocamento é rápido e de curta duração, derivado de uma superfície de ruptura planar. É interpretado por Guidicini & Nieble (1984) como um movimento associado a planos de fraqueza na interface solo-rocha. A Figura 4 mostra um desenho ilustrativo dos tipos de movimentos de massa.

Figura 4: Tipos de movimentos de massa.



Fonte: PRESS *et al.* (2007)

2.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A ruptura dos solos é quase sempre assistida por um evento de cisalhamento. Somente em condições especiais ocorrem rupturas por tensões de tração. A resistência ao

cisalhamento de um solo é compreendida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem que haja sua ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo (PINTO, 2000). De acordo com Caputo (1988), a capacidade dos solos em suportar cargas e manter sua estabilidade depende da sua resistência ao cisalhamento. Quando a resistência é excedida, toda massa de solo se rompe.

No ano de 1846, o engenheiro francês Alexandre Collin foi o responsável pela primeira tentativa de medir os esforços de cisalhamento de um solo. Ele utilizou uma caixa deslizante com um comprimento de 350 mm, na qual uma amostra de argila com dimensões de 40 mm por 40 mm era levada ao duplo cisalhamento com a aplicação de uma carga (HEAD & EPPS, 1986).

Segundo Espindola (2011) a identificação do ponto de ruptura do solo é interpretativa, dependendo do critério de ruptura adotado, do tipo de carregamento, do tipo de obra. É comum utilizar o valor da máxima tensão desviadora como sendo o ponto de ruptura no gráfico de tensão *versus* deformação. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é um dos mais comuns para analisar as tensões atuantes no solo e obter os parâmetros de resistência, utilizados em projetos de obras de engenharia.

2.6.1 Parâmetros de resistência

Os principais parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo são o intercepto coesivo ou coesão e o ângulo de atrito interno. Os parâmetros residuais de resistência, citado por alguns autores não serão detalhados na presente revisão.

2.6.1.1 Ângulo de atrito interno

A NBR6502 da ABNT (1995) define ângulo de atrito interno como o ângulo correspondente à inclinação da tangente à curva envoltória, que representa a relação entre a resistência ao cisalhamento e a tensão normal atuante na superfície de contato de um solo com um outro tipo de material. Segundo Pinto (2000), o ângulo de atrito é o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo para superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que haja deslizamento. Caputo (1988) aponta que, além de haver um atrito físico entre as partículas, há um atrito fictício que é gerado a partir do entrosamento das partículas.

A resistência por atrito entre as partículas depende do coeficiente de atrito podendo ser definida como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano em outro paralelamente a este. Na equação de Mohr-Coulomb é representada pelo termo $\sigma \cdot \tan \phi$ (SBROGLIA, 2015).

2.6.1.2 *Intercepto Coesivo*

A resistência ao cisalhamento do solo ocorre, essencialmente pelo atrito entre as partículas. Contudo a atração química entre partículas pode acarretar uma resistência, constituindo uma coesão real (PINTO, 2000). De acordo com Caputo (1988), a coesão pode ser distinguida em coesão aparente (c_a) e coesão verdadeira ou efetiva (c').

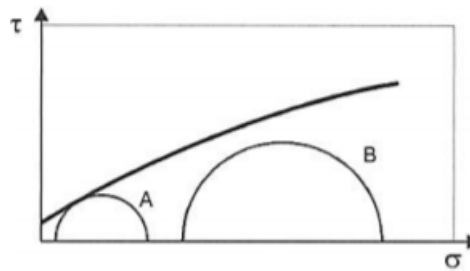
A coesão aparente é resultado da presença de meniscos de água nos contatos entre os grãos e é característica de solos parcialmente saturados. Forças capilares são originadas pelos meniscos de água, à medida que ela vai evaporando. Já a coesão verdadeira pode ser gerada pelas forças eletroquímicas de atração das partículas de argila ou ser resultante da cimentação. Um solo coesivo é aquele que possui um alto conteúdo de argila (ALVES, 2018).

2.6.2 **Critério de ruptura Mohr-Coulomb**

A ruptura é considerada um estado de tensões arbitrárias, onde, conforme o critério escolhido, tem-se uma curva tensão *versus* deformação (GERSCOVICH, 2010).

O critério de Mohr estabelece a relação entre os círculos de Mohr e a curva formada pela função $f(\sigma)$. Se um material sofrer ação de duas tensões principais, a tensão normal (σ) e cisalhante (τ) podem formar um ângulo ϕ com o plano principal. Através da determinação de dois pares de tensões principais de ruptura são criados os círculos de Mohr. As tensões a serem utilizadas na plotagem do círculo são conhecidas por meio de alguns ensaios, como exemplo pode-se citar o ensaio de cisalhamento direto e triaxial (WU, 1966). Não ocorrerá ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior da envoltória curva, conforme Figura 5 (Pinto, 2000).

Figura 5: Representação do critério de Mohr.



Fonte: Adaptado de Pinto (2000).

De acordo com o critério de Coulomb (Figura 6) não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar o valor dado pela expressão:

$$\tau = c + \sigma \cdot \varphi, \text{ onde:}$$

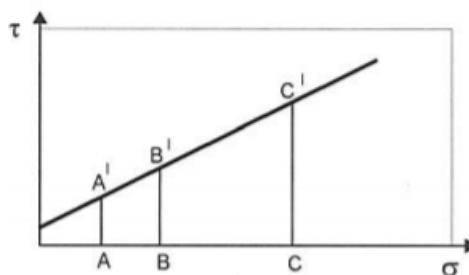
τ = resistência ao cisalhamento

c = coesão

σ = tensão normal do plano de ruptura

φ = ângulo de atrito interno

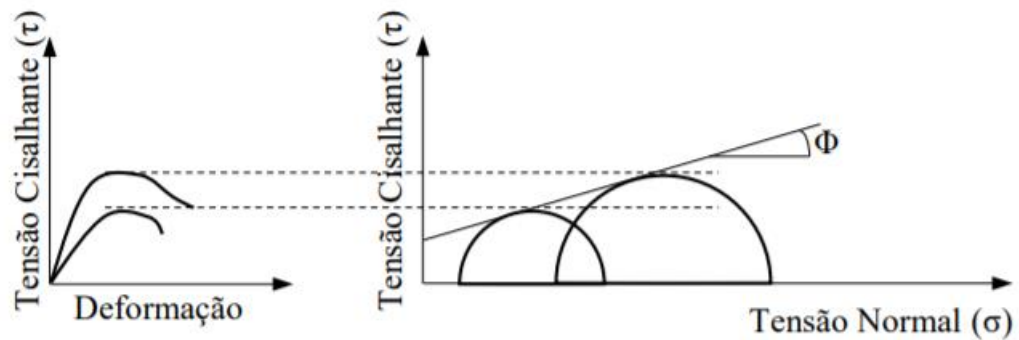
Figura 6: Representação do critério de Coulomb.



Fonte: Adaptado de Pinto (2000).

Pinto (2000) afirma que envoltórias curvas são de difícil aplicação, portanto as envoltórias de Mohr são, em geral, substituídas por retas que melhor se ajustam à envoltória, ficando análogo ao critério de resistência de Coulomb, em Mecânica dos Solos utiliza-se a expressão critério de Mohr-Coulomb (Figura 7).

Figura 7: Determinação da envoltória de Mohr-Coulomb



Fonte: Muller (2015).

2.7 ESTABILIDADE DE TALUDES

Os taludes são superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos. Eles podem ser naturais, também denominado de encostas, originados a partir de processos geológicos e geomorfológicos; podem ser construídos pela ação humana, resultando de corte em encostas, de escavações ou lançamento de aterros (GERSCOVICH, 2012).

Dentre os objetivos da análise de estabilidade de taludes, destacam-se: avaliar a estabilidade de taludes das obras geotécnicas sob diferentes condições de solicitação ou elaborar projetos de estabilização de taludes já rompidos; avaliar o risco de escorregamento em taludes naturais ou artificiais; retroanálise em escorregamentos já ocorridos, permitindo a compreensão dos mecanismos de ruptura e da influência de fatores ambientais (DYMINSKI, 2011).

De acordo com a NBR 11682 da ABNT (2009), a estabilidade de taludes abrange condições de estudo, projeto, execução, controle e observação das obras de estabilização. Conforme o grau de segurança do local definido, são determinados valores do fator de segurança (FS) mínimos a serem adotados. Em locais próximos a edificações, instalações hidráulicas, viadutos, pontes, condutos, linhas de transmissão de energia, por exemplo, o FS deve ser superior a 1,5 para o talude ser considerado estável. O FS 1,3 é permitido, se houver entre o talude e o local a ser ocupado, espaço de ocupação não permanente considerado como área de segurança. Valores abaixo de 1,0 representariam a ruptura de um talude.

Segundo Das (2007), o objetivo de uma análise de talude é determinar o fator de segurança. O FS pode ser definido como a razão entre as forças ou momentos quando se

considera equilíbrio rotacional, que tendem a resistir ao deslizamento e as forças ou momentos que tendem a produzir deslizamento, forças atuantes. (FERREIRA, 2004).

De acordo com Vitto (2016), a partir da modelagem de dados em *softwares* como SVSlope da *SoilVision*, *Slide* da *GeoStudio*®, entre outros, podem ser feitos os cálculos de FS. Os parâmetros de entrada utilizados são os resultados obtidos em ensaios mecânicos de resistência, peso específico do material e geometria do talude. *Softwares* como estes permitem analisar diferentes níveis freáticos.

Em estabilidade de taludes pode-se realizar análise determinística e/ou probabilística. Segundo Duncan e Wright (2005) a análise determinística é a análise quantitativa expressa por um coeficiente ou fator de segurança.

Existem 2 grupos dentro da análise determinística de estabilidade de taludes. Um é baseado na análise de deslocamentos, representado principalmente pelo método dos elementos finitos. E no outro grupo, os métodos que se baseiam no estado de equilíbrio limite. Estes mais tradicionais e difundidos pela facilidade de aplicação (TONUS, 2009).

De acordo com Silva (2015), a abordagem probabilística que é executada normalmente com o uso dos métodos de equilíbrio limite, considera a variação dos parâmetros de projeto com a vantagem de serem capazes de quantificar as diversas origens de incerteza. A modelagem probabilística reconhece as incertezas nos parâmetros de entrada e nos modelos de previsão. Os parâmetros de entrada são tratados como variáveis aleatórias.

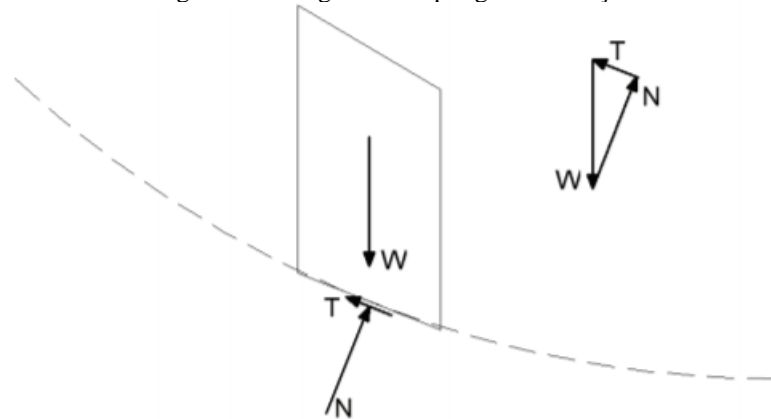
Segundo Ang & Tang (1975) é conhecido que as propriedades geotécnicas dos materiais do solo e da rocha são variáveis. Essa variação pode ser explicada pois os depósitos naturais são formados por camadas irregulares de vários tipos de materiais, de diferentes combinações mineralógicas e com presença de descontinuidades, no caso de rochas, resultantes de processos deformacionais e do intemperismo químico e físico. Isso leva a apresentarem diferentes propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade do depósito.

O risco da obra geotécnica pode ser tratado através de métodos estatísticos e probabilísticos, agregando a variabilidade dos parâmetros e carregamentos no projeto, levando em consideração a frequência de ocorrência dos dados. A análise probabilística é uma complementação da determinística, uma vez que permite obter uma distribuição probabilística dos valores, fornecendo, por exemplo, a probabilidade de ruptura de taludes com FS menores ou maiores que 1 (SILVA, 2015).

2.7.1.1 Método de Fellenius

Freitas (2011) aponta que o método admite que as forças resultantes das interações entre as lamelas são colineares e de mesma ordem de grandeza, permitindo que sejam excluídas dos cálculos. A reação normal na base das fatias pode ser obtida através do equilíbrio de forças segundo a direção perpendicular à base ou através das equações de equilíbrio segundo a vertical e a horizontal. A Figura 8 representa uma fatia genérica e o polígono de forças.

Figura 8: Fatia genérica e polígono de forças.



Fonte: Silva (2011).

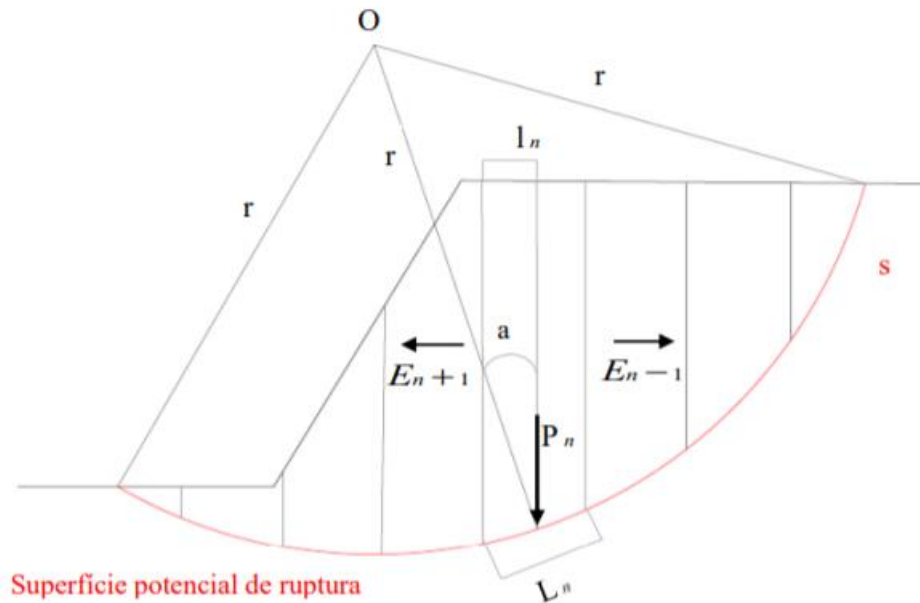
Para Gerscovich (2013) o método é muito conservador, uma vez que oferece valores mais baixos de FS. O método passa a fornecer valores pouco confiáveis em situações que o círculo de ruptura atinge grande profundidade. Duncan e Wright (1980) apontam que esse procedimento, que satisfaz apenas uma condição de equilíbrio, pode apresentar um fator de segurança até 50% menor que o valor correto em encostas verticais com poropressões altas.

2.7.1.2 Método de Bishop Simplificado

Proposto por Bishop no ano de 1955, esse método também utiliza a divisão da cunha em fatias, sendo considerada uma modificação do método de Fellenius. Bishop considera as reações entre as fatias vizinhas (PEREIRA, 2013). Fiori e Carmignani (2009) afirmam que o método é menos conservador que Fellenius, admitindo uma superestimação do FS mais baixa.

Segundo Gerscovich (2009) o FS aparece nos dois lados da equação, logo a solução do método se dá por meio de interações. O valor fornecido por esta equação é verificado por meio da adoção de um valor para FS_1 , sendo que sua primeira aproximação é, em geral, obtida por Fellenius. A Figura 9 mostra o modelo de um talude finito com plano de ruptura circular.

Figura 9: Método de Bishop Simplificado.



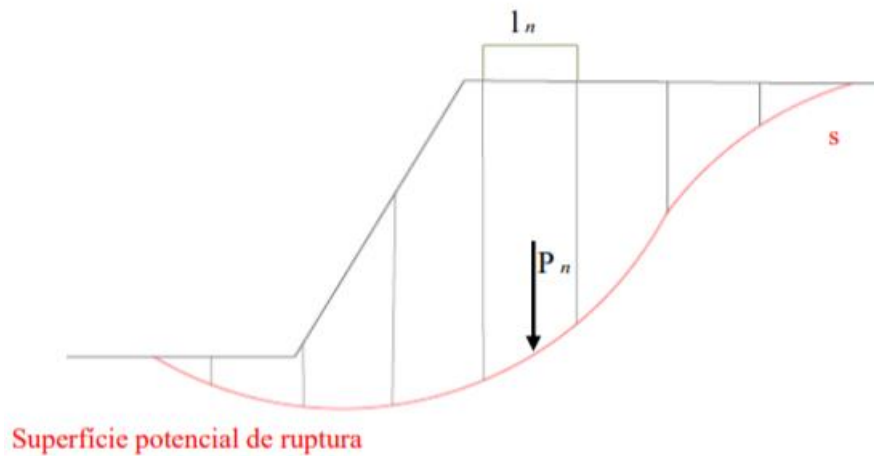
Fonte: Fornasa (2018).

De acordo com Duncan e Wright (1980) o método de Bishop apresenta resultados tão precisos quanto outros métodos que utilizam todas as equações de equilíbrio para determinar o FS. Sendo considerado simples e eficaz para analisar superfícies de deslizamento circulares.

2.7.1.3 Método de Janbu Simplificado

O método de Janbu simplificado satisfaz apenas o equilíbrio de forças horizontais global, mas não o equilíbrio de momentos global em detrimento do método de Bishop Simplificado. É utilizado quando as superfícies de escorregamento não são necessariamente circulares. O cálculo para obtenção do FS é similar ao de Bishop, entretanto com o objetivo de minimizar os erros embutidos na hipótese escolhida, existe a multiplicação por um fator de correção. A Figura 10 mostra um exemplo do modelo de Janbu a partir de um talude finito com plano de ruptura qualquer.

Figura 10: Modelo de Janbu.



Fonte: Fornasa (2018).

2.8 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

O ensaio geotécnico abordado no presente capítulo compreende o ensaio usado na pesquisa. É uma etapa muito importante para obtenção dos resultados, uma vez que é através dela que são obtidos parâmetros de resistência do solo com o objetivo de determinar o seu comportamento.

Ao longo da história da mecânica dos solos, os equipamentos desenvolvidos têm o objetivo de simular ao máximo a condição de campo, prezando pela integridade da amostra; e em ensaios de campo, obter resultados confiáveis por meio de equipamentos que sejam viáveis quanto a praticidade e tempo de operação (ESPINDOLA, 2011).

A etapa de amostragem é fundamental, uma vez que ela determina a qualidade dos resultados obtidos no ensaio. Existem 2 tipos de amostras que podem ser coletadas em campo, as amostras indeformadas e as amostras deformadas.

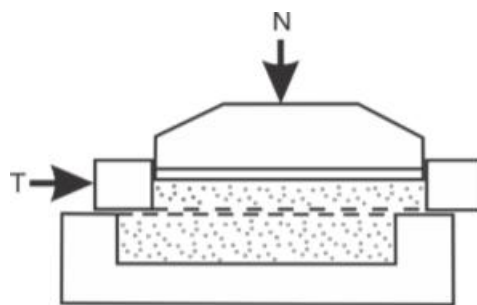
2.8.1 Cisalhamento Direto

Conforme Das (2007), o ensaio de cisalhamento direto é o procedimento mais antigo para determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb. O objetivo do ensaio é determinar qual a tensão de cisalhamento capaz de

provocar a ruptura de uma amostra de solo, em um plano de ruptura predefinido. É regido pela NBR 6122 (2003).

O corpo de prova é colocado em uma caixa bipartida longitudinalmente, composta de duas seções e duas pedras porosas, permitindo a drenagem da amostra conforme o tipo de ensaio. Caracteriza-se pela aplicação de uma tensão normal num plano e a verificação da tensão cisalhante que provoca a ruptura (Figura 11).

Figura 11: Esquema do equipamento para cisalhamento direto.



Fonte: Pinto (2000).

Sbroglia (2015) reforça que o ensaio de cisalhamento direto pode ser dividido em dois estágios, o de consolidação do corpo de prova por meio da aplicação da tensão normal, que é mantida constante e o de cisalhamento, com o auxílio de uma máquina de deformação controlada, que provoca o deslocamento controlado à seção inferior da caixa, aplicando então uma tensão cisalhante que é aumentada até produzir a ruptura do corpo de prova por cisalhamento ao longo do plano de contato entre as duas seções da caixa. A velocidade de ruptura constante é condicionada ao tipo de solo ensaiado, para as areias pode ser elevada, enquanto para as argilas deve ser baixa, por apresentar baixa permeabilidade.

As medidas das forças horizontais aplicadas e dos deslocamentos verticais que ocorrem em função do tempo de ensaio permitem a construção de gráficos de tensão cisalhante máxima *versus* tensão normal, no qual, descreve uma função linear, onde o intercepto do eixo y representa a coesão e o ângulo de atrito interno é representado pelo coeficiente angular da reta (HIGASHI & ESPÍNDOLA, 2011).

A presença de água tem pouca influência no valor do ângulo de atrito, porém influencia no valor da coesão, que diminui com a inundação do solo. Isso leva a necessidade de realizar ensaio para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em corpos

de prova inundada ao se calcular a estabilidade de um talude que possa ter saturado. (VARGAS, 1977).

2.8.1.1 Resultados anteriores

A presente seção tem como objetivo compilar os resultados de pesquisas já realizadas na região. Alguns desses resultados serão utilizados para compor o banco de dados estatísticos do trabalho.

Tabela 1: Resultados de ensaios de cisalhamento direto.

Unidade Geotécnica	C (kN/m²)	Φ (°)	Autor
PVg	11	31,4	Higashi (2006)
PVg	3,58	32,1	Higashi (2006)
PVg	13,40	35,1	Higashi (2006)
PVg	12,99	38,7	Higashi (2006)
Casq	0	41,3	Higashi (2006)
PVg	1,36	31,5	Higashi (2006)
PVsq	11,84	23,2	Higashi (2006)
Centro urbano	10,95	31,6	Higashi (2006)
PVg	7,3	33,7	Higashi (2006)
Cg	2,10	36,60	Fornasa (2018)
Cg	4,50	31,20	Fornasa (2018)
Cg	1,60	38,10	Fornasa (2018)
Cg	3,20	35,20	Fornasa (2018)
Cg	3,00	33,40	Fornasa (2018)
Cg	5,20	31,00	Fornasa (2018)
Cg	4,50	32,40	Correia (2018)
Cg	8,20	28,70	Muller (2015)
Cg	6,10	33,80	Muller (2015)
Cg	9,10	25,60	Muller (2015)
PVa	5,00	28,80	Muller (2015)
PVa	16,00	19,80	Muller (2015)

Fonte: Correia (2018); Fornasa (2018); Higashi (2006); Muller (2015).

2.9 ESTATÍSTICA

Segundo Larson e Farber (2014) estatística é a ciência que coleta, organiza, analisa e interpreta dados para tomada de decisões. Os dados consistem em informações que vem de observações, contagens, medições ou respostas, havendo dois tipos de conjunto de dados, a população e amostra. Uma população é uma coleção de todos os resultados e uma amostra é um subgrupo de uma população. Um parâmetro é a descrição numérica de uma característica populacional e uma estatística é uma descrição numérica de uma característica amostral.

Quando se utiliza estudos estatísticos na tomada de decisões, pode-se obter resultados satisfatórios desde que o processo adotado para obtenção dos dados seja aplicado corretamente. Logo, se o processo tiver falhas, a decisão será questionável (LARSON & FARBER, 2014).

A aplicação de um banco de dados exige, de alguma forma, ao pesquisador, a realização de uma análise de tais dados com o objetivo de entender o comportamento dos mesmos. De maneira a sistematizar essa análise, faz-se necessário transformar os dados em informações passíveis de serem utilizadas (CORREIA, 2018)

Segundo Larson e Farber (2014) a inferência de uma população é realizada através da coleta, análise e modelagem dos dados, sendo o último, importante na realização das previsões que são utilizadas na tomada de decisões.

2.9.1 Medidas de Tendência Central

Uma medida de tendência central é um valor que representa uma entrada típica ou central de um conjunto de dados, ou seja, a tendência de dados quantitativos de se agruparem ao redor de um valor central. As medidas de tendência central mais comuns utilizadas na estatística são média, mediana e moda (DEVORE, 2006).

A média de um conjunto de dados é a soma das entradas de dados dividido pelo número de entradas. O cálculo é expresso na equação a seguir:

$$\mu = \frac{\sum x}{N} (\text{Média populacional})$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} (\text{Média amostral})$$

A mediana de um conjunto de dados é um valor que está no meio dos dados, quando estes, são ordenados. A mediana divide o conjunto de dados em partes iguais. Se o conjunto de dados tiver um número ímpar de entradas a mediana será o valor do meio, já se o valor for par, a mediana será a média das duas entradas do meio.

A moda de um conjunto de dados é uma entrada que aparece com maior frequência. Se nenhuma entrada se repete o conjunto de dados não tem moda. Um conjunto é bimodal, quando duas entradas ocorrem na mesma frequência.

2.9.2 Medidas de dispersão

As medidas de dispersão são utilizadas para determinar a variação do conjunto de dados. As principais são a amplitude, o desvio, a variância e o desvio padrão. A amplitude é a medida mais simples e é a diferença entre as entradas máximas e mínimas no conjunto de dados. Tem como desvantagem que utiliza apenas duas entradas do conjunto de dados.

O desvio de uma entrada “x” em uma população é a diferença entre a entrada e a média μ do conjunto de dados, expresso na equação a seguir:

$$x = x - \mu$$

A variância mostra a dispersão de uma amostra, série ou população com relação à média destas.

$$S^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1} (\text{Variância amostral})$$

O desvio padrão é a medida de dispersão dos dados em torno da média amostral. A vantagem de usar o desvio padrão em relação a variância é que o desvio padrão é expresso na mesma unidade dos dados, sendo calculado pela fórmula a seguir:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} (\text{Desvio padrão amostral})$$

O coeficiente de variação é uma forma de expressar a variabilidade dos dados excluindo a influência da ordem de grandeza da variável.

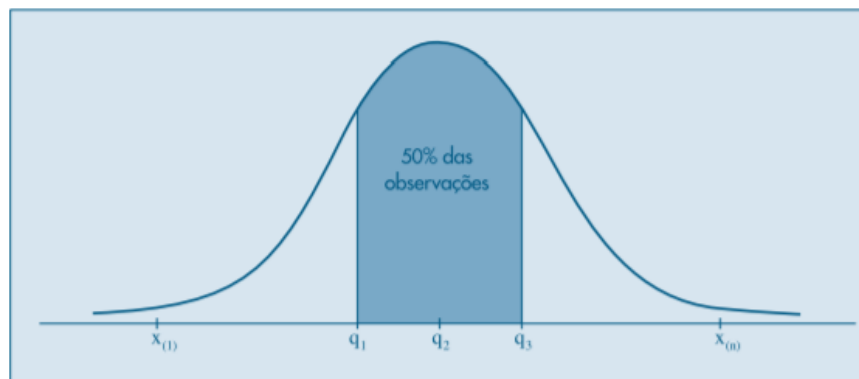
$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100\%$$

2.9.3 Medidas de posição

Os fractis são números que separam ou dividem um conjunto de dados ordenados em partes iguais. Os três quartis Q_1 , Q_2 e Q_3 ordenam em ordem crescente, dividindo a distribuição em quatro partes iguais. O primeiro quartil (Q_1), é o número que deixa 25% das observações abaixo e 75% acima; o segundo quartil (Q_2) corresponde a mediana e deixa 50% das observações acima e 50% abaixo; o terceiro quartil (Q_3), deixa 75% das observações abaixo e 25% acima.

Se os dados apresentam simetria isso significa que eles seguem uma distribuição normal, também chamada de distribuição Gaussiana (Figura 12).

Figura 12: Distribuição normal dos dados.



Fonte: Bussab (2010).

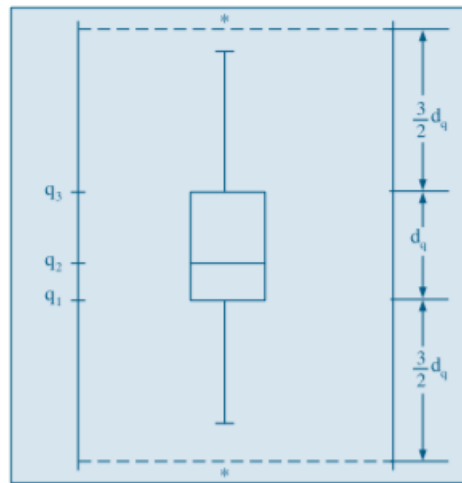
2.9.4 Box Plot

É um gráfico utilizado para avaliar a distribuição empírica dos dados. Para a sua construção utiliza-se o primeiro e terceiro quartil e a mediana. A partir de um retângulo, para cima, segue uma linha até o ponto mais remoto que não exceda $LS = q_3 + (1,5)dq$, chamado limite superior. De modo similar, da parte inferior do retângulo, para baixo, segue uma linha até o ponto mais remoto que não seja menor do que $LI = q_1 - (1,5)dq$, chamado limite inferior. Os valores compreendidos entre esses dois limites são chamados valores adjacentes. As observações que estiverem acima do limite superior ou abaixo do limite inferior estabelecidos serão chamadas pontos exteriores e representadas por asteriscos.

A representação ajuda a visualizar o centro, a dispersão e a assimetria de um conjunto de dados (Figura 13). Ainda, é excelente para identificar e controlar valores

extremos, conhecidos na estatística como *outliers*. Sua utilização facilita na visualização e identificação da mediana.

Figura 13: Exemplo de uma representação Box Plot.



Fonte: Bussab (2009).

2.9.5 Distribuição t de Student

A construção de um intervalo de confiança do tipo “t” é muito similar a construção de um intervalo que utiliza a distribuição normal, já que as mesmas utilizam uma estimativa pontual média e uma margem de erro. Ela é mais achatada no centro e tem as caudas mais longas (LARSON & FARBER, 2014). Segundo Bussab (2010) a distribuição do tipo “t” foi desenvolvida pelo estatístico inglês W. S. Gosset para inferências de pequenas amostras. Ele utilizava o pseudônimo *Student* para fazer suas publicações

Um parâmetro importante dessa distribuição é o grau de liberdade (G.L), onde $GL = (\text{número de amostras} - 1)$ e representa o número de escolhas livres deixadas depois que uma amostra estatística é calculada. Conforme os graus de liberdade aumentam, essa distribuição se aproxima da distribuição Normal, sendo que para mais de 30 graus de liberdade, a distribuição t se comporta muito próximo a uma distribuição normal (LARSON & FARBER, 2014).

O nível de significância diz respeito a uma margem de erro tolerável e que sustenta a rejeição da hipótese. Ele é escolhido com base nos riscos envolvidos na rejeição incorreta da hipótese nula, logo a certeza de que o parâmetro avaliado está incluso nos dados. Ao utilizar essa distribuição, se faz necessário determinar um valor de t crítico tabelado (Figura 14). Para isso, foi desenvolvida a tabela de valores de t crítico para variados níveis de significância e

variáveis explicativas (X_1, X_2, X_n). Quando a análise de regressão linear é feita utilizando 2 variáveis têm-se uma análise de regressão simples, quando são 3 ou mais variáveis têm-se uma análise de regressão múltipla (LARSON e FARBER, 2014).

Além da correlação entre as variáveis é necessário que haja causalidade (variável resposta afetada pela explicativa). O modelo de regressão linear simples é descrito na fórmula a seguir.

$$Y = \alpha + \beta * X + \varepsilon, \text{ onde:}$$

$\alpha =$ *intercepto da reta*; $\beta =$ *é a inclinação da reta*; $\varepsilon =$ *é o erro aleatório*.

A equação da regressão linear simples é expressa na fórmula a seguir.

$$\hat{Y} = a + b * X, \text{ onde:}$$

$a =$ *estimador de α* ; $b =$ *estimador de β* ; $x, y =$ *variáveis*.

Para avaliar a qualidade do ajustamento dos dados à equação de regressão linear utiliza-se o indicador chamado de coeficiente de determinação (R^2). Esse coeficiente mede a proporção da variação de Y, que pode ser explicada pela variação de X, compreendendo um valor entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, melhor a qualidade do ajustamento (PINHEIRO *et al.*, 2012).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Esta seção apresenta a caracterização da área de estudos, no que diz respeito os seguintes aspectos: clima, pedologia, geologia regional, geologia local, hidrografia e as principais características geotécnicas e ambientais.

Segundo dados da Prefeitura Municipal de Tubarão, a altitude média na sede do município é de 9 metros acima do nível do mar e o ponto culminante é o morro do Martinelli, com 540 metros.

O principal rio do município é o rio Tubarão. Ele pertence a Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar. A região compreende as bacias do Rio Tubarão, Rio Urussanga e Rio D'una, que fazem parte da vertente atlântica.

3.1 CLIMA

Neste tópico são abordados alguns elementos climáticos, que são grandezas meteorológicas variáveis, tais como, temperatura, umidade, chuva, pluviosidade, ventos. Os fatores climáticos, que são aspectos físicos que influenciam os elementos climáticos, tais como, relevo, altitude, latitude foram descritos à priori.

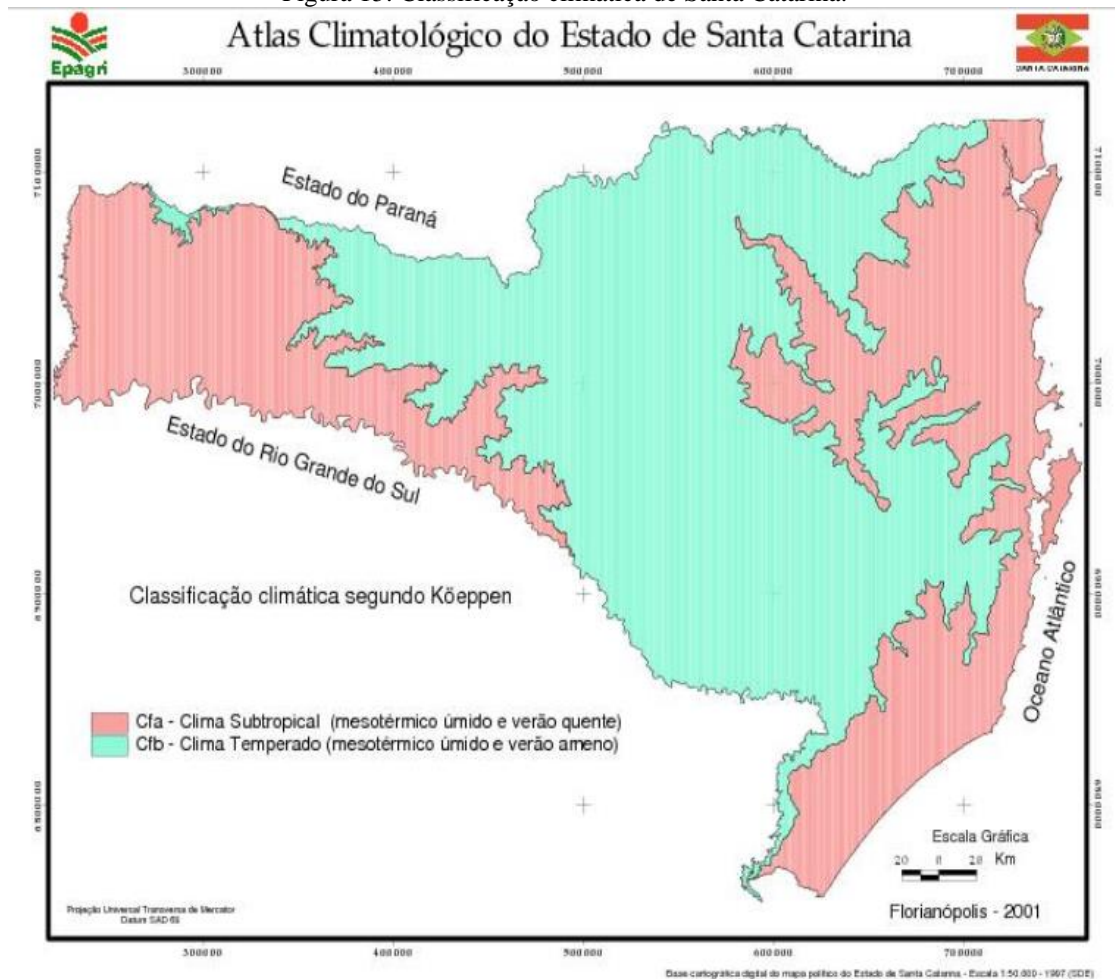
Segundo a classificação de Köppen (1931), o Estado de Santa Catarina é classificado como de clima mesotérmico úmido- Cf, incluindo dois subtipos (Figura 15), clima subtropical (Cfa) e clima temperado (Cfb). O clima do município de tubarão é subtropical, que é caracterizado por temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida.

A precipitação média anual em volume é de 1.493 cm³, com chuvas, em geral, bem distribuídas ao longo dos meses. Os meses de abril, junho e agosto são os de menor precipitação. Enquanto a estação de maior precipitação dura entre dezembro a março, sendo fevereiro o mês de maior precipitação. Como apontado por Fornasa (2018) são nessas épocas chuvosas que as encostas ficam mais suscetíveis à escorregamentos, pelo acréscimo de poropressão e conseqüente redução das tensões efetivas nos maciços com a perda de efeitos capilares, que reduzem a resistência do solo ao cisalhamento.

A umidade relativa do ar apresenta uma média anual de 83,59 pontos. O índice é elevado em virtude da presença de lagoas e do mar, havendo influências devido à temperatura e à altitude.

No verão, os ventos sopram com mais constância e regularidade. Naturalmente, são ventos predominantes dos quadrantes leste-atlântico para o continente. O outono é a estação com menor incidência de ventos e isso se explica pelo equilíbrio entre valores barométricos no atlântico e no continente, e conseqüente diminuição das massas de ar. No inverno, devido à predominância de outra área de alta pressão no interior do continente, a componente de ventos do oeste adquire importância, podendo ultrapassar a soma de velocidade dos ventos de leste. A predominância dos ventos na região é a seguinte: 37,5 % ocorrência dos ventos Nordeste; 15,6% ocorrência dos ventos Sul; 13,2 % ocorrência dos ventos Sudoeste.

Figura 15: Classificação climática de Santa Catarina.



Fonte: Pandolfo (2002).

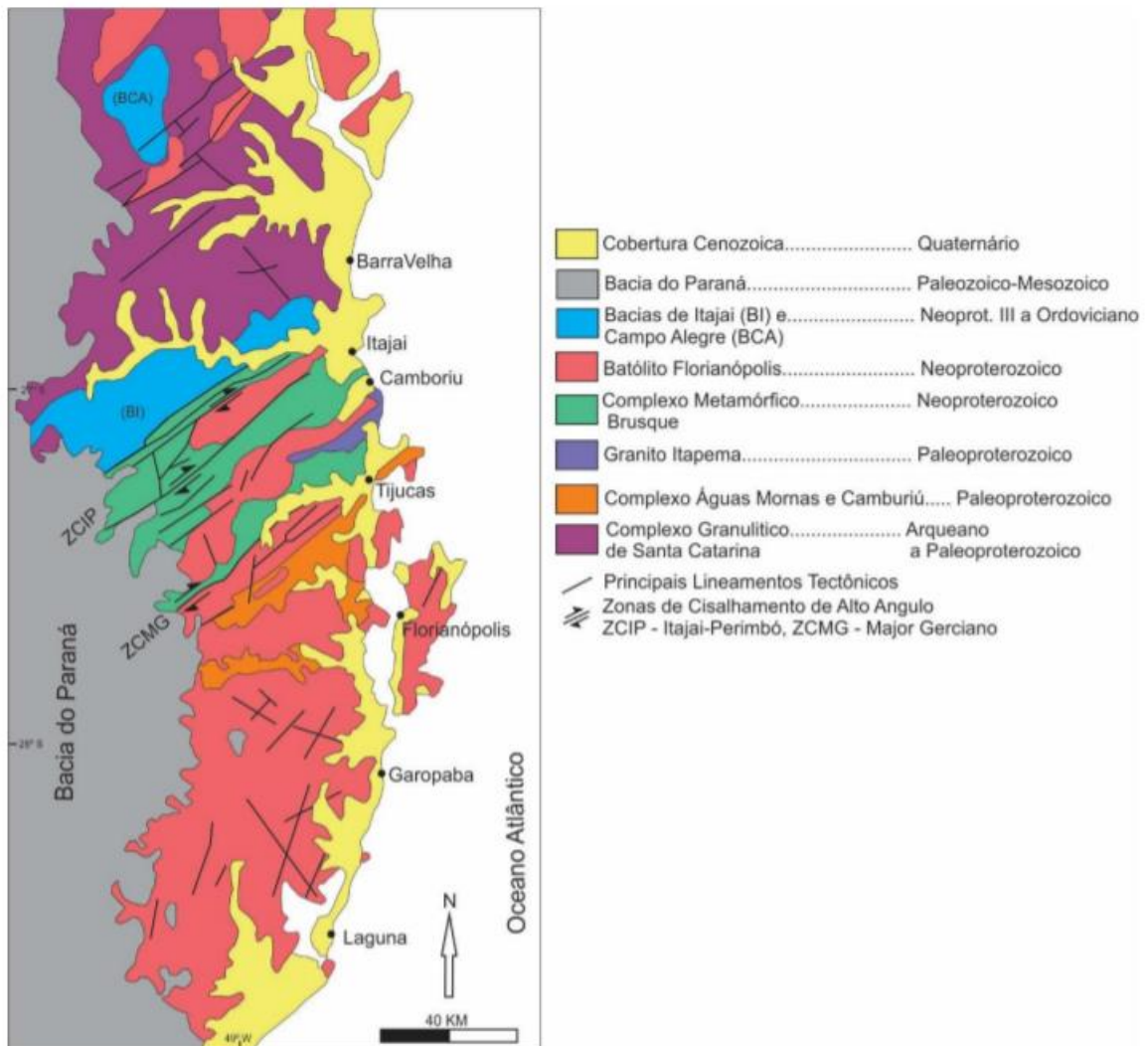
3.2 GEOLOGIA REGIONAL

O município de Tubarão é abrangido em sua totalidade pela Folha Criciúma (SH-22-X-B), inserido na porção sul da Província Mantiqueira (ALMEIDA *et al.*, 1977). Corresponde a porção sul do Escudo Atlântico, que em Santa Catarina é denominado Escudo Catarinense (EC).

Segundo Almeida (1977), a Província Mantiqueira é uma compartimentação tectônica que se estende desde o sul da Bahia até o Uruguai por cerca de 3.000 km com orientação NNE–SSW ao longo da costa atlântica. Seu limite a norte se dá com o Cráton São Francisco, a sul com o Cráton Rio de La Plata, a oeste com o oceano Atlântico Sul e a leste com o Cráton São Francisco, o Cinturão Brasília e as rochas da Bacia do Paraná. É constituído pelos orógenos Araçuaí, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel, e pela zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira (HEILBRON, 2004).

Segundo a CPRM (2000), o EC (Figura 16) tem seu arcabouço estruturado por terrenos arqueanos, recortados por unidades do Paleoproterozoico a Mesoproterozoico e por associações vulcano-sedimentares e granitóides do Neoproterozoico ao Eopaleozoico. Basei (1985) divide o EC em 3 domínios, cujos limites são definidos pela Zona de cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCI) e Major Gercino (ZCMG). O domínio externo abrange rochas do EC ocorrentes a norte da ZCI; o domínio intermediário abrange rochas do EC entre a ZCI e a ZCMG e por fim o domínio interno compreende as rochas do EC a sul da ZCMG.

Figura 16: Mapa do Escudo Catarinense e suas principais feições geológicas e estruturais.



Fonte: Extraído de Aquaroli (2017).

3.3 GEOLOGIA LOCAL

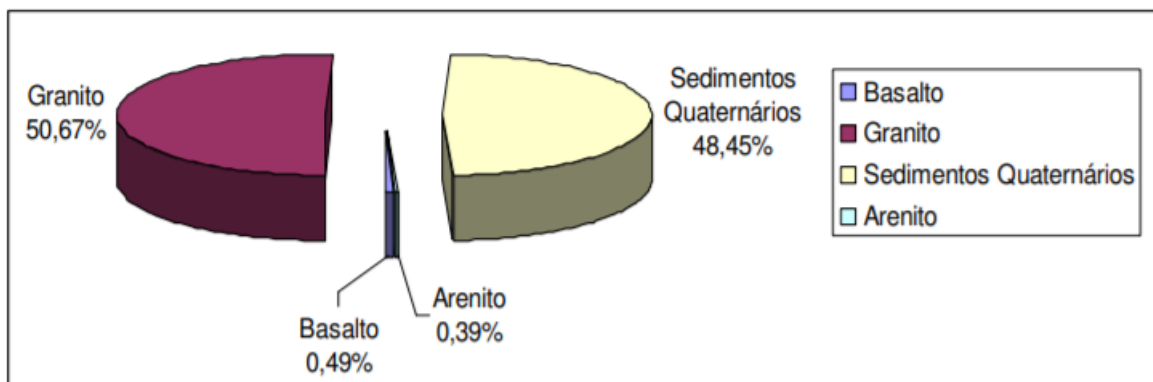
Segundo o mapeamento do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro em escala 1:100.000 no município de Tubarão afloram as seguintes unidades geológicas:

- **Suíte Intrusiva Pedras Grandes (PSpg):** constituída de granitóides alcalinos do embasamento cristalino. A rocha é de granulação média a grossa e cor cinza a rósea;
- **Formação Serra Geral (JKsg):** rochas vulcânicas da bacia do Paraná. No município ocorre em forma de dique de diabásio;
- **Formação Rio do Sul (Prs):** rochas sedimentares, com espessos pacotes de camadas predominantemente arenosas;

- **Suíte Intrusiva Tabuleiro (PSt):** Associações granito-gnaissicas onde os principais domínios apresentam forte foliação de alto ângulo devido ao cisalhamento dúctil em zonas de transcorrência;
- **Sedimentos aluvionares, siltico-argilosos, areias e calheiras (QH_a):** sedimentos fluviais, podendo formar planícies. São constituídos por argilas, areias, cascalho e materiais siltico-argilosos;
- **Sedimentos colúvio-eluviais indiferentes (QH_{ca}):** são acumulações na base de encostas. Encontram-se inconsolidados e são constituídos por cascalhos, seixos, areias e argilas.
- **Sedimentos argilo-arenosos contendo matéria orgânica de origem fluvio-lagunar (QH_{fl}):** depósitos de material detrítico, inconsolidado, constituído de areias, silte e argilas, gerando lamas e lodo com elevado teor de matéria orgânica.
- **Sedimentos siltico-arenosos de lagunas e baías (QH_l):** compostos de materiais que sofreram sedimentação em razão do baixo fluxo. Alta concentração de material de granulação fina.

A Figura 17 apresenta um gráfico das unidades litológicas do Município de Tubarão, tomando como base as unidades geológicas apresentadas acima.

Figura 17: Gráfico da porcentagem das unidades litológicas do Município de Tubarão.



Fonte: Higashi (2006).

3.4 PEDOLOGIA

As unidades pedológicas generalizadas apresentada na Tabela 2, são baseadas no Mapeamento do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, em escala de 1:100.000.

Conforme apresentado na Tabela 2 o solo Podzólico Vermelho-Amarelo é predominante na região. Ao longo do rio Tubarão existe a ocorrência de solos do tipo Cambissolo, o qual apresenta perfil pouco profundo, devido seu grau de evolução pouco acentuado. Apesar do solo Podzólico Vermelho-Amarelo ser a unidade pedológica de maior cobertura, Cambissolos e solos hidromórficos, são unidades mais próximas ao centro urbano.

Tabela 2: Unidades pedológicas.

Unidade Pedológica	Descrição	Área km²	%
A	Solos Aluviais	0,3535	0,12
C	Cambissolos	58,2827	19,88
GH	Solos Glei	37,2778	12,72
HO	Solos Orgânicos	35,1366	11,99
PV	Podzólicos Vermelho-Amarelos	160,8727	54,9
TE	Terreno de escavação	1,1432	0,39

Fonte: Higashi (2006).

3.5 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E AMBIENTAIS

Segundo Rufino (2002), os principais problemas ambientais no município de Tubarão estão relacionados à qualidade do ar e das águas, ausência de tratamento de esgoto cloacal, e problemas relacionados ao uso do solo e a supressão da cobertura vegetal.

Em Capivari de Baixo, município vizinho, está localizada a Usina Jorge Lacerda, um dos maiores complexos termelétricos da América do Sul, lançando cinzas oriundas da combustão do carvão mineral, além de dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido e dióxido de carbono (RUFINO, 2002). Além da contaminação do ar, contribui também para a acidificação dos rios e lagoas da região em decorrência das chuvas ácidas.

Segundo Santa Catarina (1998), no município de Tubarão existe uma rede unitária que recebe as águas pluviais juntamente com as ligações clandestinas das águas residuais como o esgoto cloacal das residências. Além dos problemas gerados pelo tratamento de esgoto ineficiente, como o município está localizado na parte final da bacia hidrográfica do rio Tubarão, sofre com problemas, já que drena a região de mineração de carvão na região onde se encontra suas principais nascentes, diminuindo significativamente a qualidade das

águas. Outro fator ainda é a poluição orgânica, devido ao considerável aumento da suinocultura na região, nos últimos anos (RUFINO, 2002).

A área referente à bacia hidrográfica do rio Tubarão, onde localiza-se o município de Tubarão, tem umas das menores coberturas vegetais do estado, com aproximadamente 26%. A área reflorestada que representa em torno de 1% (Santa Catarina, 1997).

Como apontado por Higashi (2006), em março de 1974 ocorreram fortes chuvas que geraram o extravasamento do rio Tubarão, resultando em uma grande enchente. A enchente deixou 199 mortos e 60.000 dos 70.000 habitantes ficaram desabrigados.

Bastos *et al.* (2003) concluiu que esta bacia do Rio Tubarão está sujeita à ocorrência de processos erosivos, em geral, acelerados pela ação antrópica. Ocorrem grandes extensões de unidades de solos com susceptibilidade alta a muito alta à erosão laminar. Eles ressaltam a preocupação sobre a produção dos sedimentos que têm gerado o assoreamento em diversos rios que compõem a bacia.

As encostas são formadas por solos residuais oriundos das elevações graníticas. Quando alterados apresentam-se intensamente fraturados, caracterizando superfícies de fraqueza. O intemperismo (dependendo da composição dos granitos) pode dar origem a solos argilosos e expansivos, de baixa permeabilidade, resultando na instabilidade das encostas (HIGASHI, 2006).

Higashi (2006) observou, através de saídas a campo, unidades na zona de expansão urbana do município de Tubarão com potencial à instabilização de encostas. Em alguns locais de expansão foram detectados taludes rompidos (Figura 18a e 18b) mesmo sem intervenção antrópica, confirmando o potencial destes solos a se instabilizarem.

Figura 18: a) Instabilidade de talude no bairro Quilômetro Sessenta. b) Detalhe da instabilização.

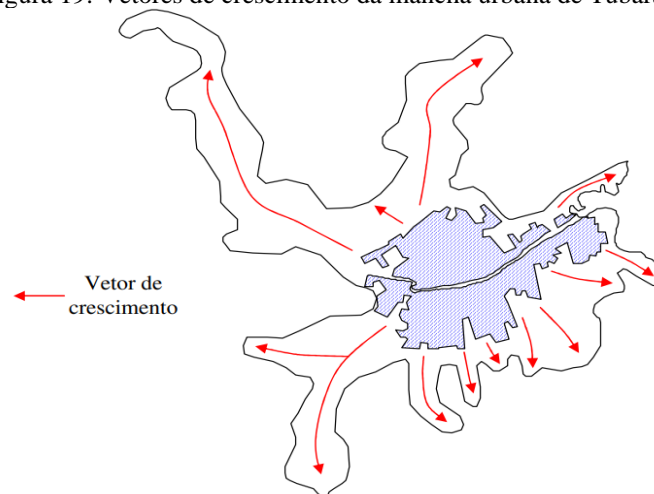


Fonte: Higashi (2006).

3.6 MANCHA URBANA E VETORES DE CRESCIMENTO

De acordo com Higashi (2006), os vetores de crescimento representam a tendência do crescimento da mancha urbana, traduzida pela ocupação dos solos por estruturas civis. O autor identificou através de análises temporais em manchas urbanas 13 sentidos preferenciais e selecionou os principais para um estudo aprofundado. Os vetores de crescimento do centro urbano de Tubarão apresentam comportamento estrelar concentrado em diversas direções (Figura 19).

Figura 19: Vetores de crescimento da mancha urbana de Tubarão.



Fonte: Higashi (2006).

Os 5 vetores principais utilizados para as análises são expressos na Figura 20. Estima-se que o vetor de crescimento 01 tenha fatores turísticos como influência de crescimento, indo em direção a uma área onde estão presentes hotéis de médio porte que exploram águas termais e banhos de lama. Neste mesmo local há ainda uma grande empresa de água mineral e observa-se o crescimento de estabelecimentos comerciais, o que caracteriza uma outra justificativa de crescimento. O vetor 2 teve como principal momento de ocupação, após a grande enchente que ocorreu no município no ano de 1974. Estima-se que o crescimento da mancha representada pelo vetor 3 esteja fortemente ligado ao crescimento do vetor 04. Estima-se que o vetor 4 adote fatores econômicos, tendo em vista o potencial de empregos que geram as grandes indústrias que compõem a área. A ocupação do solo no vetor 5 é dada principalmente por famílias de baixa renda, sendo muitas das edificações irregulares (HIGASHI, 2006).

Figura 20: Vetores de crescimento principais do município de Tubarão.

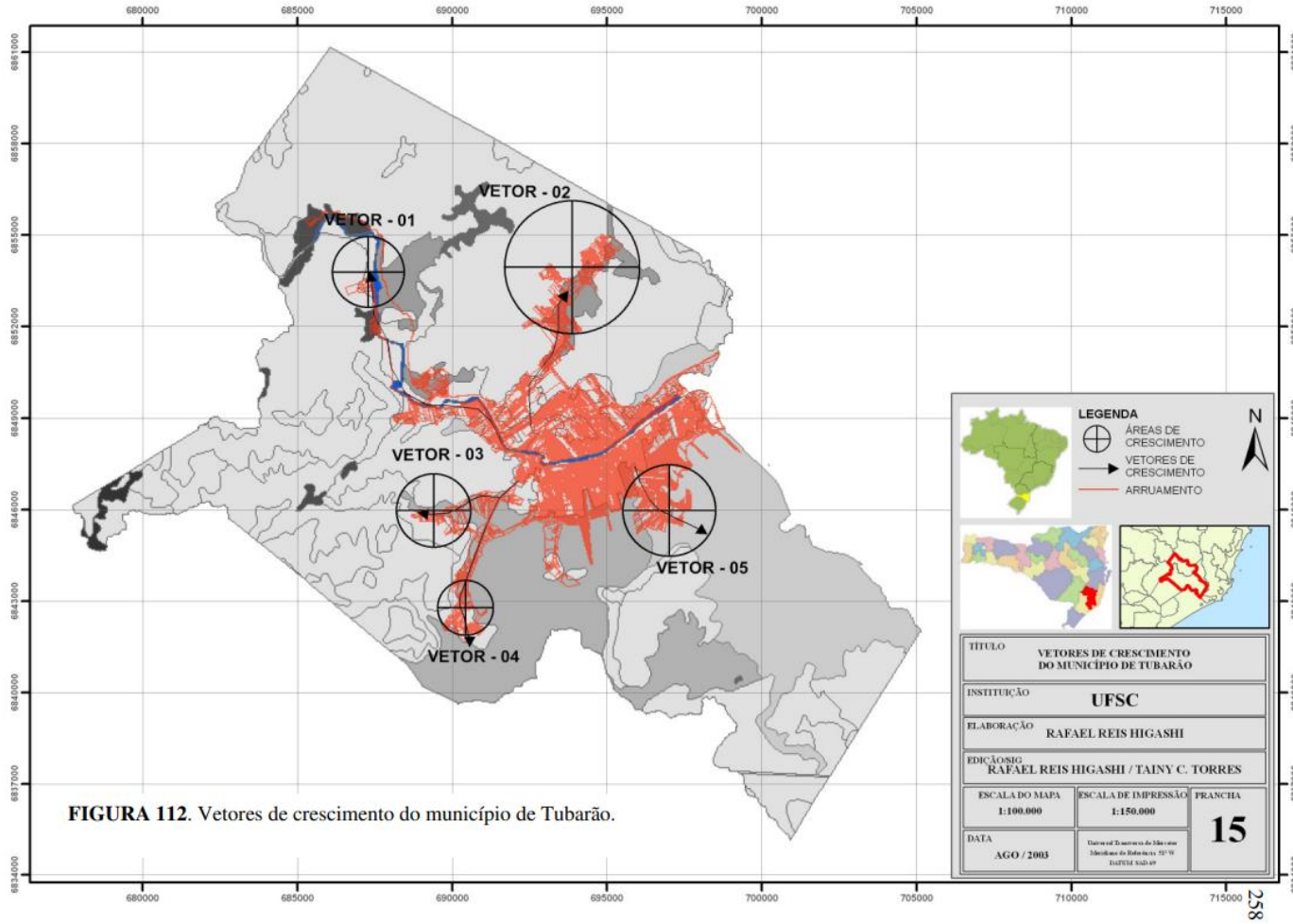


FIGURA 112. Vetores de crescimento do município de Tubarão.

Fonte: Higashi (2006).

4 METODOLOGIA

A presente seção tem como objetivo elucidar a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos. Será dividida em 2 frentes: a primeira trata-se da metodologia para a elaboração de carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa, onde será aplicada a metodologia proposta e descrita por Correia (2018) e a segunda diz respeito a análise da evolução temporal da mancha urbana para o município de Tubarão.

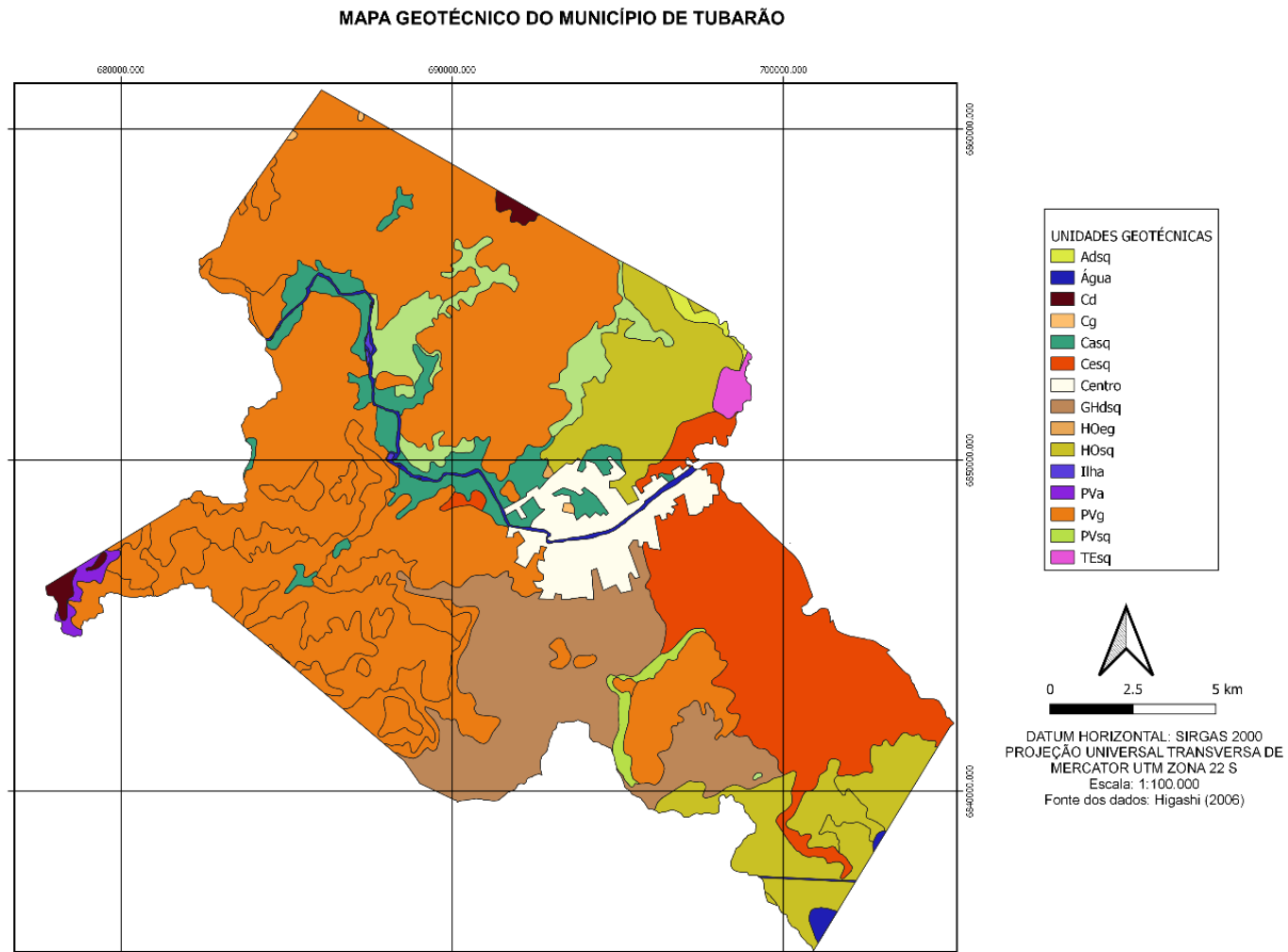
Ambas as frentes do presente trabalho envolvem ampla revisão bibliográfica de conceitos a serem utilizados na discussão deste trabalho e de características da área de estudo.

4.1 ESTUDO PRÉVIO

Essa etapa consiste no levantamento cartográfico base para o campo bem como de conceitos a serem utilizados na pesquisa. Com o auxílio do mapa geotécnico, realizou-se um estudo pré-campo onde, através da ferramenta *street view* do *Google Earth* procurou-se encostas com solo exposto que fossem possíveis de serem amostradas, nas respectivas unidades geotécnicas do mapa utilizado.

O mapa geotécnico utilizado (Figura 21), que também foi utilizado no Projeto do Ministério das Cidades, foi produzido com base nos *shapefiles* de Higashi (2006), sua metodologia é descrita detalhadamente em sua tese de doutorado e leva em consideração a metodologia proposta por Davison Dias (1995). A base geológica e pedológica utilizada pelo autor para a confecção do mapa geotécnico foi elaborada pelo Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro (1998) em escala 1:100.000. O sistema de referência geográfica utilizado foi o SIRGAS-2000 UTM 22S.

Figura 21: Unidades geotécnicas do município de Tubarão.



Fonte: Autora (2020).

4.2 ETAPA DE CAMPO

A saída de campo ocorreu no dia 25 de outubro de 2019, foram coletadas amostras conforme orientações da ABNT (1986) através da NBR 9604. Foram utilizados moldes metálicos biselados de seção quadrada, com 2 centímetros de altura e área de 93,32 cm² para serem utilizados no ensaio de cisalhamento direto. Durante a coleta houve o cuidado para não danificar a estrutura do solo (Figura 22).

Depois de encontrada as encostas com o solo exposto foi extraído 30 cm de camada superficial, visto que essa camada é mais afetada por intempéries. Posteriormente procedeu-se com a retirada e identificação das amostras que foram envolvidas em plástico filme para preservar as condições naturais de campo da amostra. Em cada unidade geotécnica buscou-se coletar 4 corpos de prova, um em caso de erro no ensaio e perda da amostra. Nem todos os pontos foi possível a coleta de 4 corpos de prova pela qualidade da estrutura de solo encontrada em algumas encostas. Em cada ponto de coleta de amostra indeformada, foram coletadas também amostras deformadas para a determinação do teor de umidade do solo. A amostra deformada de aproximadamente 1 kg de material foi depositada em sacos plásticos identificados.

Figura 22: Etapa de amostragem de corpo de prova indeformado.



Fonte: Autora (2020).

4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os corpos de prova destinados ao ensaio de cisalhamento direto foram armazenados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC. Já as amostras deformadas para determinação do teor de umidade foram armazenadas no LGA. A determinação do teor de umidade foi realizada no Laboratório de Sedimentologia conforme a ABNT (1984) através da NBR 6508.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos. Com o objetivo de simular a pior situação dentro do maciço os ensaios aconteceram em condições de solo inundado. O equipamento para execução do ensaio de cisalhamento direto possui um sistema de alavanca que permite transferir 5 vezes o peso aplicado para a amostra.

Em cada unidade geotécnica coletada foram realizados 3 estágios para calcular a envoltória de ruptura em cada unidade de análise, determinando ângulo de atrito e coesão. As amostras foram submetidas a tensões confinantes sendo que cada tensão necessitou de um determinado período de confinamento para a etapa de consolidação antes do cisalhamento da amostra (Tabela 3). Para evitar o surgimento de poropressões dentro do corpo de prova, o ensaio foi realizado com a velocidade de 0,307mm/min.

Tabela 3: Parâmetros utilizados na consolidação no ensaio.

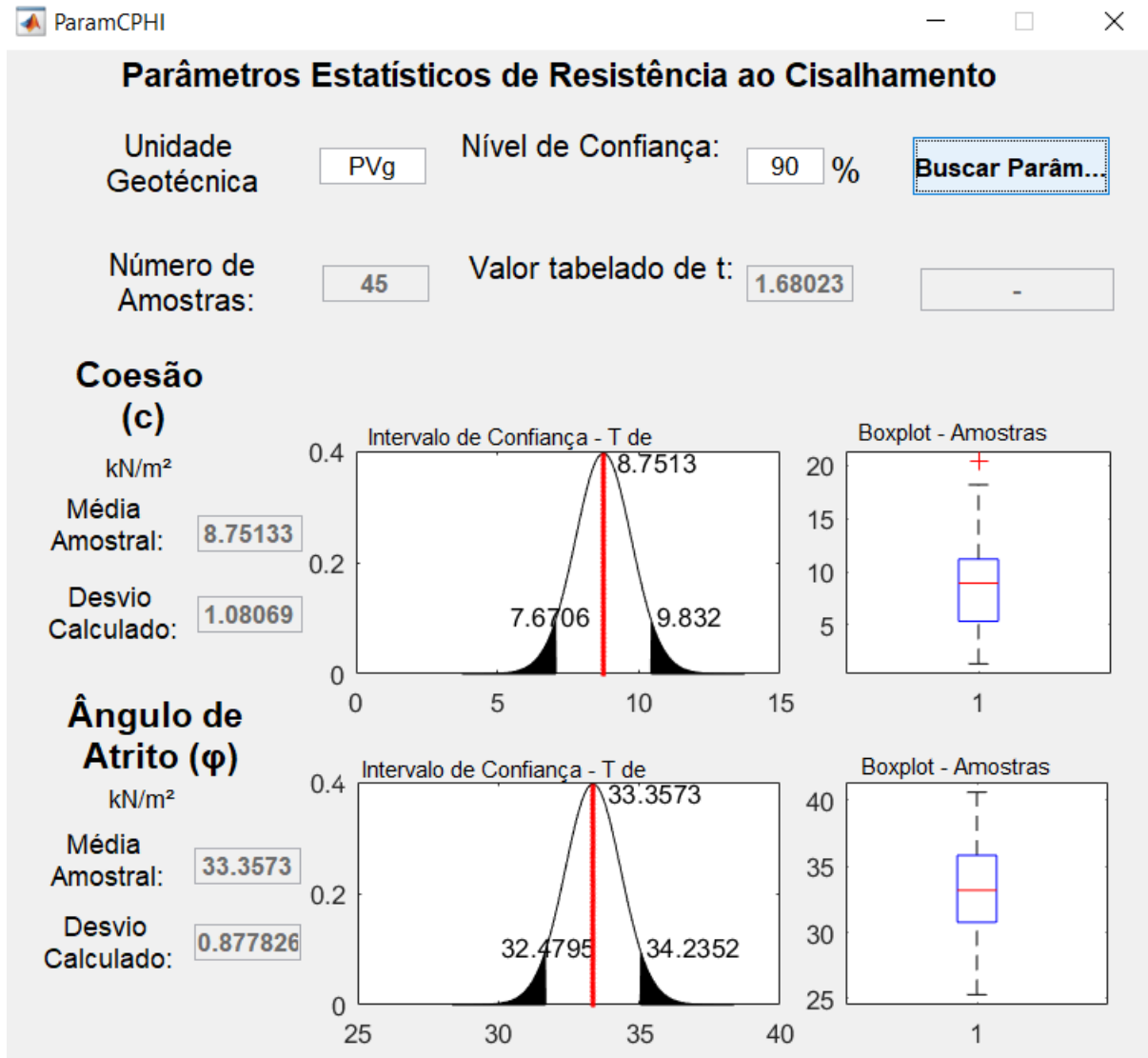
Estágio	Tensão Normal Aplicada (kPa)	Tempo mínimo de consolidação (horas)
1º	33	1
2º	78	3
3º	128	12

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Essa etapa de trabalho consistiu no uso do aplicativo criado pelo Projeto “Desenvolvimento de método de análise de riscos geotécnicos: Aplicação Brusque e Botuverá” contemplado no Edital PIBIC 2017/2018 e que foi executado pelo grupo de pesquisa do LGA. O aplicativo utiliza o *softwareMATLABTM* para calcular através de uma análise estatística com distribuições do tipo ‘t’ de *Student* e parâmetros como média e desvio padrão, os valores para coesão e ângulo de atrito interno para cada unidade geotécnica(Figura

23). Os níveis de confiança de 90%, 95% e 99% adotados na metodologia foram utilizados para determinar os valores máximos e mínimos de c e ϕ (CORREIA, 2018).

Figura 23: Interface do aplicativo desenvolvido.



Fonte: Autora (2020).

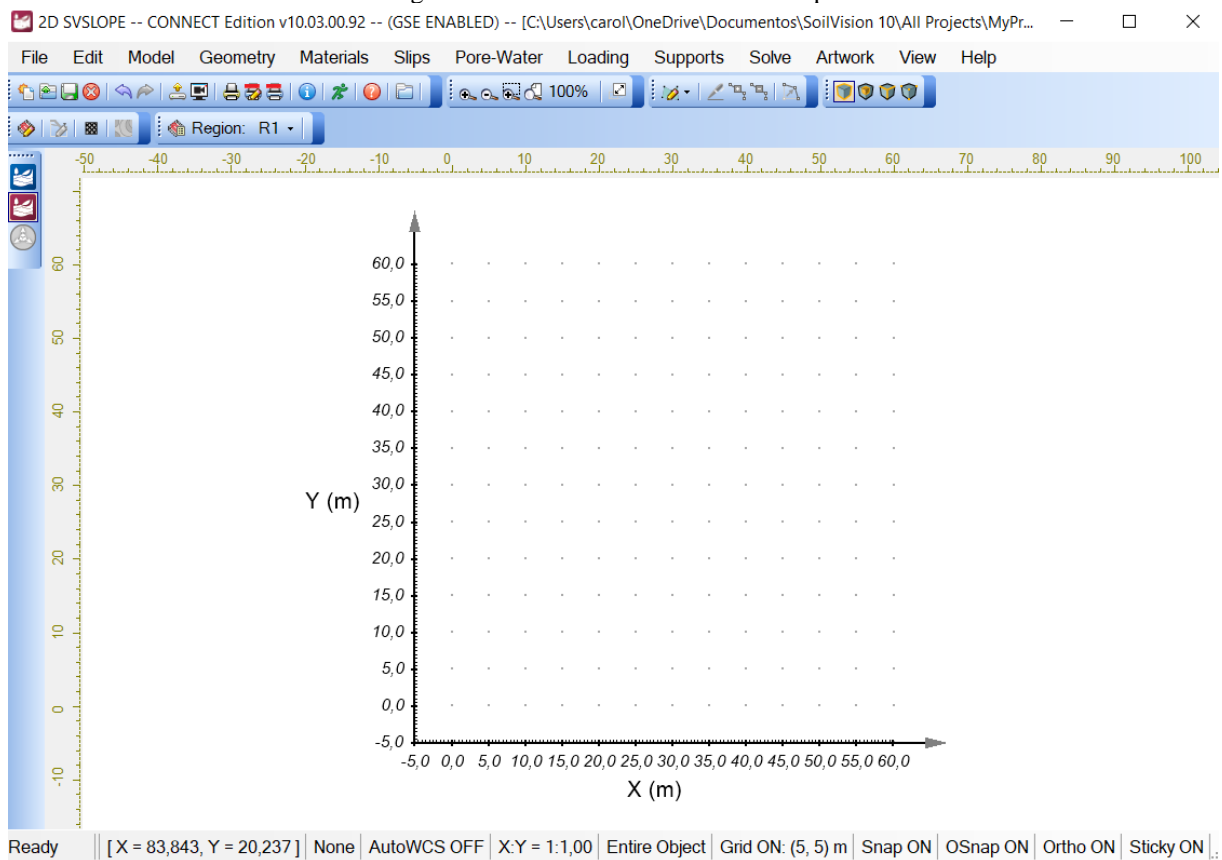
4.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

As análises de estabilidade também seguiu a metodologia descrita por Correia (2018) que consiste em criar modelos de taludes com inclinações de 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°. Depois procedeu-se com a inserção dos valores de ângulo de atrito e coesão, com níveis de confiança de 90%, 95%, 99%, juntamente com os valores de peso específico solo de cada

unidade geotécnica. O método de Bishop foi utilizado na análise de estabilidade. O *software* escolhido foi o *SVSlope* desenvolvido pela *SoilVision* (Figura 24).

Foram utilizados os FS obtidos em cada uma das inclinações dos modelos, correlacionando o FS com a inclinação para cada unidade geotécnica e cada nível de confiança. Foram determinadas funções que representem essas correlações. Com as funções definidas, foi calculada as inclinações limites, para os fatores de segurança estabelecidos pela ABNT (2009) através da NBR 11682 (CORREIA, 2018).

Figura 24: Interface do Software Sv Slope



Fonte: Autora (2020).

4.6 CLASSIFICAÇÃO DOS MAPAS

As áreas de susceptibilidade foram geradas a partir dos dados obtidos através das declividades limites, do Modelo Digital de Terreno (MDT) do ano de 2010 disponível para *download* no site da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social de Santa Catarina SDS-SC e do mapa geotécnico.

Para classificar as áreas de susceptibilidade, o MDT do município foi recortado de acordo com as unidades geotécnicas presentes, gerando a declividade das áreas. As declividades foram classificadas no intervalo de FS de 1,5 a 1,15. Encostas com FS maior que 1,5 foram classificadas como áreas de baixa susceptibilidade, sendo representadas no mapa pela cor verde; encostas com FS menores que 1,15 foram classificadas como áreas de alta susceptibilidade, sendo representadas no mapa pela cor vermelha; encostas com FS entre 1,5 e 1,15 foram classificadas como áreas de média susceptibilidade, sendo representadas no mapa pela cor amarela. As unidades sem a presença de encostas e regiões sem a presença de perfil de solo foram representadas na cor cinza nos mapas. Por fim, foram elaboradas três cartas de susceptibilidade a movimentos de massa para o município de Tubarão com níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

4.7 ANÁLISE TEMPORAL DA EVOLUÇÃO DA MANCHA URBANA

A mancha urbana pode ser definida como a área relativa à ocupação de vazios internos e expansão radial para novas unidades de solo. A tendência no comportamento de crescimento dos municípios é realizada por estudos temporais de diferentes épocas do crescimento urbano, no qual, Higashi (2006) denomina em sua tese como análise temporal da evolução da mancha urbana.

O crescimento da mancha urbana é definido com base na comparação entre polígonos de manchas urbanas em diferentes épocas. Conforme Higashi (2006) é necessário a elaboração de no mínimo 3 manchas urbanas em diferentes épocas, para a sua interpretação final através dos vetores de crescimento urbano. Imagens de satélite e fotos aéreas podem ajudar na definição do polígono da mancha.

A análise temporal da mancha urbana para o município de Tubarão foi realizada com base nas seguintes manchas:

- a) 1ª mancha (formato matricial): criada por Higashi (2006) a partir do mapa de ruas e bairros da cidade (2002) e foto aérea do Programa de recuperação ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), escala de 1:40.000.
- b) 2ª mancha (2011): *Google Earth Pro*.
- c) 3ª mancha (2019): *Google Earth Pro*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos durante o decorrer deste trabalho. Incluindo resultados de ensaios geotécnicos realizados nos pontos estudados, os parâmetros obtidos através da análise estatística dos dados encontrados na literatura e as cartas de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa.

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos índices físicos encontrados nos pontos da área de estudos. Sendo eles: peso específico natural (γ_{nat}), peso específico aparente seco (γ_d) e teor de umidade natural (w).

Tabela 4: Índices físicos dos pontos estudados.

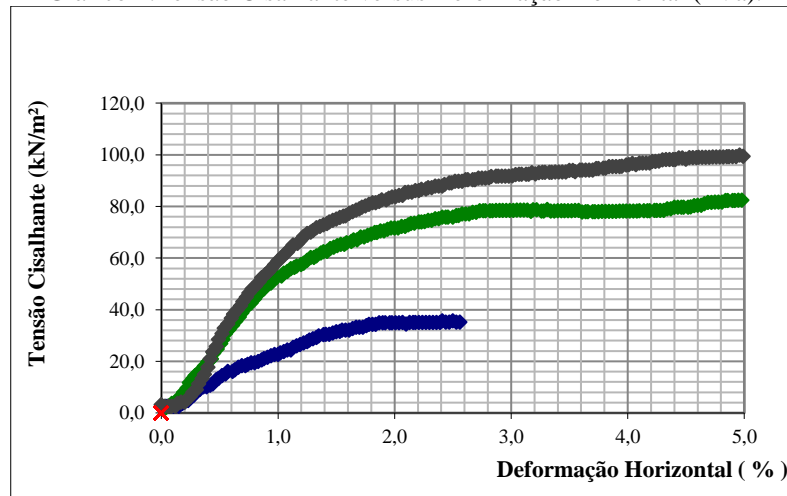
Unidade			W	γ_{nat}	γ_d
Geotécnica	UTM-L	UTM-S	(%)	(kN/m³)	(kN/m³)
PVa	689929.43	6845596.75	25,52	20,14	16,04
PVg	678870.06	6846453.77	17,41	15,42	13,13
Cd	685195.17	6859774.69	30,47	19,32	14,81
Cg	678263.68	6845479.89	10,56	15,00	13,57

Fonte: Autora (2020).

5.2 CISALHAMENTO DIRETO

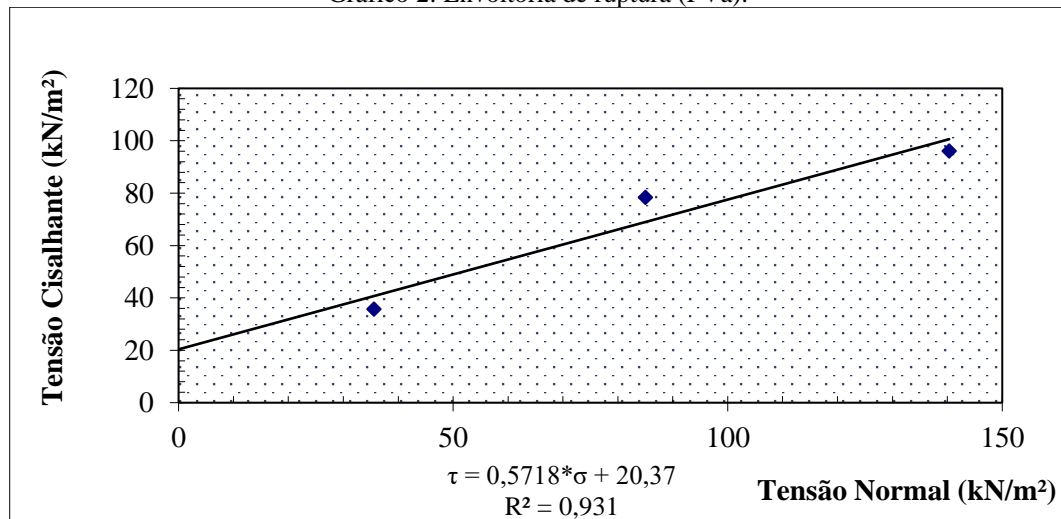
A partir do ensaio de cisalhamento direto em 11 corpos de prova, determinaram-se os parâmetros de resistência para os solos amostrados. A seguir são expressos os gráficos de tensão cisalhante *versus* deformação e o gráfico da envoltória de ruptura para cada um dos pontos de coleta.

Gráfico 1: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (PVa).



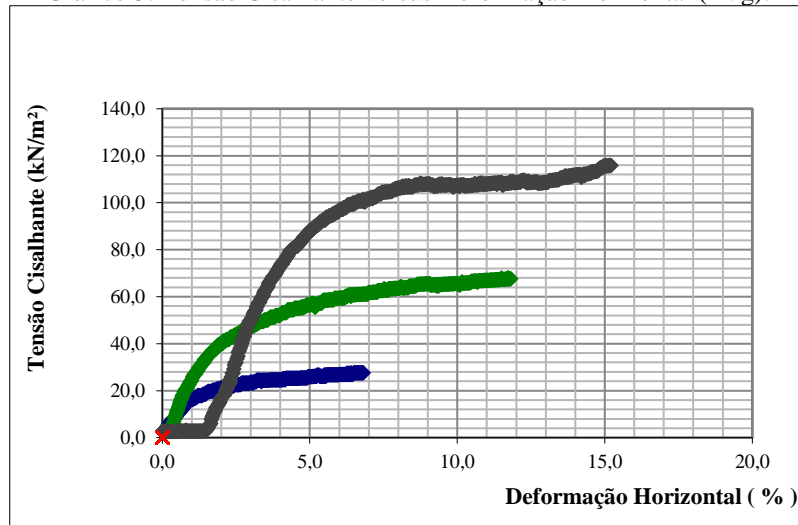
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 2: Envoltória de ruptura (PVa).



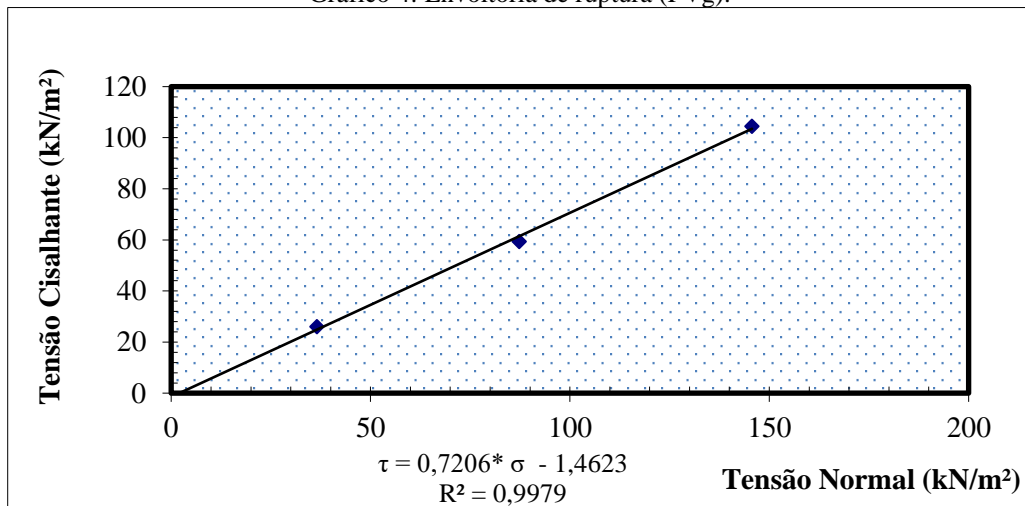
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 3: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (PVg).



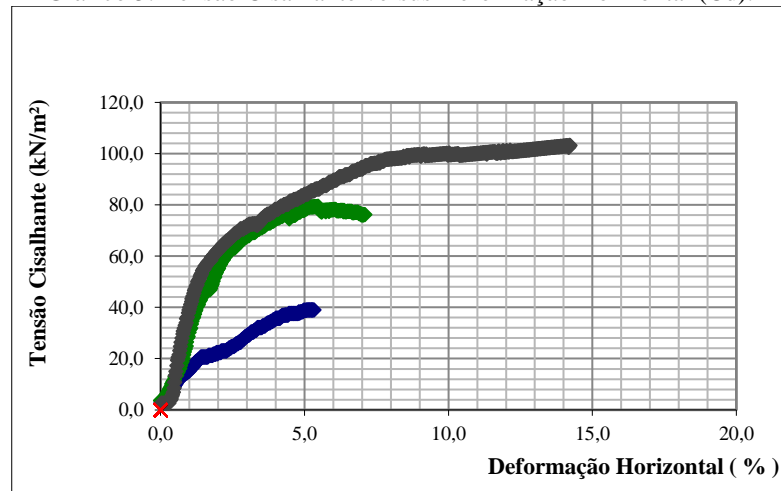
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 4: Envoltória de ruptura (PVg).



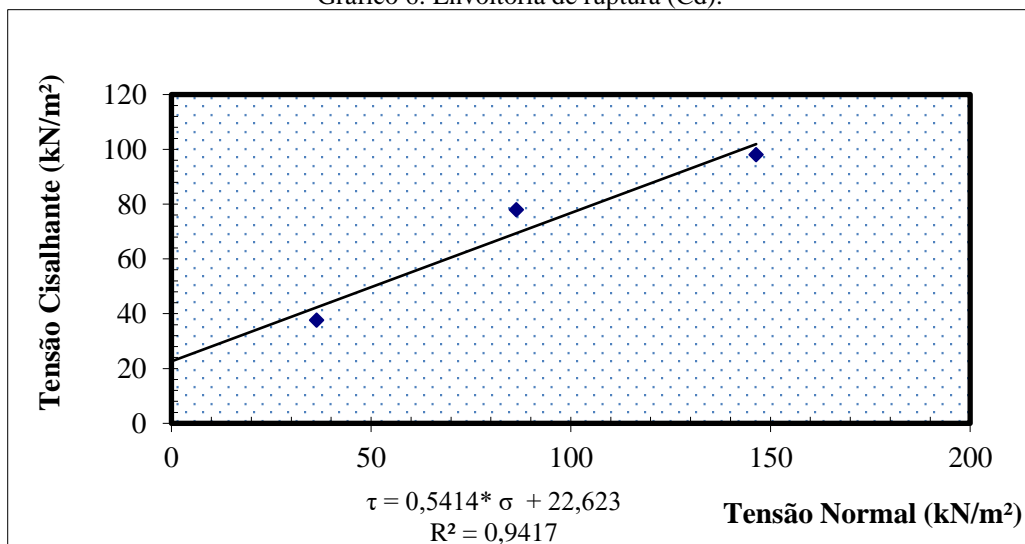
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 5: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (Cd).



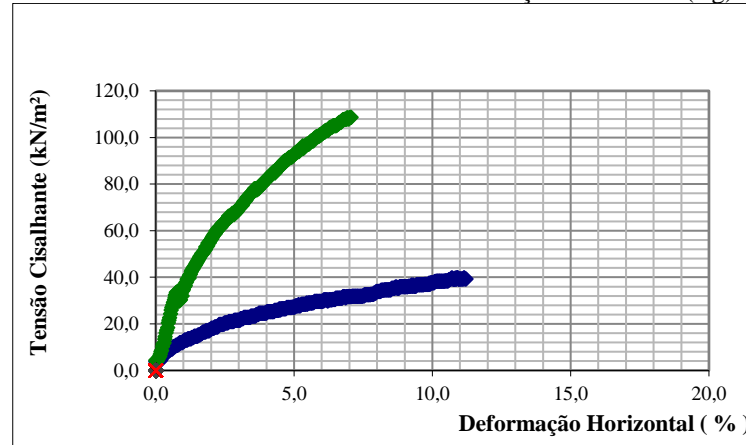
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 6: Envoltória de ruptura (Cd).



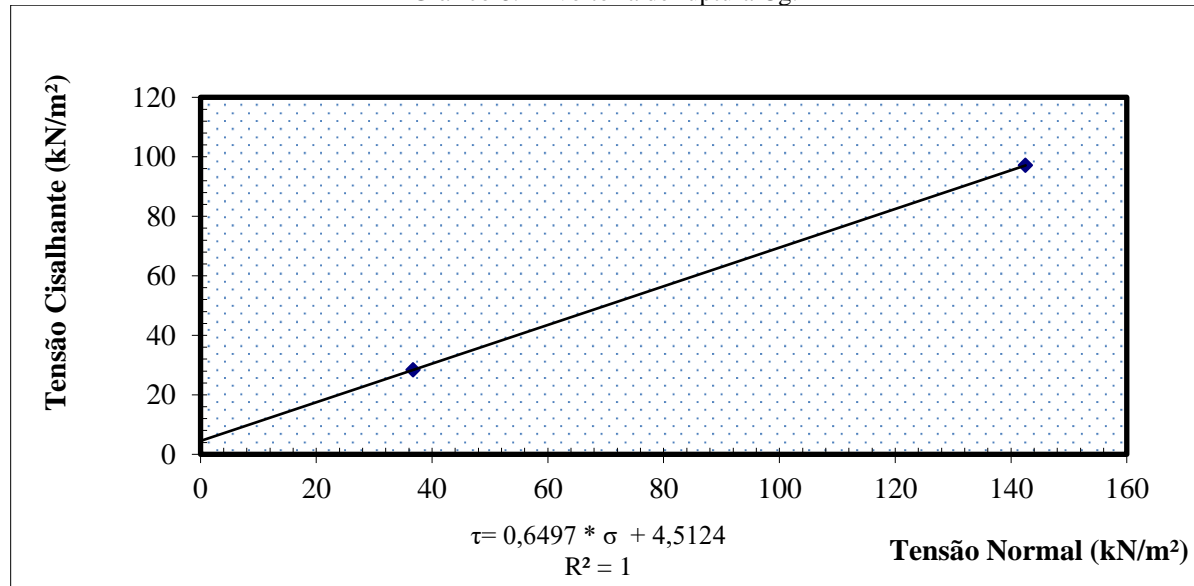
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 7: Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal (Cg).



Fonte: Autora (2020).

Gráfico 8: Envoltória de ruptura Cg.



Fonte: Autora (2020).

Analisando-se os resultados obtidos, observa-se que os maiores valores de ângulo de atrito interno podem ser observados nos pontos equivalentes as unidades geotécnicas PVg e Cg. Por outro lado, os maiores valores de coesão podem ser visualizados nos pontos correspondes as unidades geotécnicas PVa e Cd. A Tabela 5 apresenta os resultados dos parâmetros coesão e ângulo de atrito obtido através do ensaio de cisalhamento direto para os solos amostrados.

Tabela 5: Parâmetros de resistência dos solos amostrados.

Ponto	c (kN/m ²)	φ (°)
PVa	20,40	29,80
PVg	0,00	35,80
Cd	22,60	28,40
Cg	4,50	33,00

Autora (2020).

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Neste item estão apresentados os dados de coesão e ângulo de atrito obtido através das análises estatísticas realizadas no aplicativo de consulta e balizamento de parâmetros. Os dados apresentados a seguir são a coesão e ângulo de atrito médio e o desvio padrão para cada unidade geotécnica a níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

Na unidade geotécnica HOeg não foi possível coletar amostras pela ausência de encostas com solo exposto, o que revela alguns dos problemas da metodologia proposta por Davison Dias, já que a escala da unidade na área era muito pequena. Buscou-se na literatura análises para essa unidade no estado de Santa Catarina, não obtendo-se sucesso, logo não foi possível analisar estatisticamente a unidade devido à ausência de resultados e a falta de representatividade em área da mesma.

Tabela 6: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica PVg.

	PVg (45 amostras)						
	Média	Desvio Padrão			Coeficiente de variação (%)		
		90%	95%	99%	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	8,75	1,08	1,29	1,73	12,34	14,74	19,77
Ângulo de atrito (°)	33,35	0,87	1,05	1,40	2,60	3,14	4,19

Fonte: Autora (2020).

Tabela 7: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica PVa

	PVa (6 amostras)						
	Média	Desvio Padrão			Coeficiente de variação		
		90%	95%	99%	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	12,48	3,64	4,64	5,63	29,16	37,17	45,11
Ângulo de atrito (°)	24,93	4,09	5,22	5,99	16,40	20,93	24,02

Fonte: Autora (2020).

Tabela 8: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica Cg

Cg (22 amostras)							
	Média	Desvio Padrão			Coeficiente de variação (%)		
		90%	95%	99%	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	6,17	1,17	1,42	1,93	18,96	23,01	31,28
Ângulo de atrito (°)	32,40	1,45	1,75	2,38	4,47	5,40	7,34

Fonte: Autora (2020).

Tabela 9: Média, desvio padrão e coeficiente de variação da unidade geotécnica Cd.

Cd (5 amostras)							
	Média	Desvio Padrão			Coeficiente de variação (%)		
		90%	95%	99%	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	10,06	0,76	0,99	1,65	7,55	9,84	16,40
Ângulo de atrito (°)	28,34	0,51	0,66	1,10	1,79	2,32	3,88

Fonte: Autora (2020).

Analisando-se os desvios padrões calculados observa-se que as unidades geotécnicas Cd e PVg são as que apresentam os menores desvios em relação à média, fato este, corroborado pelo coeficiente de variação, que é uma medida que auxilia na análise de dados, uma vez que coeficientes de variação menores que 25% revelam dados homogêneos. Por outro lado, as unidades geotécnicas PVa e Cg apresentaram valores de desvio padrão mais altos, onde o coeficiente de variação da coesão para a unidade Cg apresenta uma confiança de 99% revela uma possível variação nos dados, assim como para unidade PVa, nos três intervalos de confiança. Essa heterogeneidade entre os parâmetros é explicada pela variedade das localidades utilizadas no banco de dados.

Em geral, observa-se que a utilização de nível de confiança (90%, 95% e 99%) para a obtenção dos parâmetros de resistência é eficaz na avaliação dos resultados. A condicionante geológica pode explicar variações na uniformidade dos dados da unidade Cg, uma vez que os diferentes tipos de granito apresentam mudanças em termos de mineralogia e textura.

5.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Através dos parâmetros de resistência obtidos estatisticamente e do peso específico natural das amostras (Tabela 10), realizou-se a estabilidade de taludes com o objetivo de se obter as declividades limites para os níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

Tabela 10: Peso específico natural para cada amostra.

Unidade Geotécnica	Peso específico natural (kN/m³)
PV _g	15,42
PV _a	20,14
C _g	15,00
C _d	19,32

Fonte: Autora (2020).

Com o objetivo de que as análises estejam em favor da segurança, simulando piores condições prováveis, utilizou-se os valores de coesão e ângulo de atrito dos limites inferiores da curva de distribuição t de Student para cada um dos níveis de confiança das unidades geotécnicas. As Tabelas 11 a 14 expressam esses valores.

Tabela 11: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica PV_g.

	PV_g		
	Nível de confiança		
	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	7,67	7,45	7,01
Ângulo de atrito (°)	32,47	32,30	31,95

Fonte: Autora (2020).

Tabela 12: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica PV_a.

	PV_a		
	Nível de confiança		
	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	8,83	7,83	5,19
Ângulo de atrito (°)	20,84	19,71	16,74

Fonte: Autora (2020).

Tabela 13: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica C_g.

	C_g		
	Nível de confiança		
	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	4,99	4,75	4,23
Ângulo de atrito (°)	30,95	30,65	30,02

Fonte: Autora (2020).

Tabela 14: Valores obtidos estatisticamente da c e ϕ para unidade geotécnica Cd.

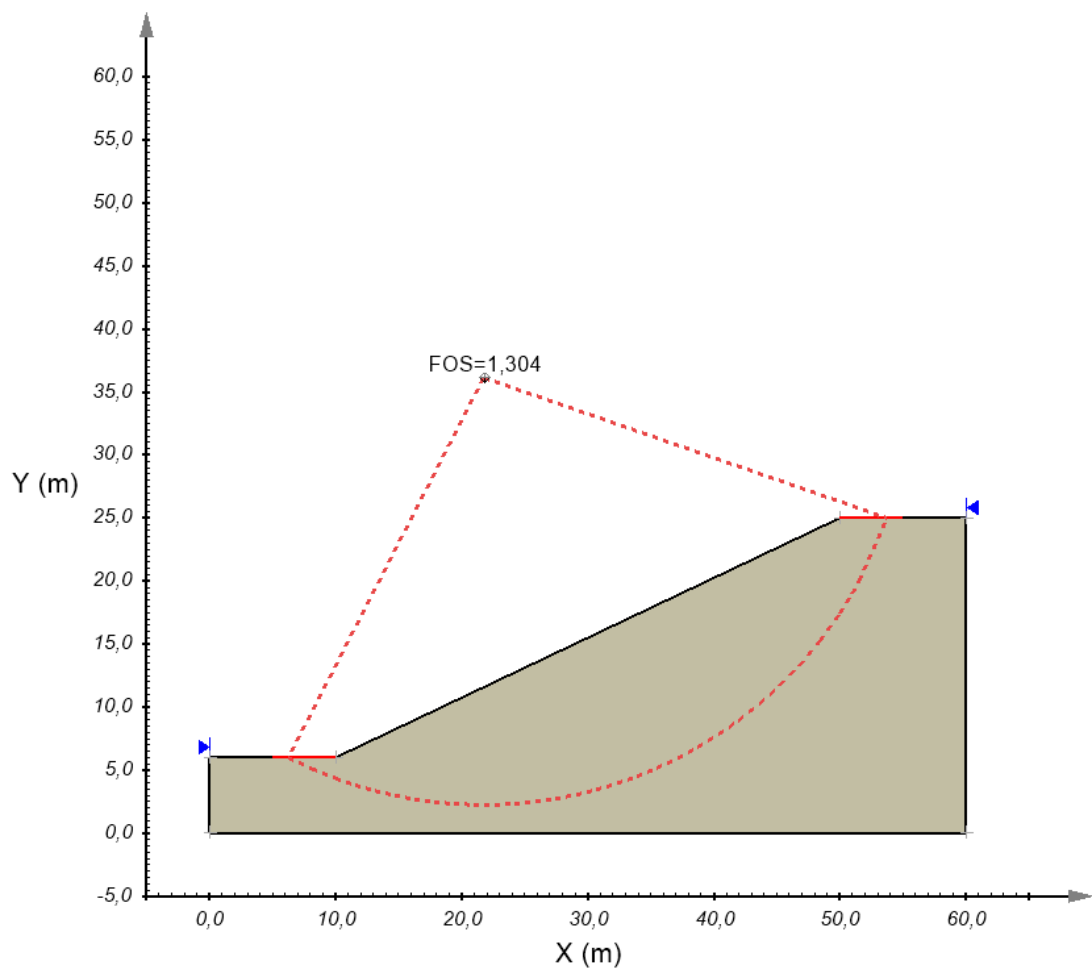
Cd			
	Nível de confiança		
	90%	95%	99%
Coesão (kN/m ²)	9,29	9,06	8,40
Ângulo de atrito (°)	27,82	27,67	27,23

Fonte: Autora (2020).

5.4.1 Determinação das declividades limite

Foram executadas um total de 84 análises de estabilidade de taludes, para todos os níveis de confiança e declividades (Figura 25). Com os valores dos fatores de segurança obtidos, a etapa posterior concentrou-se na correlação entre os FS e as declividades.

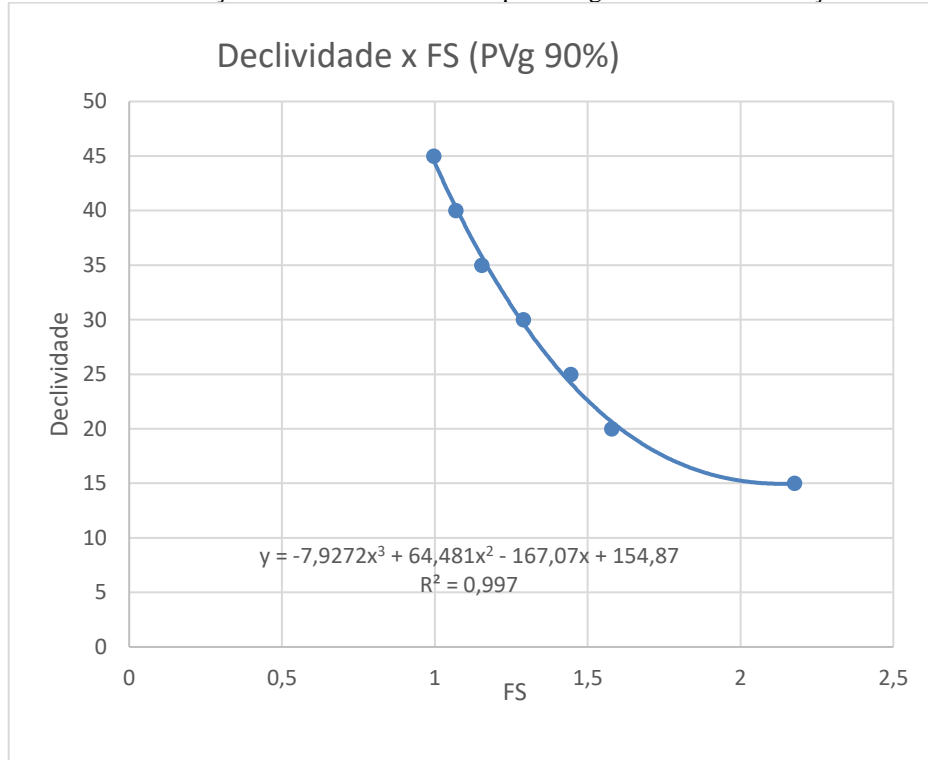
Figura 25: Modelo com inclinação de 25° utilizado para obtenção do FS.



Fonte: Autora (2020).

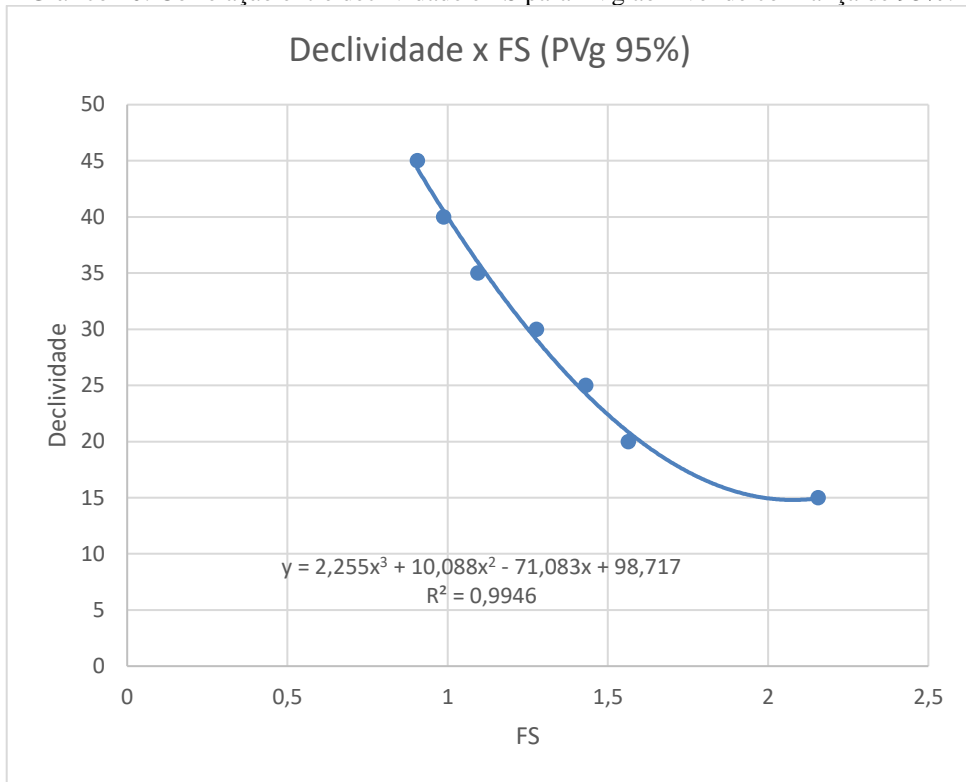
Os gráficos a seguir mostram os resultados das correlações e as equações para cada uma das unidades geotécnicas, a níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

Gráfico 9: Correlação entre declividade e FS para PVg ao nível de confiança de 90%.



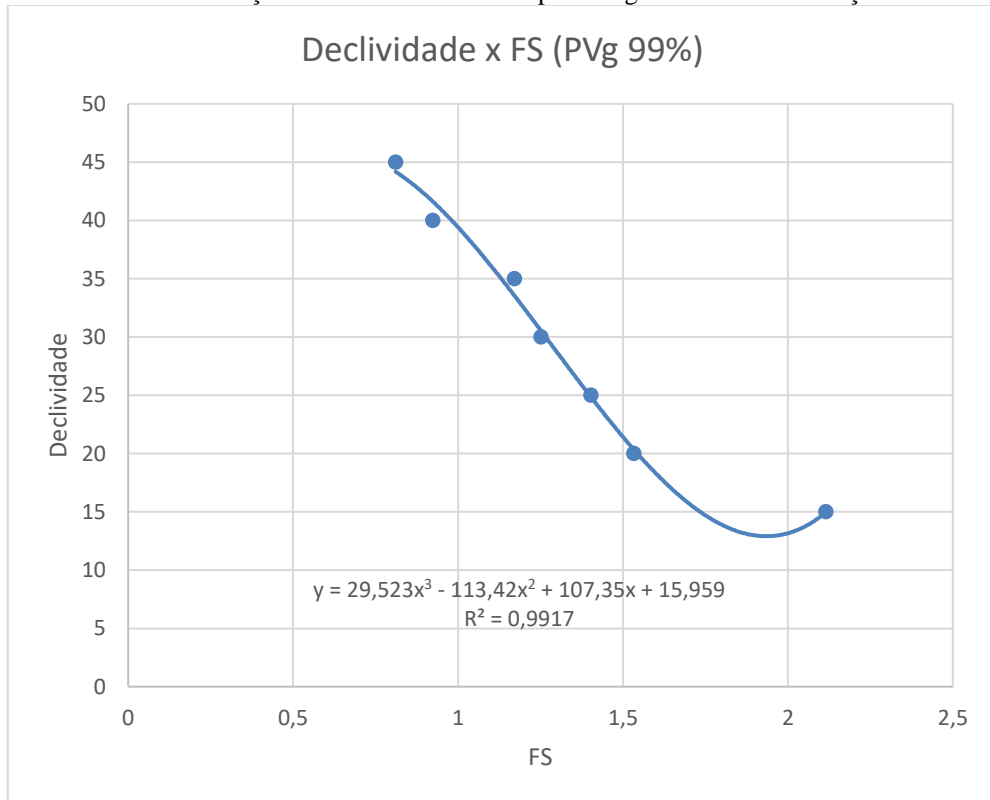
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 10: Correlação entre declividade e FS para PVg ao nível de confiança de 95%.



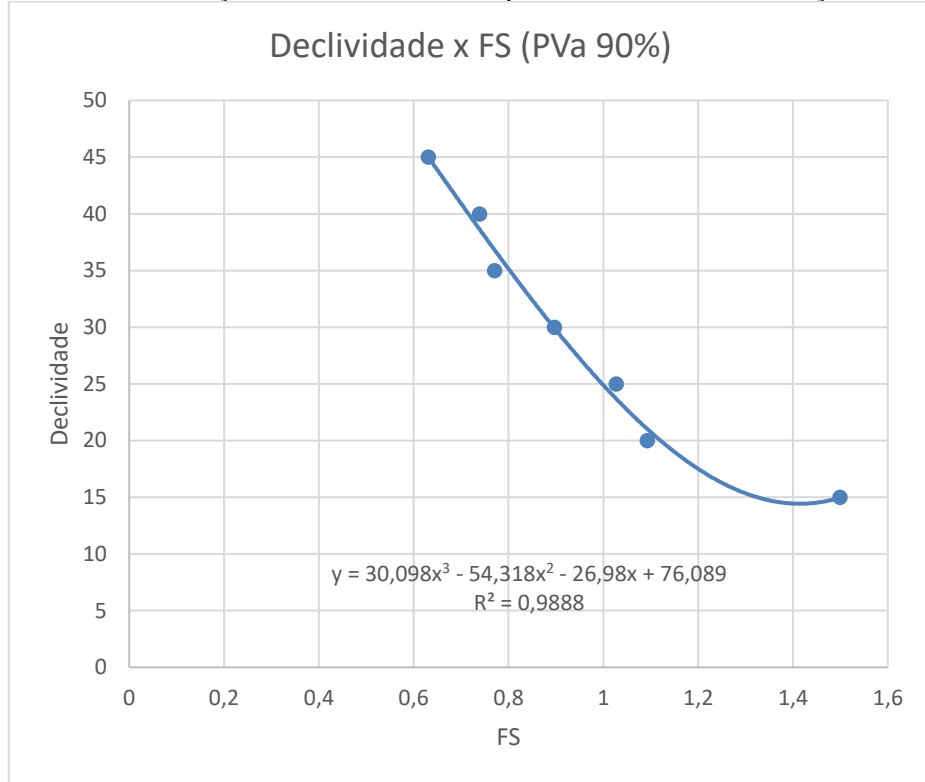
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 11: Correlação entre declividade e FS para PVg ao nível de confiança de 99%.



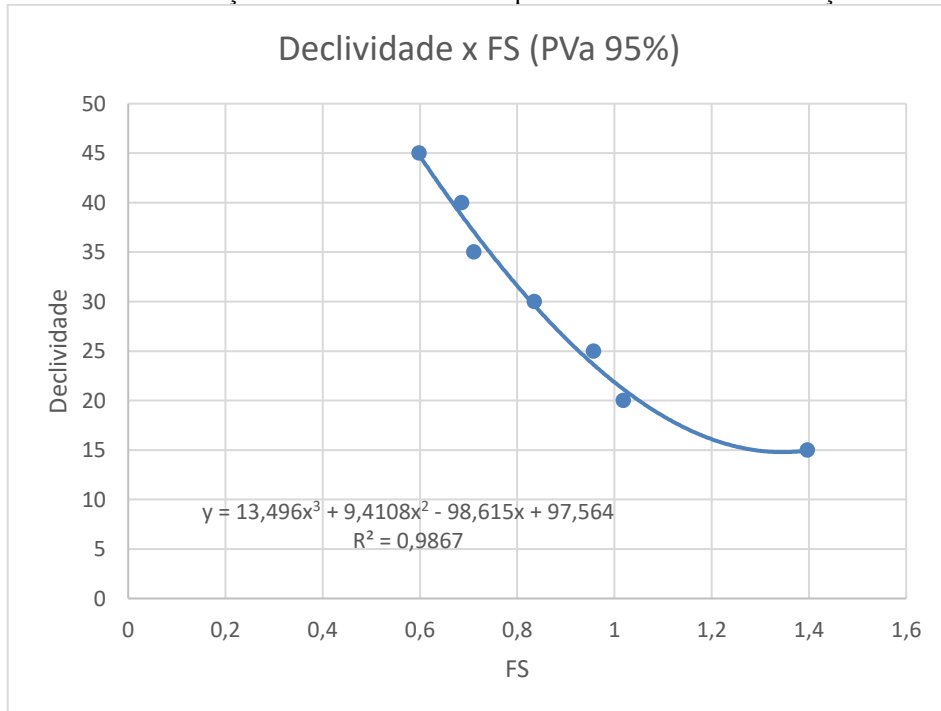
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 12: Correlação entre declividade e FS para PVa ao nível de confiança de 90%.



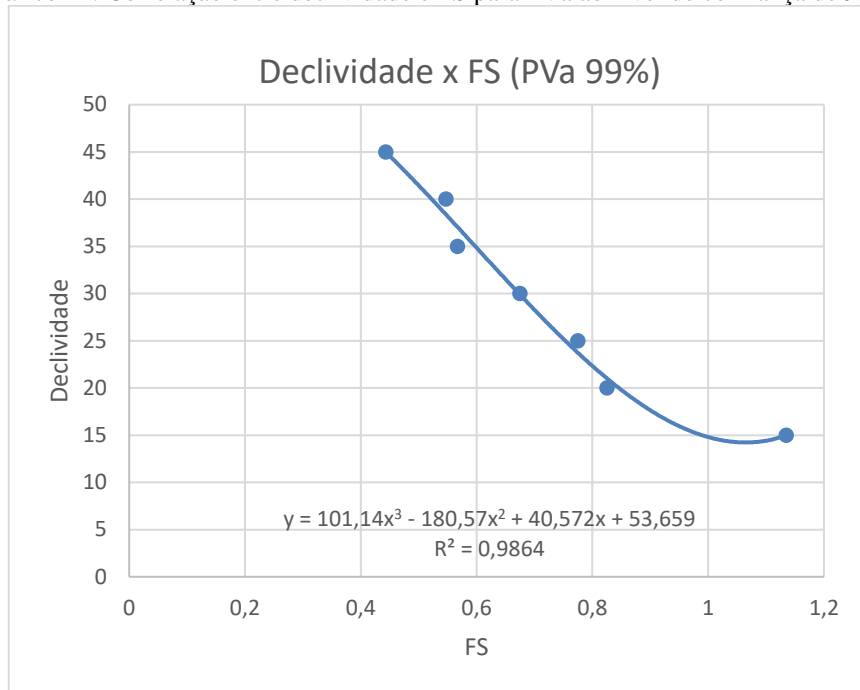
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 13: Correlação entre declividade e FS para PVa ao nível de confiança de 95%.



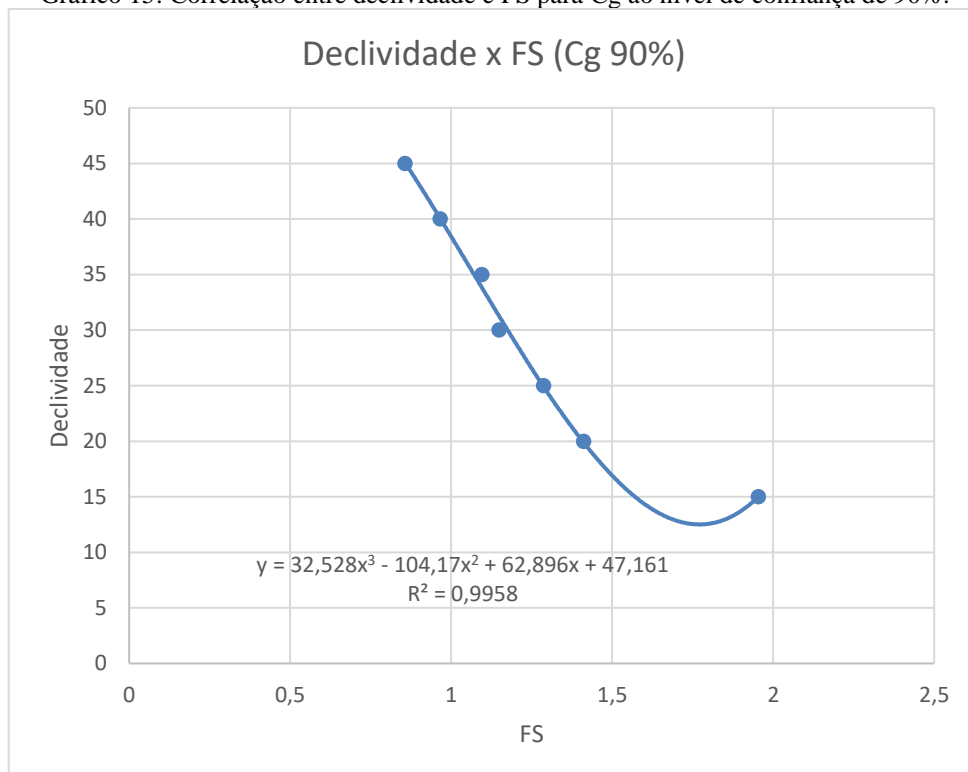
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 14: Correlação entre declividade e FS para PVa ao nível de confiança de 99%.



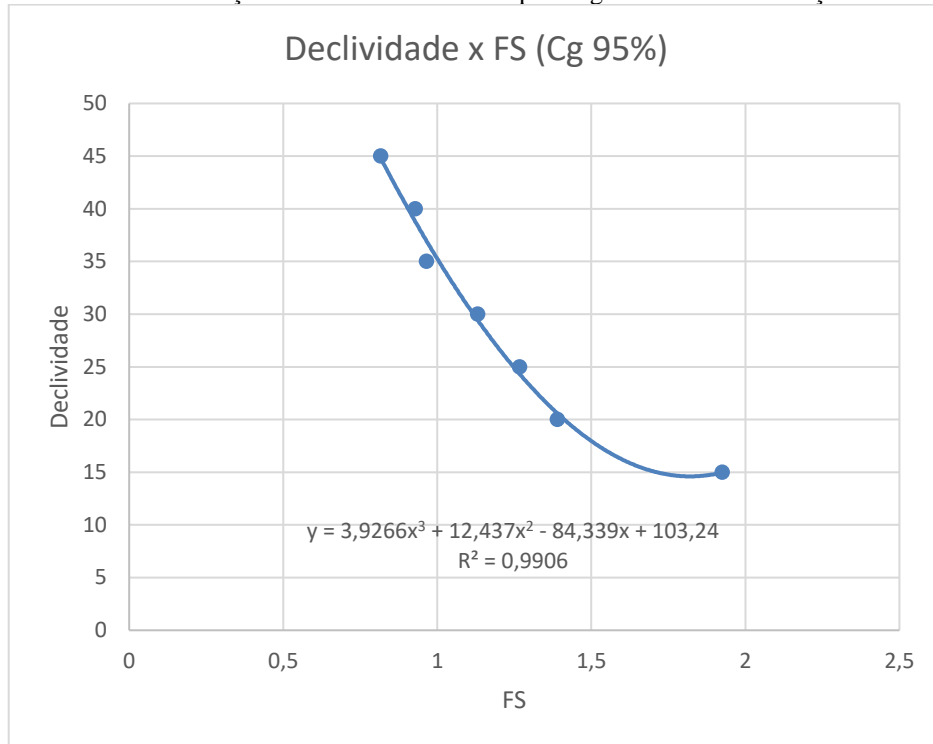
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 15: Correlação entre declividade e FS para Cg ao nível de confiança de 90%.



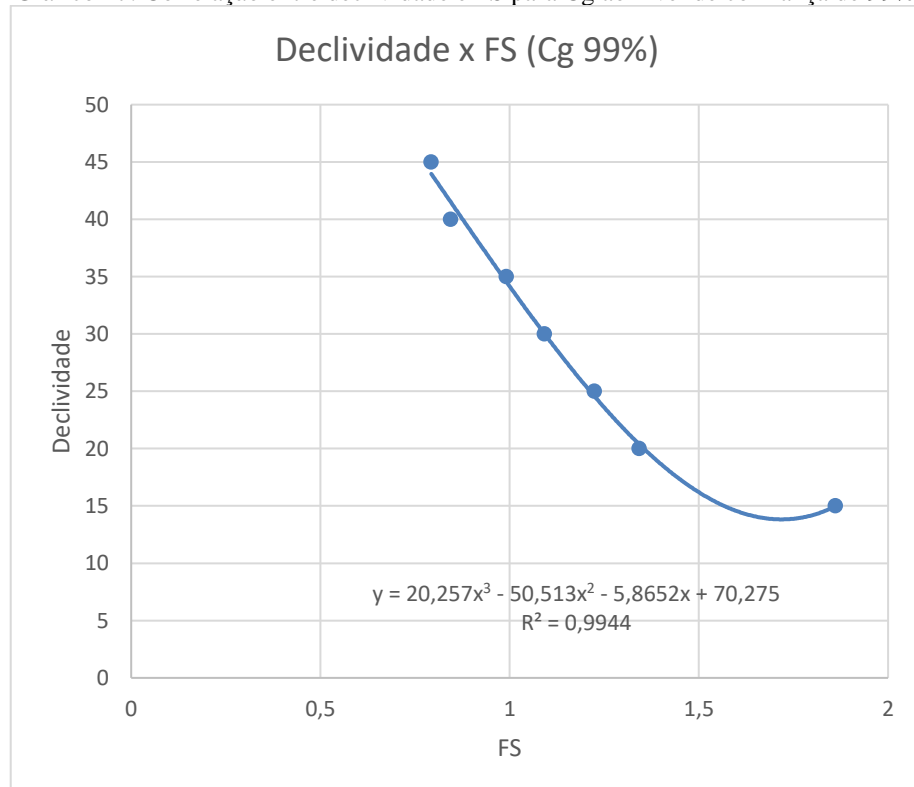
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 16: Correlação entre declividade e FS para Cg ao nível de confiança de 95%.



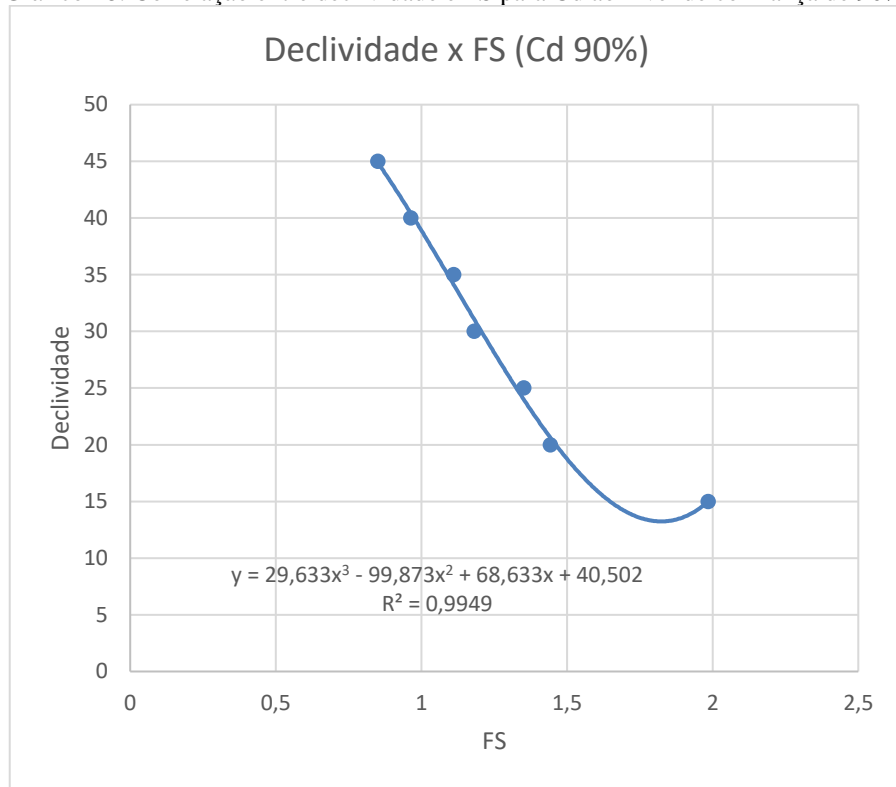
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 17: Correlação entre declividade e FS para Cg ao nível de confiança de 99%.



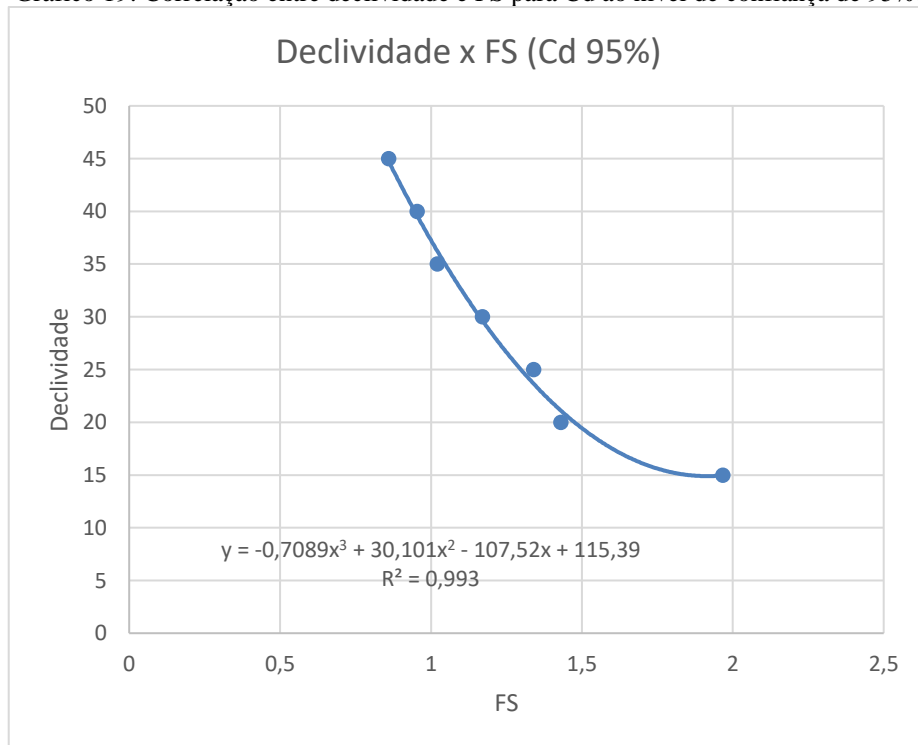
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 18: Correlação entre declividade e FS para Cd ao nível de confiança de 90%.



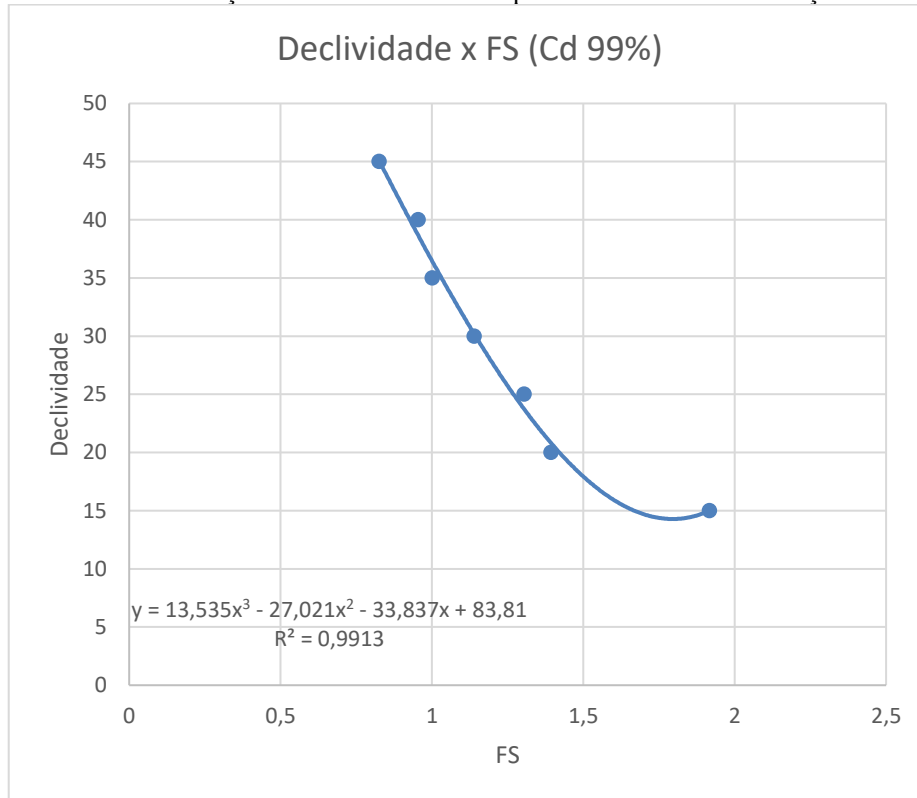
Fonte: Autora (2020).

Gráfico 19: Correlação entre declividade e FS para Cd ao nível de confiança de 95%.



Fonte: Autora (2020).

Gráfico 20: Correlação entre declividade e FS para Cd ao nível de confiança de 99%.



Fonte: Autora (2020).

Os resultados encontrados para as declividades limites satisfazem o modelo, visto o valor do R^2 . A partir das equações obtidas pelas correlações, determinou-se os valores de declividade limites para cada unidade geotécnica ao nível de confiança 90%, 95% e 99% e FS de 1,5 e 1,15 (Tabela 15).

Tabela 15: Declividades limites para cada unidade geotécnica em seu respectivo nível de confiança.

Unidade	Nível de Confiança					
	(90%)		95%		99%	
Geotécnica	FS 1,15	FS 1,5	FS 1,15	FS 1,5	FS 1,15	FS 1,5
PVg	35,95	22,59	33,74	22,40	33,31	21,42
PVa	19,00	14,98	17,12	14,36	15,33	14,33
Cg	31,19	16,90	28,66	16,86	27,53	16,19
Cd	32,41	18,74	30,47	18,44	29,74	17,96

Fonte: Autora (2020).

Conforme apontado por Torres Filho (2015), os métodos determinísticos de análise de estabilidade de taludes, embora amplamente empregados trazem fatores que influenciam

diretamente na qualidade dos resultados no qual vale ressaltar a variabilidade natural nos parâmetros, que são fixados nos cálculos. Em detrimento dessas restrições, a análise probabilística que tem como característica a utilização de um método determinístico para o seu desenvolvimento, onde o fator de segurança pode ser avaliado através de uma distribuição de probabilidade, possibilitando a obtenção de um fator de segurança médio e valores associados aos seus riscos.

Quando se considera o desvio padrão das variáveis pela aplicação de um método probabilístico, obtém-se uma grande quantidade de valores de fator de segurança, com a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade da encosta associados ao fator de segurança adotado. Sendo assim, existe uma maior precisão dos riscos associados à utilização de determinado fator de segurança no projeto. (SILVA, 2006).

5.4.2 Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa

Os mapas apresentados nas Figuras 26, 27 e 28 apresentam o resultado das classificações das declividades limites encontrados para cada unidade geotécnica nos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

A Tabela 16 apresenta a porcentagem das áreas estudadas que são classificadas como baixa, média e alta susceptibilidade para cada nível de confiança.

Tabela 16: Porcentagem da área estudada para cada classe de susceptibilidade por nível de confiança.

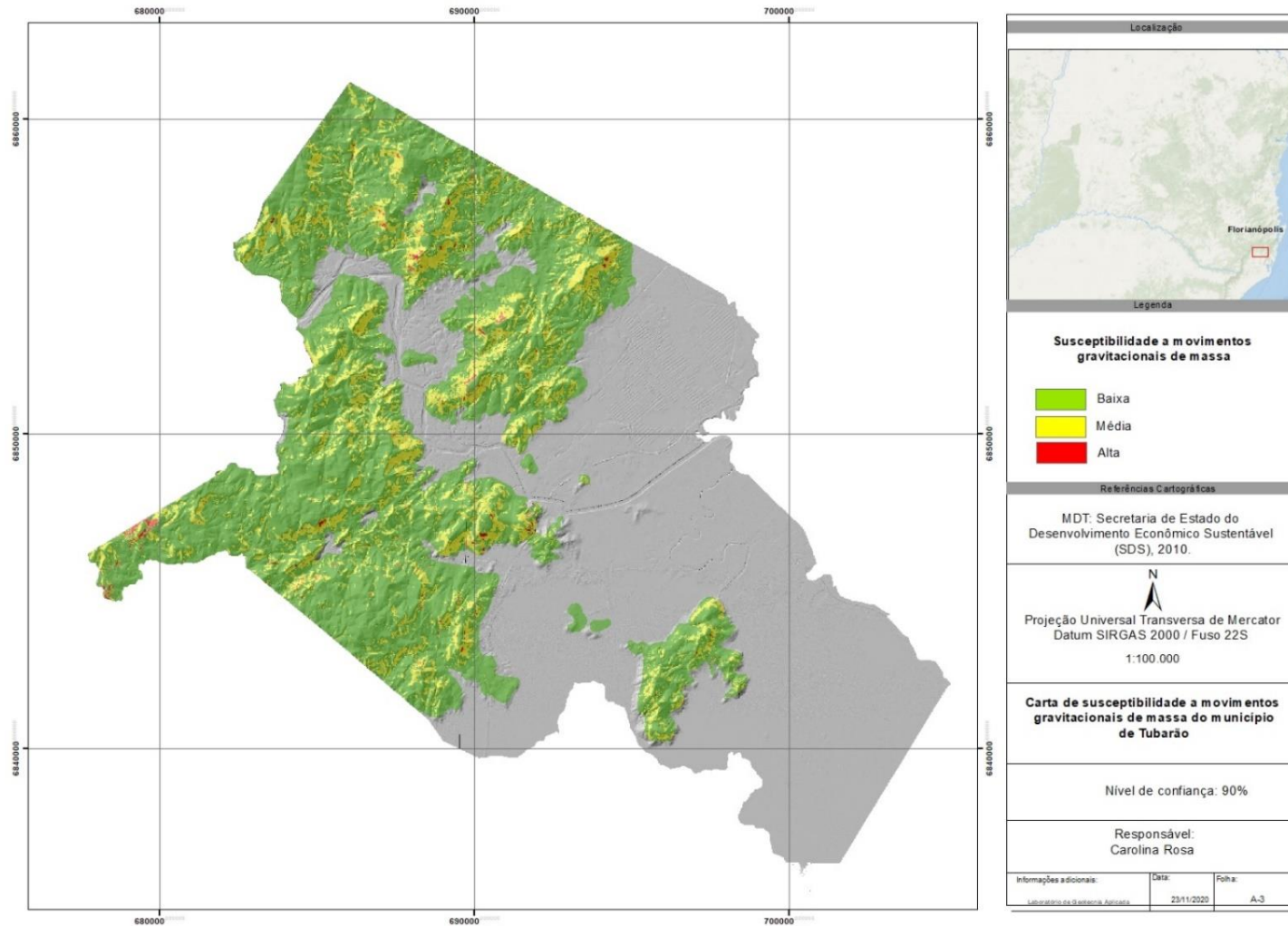
Nível de confiança	Baixa	Média	Alta
90%	77,72%	21,51%	0,77%
95%	76,96%	21,59%	1,45%
99%	72,90%	25,27%	1,83%

Fonte: Autora (2020).

Conforme o nível de confiança aumenta é possível observar uma migração de áreas de baixa susceptibilidade para áreas de média e alta susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa.

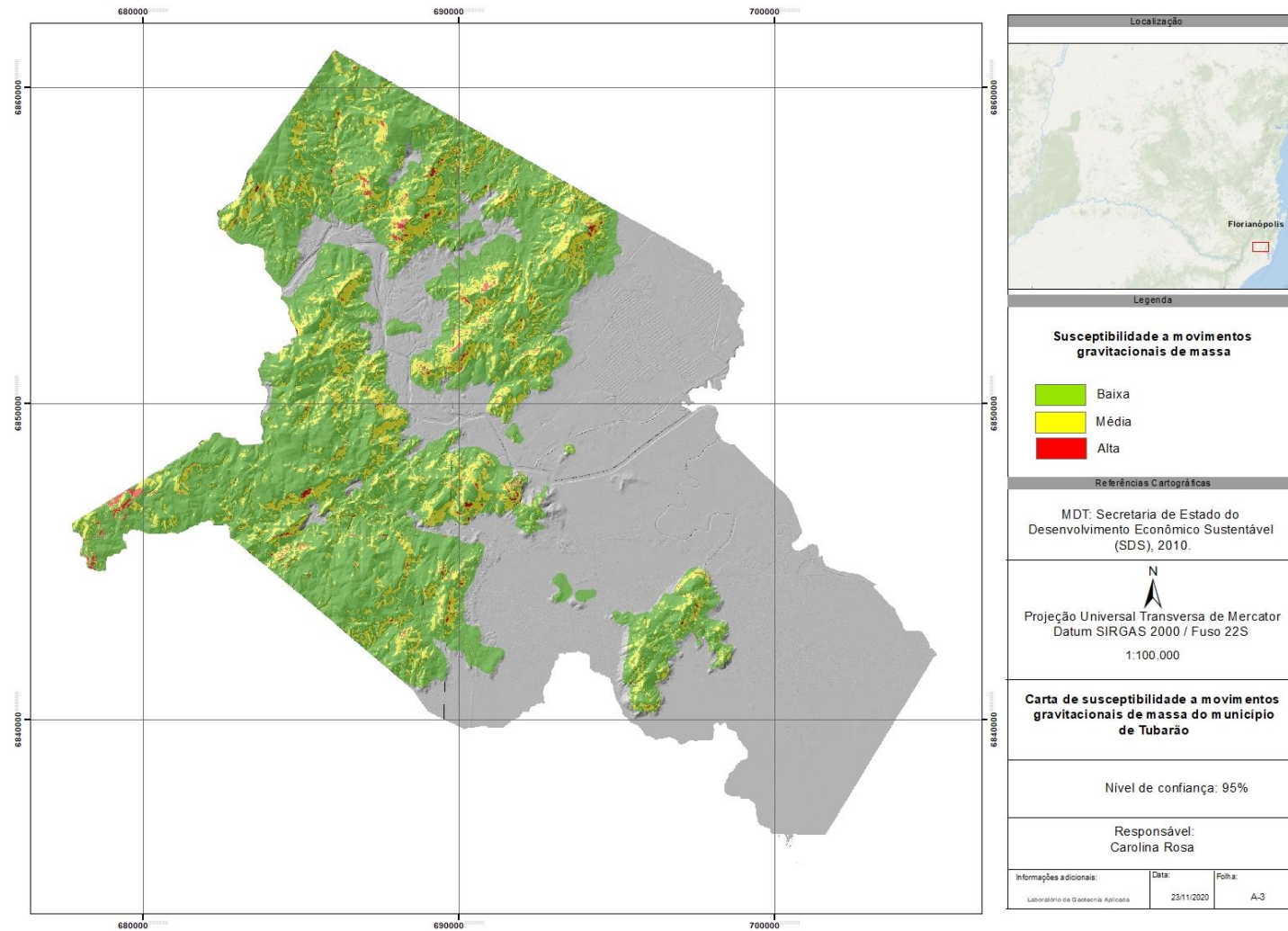
Maiores níveis de confiança demonstram uma menor probabilidade de erros associados, portanto conforme os níveis de confiança aumentam as áreas verdes dos mapas diminuem, já que também maiores níveis de confiança expressam valores menores para a declividade limite correspondentes aos FS.

Figura 26: Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Tubarão com o nível de confiança de 90%.



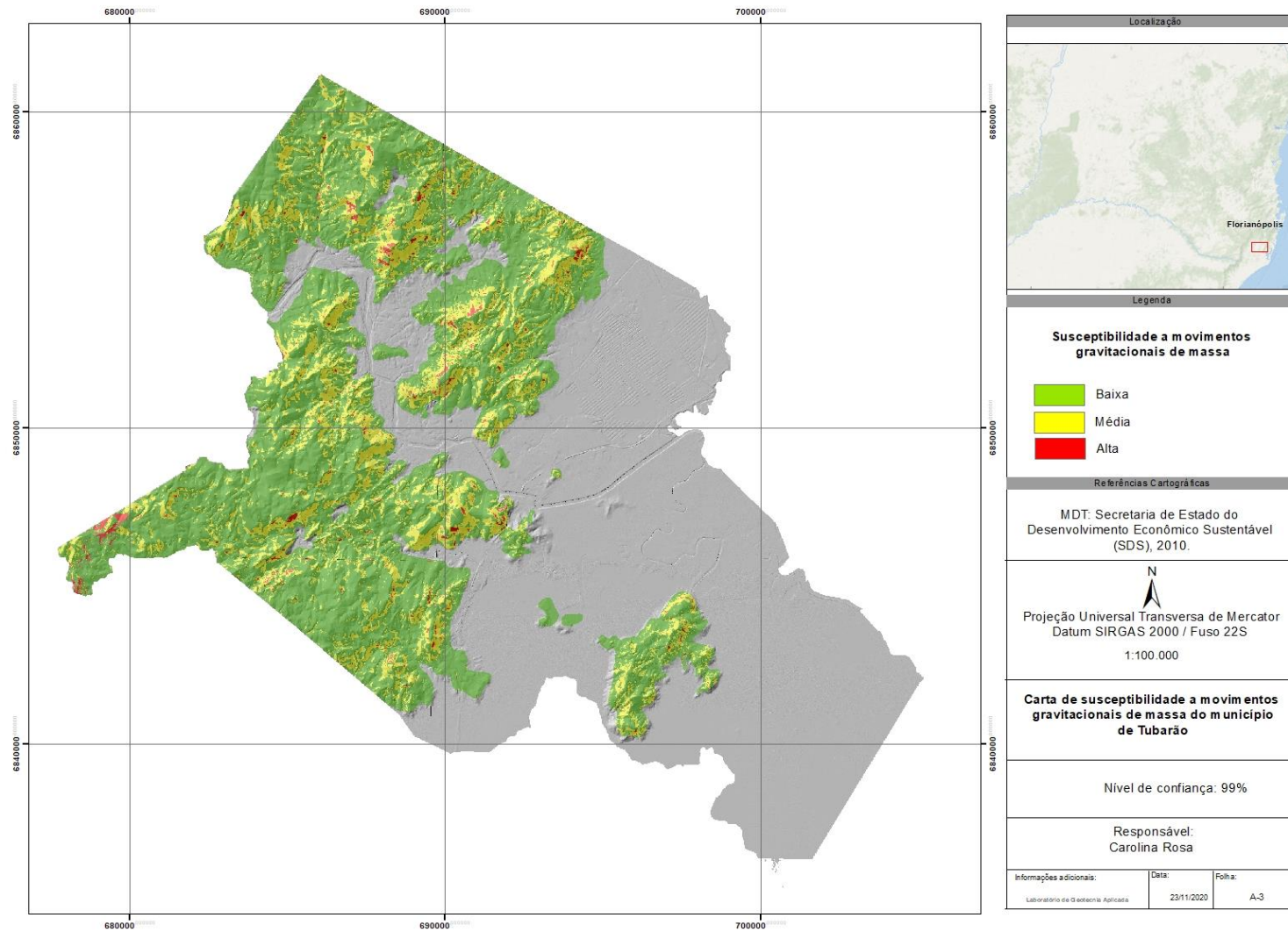
Fonte: Autora (2020).

Figura 27: Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Tubarão com o nível de confiança de 95%.



Fonte: Autora (2020).

Figura 28: Carta de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Tubarão com o nível de confiança de 99%.



Fonte: Autora (2020).

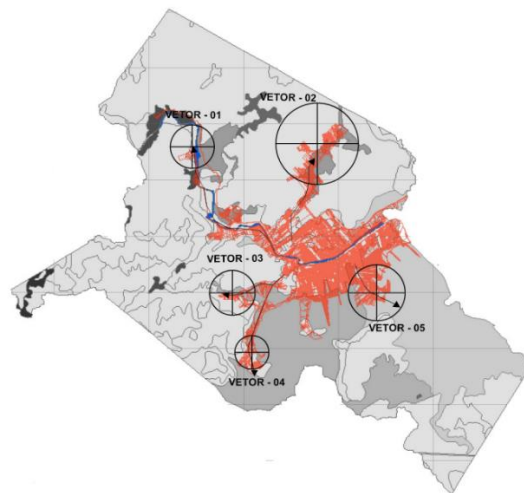
Observa-se que o setor nordeste do mapa foi o que mais sofreu com aumento de áreas de susceptibilidade conforme o nível de confiança aumenta. Isso é explicado pelas declividades e resultados dos parâmetros de resistência. Outro ponto importante a se levantar é a ocorrência de regiões de alta susceptibilidade em zonas de falhas. Isso demonstra que a condicionante geológica tem forte influência na análise de estabilidade.

5.5 MANCHA URBANA E VETORES DE CRESCIMENTO

Aplicando a metodologia proposta por Higashi (2006) e analisando-se a mancha urbana do município de Tubarão verificou-se que os vetores de crescimento acompanharam a proposta de Higashi (2006), conforme visualiza-se na Figura 29. A proposta inicial do presente trabalho previa uma atualização nos vetores de crescimento para realizar uma análise comparativa nos últimos 18 anos, porém verificou-se uma mudança pouca expressiva na mancha urbana no município de Tubarão que não justificaria uma atualização da base cartográfica já existente.

Verificando individualmente cada um dos 5 vetores propostos por Higashi (2006), observa-se que o vetor 5 foi o que teve uma maior expressão no crescimento urbano. Esse fato pode ser explicado devido a região do vetor 5 ser uma área mais plana, o que é confirmado pelas cartas geradas e pelas análises dos Modelos Digitais de Terreno da região. Em detrimento o vetor 2 foi o que teve menores expressões de crescimento. A região que abrange o vetor 2, é uma região de médias e altas susceptibilidades a movimentos gravitacionais de massa. Nos vetores 1,3, 4, não houve modificações expressivas na mancha urbana.

Figura 29: Vetores de crescimento principais do município de Tubarão.



Fonte: Modificado de Higashi (2006).

6 CONCLUSÕES

Antes de adotar uma metodologia de análise de estabilidade é importante ter em mente o objetivo, mas também os recursos envolvidos no processo. A aplicação da metodologia probabilística para a análise dos parâmetros de resistência do solo demonstra-se satisfatória. Vale destacar a importância na construção de um banco de dados consistente, uma vez que é necessário fazer uma análise crítica no levantamento e escolha dos dados a serem utilizados, uma vez que ensaios mal executados podem levar a resultados não condizentes com a realidade.

Para uma avaliação mais fidedigna é importante não só aplicar valores encontrados na literatura, mas também conhecer o comportamento da área de estudos com os ensaios executados em laboratório. Para isso é importante uma coleta de corpos de prova abrangendo as unidades geotécnicas estudadas.

A metodologia que apoia o mapeamento geotécnico e as unidades geotécnicas utilizadas no presente trabalho proposta por Davison Dias, apesar de ser satisfatória revela alguns problemas principalmente em relação a escala, como por exemplo, a delimitação de uma unidade geotécnica pouco expressiva (HOeg), que foi verificada em campo que na verdade se tratava de um solo com as mesmas características da encontrada na unidade PVg.

Para a utilização do aplicativo de consulta e balizamento de parâmetros é necessário observar os valores do desvio padrão. Logo, se a obtenção de dados apresentar desvios padrões altos, os mesmos devem ser revistos antes de serem utilizados. Outro fator importante na análise é a entrada dos dados no *software* SV Slope, tendo em vista que qualquer variação nos modelos de taludes desenhados podem gerar resultados não consistentes.

As cartas de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa e a elaboração dos vetores de crescimento através das análises das manchas urbanas são essenciais para a expansão urbana das cidades.

Como sugestão para trabalhos futuros ressalta-se a importância da validação dos dados. Esta pode ser feita através de uma análise comparativa com outras metodologias ou ainda com o mapeamento de cicatrizes para compreensão da espacialização dos movimentos de massa.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 9604: Abertura de poço trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.** Rio de Janeiro, 1986. 9 p.
- ABNT. **NBR 6502: Rochas e Solos – Terminologia.** Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- ABNT. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações.** Rio de Janeiro, 2003. 91 p.
- ABNT. **NBR 11682: Estabilidade de taludes.** Rio de Janeiro, 2009. 39p.
- AITCHISON, G. D.; GRANT, K. **The Puce Program of Terrain Description Evaluation and Interpretation of Engineering Purposes.** IN Regional Conference of Africa on soil mechanics and foundation engineering, Cape Town, 1976.
- ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; NEVES, B.B. de B.; FUCK, R.A. **Províncias Estruturais Brasileiras.** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, Campina Grande, 1977. SBG, 1977. p. 363-391.
- ALVES, L. E.C. **Avaliação das variáveis mecânicas em solos de encostas naturais de Blumenau, SC.** 2018. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- ANG, A.H.S.; TANG, W. (1975). **Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles.** John Wiley & Sons, New York, NY, USA, vol. 1, 422 p.
- AQUAROLI, L. H.S. **Tectônica transcorrente pós-mesozoica na região de Laguna, litoral de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado. UNESP, São Paulo, 2017. 144p.
- AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 162p.
- BENEDET, J.S. **Análise espacial da ocupação urbana de Tubarão/SC no período de 1957 a 2017.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2018.
- BASEI, M. A. S. **O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina.** 1985. 191 f. Tese (Doutorado) – Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.
- BASTOS, C. A. B.; VALENTE, A. L. S.; TAGLIANI, C. R.; MIRANDA, T. C.; PINTO, W. S.; DIAS, R. D. **Mapeamento de Unidades Geotécnicas como Subsídio à Formação de um Banco de Dados Geotécnicos Georreferenciado para o Município de Rio Grande/RS.** In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, Anais..., Florianópolis, SC, 2005, v.1.

BITAR, O. Y.; CERRO, L. E.S.; NAKAZAWA, V.A. **Carta de risco geológico e carta geotécnica. Uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil.** 1992. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 2, Pereira, 1992. Pereira V.1, p.35-41.

BISHOP, A.W. **The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes.** Géotechnique.1955, v.5, pp.7-17

BORTOLUZZI, S. D. **Caracterização das funções e padrões de uso e ocupação do solo no centro de Florianópolis (SC).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems,** Oxford University Press, Nova York, 333p., 1998.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P.A. **Estatística Básica.** 6 °Edição São Paulo: SaraivaUni, 2010.

CÂMARA, G; FELGUEIRAS, C. A. **Sistema de informações geográficas do INPE. Sistema de Informações Geográficas: aplicações na agricultura.** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, p. 41-59, 1993.

CÂMARA, Gilberto. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos.** São José dos Campos, v. 264, 1995.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução a Ciência da Geoinformação.** DPI/INPE. 2001.

CAPUTO, H. M. **Mecânica de Solos e suas aplicações.** 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234 p.

CARDOSO, A.S. **Desenvolvimento da geotecnia: condicionantes gerais e específicas.** In: Geotecnia.º 135, Portugal, 2015, pg 05-39.

CEREDA JUNIOR, A. **Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Ribeirão do Monjolinho - São Carlos - SP - utilizando ferramentas de geoprocessamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, 2006.

CERRI, L. E. S. **Carta geotécnica: Contribuições para uma Concepção Voltada Às Necessidades Brasileiras.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, Salvador, BA, 1990.

CHRISTOFOLLETTI, A. **Geomorfologia.** 2 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1979. 188p

CORREIA, V.M. **Aplicação de uma nova metodologia de mapeamento de susceptibilidade à movimentos gravitacionais de massa em Santo Amaro da Imperatriz-SC.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil** – Carta geológica (1:250.000) – Folha de Criciúma SH.22.X.B, 2000.

COTTAS, L.R. **Estudos Geológico-Geotécnico aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro - SP.** 1983. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Ed. Thompson Pioneira, 6. ed., 2007.

DAVISON DIAS, R. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais.** Revista do Instituto Geológico. São Paulo, p.511-55.1995.

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

DEVORE, J. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências.** Pioneira Thomson Learning, 2006.

DUNCAN, S.G.; WRIGHT, S.G. **The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. Engineering Geology.** 1980. Elsevier.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil Strength and Slope Stability.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

DYMINSKI, A. S., 2011. **Noções de Estabilidade de Taludes e Contencões.** Notas de Aula de Estabilidade de Taludes, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS – EMBRAPA – CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa – SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306p.

ESPÍNDOLA, M.D.S. **Análise dos parâmetros geotécnicos dos solos moles da obra de ampliação do Aeroporto Internacional Hercílio Luz, Florianópolis.** 2011. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

FERNANDES, N.F., AMARAL, C.P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica.** In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand, p. 123-194, 2003.

FERREIRA, S.B. **Estudo de ruptura em talude urbano no Morro do Curral - Ouro Preto.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto.

FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas: Aplicações na estabilidade de Taludes.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. 2ª ed.

- FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem Complicação**. São Paulo, Ed. Oficina de Textos, 2008.
- FORNASA, T.L. **Mapeamento geológico-geotécnico e análise de suscetibilidade a movimentos de massa em Braço do Norte-SC**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina.
- FREITAS, C. G. L. **Cartografia geotécnica de planejamento e gestão territorial: proposta teórica e metodológica**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.
- FREITAS, C, G, L. de; CAMPANHA, V. A. **Carta geotécnica e ambiental aplicada em planos diretores municipais**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 6, Uberlândia. Anais... Uberlândia: ABGE, 2007. p. 562-570.
- GERSCOVICH, D.M.S. **Apostila Resistência ao Cisalhamento**. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- GERSCOVICH, D.M.S. **Estabilidade de Taludes**. Oficina de Textos. São Paulo, 2012.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Edgard Blucher, 1984. 194p.
- HEAD, K.H.; EPPS, N.S. **Manual of soil laboratory testing**. III ed London: Pentech Press, 1986. V3
- HEILBRON, M. et al. **Província Mantiqueira**. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Eds.) **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, São Paulo: Beca, 2004. Cap. 13. p.203-235.
- HIGASHI, R. R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.
- HIGASHI, R. R.; ESPINDOLA, M. **Mecânica dos Solos II**. 2011. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Apostila).
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008. 129p.
- HUTCHINSON, J.N. **General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology**. Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10-15 July, 1988.
- KÖPPEN, W. **Grundriss der klimakunde**. Berlin: W. Guyter, 1931. 390p.
- LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2014.

Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. **Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm>. Acesso em: 04 out 2019.

Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm> Acesso em: 04 out 2019.

Lei Complementar nº 84, de 20 de dezembro de 2013. **Dispõe sobre o plano diretor do município de Tubarão e dá outras providências.** Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-tubarao-sc>>. Acesso em: 04 out 2019.

MARANDOLA JR, E.; MARQUES, C.; PAULA, L.T.; CASSANELI, L.B. **Crescimento urbano e áreas de risco no litoral norte de São Paulo.** Revista brasileira de estudos de população, Rio de Janeiro 2013, v. 30, n. 1, p. 35-56, 2013.

MÜLLER, V. S. **Avaliação da influência de um protocolo para obtenção de dados de resistência ao cisalhamento com aplicação em mapas geotécnicos.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina.

PINHEIRO, J. I. D; CARVAJAL, S. S. R; CUNHA, S.B; GOMES, G.C. **Probabilidade e Estatística Quantificando a incerteza.** 5ed, Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

PEREIRA, T.S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2013.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247p.

PORTO, C. G. Intemperismo em Regiões Tropicais. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 25-58, 2003.

PRANDINI, F. L.; NAKAZAWA, V. A.; LUZ DE FREITAS, C. G.; DINIZ, N. C. **Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais.** Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, São Paulo, SP, 1995, p.187-202.

RODRIGUES, M., QUINTANILHA, J. A. **A seleção de software SIG para gestão urbana.** In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 15, S. Paulo. Anais.São Paulo; SBC, 1991, V.3, p. 513-9, 1991.

RODRIGUES, V.L. **Mapeamento geotécnico como base para o planejamento urbano e ambiental: Município de Jaú/SP.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

RUFINO, R.C. **Avaliação da qualidade ambiental do município de Tubarão (SC) através do uso de indicadores ambientais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

SAKAMOTO, M. Y., GUESSER, L. H., OLIVEIRA, M. C., CONTESSI, R. J., ABREU, R. P., & HIGASHI, R. A. (2015). **Uso do Método Borehole Shear Test no Mapeamento Geotécnico de Áreas de Risco.** CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15. Bento Gonçalves.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota - SC.** Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015. 187 p.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and process.** Oxford Universty Press Inc. New York, 2ºed., 1993. 450p.

SILVA, J.P.M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes.** Dissertação. (Metrado em Geotecnia). Faculdade de Engenharia-Universidade do Porto, 2011.

SILVA, L.C. **Sugestões para uma reavaliação do Potencial Metalogenético do Cinturão Brusque.**Florianópolis: CRM/SCTME-SC, 1987. 12 p.

SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da Cava de Alegria utilizando abordagem probabilística.** Dissertação de Mestrado, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

TERZAGHI, K. **Mechanisms of Landslides.**In: Application of Geology in Engineering Practice. Berkeley: Geotechnical Society of America, 1950. p. 83 – 125

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense.** 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná.

TORRES, F.S.M.; COUTINHO, R.Q.; DUARTE, C.C.; MENEZES, J.N.; FÔNSECA, D.N.; PFALTZGRAFF, P.A.S. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca-PE.** In:Geotecnia n.º 135, Portugal, 2015, pg 67-88.

UNESCO – IAEG. **Engineering Geological Maps. A Guide to Their Preparation.**Paris: The Unesc Press, 1976. 79p.

VALENTE, A.L.S. **Desenvolvimento de uma metodologia para planejamento urbano, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, Modelagem Numérica do Terreno (MNT) e Sistema de Informações Geográficas (SIG).** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1995.

VALENTE, L. S. **Integração de dados por meio de geoprocessamento, para a elaboração de mapas geotécnicos, análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana: o**

caso de Porto Alegre (RS). . Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1999.

VANACÔR, R.N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

VARNES D.J. **Slope Movement Types and Processes**. In: Landslides: Analysis and control. Washington, D.C.: National Academy Press, 1978. (Transportation and Road Research Board Special Report 176), cap. 2, p. 11 – 33.

VITTO, R. **Análise do comportamento geológico-geotécnico aplicada à estabilidade de um talude – Camboriú**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

WU, T. H. **Soil Mechanics**. Boston - Allyn And Bacon Inc, 1966. 431 p.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e posposta metodológica para as condições brasileiras**. 1987. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. **Mapeamento Geotécnico: uma proposta metodológica**. Geociências, v. 9, n. 1, p. 55-66, 1990.

ZUQUETTE, L. V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meiofísico: Fundamentos e guia para elaboração**. Tese de livre-docência, escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993, 2v., 388p.

ZUQUETTE, L. V.; NAKAZAWA, V. A. **Cartas de geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.

ZUQUETTE, L.V; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. 2004.