

Daniel de Toledo Barros Mota

**COMPARATIVO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE  
ENCOSTAS A MOVIMENTOS TRANSLACIONAIS NA MICROBACIA DO  
RIBEIRÃO DO BAÚ, ILHOTA-SC**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da  
Universidade Federal de Santa Catarina como  
requisito para a obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Civil  
Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis  
Higashi

Florianópolis

2019



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

MOTA, DANIEL DE TOLEDO BARROS  
COMPARATIVO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE  
DE ENCOSTAS A MOVIMENTOS TRANSLACIONAIS NA MICROBACIA DO  
RIBEIRÃO DO BAÚ, ILHOTA-SC / DANIEL DE TOLEDO BARROS MOTA ;  
orientador, RAFAEL AUGUSTO DOS REIS HIGASHI, 2019.  
91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO. 3.  
EQUAÇÃO DOS TALUDES INFINITOS. 4. MODELO SHALSTAB. 5.  
ANÁLISE DO FATOR DE SEGURANÇA. I. HIGASHI, RAFAEL AUGUSTO  
DOS REIS. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.



Daniel de Toledo Barros Mota

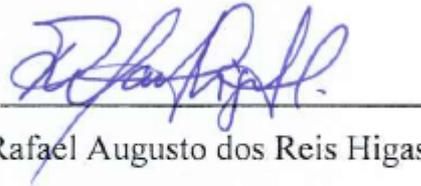
**COMPARATIVO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE  
ENCOSTAS A MOVIMENTOS TRANSLACIONAIS NA MICROBACIA DO  
RIBEIRÃO DO BAÚ, ILHOTA-SC**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Civil” e aprovado em sua forma final pelo curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 27 de junho de 2019.

Prof.<sup>a</sup> Luciana Rohde, Dr.<sup>a</sup>  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**



Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Liseane Padilha Thives, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.<sup>a</sup> Gisele Marilha Pereira Reginatto, Me.

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Sérgio e Caroline.



## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Sérgio Murilo por me apresentar essa carreira e me ensinar que com esforço e dedicação é possível se chegar aonde quiser.

A minha mãe Caroline, pela paciência, pelo carinho por todo o amparo que me deu durante essa graduação.

A minha namorada Leticia por sempre aproveitar e dividir os bons momentos e me apoiar nas horas difíceis.

Aos meus amigos, pessoas incríveis que tive o prazer de conhecer na faculdade, que sempre estiveram comigo nessa caminhada. A galera do Amigos do Chape que, por se fazerem mais presente, estiveram comigo e me ajudaram a ser a pessoa que sou hoje. Em especial ao Saulo e ao Chapegol que, morando comigo, fizeram parte dessa jornada e ao Pablo, primeiro amigo da faculdade e por todas as assistências no futebol durante esse tempo.

Aos amigos de longa data, que se encontram em diversos cantos desse Brasil, mas independentemente do tempo que não nos falamos sempre que nos vemos é como se ainda morássemos juntos em Campo Grande.

A Associação Atlética de Engenharia Civil, à qual fiz parte da diretoria desde sua criação em 2013 e tive a honra de ser presidente em 2015, o que me ensinou muitas coisas que não seriam aprendidas em sala de aula.

Ao meu orientador Professor Higashi pela parceria, auxílio e motivação durante a confecção desse trabalho e a resenha nos jogos que jogamos juntos.

Às professoras Liseane e Gisele, por aceitarem comporem a banca deste trabalho e contribuírem para o seu aprimoramento.

Por fim a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que essa fosse a melhor experiência da minha vida até o momento. Tamo juntasso.

## RESUMO

É do conhecimento de todos os danos causados pelo deslizamento de encostas no Brasil e no mundo todo. Assim, é de extrema importância que se compreenda esses fenômenos, ou seja, o entendimento de que forma e sob que condições eles acontecem, e como preveni-los. Este trabalho tem como principal objetivo comparar duas formulações distintas de mapeamento a fim de verificar a influência de diferentes metodologias na delimitação das áreas suscetíveis a ocorrência desse fenômeno (o modelo SHALSTAB e a equação dos taludes infinitos.) A região escolhida para ser analisada se encontra no município de Ilhota-SC, uma região que apresenta um histórico recente de deslizamentos translacionais. Para a execução dos métodos foi necessário levantar os parâmetros do solo da região, estes sendo coletados em pesquisas anteriores, tais como a coesão, ângulo de atrito e peso específico. Quando se trata do fator de segurança é necessário que se considere a influência da percolação de água na equação dos taludes infinitos para se obter o cenário crítico, e dessa forma, foi considerada a equação com percolação de água. A fim de se considerar o cenário de maior ocorrência, foi determinado a profundidade de ruptura de 5 metros. O *software* SHALSTAB e Excel 2016 foram de extrema importância na confecção do mapa de suscetibilidade e na representação gráfica das unidades que apresentaram maiores variações do fator de segurança que identificaram, de acordo com suas formulações matemáticas, áreas mais ou menos suscetíveis a sofrerem deslizamentos. Como resultado foi encontrado, para as mesmas unidades geotécnicas, as áreas de maior instabilidade utilizando o modelo SHALSTAB e os menores fatores de segurança utilizando a equação dos taludes infinitos, o que valida a equivalência de ambas as metodologias.

**Palavras-chave:** Deslizamentos, SHALSTAB, Fator de Segurança, Equação dos Taludes Infinitos

## **ABSTRACT**

It is common knowledge the damage caused by landslides in Brazilian community and worldwide. Therefore, it is extremely important to understand how and when this process happens in order to prevent them. This research has the main priority to compare two different approaches of mapping and identify the influence of the hydrological module on this map. The methods are the SHALSTAB and the Equation of Infinity Slopes. The chosen area to be studied is located in Ilhota-SC, a region which presents a recent historical of translational landslides. In order to execute these methods it was necessary to check in previously studies for the soil parameters such as tenacity, friction angle and density. When it comes to the safety factor it is necessary to imply or not the water flow on the equation and to simulate the worst scenario possible this research will imply the influence of the water flow. On the other hand, to imply the best field scenario possible this research will consider a 5 meters depth on the equation. The SHALSTAB and Excel 2016 software were extremely important to provide the map of susceptibility to landslides and the graphic representation of the unities that presented the highest variations of the safety factor, that identify along its formulations, the areas more or less susceptible to suffer landslides.

**Keywords:** Landslides, SHALSTAB, Safety factor, Equation of Infinity Slopes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Talude de Corte/Aterro.....	22
Figura 2 – Rastejo.....	25
Figura 3 - Corrida de Terra.....	26
Figura 4 - Queda de bloco .....	26
Figura 5 - Tombamento .....	27
Figura 6 - Escorregamentos/deslizamentos.....	28
Figura 7 - Ensaio cisalhamento direto.....	30
Figura 8 – Equipamento para BST .....	30
Figura 9 - Envoltória de ruptura típica de uma areia.....	31
Figura 10 – Sobreposição de mapas com auxílio do SIG.....	33
Figura 11 – Mapeamento de áreas com suscetibilidade a movimentos de massa.....	35
Figura 12: Metodologia IPT .....	40
Figura 13 - Método das fatias.....	44
Figura 14- Forças atuantes .....	45
Figura 15 – Polígono das forças .....	46
Figura 16 – Forças que atuam em uma fatia sem percolação.....	47
Figura 17 – Forças que atuam em uma fatia com percolação .....	47
Figura 18 – Diagrama das forças método dos taludes infinitos .....	49
Figura 19 – Zonas de estabilidade modelo SHALSTAB .....	52
Figura 20 – Modelo hidrológico no estado uniforme.....	53
Figura 21 – Mapa de suscetibilidade Serra do Mar.....	57
Figura 22 – Registro de deslizamentos por bairro em Vitória - ES .....	58
Figura 23 – Mapeamento de áreas com suscetibilidade a deslizamentos translacionais em Vitória -ES.....	59
Figura 24 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos usando SHALSTAB .....	60
Figura 25 – Mapa de suscetibilidade a deslizamento usando SINAMP.....	61
Figura 26 - Localização microbacia Ribeirão do Baú, Ilhota - SC .....	62
Figura 27 - Mapa litológico mirobacia Ribeirão do Baú.....	64
Figura 28 - Mapa pedológico mirobacia Ribeirão do Baú .....	65
Figura 29 – Mapa geotécnico da área de estudo .....	66
Figura 30 - Gráfico Tensão Cisalhante x Tensão Normal.....	69
Figura 31 - Fluxograma das etapas de estudo .....	71

Figura 32 - Modelo Digital do Terreno .....	72
Figura 33 - Mapa de declividade em graus .....	73
Figura 34 - Mapa de declividade em porcentagem .....	73
Figura 35 - Sobreposição de mapas para geração do mapa geotécnico .....	74
Figura 36 - Mapa Geotécnico com pontos de coleta do solo .....	74
Figura 37 - Mapa de área de contribuição .....	75
Figura 38 - Mapa de suscetibilidade microbacia Ribeirão do Baú com SHALSTAB77	
Figura 39 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Ca.....	78
Figura 40 - Fator de segurança vs Inclinação para Ca .....	79
Figura 41 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cc.....	80
Figura 42 - Fator de segurança vs Inclinação para Cc .....	80
Figura 43 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cf.....	81
Figura 44 - Fator de segurança vs Inclinação para Cf.....	82
Figura 45 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cgn.....	82
Figura 46 - Fator de segurança vs Inclinação para Cgn .....	83
Figura 47 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cpi.....	84
Figura 48 - Fator de Segurança vs Inclinação para Cpi .....	84
Figura 49 - Comparativo entre as unidades geotécnicas .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Movimentos de Massa.....	23
Tabela 2 – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres COBRADE (2012).	24
Tabela 3 – Comparativo EESC/USP e IPT .....	41
Tabela 4 - Talude infinito sob diferentes condições.....	56
Tabela 5 – Definição das classes de estabilidade SINMAP .....	61
Tabela 6 - Caracterização das unidades geotécnicas.....	68
Tabela 7 - Parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto.....	70
Tabela 8- Declividade limite para Ca.....	79
Tabela 9 - Declividade limite para Cc.....	81
Tabela 10 - Declividade limite para Cf.....	82
Tabela 11 - Declividade limite para Cgn.....	83
Tabela 12 - Declividade limite para Cpi .....	85
Tabela 13 - Tabela resumo de Declividade Limite .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BST – *Borehole Shear Test*

c – Coesão

$\emptyset$  e  $\varphi$  – Ângulo de Atrito

$\beta$  e  $\theta$  – Inclinação do talude

H – Profundidade

$\gamma$  - Peso específico

$\mu$  - Poropressão

Ca - Cambissolo com substrato de arenito

Cc – Cambissolo com substrato de conglomerado

Cf – Cambissolo com substrato de folhelho

Cde - Cambissolo com substrato depósito de encosta

Cgn – Cambissolo com substrato de gnaiss

Cpi – Cambissolo com substrato de piroxenito

GHsqa – Gleissolo com substrato sedimentos quaternários aluviais

Ra e Rc – Litólico substrato de arenito e conglomerado

AR – Afloramentos Rochosos

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USP – Universidade de São Paulo

CD – Ensaio Cisalhamento Direto

SIG – Sistema de Informações Geográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

MDT – Modelo Digital do Terreno

FS – Fator de Segurança

DL – Declividade Limite

IPUF - Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>21</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	TALUDES.....	22
2.2	MOVIMENTOS DE MASSA.....	23
2.2.1	<b>Escoamento .....</b>	<b>24</b>
2.2.1.1	Rastejo.....	24
2.2.1.2	Corridas .....	25
2.2.2	<b>Queda de Blocos.....</b>	<b>26</b>
2.2.3	<b>Tombamento .....</b>	<b>27</b>
2.2.4	<b>Escorregamento .....</b>	<b>27</b>
2.2.4.1	Escorregamentos rotacionais.....	28
2.2.4.2	Escorregamentos translacionais .....	28
2.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	29
2.3.1	<b>Caracterização dos parâmetros de resistência .....</b>	<b>29</b>
2.3.2	<b>Critério de ruptura Mohr-Coloumb.....</b>	<b>31</b>
2.4	SIG (SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS).....	32
2.4.1	<b>Sensoriamento remoto .....</b>	<b>32</b>
2.4.2	<b>GPS .....</b>	<b>32</b>
2.4.3	<b>Geoprocessamento.....</b>	<b>32</b>
2.5	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO .....	33
2.5.1	<b>Definição.....</b>	<b>33</b>
2.5.2	<b>Aplicações.....</b>	<b>34</b>
2.5.3	<b>Metodologias .....</b>	<b>35</b>

2.5.3.1	Classificação internacional.....	35
2.5.3.1.1	<i>IAEG (International Association of Engineering Geology)</i> .....	35
2.5.3.1.2	<i>ZERMOS (Zonas expostas aos Riscos de Movimento de Solo)</i> .....	36
2.5.3.1.3	<i>P.U.C.E (Patterns, Units, Components, Evaluations)</i> .....	37
2.5.3.2	Classificação nacional.....	37
2.5.3.2.1	<i>EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos)</i> .....	37
2.5.3.2.2	<i>IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo)</i> .....	38
2.5.3.2.3	<i>Davinson Dias</i> .....	42
2.6	DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA.....	42
<b>2.6.1</b>	<b>Rupturas circulares.....</b>	<b>43</b>
2.6.1.1	Método de Taylor (1948).....	43
2.6.1.2	Método das Fatias.....	44
<b>2.6.2</b>	<b>Rupturas planares.....</b>	<b>45</b>
2.6.2.1	Método de Cullman (1866).....	45
2.6.2.2	Método dos Taludes Infinitos.....	46
<b>2.6.3</b>	<b>SHALSTAB.....</b>	<b>50</b>
2.6.3.1	Modelo de estabilidade de encostas.....	50
2.6.3.2	Modelo hidrológico.....	52
2.6.3.3	Combinação do modelo de estabilidade de taludes e modelo hidrológico.....	55
2.6.3.4	Aplicações.....	56
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>62</b>
3.1	Clima e vegetação.....	62
3.2	Geomorfologia.....	63
3.3	Geologia e litologia.....	63
3.4	Pedologia.....	64
3.5	Mapa Geotécnico.....	66
3.6	Parâmetros do solo.....	69

<b>4</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>71</b>
	<b>71</b>	
4.1	Levantamento de dados .....	72
<b>4.1.1</b>	<b>Mapa de declividade.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Mapa Geotécnico e parâmetros de resistência do solo.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Mapa de Área de Contribuição.....</b>	<b>75</b>
4.2	Equação dos Taludes Infinitos .....	76
4.3	Equação SHALSTAB.....	76
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>77</b>
5.1	Aplicação do modelo SHALSTAB .....	77
5.2	Aplicação da equação dos Taludes Infinitos .....	78
<b>5.2.1</b>	<b>- Cambissolo de substrato de arenito.....</b>	<b>78</b>
<b>5.2.2</b>	<b>- Cambissolo de substrato de conglomerado.....</b>	<b>80</b>
<b>5.2.3</b>	<b>- Cambissolo de substrato de folhelho.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.4</b>	<b>- Cambissolo de substrato de gnaise.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2.5</b>	<b>- Cambissolo de substrato de piroxenito .....</b>	<b>84</b>
<b>5.2.6</b>	<b>- Compilação dos resultados.....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a falta de planejamento técnico torna-se cada vez mais crítico o processo de construção e ocupação do solo brasileiro, visto que é necessário compreender suas limitações geológicas e características naturais ao mesmo passo do acelerado processo de urbanização. A ocupação irregular e a retirada da mata ciliar que acompanha o trajeto dos rios promovem o aumento do escoamento superficial em direção dos cursos dos rios, potencializando as enchentes. Em relação ao processo de deslizamentos a vegetação presente nas encostas é capaz de absorver a água das chuvas e evitar a movimentação dos solos para as regiões mais baixas.

Pelo fato de o Brasil ter predominância de clima tropical, com um elevado índice pluviométrico no verão em determinadas regiões, que corresponde ao período chuvoso, as encostas naturalmente poderiam representar locais de risco, uma vez que estão sujeitas a deslizamentos.

No Brasil, ocorrem inúmeros deslizamentos em edificações de pequeno porte, geralmente construídas por famílias de baixa renda, por não terem opções de melhores moradias. Sendo assim, o processo de deslizamento deixa de ser um fenômeno natural e passa a ser também socioeconômico, nesse caso, há necessidade de uma avaliação das áreas ocupadas com maior suscetibilidade a movimentos de massa somado a políticas públicas de conscientização para o uso adequado dos terrenos, gerando a melhoria na qualidade de vida para as pessoas e evitando que regiões indevidas sejam ocupadas prevenindo, assim, desastres.

Além disso, também é observado, com o crescimento populacional, a ocupação de áreas que naturalmente estão sujeitas a deslizamentos, isto é, a ocupação de morros com altas declividades, solos frágeis, processos de desmatamento, execução de cortes e aterros de forma inadequada, principalmente em regiões costeiras, como no caso da área de estudo dessa pesquisa.

Sendo assim, o estudo de deslizamentos é de extrema importância, pois a partir dele pode-se mapear as áreas de risco e elaborar previsões de regiões com possíveis ocorrências de desastres.

Neste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos principais temas para o entendimento de como se dá os movimentos de massa, as principais metodologias para mapeamento e a formulação matemática para as ferramentas que foram desenvolvidas para tal. Para a determinação do mapa de suscetibilidade foi extremamente importante a ferramenta SHALSTAB e para a caracterização do gráfico Fator de Segurança vs Inclinação o programa

Excel 2016. E com uso desses foi possível comparar as diferentes metodologias de análise de estabilidade de encostas.

A escolha da área de estudo se deu pelo alto índice pluviométrico, principalmente nos meses mais chuvosos, e pelo grande número de desastres registrados em municípios próximos. Em novembro de 2008, o estado de Santa Catarina vivenciou chuvas de excepcional intensidade que obrigou o poder público a decretar situação de emergência em grande parte do estado. Os movimentos de massa desencadeados por este evento foram os principais causadores de prejuízos econômicos e sociais. Eles ocorreram em enorme quantidade, 14 no total de acordo com a defesa civil do estado de Santa Catarina, tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais. Em áreas urbanas os deslizamentos danificaram e destruíram residências e infraestrutura pública e privada, além de causarem perdas humanas. Na área rural destruíram residências, indústrias, estradas e acessos, causando também um grande número de mortes.

Sendo assim, o mapeamento geotécnico, é uma das ferramentas que pode gerar subsídios para a identificação dos fatores e processos envolvidos na diminuição da estabilidade de encostas. Esta ferramenta, associada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a ensaios de laboratório atua na caracterização do meio físico de forma a prever o comportamento dos solos para determinada situação e, assim, possibilitar a simulação de cenários de suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos para grandes áreas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a influência do módulo hidrológico no mapeamento de áreas sujeitas a deslizamentos translacionais utilizando a equação do talude infinito e o modelo SHALSTAB.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a área de estudo quanto ao clima, relevo, formação geológica, vegetação, litologia e pedologia para identificar suas características;
- Elaborar, a partir MDT, o mapa de declividades e mapa de área de contribuição do módulo hidrológico;
- Utilizar softwares de mapeamento para gerar mapas de suscetibilidade a deslizamentos;
- Calcular o fator de segurança das diferentes unidades geotécnicas considerando as inclinações máximas da encosta;
- Elaborar um gráfico apresentando a influência da inclinação do talude no fator de segurança para cada unidade geotécnica;
- Comparar os resultados de diferentes métodos de mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais.

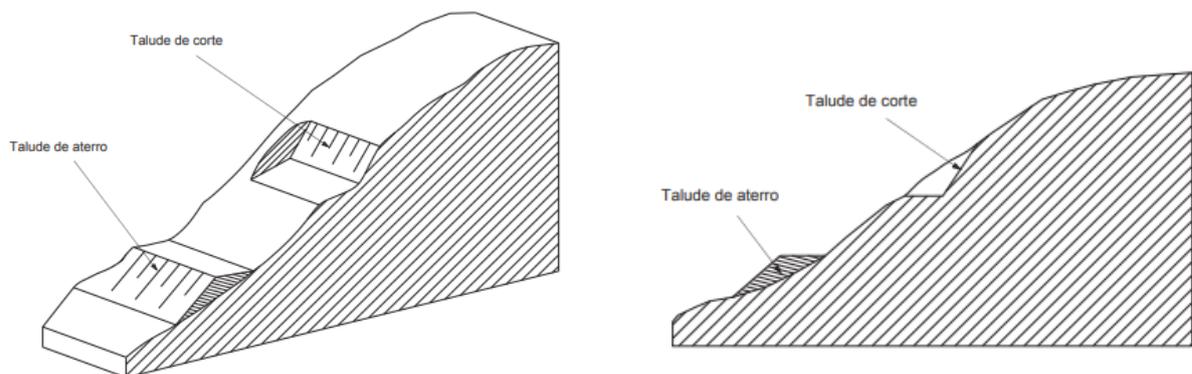
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão apresentados os principais conceitos sobre instabilidades de taludes, mapeamento geotécnico e suas aplicações com o intuito de gerar uma base para a avaliação desse estudo.

### 2.1 TALUDES

Taludes são superfícies inclinadas de solos terrosos, rochosos ou misto (solo e rocha) podendo essas inclinações serem de forma natural (encostas ou vertentes) ou, como ilustrado na Figura 1, artificial (corte ou aterro).

Figura 1 - Talude de Corte/Aterro



Fonte: ABNT (2009)

Esse tema é amplamente discutido por geólogos a fim de caracterizarem o tipo de solo e seus parâmetros de resistência; profissionais especializados em estruturas de contenção devido aos desastres relacionados aos desprendimentos de solo, bem como a engenharia geotécnica que desempenha um papel de relevância em empreendimentos tanto civis quanto minerais, por ter uma grande importância nas questões de estabilidade de taludes que se encontram alterados.

Nesta pesquisa, serão abordados os aspectos que dizem respeito aos taludes de encostas, onde os movimentos de massa translacionais assumem grande importância.

## 2.2 MOVIMENTOS DE MASSA

Tratam-se de desprendimentos de solos devido a ação da gravidade e potencializados pela ação da água.

Os movimentos de massa dependem, principalmente, da resistência interna ao deslizamento, segundo Terzaghi (1925). Sendo assim, os deslizamentos de taludes são causados pela diminuição das forças estabilizadoras, ou seja, redução da resistência interna ao deslizamento que se opõe ao movimento de massa deslizante ou aumento das forças que geram instabilidade, isto é, aumento das solicitações externas no maciço, como pode se ver na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de Movimentos de Massa

<b>Tipos de Movimentos de Massa</b>	<b>Definição</b>
Queda/ Rolamento	Desprendimento de fragmentos do terreno, de qualquer tamanho, que caem de certa altura, em queda livre ou com qualquer outra trajetória e tipo de movimento
Tombamento	Movimento de massa em forma de balsa com eixo na base
Escorregamento	Movimento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies
Escoamento	Movimento de massa com propriedades de fluido, lento (rastejo) ou rápido (corrida)

Fonte: ABNT (2009)

A COBRADE (Classificação e Codificação Brasileira de Desastres) foi elaborada com o intuito de se adaptar ao sistema de classificação de desastres do Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT), do Centro para Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres (CRED), da Organização Mundial da Saúde (OMS/ONU), a fim de contribuir na alimentação do banco de dados internacional (BRASIL, 2012).

A Tabela 2 traz a classificação dos desastres naturais do grupo geológico, objeto do presente trabalho.

Tabela 2 – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

CATEGORIA	GRUPO	SUBGRUPO	TIPO	SUBTIPO	COBRADE
1. Naturais	1. Geológico	1. Terremoto	1. Tremor de Terra	0	1.1.1.1.0
			2. Tsunami	0	1.1.1.2.0
		2. Emissão Vulcânica	0	0	1.1.2.0.0
		3. Movimento de massa	1. Quedas, tombamentos e rolamentos	1. Bloco	1.1.3.1.1
				2. Lascas	1.1.3.1.2
				3. Matações	1.1.3.1.3
				4. Lajes	1.1.3.1.4
			2. Deslizamentos	1. Deslizamentos de solo e/ou rocha	1.1.3.2.1
			3. Corridas de <u>mass</u>	1. Solo/Lama	1.1.3.3.1
				2. Rocha/Detrimento	1.1.3.3.2
		4. Subsídências e colapsos	0	1.1.3.4.0	
		4. Erosão	1. Erosão costeira/Marinha	0	1.1.4.1.0
			2. Erosão de margem fluvial	0	1.1.4.2.0
			3. Erosão continental	1. Laminar	1.1.4.3.1
				2. Ravinas	1.1.4.3.2
				3. Boçorocas	1.1.4.3.3

Fonte: SEDEC (2012) adaptado por Orsi (2018)

## 2.2.1 Escoamento

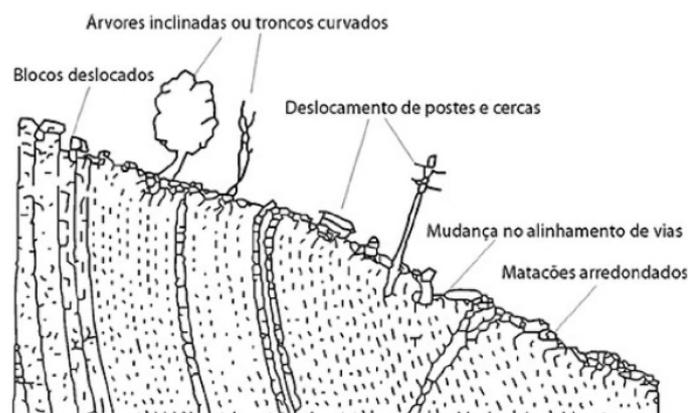
Escoamento, pode ser definido como deformações ou movimentos contínuos de solos em uma superfície. Pode ser subdividido, ainda, dependendo da sua velocidade de ocorrência, sendo lentos (rastejo) e rápidos (corridas).

### 2.2.1.1 Rastejo

O processo de rastejo consiste em um movimento descendente, lento e contínuo de massa de solo de um talude, caracterizando uma deformação plástica, sem geometria e superfície de ruptura definidas. A velocidade do rastejo é medida em centímetros por ano ou ainda menos, é maior na superfície do terreno e diminui gradualmente, até zero, com a profundidade.

A ocorrência de rastejo pode ser identificada através da observação de indícios indiretos, tais como: encurvamento de árvores, postes e cercas, presença de fratura de tensão na superfície do solo e de pavimentos, além do “embarrigamento” de muros de arrimo (INFANTI JUNIOR e FORNASARI FILHO, 1998). Dificilmente gera mortes, porém muito prejuízo financeiro. A Figura 2 mostra esquematicamente algumas consequências da ocorrência do rastejo.

Figura 2 – Rastejo

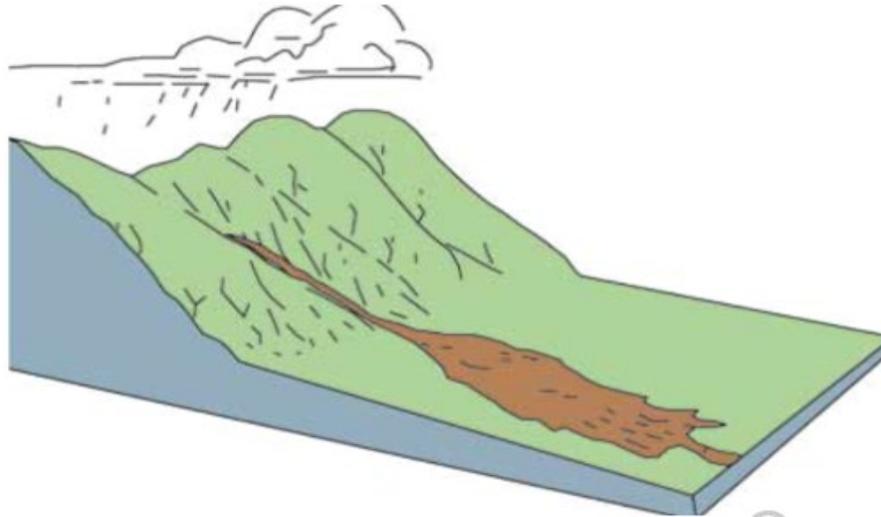


Fonte: Sharpe, 1938 *apud* Guidicini e Nieble, 1983, p. 20

### 2.2.1.2 Corridas

São movimentos de massa gerados pela perda completa das características de resistência do solo e, diferentemente do rastejo, são extremamente rápidos ( $>10\text{km/h}$ ) e desencadeados por um intenso fluxo de água na superfície, em decorrência de chuvas fortes, que liquefaz o material superficial que escoia encosta abaixo em forma de um material viscoso composto por lama e detritos rochosos. Esse tipo de movimento de massa se caracteriza por ter extenso raio de ação e alto poder destrutivo, como representado na Figura 3. As corridas ainda podem ser subdivididas em corridas de solo, corridas de areia, corridas de lama e avalanches.

Figura 3 - Corrida de Terra

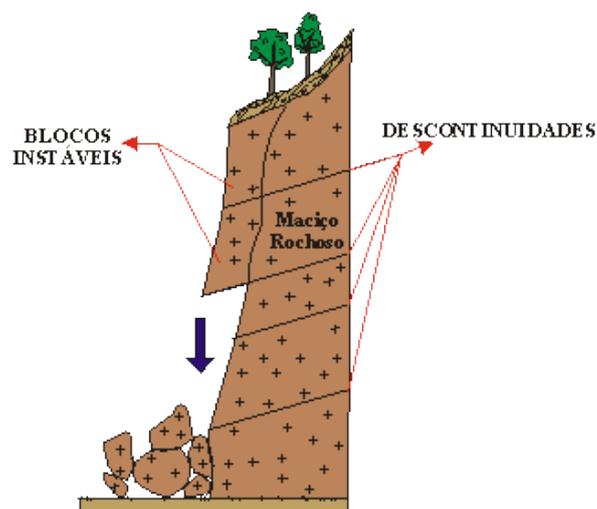


Fonte: LABGEO, 2015

### 2.2.2 Queda de Blocos

São movimentos extremamente rápidos (m/s) em queda livre, com ausência de superfície de movimentação, de fragmentos rochosos (de volumes variáveis) que se desprendem de taludes íngremes por ação da gravidade (GUIDICINE E NIEBLE, 1983). Além disso, segundo Gerscovich (2016) a formação dos blocos tem origem na ação do intemperismo nas fraturas, pressões hidrostáticas nas fraturas, perda de confinamento lateral, decorrentes de obras subterrâneas, vibrações, entre outros. A Figura 4 apresenta a ocorrência desse fenômeno.

Figura 4 - Queda de bloco

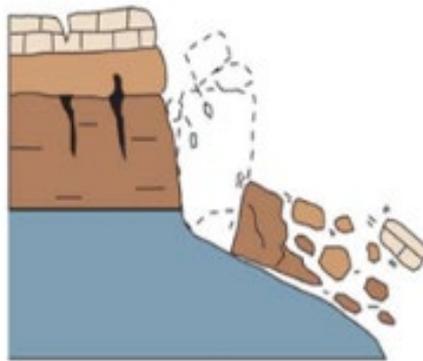


Fonte: UNESP (2018)

### 2.2.3 Tombamento

É a rotação de massa de solo ou rocha em relação a um ponto ou eixo localizado abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. É ocasionado por alguns fatores como, material sobre o talude e água ou gelo nas fraturas de massa (TURNER e SCHUSTER, 1996). Esse material sofre rotação frontal para fora do talude sendo classificado como tombamento). Em geral, são movimentos mais lentos que as quedas e ocorrem, principalmente, em taludes de corte, onde a alteração na geometria acaba desconfinando os planos de fraqueza causando o tombamento das paredes do talude (IPT, 1991). A Figura 5 apresenta um aspecto geral do tombamento de blocos.

Figura 5 - Tombamento



Fonte: Cemaden (2016)

### 2.2.4 Escorregamento

“Escorregamentos ou deslizamentos são movimentos de massas caracterizados por ocorrerem de forma rápida e com curta duração” (QUEIROZ, 2009). Possuem massas de terreno geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude. O presente trabalho abordará adiante, de forma sucinta, o deslizamento translacional. Além desse tipo, há também o deslizamento rotacional, que se difere dos demais em razão do seu tipo de mecanismo. A Figura 6 apresenta e compara, de forma esquemática, esses dois tipos de deslizamentos.

Figura 6 - Escorregamentos/deslizamentos



Fonte: Cemaden (2016)

#### 2.2.4.1 Deslizamentos rotacionais

Consiste em movimento de caráter rotacional segundo um eixo imaginário, ao longo de uma superfície encurvada de ruptura, sendo comum uma série de deslizamentos combinados e sucessivos (INFANTI, JR. E FORNASARI FILHO, 1998). Esse tipo de processo é muito comum ao longo de estradas e rodovias, devido a construção de taludes artificiais, principalmente durante as épocas chuvosas, onde a saturação de água no solo é grande, fazendo com que a resistência do mesmo diminua (MURK, SKINNER e PORTER, 1996).

Nas áreas costeiras, uma causa frequente desses movimentos é a erosão marinha da base das vertentes. Assim, sem suporte, a vertente colapsa, muitas vezes por deslizamentos rotacionais (DIAS, 2006).

#### 2.2.4.2 Deslizamentos translacionais

Esses deslizamentos se diferenciam dos rotacionais pela forma de ruptura e pelo tipo de solo. Nos translacionais, normalmente, o solo possui descontinuidades ao longo da superfície de ruptura, caracterizando a heterogeneidade e anisotropia (QUEIROZ, 2009).

No que diz respeito aos deslizamentos rotacionais, estes ocorrem em taludes mais íngremes e com pouca extensão (KRYNINE e JUDD, 1957 *apud* GUIDICINE e NIEBLE, 1983). Os deslizamentos translacionais ocorrem em taludes de menor altura e na sua grande maioria são extensos em comprimento, podendo atingir grandes amplitudes.

## 2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Define-se como resistência ao cisalhamento do solo a tensão cisalhante que ocorre no plano de ruptura no instante da ruptura. É um parâmetro fundamental para que se sejam analisados problemas, como por exemplo, capacidade de carga de fundações e estabilidade de taludes. Em Mecânica dos Solos, a resistência ao cisalhamento envolve duas componentes: atrito e coesão. O primeiro diz respeito a interação entre duas superfícies de contato. A resistência (T) é proporcional a força normal (N) aplicada de acordo com a equação:  $T = N \times f$ , onde  $f$  é o coeficiente de atrito. Já a coesão, segundo VARGAS (1977), é aquela resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pelo qual ele se torna capaz de se manter coeso em forma de torrões ou blocos, ou pode ser cortado em formas diversas e manter esta forma.

A medida de resistência ao cisalhamento do solo é obtida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, dada pela equação (DAS, 2011):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\emptyset \quad (1)$$

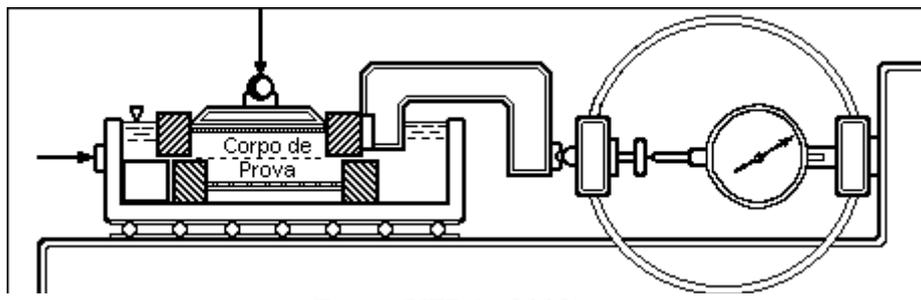
onde  $c$  = coesão;  
 $\emptyset$  = ângulo de atrito interno;  
 $\sigma$  = tensão normal do plano de ruptura;  
 $\tau$  = resistência ao cisalhamento.

### 2.3.1 Caracterização dos parâmetros de resistência

Existem diversos ensaios para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, isto é, coesão e ângulo de atrito. As técnicas mais utilizadas em laboratório são o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial, além desses, existem ainda os ensaios de cisalhamento simples, ensaio triaxial de deformação plana e ensaio de cisalhamento anelar ou ring shear.

Os “Ensaio de Campo”, ou “Ensaio *In Situ*”, são executados quando as amostragens indeformadas são difíceis ou até impossíveis de serem obtidas, como é o caso das areias submersas e dos solos extremamente moles (coesão inferior a 5 kPa), ou quando os resultados de dos ensaios de laboratório são de pouca serventia (MASSAD, 2010). As Figuras 7 e 8 representam alguns exemplos de ensaios de obtenção dos parâmetros de resistência.

Figura 7 - Ensaio cisalhamento direto



Fonte: UFBA (2009)

Figura 8 – Equipamento para BST



Fonte: Handygeotech, 2011

### 2.3.2 Critério de ruptura Mohr-Coloumb

Descreve que a ruptura ocorre de maneira linear e quando no plano de ruptura a combinação das tensões normais e cisalhantes ( $\sigma, \tau$ ) é tal que a tensão de cisalhamento é máxima. Esta combinação de tensões, avaliada através do círculo de Mohr, resulta numa em uma envoltória curva que circunscreve os círculos correspondentes à ruptura, ou seja, a máxima resistência que solo consegue ser solicitado.

Terzaghi conceituou essa resistência como consequência imediata da pressão normal ao plano de ruptura correspondente a pressão grão a grão ou pressão efetiva e que em um solo saturado, a tensão normal total é a soma da tensão efetiva ( $\sigma'$ ) e da poropressão ( $\mu$ ):

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (2)$$

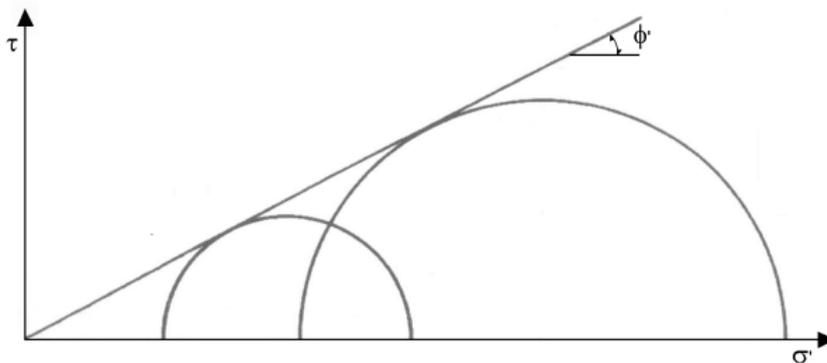
Assim, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb passa a ser (DAS, 2011):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \emptyset \quad (3)$$

onde  $c'$  é a coesão efetiva [kPa] e  $\emptyset$  o ângulo de atrito efetivo [graus], com base na tensão efetiva.

É importante observar que para um determinado solo, a envoltória de ruptura varia em função do tipo de ensaio; isto é,  $c'$  e  $\phi$  variam com: condições de drenagem, velocidade de ensaio (argilas), direção do ensaio (solo anisotrópico), trajetória de tensões (variação de  $\sigma_2$ ), compactidade da amostra, como representado na Figura 9.

Figura 9 - Envoltória de ruptura típica de uma areia



Fonte: Viana (2017)

## 2.4 SIG (SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS)

O Sistema de Informações Geográficas – SIG é um conjunto de sistemas de softwares e hardwares capazes de produzir, armazenar, processar, analisar e representar inúmeras informações sobre o espaço geográfico, tendo como produto final mapas temáticos, imagens de satélites, cartas topográficas, gráficos e tabelas. Esses produtos são importantes para a análise de evoluções espaciais e temporais de um fenômeno geográfico e as inter-relações entre diferentes fenômenos espaciais, no caso dessa pesquisa, para gerar mapas de suscetibilidade a deslocamentos de massa. (LEITE, 2013).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são equipamentos e meios tecnológicos para se estudar o espaço terrestre. São utilizados por pesquisadores, empresas, ONGs (Organizações Não Governamentais), governos, serviços de inteligência, entre outros.

Os SIGs resultam da combinação entre três tipos de tecnologias distintos: O sensoriamento remoto, o GPS e o geoprocessamento.

### 2.4.1 Sensoriamento remoto

O Sensoriamento Remoto é um conjunto de técnicas utilizado para a captação de imagens por meio de sensores de satélites, acoplados de equipamentos fotográficos e *scanners*. É uma técnica que permite obter informações de um determinado objeto sem entrar em contato físico com ele.

### 2.4.2 GPS

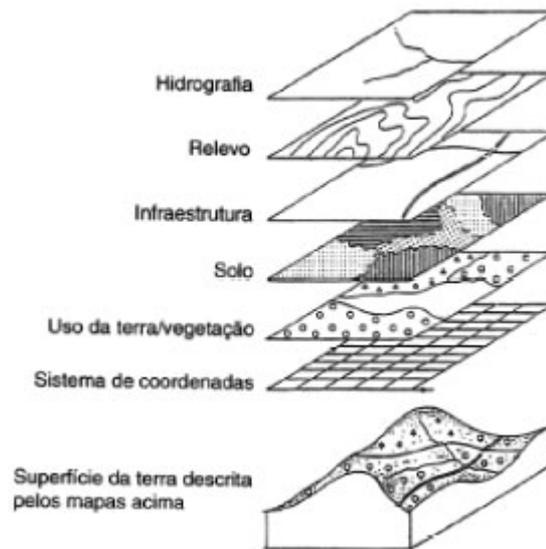
O GPS é o Sistema de Posicionamento Global (sigla derivada do inglês *Global Positioning System*), um instrumento que permite a localização de uma pessoa ou um objeto espacial a partir de suas coordenadas geográficas, latitude e longitude.

### 2.4.3 Geoprocessamento

Alguns pesquisadores consideram o geoprocessamento um conjunto das geotecnologias, ou seja, a combinação do sensoriamento remoto, cartografia digital, GPS (Sistema de Posicionamento Global), entre outros. Entretanto, para Silva (2009), enquanto a cartografia digital, o sensoriamento remoto e o GPS estão nitidamente envolvidos na produção

e qualidade dos dados, o geoprocessamento está relacionado à geração de informações através de dados produzidos por essas ferramentas. Um exemplo dessa tecnologia é demonstrado na Figura 10, onde a caracterização de uma área de estudo se dá pela sobreposição de mapas que descrevem, cada um, uma característica diferente da região.

Figura 10 – Sobreposição de mapas com auxílio do SIG



Fonte: Werneck e Silva, 2010

## 2.5 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

### 2.5.1 Definição

Diversas são as definições de mapeamento geotécnico, pois se trata de um tema muito amplo e utilizado em diversas áreas da engenharia. Sendo assim, sempre que se busca uma conceituação devem-se levar em consideração os equipamentos utilizados, a área de estudo e suas aplicações. Seguem algumas das mais importantes definições que ao longo do tempo foram estudadas e aperfeiçoadas.

Segundo Varnes (1971) o ato de mapear refere-se ao ato de delinear áreas que são homogêneas ou aceitavelmente heterogêneas para as finalidades às quais o mapa está sendo

realizado, e a apresentação normalmente é feita em bi-dimensão, associada a palavras, letras, números, símbolos e outros caracteres que representam os atributos essenciais.

Zuquette (1987) define o mapeamento geotécnico como um processo que tem por finalidade básica levantar, caracterizar, classificar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico, sejam geológicos, hidro geológicos, hidrológicos e outros. Tais informações deverão ser produzidas de maneira tal que possam ser utilizadas para fins de engenharia, planejamento, agronomia, saneamento, avaliações ambientais e outros. As informações devem ser tratadas através de processos de seleção, generalização, adição e transformação, para que possam ser relacionadas, correlacionadas, interpretadas e, ao final, representadas em mapas, cartas e anexos descritivos, sempre respeitando os princípios básicos que regem a execução do mapeamento geotécnico.

Aguiar (1994) afirma que mapeamento geotécnico é o conjunto de processos sistemáticos de investigação de atributos, imprescindíveis ao estabelecimento de unidades geotécnicas e passíveis de representação em documentos cartográficos.

Com base em aspectos apresentados por Cerri et al. (1996), pode-se considerar que a cartografia geotécnica corresponde a um processo que envolve a interpretação na definição dos limites espaciais de determinados atributos ou características do meio físico geológico.

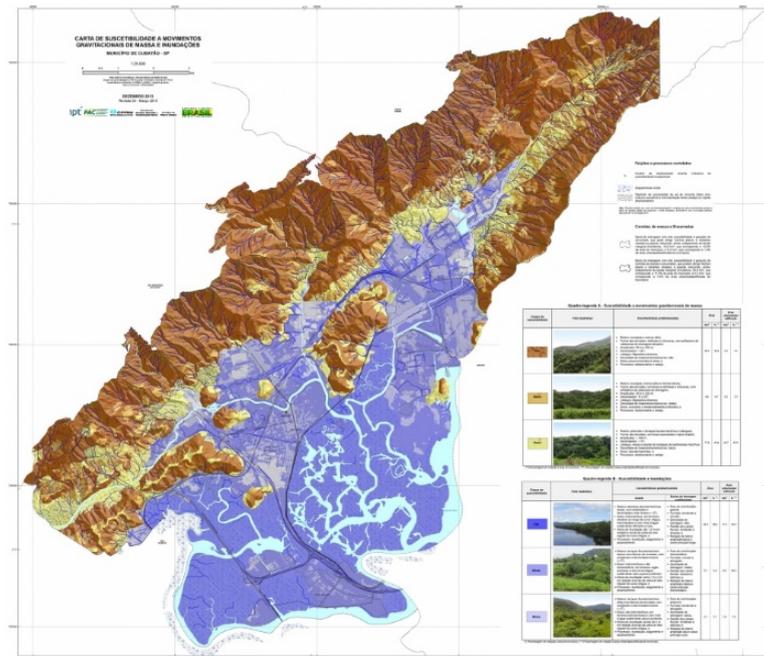
O mapeamento geotécnico pode ser definido como uma metodologia, em que sob forma de um mapa são representadas as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas, o que possibilita a sua aplicação em projetos ambientais e de engenharia (HIGASHI, 2006).

### **2.5.2 Aplicações**

Inúmeras são as aplicações do mapeamento geotécnico, dentre as quais de acordo com Cerri (1990) pode-se destacar que é possível aplica-las: como subsídios à elaboração de projetos voltados ao planejamento e gerenciamento do uso e ocupação do solo; como subsídios a estudos de impacto ambiental; na restrição à ocupação de áreas de riscos a movimentos de massa; na definição de locais mais adequados, dos cuidados e estudos específicos para implantação de obras de engenharia; na melhor estimativa dos custos de implantação dos

empreendimentos; no estabelecimento de critérios técnicos para eficientes sistemas de manutenção das obras de engenharia. Um exemplo de aplicação do mapeamento geotécnico é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Mapeamento de áreas com suscetibilidade a movimentos de massa



Fonte: IPT (2009)

### 2.5.3 Metodologias

Pode-se dividir os tipos de metodologias em dois grupos: Internacionais e nacionais.

#### 2.5.3.1 Classificação internacional

##### 2.5.3.1.1 IAEG (International Association of Engineering Geology)

Essa metodologia foi elaborada por uma comissão formada pela International Association of Engineering Geology (IAEG), que iniciou seus trabalhos em 1968. O objetivo era formular uma orientação de mapeamento que fosse viável para ser desenvolvida e utilizada na maioria dos países, considerando tanto os aspectos socioeconômicos, como os técnicos (ZUQUETTE E NAKAZAWA, 1998).

Levam em consideração o caráter das rochas e dos solos, condições hidro geológicas, condições geomorfológicas e fenômenos geodinâmicos.

Pode ser representado quanto à finalidade: mapas de finalidade especiais tratando de aspectos específicos do meio físico ou das condições geotécnicas para a construção de um determinado tipo de obra. De multifinalidade, isto é, descrevendo os aspectos técnicos de maneira mais geral.

Podem ser representados, também, quanto ao conteúdo: mapa analítico tratando de aspectos individuais e sua finalidade vem expressa no título. Ou mapa compreensivo analisando todos os componentes possíveis do meio-físico.

#### 2.5.3.1.2 ZERMOS (*Zonas expostas aos Riscos de Movimento de Solo*)

A sistemática ZERMOS foi elaborada na França no início da década de 70, sendo utilizada pelo Serviço Geológico da França. Tem como objetivo principal fornecer informações sobre uma área quanto às condições de instabilidades potenciais e/ou reais, em relação à movimentos de massa, erosão, abatimentos e sismos (ZUQUETTE E NAKAZAWA, 1998). Além disso, as cartas ZERMOS são elaboradas no mínimo em 3 fases: levantamento bibliográfico e entrevistas sobre a ocorrência de movimentos de terrenos na região estudada, suas frequências e amplitudes; estudo geomorfológico por meio de fotointerpretação e estudo e controle dos principais fatores geológico-geotécnicos, na escala 1:50.000 ou maiores.

As cartas apresentam uma base topográfica e a representação do zoneamento de risco da seguinte forma (Proin/Capes & Unesp/IGCE, 1999):

- VERDE: áreas sem problemas de instabilidade;
- LARANJA: áreas com problemas potenciais;
- VERMELHO: áreas instáveis.

### 2.5.3.1.3 P.U.C.E (*Patterns, Units, Components, Evaluations*)

A metodologia PUCE foi desenvolvida na Austrália, na década de 50. É baseada na definição de diversas classes de terrenos, que são representadas em mapa por nomenclatura específica. As referidas classes são estabelecidas pela análise dos seguintes parâmetros (Proin/Capes e Unesp/IGCE, 1999): topografia, natureza do material, forma de erosão, vegetação e uso do solo.

A sistemática metodológica PUCE baseia-se na definição de classes de terrenos, de acordo com a escala de trabalho considerada, classificando os terrenos em (Proin/Capes e Unesp/IGCE, 1999):

- Províncias (< 1:250.000): definidas como áreas geologicamente homogêneas;
- Padrões ou modelos de terreno (entre 1:250.000 e 1:100.000): definidos com base em critérios geomorfológicos;
- Unidades de terreno (entre 1:100.000 e 1:25.000): definidas pelas formas de relevo e suas associações com o solo e a vegetação;
- Componentes do terreno (>1:2.500): definidos com base na integração de critérios do meio físico e do uso do solo.

### 2.5.3.2 Classificação nacional

#### 2.5.3.2.1 EESC/USP (*Escola de Engenharia de São Carlos*)

A sistemática EESC/USP foi proposta por Zuquette (1987 e 1993), em trabalhos nos quais o autor faz uma análise crítica da cartografia e do mapeamento geotécnicos, mostrando suas importâncias para o uso e ocupação do solo, além de apresentar uma proposta metodológica de elaboração de Cartas Geológico-Geotécnicas (Proin/Capes e Unesp/IGCE, 1999).

O grupo de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), do qual o professor Zuquette faz parte, desenvolveu trabalhos utilizando a sistemática em questão, na região centro-leste do Estado de São Paulo (Ribeirão Preto, Franca, etc.), entre outros

municípios, tais como: Fortaleza, Cuiabá, Ouro Preto, etc (ZUQUETTE E NAKAZAWA, 1998).

Zuquette (1987 e 1993) esclarece que sua proposta metodológica se baseia em um processo científico de investigação da natureza, combinando os três métodos científicos apresentados por Vargas (1985), que são: o dedutivo, o indutivo e o experimental. Nesse contexto, o objetivo da sistemática proposta é estudar e analisar o meio físico e suas relações, com a finalidade de elaborar documento cartográfico que seja aplicado ao planejamento da ocupação de uma determinada área ou região. A metodologia EESC/USP é dividida em 3 fases (ZAINÉ, 2000).

- Primeira fase consiste em identificar o problema e fazer uma esquematização sobre o tema, assim, formulando uma hipótese de trabalho e estabelecendo uma relação entre os atributos do meio físico para com os atributos da finalidade de estudo.

- Na segunda fase se estabelece teorias para a classificação do meio físico. Após isso, dividimos a área em unidades (zonas homogêneas) em função das propriedades de atributos a serem estudados.

- Por fim, tem-se a terceira fase que é a de experimentação, onde a comprovação da hipótese formulada virá da realização de ensaios e disposição dos dados de forma estatística.

#### 2.5.3.2.2 IPT (*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo*)

A Sistemática do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) foi proposta nos trabalhos de Nakazawa et al. (1991) e por Prandini et al. (1995).

Essa metodologia foi elaborada a partir de trabalhos específicos realizados pela Divisão de Geologia do IPT em algumas cidades brasileiras, com a finalidade de resolver problemas relacionados ao meio físico. O objetivo era fornecer informações úteis aos interessados através da cartografia geotécnica, levando em conta prazos e custos de acordo com a necessidade e possibilidade dos clientes e usuários (Zuquette e Nakazawa, 1998).

Nakazawa et al. (1991) propõem uma sistemática de elaboração de Cartas Geológico-Geotécnicas que visa caracterizar o meio físico, considerando o uso e ocupação do solo, a dinâmica dos processos naturais, os recursos disponíveis e os problemas encontrados, buscando identificar as causas e consequências dos problemas, através da litologia, pedologia, geologia física, entre outros aspectos.

Segundo Zuquette e Nakazawa (1998), a sistemática do IPT busca otimizar as relações entre os esforços de investigação, a qualidade e a utilidade da informação obtida. Assim, os fundamentos básicos dessa metodologia são os seguintes:

- Iniciar os trabalhos a partir de problemas significativos do meio físico presentes no território, para posteriormente identificar suas condicionantes mapeáveis;

- Integrar as formas de uso e ocupação aos processos do meio físico para determinar o desempenho dos terrenos;

- Realizar coletas objetivas e orientadas de dados, com a finalidade de estabelecer unidades geológico-geotécnicas de mesmo comportamento, de modo que elas correspondam a distintas práticas e técnicas de prevenção e correção dos problemas identificados;

- Elaborar cartas geotécnicas de caráter dinâmico, que permitam incorporar novos conhecimentos a respeito do meio físico e novas técnicas de uso e ocupação do solo.

- Nesse contexto, são definidos 4 tipos de Cartas Geológico-Geotécnicas (Proin/Capes e Unesp/IGCE, 1999):

- **CARTAS GEOTÉCNICAS (PROPRIAMENTE DITAS):** expõem as limitações e potencialidades dos terrenos, estabelecendo as diretrizes de ocupação, frente às formas de uso do solo.

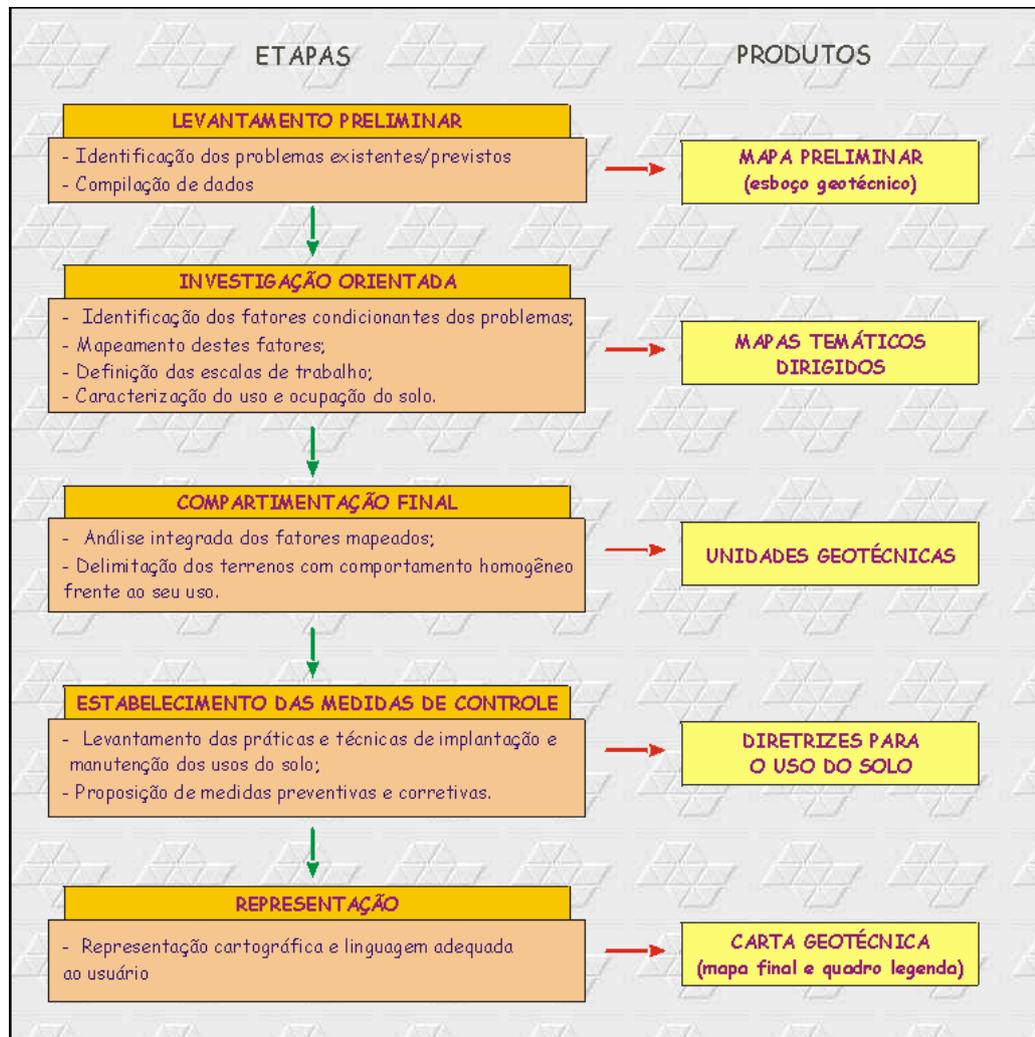
- **CARTAS DE ATRIBUTOS ou PARÂMETROS:** apresentam a distribuição geográfica de características de interesse (atributos, parâmetros geotécnicos) a uma ou mais formas de uso e ocupação do solo.

- **CARTAS DE RISCOS GEOLÓGICOS:** prepondera a avaliação de dano potencial à ocupação, frente a uma ou mais características ou fenômenos naturais ou induzidos pelo uso do solo.

- **CARTAS DE SUSCETIBILIDADE:** informam sobre a possibilidade de ocorrência de um ou mais fenômenos geológicos e de comportamentos indesejáveis, pressupondo uma dada forma de uso do solo.

Diferentemente do modelo da Escola de Engenharia de São Carlos, este método consiste em 5 etapas que são apresentadas na Figura 12. A Tabela 3 apresenta um compartivo deste método com o EESC/USP.

Figura 12: Metodologia IPT



Fonte: Modificada de Prandini et al., 1995; organizada por Fábio Reis (2003)

Tabela 3 – Comparativo EESC/USP e IPT

ASPECTO ABORDADO	EESC/USP	IPT
Escala e Área Total Mapeada (EESC menores que aquelas adotadas pelo IPT)	Mapas geotécnicos (ou cartas) convencionais, com predomínio de escalas de 1:100.000 e 1:50.000, para áreas de maior dimensão, para trabalhos de maior detalhe realizado na escala 1:20.000.	Mapas geotécnicos que, independentemente da dimensão da área de estudo, adotam escalas 1:5.000 e 1:10.000. Embora existam áreas com mapas em diferentes escalas, não há uma relação entre eles.
Número de Zonas/Unidades Geotécnicas Definidas	Apresentam um número elevado de zonas/unidades geotécnicas.	Os mapas apresentam um número relativamente baixo de unidades geotécnicas, não superior 11.
Parâmetros Geotécnicos	A quantificação de parâmetros geotécnicos por meio de ensaios de laboratório é muito utilizada.	Não apresentam quantificação de parâmetros por meio de ensaios de laboratório.
Número de Documentos Cartográficos	Apresentam uma série de mapas/cartas geotécnicas (mapa das condições geotécnicas, mapa de zoneamento geotécnico e mapa de zoneamento geotécnico específico), podendo ser considerada uma grande quantidade.	Em geral, apenas uma carta geotécnica é apresentada ao final dos trabalhos.
Processos Geológicos	Não necessariamente consideram a análise dos processos geológicos instalados e/ou potenciais para a elaboração dos cartogramas.	Na elaboração das cartas, os processos geológicos instalados e/ou potenciais, são sempre considerados desde o início dos trabalhos.
Finalidade	Destinam-se ao planejamento do uso do solo	Apresenta cartas geotécnicas dirigidas, que visam uma aplicação mais imediata, pois parte da identificação dos problemas decorrentes da interação entre o meio físico geológico e a ocupação, busca a correção desses problemas. Também se destinam ao planejamento do uso do solo.
Método	Tem por base as metodologias internacionais clássicas, como IAEG e Sanejuoand.	Dirige o trabalho de forma específica.

Fonte: Modificada de Zaine, 2000. Adaptada pelo autor.

### 2.5.3.2.3 *Davinson Dias*

A metodologia proposta por Davison Dias (1995) surgiu a partir da necessidade de caracterizar grandes áreas de solos tropicais, onde não se tem a possibilidade de realizar um grande volume de ensaios geotécnicos. Sugere o cruzamento dos mapas litológico, oriundo de um mapa geológico, e pedológico para a definição preliminar das unidades geotécnicas com semelhante comportamento do solo relacionando-o com a sua gênese (SBROGLIA, 2015).

Através da Geomorfologia, norteadada pela Pedologia, o mapa possibilita a modelagem de sequências topográficas típicas para cada região de estudo, baseada em curvas de nível e geologia local. Levando-se em consideração que existem variações dos tipos de solos de acordo com a declividade, indiretamente esta metodologia utiliza-se das feições de relevo (landforms) de Zuquette (1987) para caracterizar o solo (HIGASHI, 2006).

Higashi (2006) alerta ainda que as propriedades do solo podem variar de local para local e, portanto, os resultados obtidos através dessa metodologia devem ser usados apenas como subsídio para a estimativa de um comportamento do solo, não podendo ser usados como valores de projeto.

## 2.6 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

Com o grande número de desastres naturais que ocorrem no Brasil, cada vez mais é necessário descobrir meios de prever quando, aonde e de que maneira se dá esses fenômenos. Sendo assim, é de grande interesse de empresas utilizar softwares de mapeamento de áreas que apresentam regiões instáveis e de difícil ocupação. Para compreender melhor a formulação digital dessas ferramentas é necessário compreender os métodos de determinação dos fatores de segurança para analisar a estabilidade de taludes.

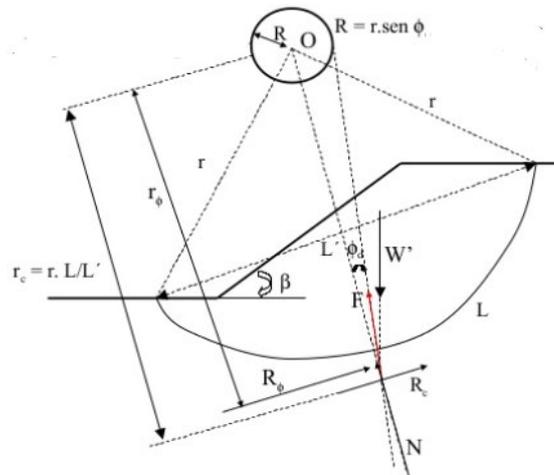
## 2.6.1 Rupturas circulares

### 2.6.1.1 Método de Taylor (1948)

Taylor (1948) foi o primeiro a desenvolver ábacos para o cálculo da estabilidade de taludes. As condições que ele utilizou em sua pesquisa foram bem claras: fator de segurança igual a 1, geometria simples, exemplificada na Figura 13, solo homogêneo e saturado e superfície de ruptura circular (GERSCOVICH, 2016).

Atualmente, esses ábacos encontram-se em desuso devido às várias restrições e por serem somente aplicados à análises de tensões totais, considerando resistência não drenada constante com a profundidade, o que não ocorre com muita frequência em campo (GERSCOVICH, 2016).

Figura 13: Geometria adotada, Método de Taylor (1948)



Fonte: slideshare (MÉNDEZ, 2013)

Com o auxílio dos vários ábacos e da geometria adotada e considerando o fator de segurança igual a 1, são determinados o fator de estabilidade e a altura crítica. Com a altura crítica encontrada, determina-se o fator de segurança, conforme a Equação 4.

$$FS = H_c/H=1 \quad (4)$$

Onde:

$H_c$  = Altura crítica

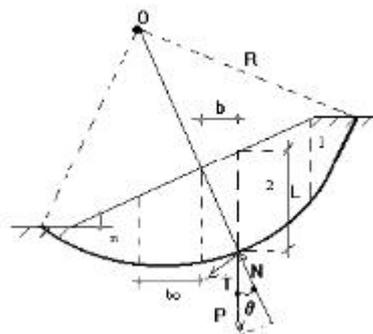
$H$  = Altura do talude

### 2.6.1.2 Método das Fatias

Este método não apresenta restrições quanto à homogeneidade, geometria do talude e nem mesmo o tipo de análise, podendo o talude apresentar uma superfície irregular, além de possibilitar incluir também, a distribuição de poropressão. Por estes motivos, esse é um dos métodos mais utilizado em estudos de estabilidade de taludes (GERSCOVICH, 2016).

A execução deste método consiste em dividir a superfície do talude em várias fatias e aplicar as equações de equilíbrio (somatório das forças verticais, horizontais e momentos iguais a 0), conforme a Figura 13. Ao aplicar todas as equações de equilíbrio são encontradas mais incógnitas do que equações, então são feitas algumas hipóteses simplificadoras para a solução do problema.

Figura 13 - Método das fatias



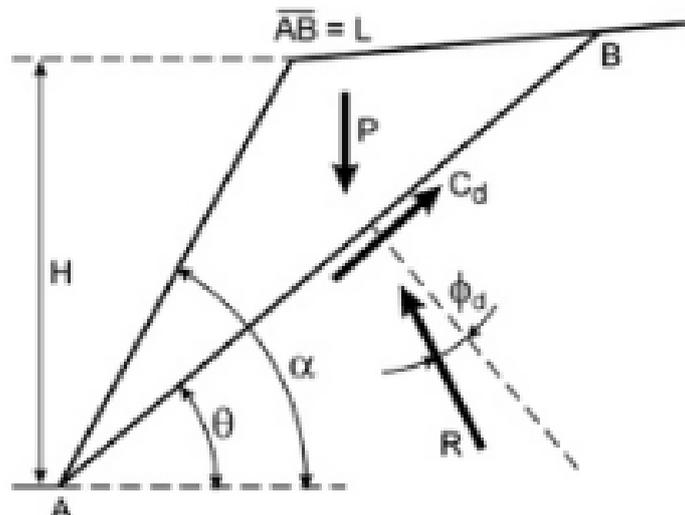
Fonte: ebah (2018)

## 2.6.2 Rupturas planares

### 2.6.2.1 Método de Cullman (1866)

O método de Culmann apoia-se na hipótese de que a superfície de ruptura plana passa pelo pé do talude. Então a massa de solo se comporta como se fosse um corpo rígido deslizando ao longo dessa superfície. A Figura 14 exemplifica esse método com as forças atuantes.

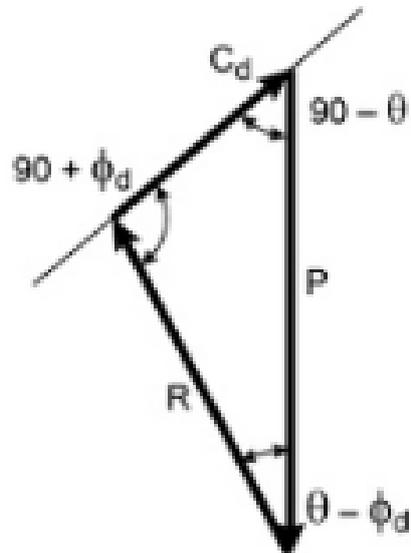
Figura 14- Forças atuantes



Fonte: (MASSAD, 2010)

A partir dessas forças é feito um desenho da forma e disposição conveniente dos triângulos de composição das forças (VARGAS, 1978). Assim, é criado o polígono das forças (Figura 15) e após alguns cálculos e considerações obtém-se a solução analítica de Culmann.

Figura 15 – Polígono das forças



Fonte: (MASSAD, 2010)

Com as transformações adequadas chega-se na Equação 5 que é a solução analítica de Culmann.

$$\frac{c_d}{\gamma H} = \frac{1 - \cos(\alpha - \phi_d)}{4 \operatorname{sen} \alpha * \cos \phi_d} \quad (5)$$

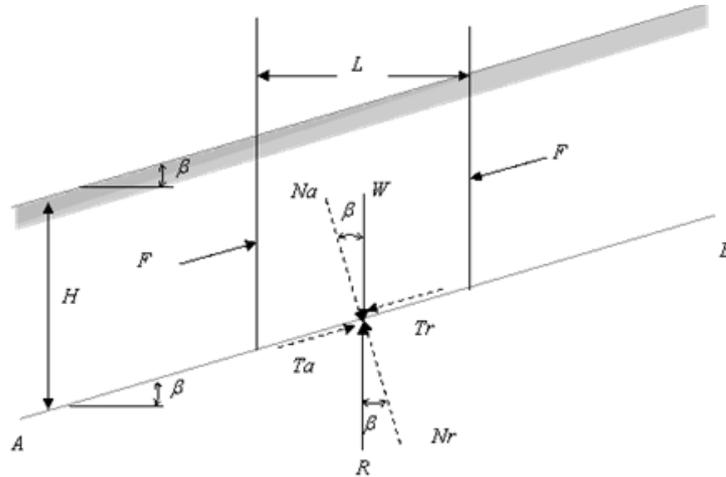
#### 2.6.2.2 Método dos Taludes Infinitos

Segundo Marangon (2009), um talude pode ser definido com infinito quando a relação entre suas grandezas geométricas, extensão e espessura for muito grande. Assim a linha de ruptura é paralela à superfície do terreno.

Com isso, desprezam-se os efeitos de extremidades e assim os esforços podem ser identificados (GERSCOVICH, 2016). Resolvendo o equilíbrio de forças da fatia das Figuras 16 e 17 nas direções paralela e perpendicular à superfície do talude obtém-se as equações para o

cálculo do fator de segurança do método dos taludes infinitos para a situação sem percolação e para a situação com percolação de água, respectivamente.

Figura 16 – Forças que atuam em uma fatia sem percolação



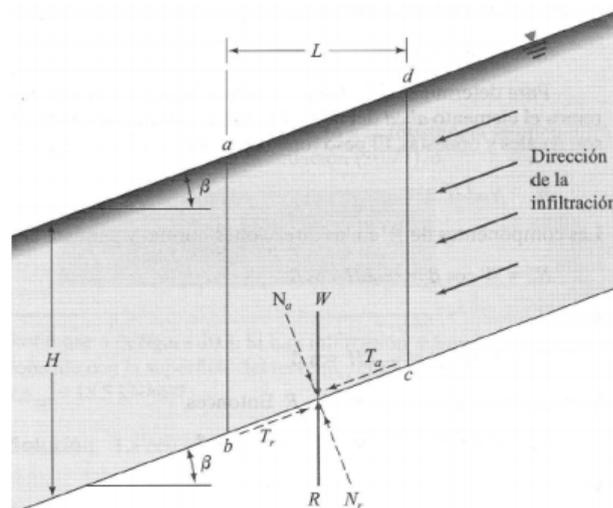
Fonte: (ESPARZAVILI, 2017)

Assim, a partir das devidas substituições, chega-se na expressão para o cálculo do fator de segurança (FS) para tensões efetivas no caso sem percolação de água.

$$FS = \frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (6)$$

Quando se considera a percolação da água, o equilíbrio de forças muda, alterando assim a Equação do fator de segurança (Figura 17).

Figura 17 – Forças que atuam em uma fatia com percolação



Fonte: (ESPARZAVILI, 2017)

Deduzindo-se o equilíbrio de forças, obtém-se a seguinte Equação 7 do fator de segurança para o caso com percolação.

$$FS = \frac{c}{\gamma_{sat} \cdot H \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\gamma' \cdot \tan \emptyset}{\gamma_{sat} \cdot \tan \beta} \quad (7)$$

Onde, para as duas equações 6 e 7:

$c$  = Coesão;  
 $H$  = Profundidade do solo;  
 $\gamma$  = Peso específico do solo;  
 $\gamma'$  = Peso específico efetivo do solo;  
 $\gamma_{sat}$  = Peso específico saturado do solo;  
 $\beta$  = Inclinação do talude;  
 $\emptyset$  = Ângulo de atrito;  
 $FS$  = Fator de Segurança.

Além de identificar a equação do fator de segurança tanto sem percolação de água e com percolação de água, a dedução das forças de equilíbrio nos fornece a equação de resistência ao cisalhamento do solo de acordo com a Figura 18, que é dada de acordo com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb dado pela Equação (3).

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \tan \emptyset \quad (3)$$

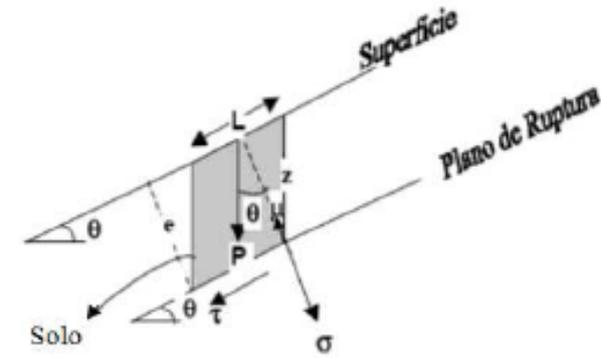
onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento [kPa];  $\sigma$  é a tensão normal [kPa];  $\mu$  é a poropressão [kPa];  $\emptyset$  é o angulo de atrito entre os grãos [graus] e  $c$  é a coesão [kPa].

Na análise de um talude infinito o bloco está inserido no interior do solo. Desse modo, com base na Figura 18 a determinação do valor do peso do bloco ( $P$ ) pode ser feita por meio da Equação (8), colocando-se  $e$  em função de  $z$  ( $e = z \cdot \cos \theta$ ):

$$P = L \cdot \rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta \quad (8)$$

onde  $P$  representa o peso do bloco [N];  $L$  o comprimento do bloco [m];  $\rho_s$  a densidade do solo [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $g$  a aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];  $z$  a espessura vertical do bloco [m] e  $\theta$  a declividade [graus].

Figura 18 – Diagrama das forças método dos taludes infinitos



Fonte: adaptado de Gomes, 2006.

A poropressão ( $\mu$ ) ilustrada na Figura 18 é caracterizada pela pressão  $a$  que está submetida a água situada nos poros do solo e atua no sentido de aliviar a tensão normal do solo. Esta variável pode ser expressa por:

$$\mu = \rho_a \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta \quad (9)$$

onde  $\rho_a$  é a densidade da água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] e  $h$  é a altura da coluna d'água dentro da camada de solo [m].

Redistribuindo as Equações (3), (8) e (9) com outros elementos do diagrama de forças tem-se a Equação 10.

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = c' + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_a \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \tan \emptyset \quad (10)$$

### 2.6.3 SHALSTAB

O modelo SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) foi desenvolvido por Montgomery e Dietrich em 1994, sendo posteriormente automatizado para a sua utilização em ambiente SIG.

O modelo SHALSTAB é um método determinístico, direcionado à identificação de locais com predisposição a deslizamentos translacionais. Esse modelo resultou da combinação do modelo de estabilidade de encosta, que utiliza o método dos taludes infinitos, e um modelo hidrológico que permitem prever a ocorrência de um deslizamento translacional em função dos picos de precipitação. (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; FERNANDES et al., 2001; VIEIRA e MARTINS, 2016). Sendo assim, o modelo incorpora em suas análises a declividade e a área de contribuição da bacia de forma espacializada, contudo, as variáveis referentes ao solo (coesão, ângulo de atrito, densidade e espessura) são mantidas constantes ao longo da área (REGINATTO, 2013). Desse modo, a resposta do modelo se dá em função de um parâmetro livre “q/T” (quantidade de chuva/transmissibilidade do solo), o qual fornece sete classes de estabilidade.

#### 2.6.3.1 Modelo de estabilidade de encostas

Como já mencionado, o modelo SHALSTAB se baseia no critério de ruptura de Mohr-Coulomb e utiliza a Equação (10) do método dos taludes infinitos para dar sequência a sua formulação matemática.

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = c' + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_a \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \tan \emptyset \quad (10)$$

O modelo SHALSTAB expressa a Equação (10) em função de h/z, denominado proporção da coluna de solo saturado, por meio da Equação (11).

$$\frac{h}{z} = \frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \emptyset} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \emptyset}\right) \quad (11)$$

Onde:

c = Coesão;

h = Altura do talude;

$\rho_s$  = Peso específico do solo;

$\rho a$  = Peso específico da água;  
 $g$  = aceleração da gravidade;  
 $\theta$  = Inclinação do talude;  
 $\emptyset$  = Ângulo de atrito.

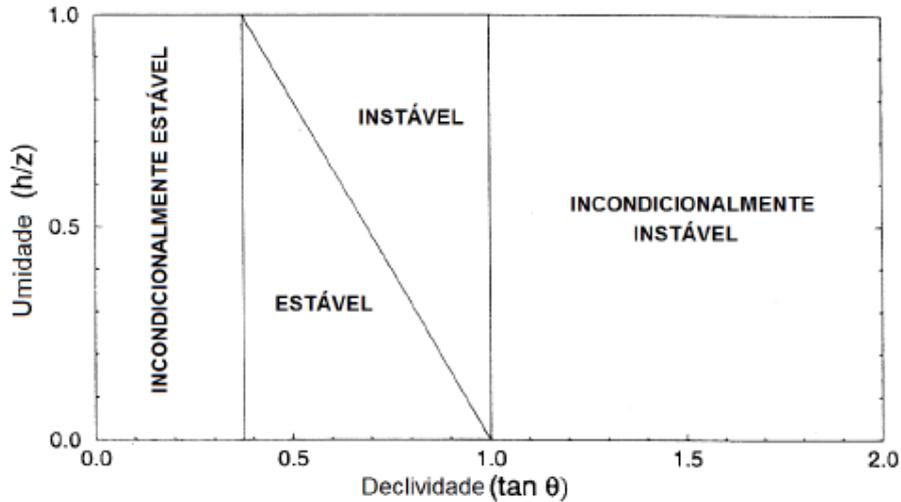
Esta equação ainda pode ser representada considerando a inexistência da coesão do solo conforme a Equação (12).

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho s}{\rho a} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset}\right) \quad (12)$$

De acordo com Caraméz (2017), essa simplificação máxima é claramente equivocada na maioria das aplicações. Embora os solos pedregosos, solos arenosos e solos com presença de sedimentos de rochas e minerais apresentem, teoricamente, valores baixos de coesão, podendo ser admitidos como um termo coesivo adicional na Equação (3), o mesmo desempenha um papel importante na estabilidade dos taludes.

A partir dessas equações, assume-se que o plano de ruptura e o movimento subsuperficial do deslizamento ocorrem paralelamente à declividade do terreno. Sendo assim, o modelo pode atribuir, para diferentes regiões, um grau incondicional de estabilidade e instabilidade variando os valores da  $\tan\theta$ . A primeira situação ocorre quando a razão  $h/z$  é igual a 1, considerando  $\tan\theta = 0$ , isto é, um solo com declividade nula caracterizando-o como incondicionalmente estável (ou seja, o relevo da encosta é tão suave que não ocorrerá ruptura mesmo se o solo estiver saturado). A segunda situação acontece quando a razão  $h/z$  é igual a 0, isto é, quando a declividade equivalente ao ângulo de atrito do solo, considerando incondicionalmente instável (ou seja, a declividade da encosta é elevada, propicia a ruptura mesmo se o solo estiver praticamente seco). A Figura 19 ilustra as zonas de estabilidade indicando a relação entre  $h/z$  e  $\tan\theta$  para um ângulo de atrito interno ( $\emptyset$ ) igual a  $45^\circ$  e massa específica do solo  $\rho s$  igual a  $1,6 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 19 – Zonas de estabilidade modelo SHALSTAB



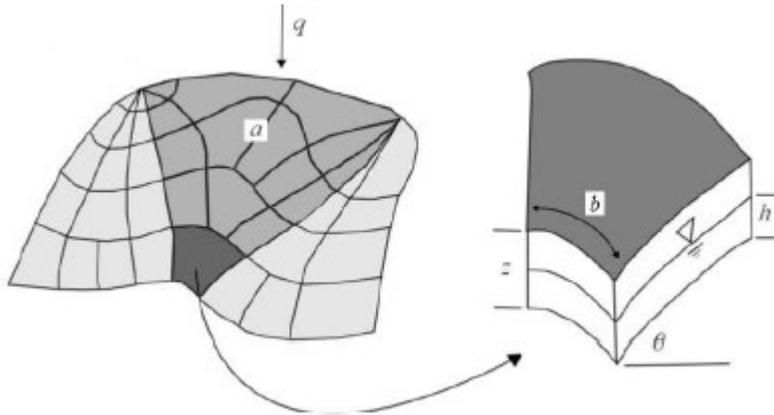
Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

### 2.6.3.2 Modelo hidrológico

O modelo hidrológico baseia-se nos princípios de Beven e Kirkby (1979), os quais demonstram que a saturação de um solo em função da topografia está relacionada com a razão da área de drenagem que capta a água ( $a$ ) que é conduzida ao local de escoamento a jusante passando por uma unidade de comprimento de contorno ( $b$ ) pela declividade da encosta ( $\theta$ ) (Figura 20).

A partir daí O'Loughlin (1986) descreve esse modelo assumindo um estado uniforme de recarga que representa o padrão da variação da umidade do solo, ou seja, a parcela saturada que ocorre durante os períodos de alta precipitação. A Figura 20 representa as grandezas envolvidas nessa simulação, onde  $q$  é a taxa de recarga uniforme,  $a$  é a área de contribuição,  $b$  é o comprimento do contorno unitário,  $z$  é a espessura do solo,  $h$  é a altura de coluna de água e  $\theta$  é a declividade.

Figura 20 – Modelo hidrológico no estado uniforme



Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1994)

No modelo SHALSTAB, assume-se que a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) é constante para toda camada de solo acima da rocha impermeável e as equações de quantidade total de água que entra ( $Q_e$ ) e que sai ( $Q_s$ ) são descritas pelas Equações 13 e 14.

$$Q_e = q \cdot a \quad (13)$$

$$Q_s = v \cdot S \quad (14)$$

Tem-se também que:

$$v = K_s \cdot i \quad (15)$$

$$S = h \cdot \cos \theta \quad (16)$$

Onde  $Q_s$  é a quantidade total de água que sai [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $Q_e$  é a quantidade total de água que entra [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $q$  é a taxa de recarga uniforme [ $\text{mm}/\text{d}$ ];  $a$  é a área de contribuição [ $\text{m}^2$ ];  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada [ $\text{m}/\text{d}$ ];  $v$  é a velocidade do fluxo [ $\text{m}/\text{s}$ ];  $h$  é a altura da coluna de água [ $\text{m}$ ];  $i$  é o gradiente hidráulico [ $\text{m}/\text{m}$ ];  $\theta$  é a declividade [graus];  $S$  é a área de seção saturada [ $\text{m}^2$ ];

O gradiente hidráulico ( $i$ ) é o quociente entre a carga hidráulica e o comprimento do meio poroso a ser percorrido. A carga hidráulica é representada pela diferença altimétrica entre o ponto inicial e o ponto final do escoamento, e o comprimento do meio poroso pelo comprimento da encosta. Desta maneira,  $i$  pode ser representado por  $\sin\theta$ . Assim,

acrescentando o comprimento do contorno ( $b$ ), a quantidade total da água que sai ( $Q_s$ ) é expressa pela Equação 17.

$$Q_s = K_s . h . \sin \theta . \cos \theta . b \quad (17)$$

Para critérios de pesquisa, considerou-se nesse trabalho a condição uniforme, ou seja,  $Q_e = Q_s$ , deste modo, reajustando as equações (13) e (17), tem-se a Equação 18.

$$q . a = K_s . h . \sin \theta . \cos \theta . b \quad (18)$$

Para completar nossa formulação matemática devemos considerar como o solo distribui a água pelo sistema, isto é, sua transmissividade ( $T$ ) que é dada pela multiplicação de  $K_s$  por  $e$ . Porém, como já mencionado, podemos substituir  $e$  por  $z . \cos \theta$  resultando na Equação 19.

$$T = K_s . z . \cos \theta \quad (19)$$

Considerando a condição saturada do sistema a Equação (17) pode ser reescrita conforme a Equação 20.

$$Q_{s_{m\acute{a}x}} = K_s . z . \sin \theta . \cos \theta . b \quad (20)$$

Desta forma, substituindo a Equação (19) em (20) tem-se a Equação 21.

$$Q_{s_{m\acute{a}x}} = T . b . \sin \theta \quad (21)$$

Dado por O'Loughlin a fórmula da umidade ( $W$ ) para um solo saturado é expressa na Equação 22.

$$W = \frac{Q_e}{Q_{s_{m\acute{a}x}}} = \frac{q . a}{T . b . \sin \theta} \quad (22)$$

Substituindo as equações (18) e (19) em (22), tem-se a Equação 23.

$$W = \frac{K_s . h . b . \sin \theta . \cos \theta}{K_s . z . b . \sin \theta . \cos \theta} \quad (23)$$

Assim, resolvendo a Equação (23), é possível colocar o modelo hidrológico em função  $h/z$ , que representa a proporção saturada da espessura do solo, conforme Montgomery e Dietrich (1994).

$$W = \frac{h}{t} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} \quad (24)$$

### 2.6.3.3 Combinação do modelo de estabilidade de taludes e modelo hidrológico

Como já mencionado a formulação do SHALSTAB consiste na combinação de dois modelos, o de estabilidade de taludes e o modelo hidrológico que se relacionam a partir da razão  $h/z$ , igualando as Equações (11) e (24) para se obter a Equação 25.

$$\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} = \frac{c'}{\rho a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \text{tg} \varphi} + \frac{\rho s}{\rho a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta}\right) \quad (25)$$

Como já mencionado, no item 2.6.3, a resposta do modelo se dá através do parâmetro livre  $q/T$ , sendo assim:

$$\frac{q}{T} = \frac{b \cdot \sin \theta}{a} \cdot \left[ \frac{c'}{\rho a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \text{tg} \varphi} + \frac{\rho s}{\rho a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta}\right) \right] \quad (26)$$

De acordo com Montgomery e Dietrich (1994) recomendam que para o cálculo de  $q/T$  é necessário utilizar os valores em escala logarítmica, conforme apresentado na Equação 27.

$$\text{Log} \frac{q}{T} = \frac{b \cdot \sin \theta}{a} \cdot \left[ \frac{c'}{\rho a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \text{tg} \varphi} + \frac{\rho s}{\rho a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta}\right) \right] \quad (27)$$

Segundo Dietrich e Montgomery (1998), o modelo calcula o grau de suscetibilidade a deslizamentos translacionais para cada célula (pixel) dentro de uma malha (grid). Deste modo, a partir da Equação (27), Montgomery e Dietrich (1994) determinaram classes de estabilidade em função do parâmetro livre  $q/T$ , que são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Talude infinito sob diferentes condições

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

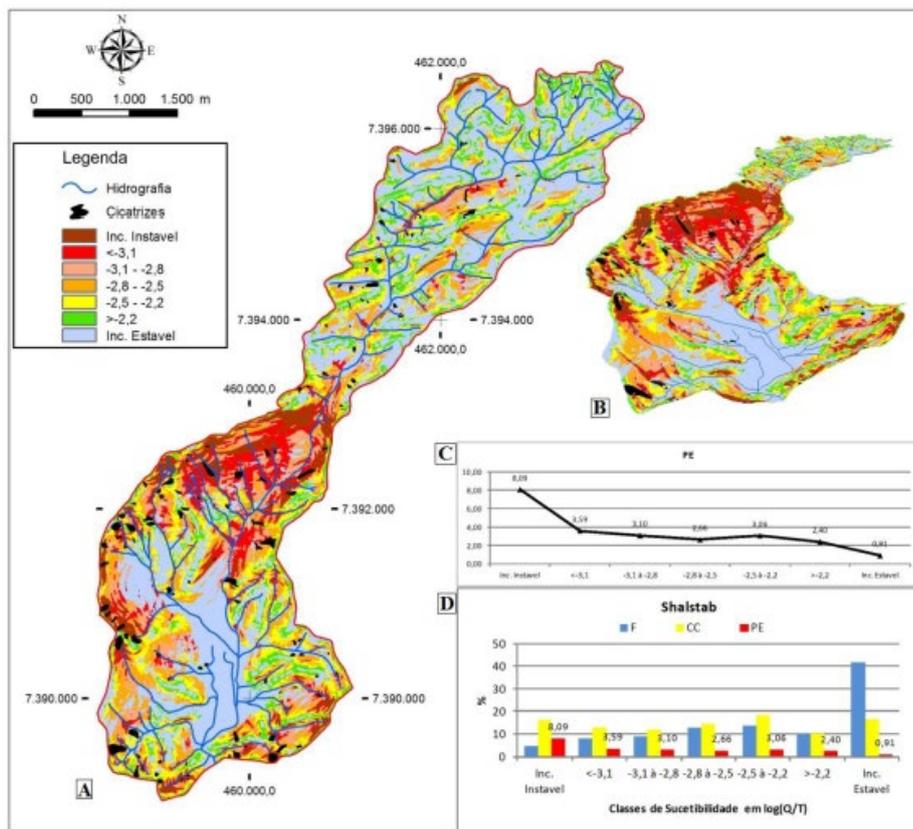
Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998)

#### 2.6.3.4 Aplicações

Cada vez mais o uso dessas ferramentas se torna necessário no estudo de geoprocessamento em obras de engenharia principalmente no que diz respeito a identificação de áreas de risco de tal maneira que o modelo matemático consegue prever de maneira precisa o nível de instabilidade de uma determinada região, assim, permitindo que medidas de segurança sejam tomadas antes mesmo de acontecer.

Ramos e Vieira (2015) estabeleceram um estudo na Serra do mar (SP) onde conseguiram analisar a suscetibilidade de deslizamentos de maneira satisfatória através do modelo SHALSTAB. Nessa pesquisa foi considerada uma área de estudo dentro da bacia hidrográfica do Rio da Guaxinduba. Com o auxílio do MDT foram gerados mapas da área de contribuição e o mapa de declividade que foram posteriormente agregados ao modelo matemático SHALSTAB. Os resultados dessa pesquisa são apresentados na Figura 21, onde é possível observar as 7 diferentes classificações desse modelo.

Figura 21 – Mapa de suscetibilidade Serra do Mar

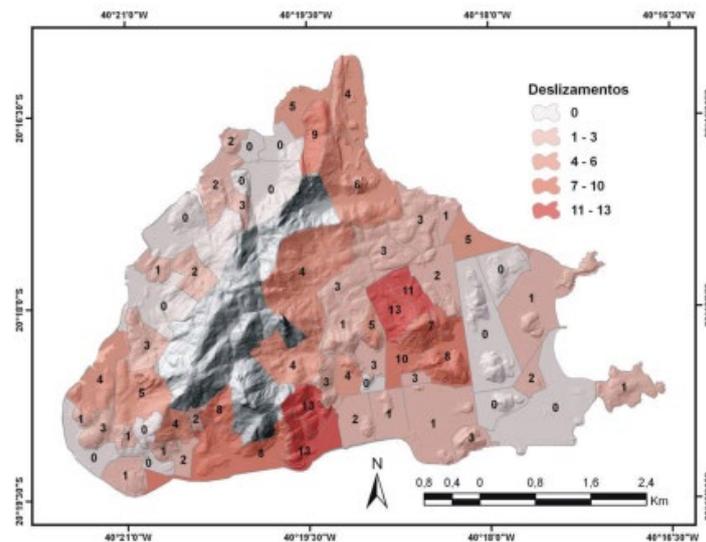


Fonte: Ramos e Vieira (2015)

As discussões dos autores com relação aos resultados foi uma comparação com a pesquisa de Vieira (2007), onde se estabeleceu condições parecidas de geologia, vegetação e relevo na Serra de Cubatão e que ambos os autores acharam valores parecidos de grau de instabilidade para as regiões em questão. De acordo com os autores, os valores mais relevantes para validação dos mapas de suscetibilidade, por considerar o número de células de cada classe afetada pelas cicatrizes e o total de células dessa mesma classe, confirmaram a eficiência do modelo SHALSTAB para previsão de deslizamentos translacionais.

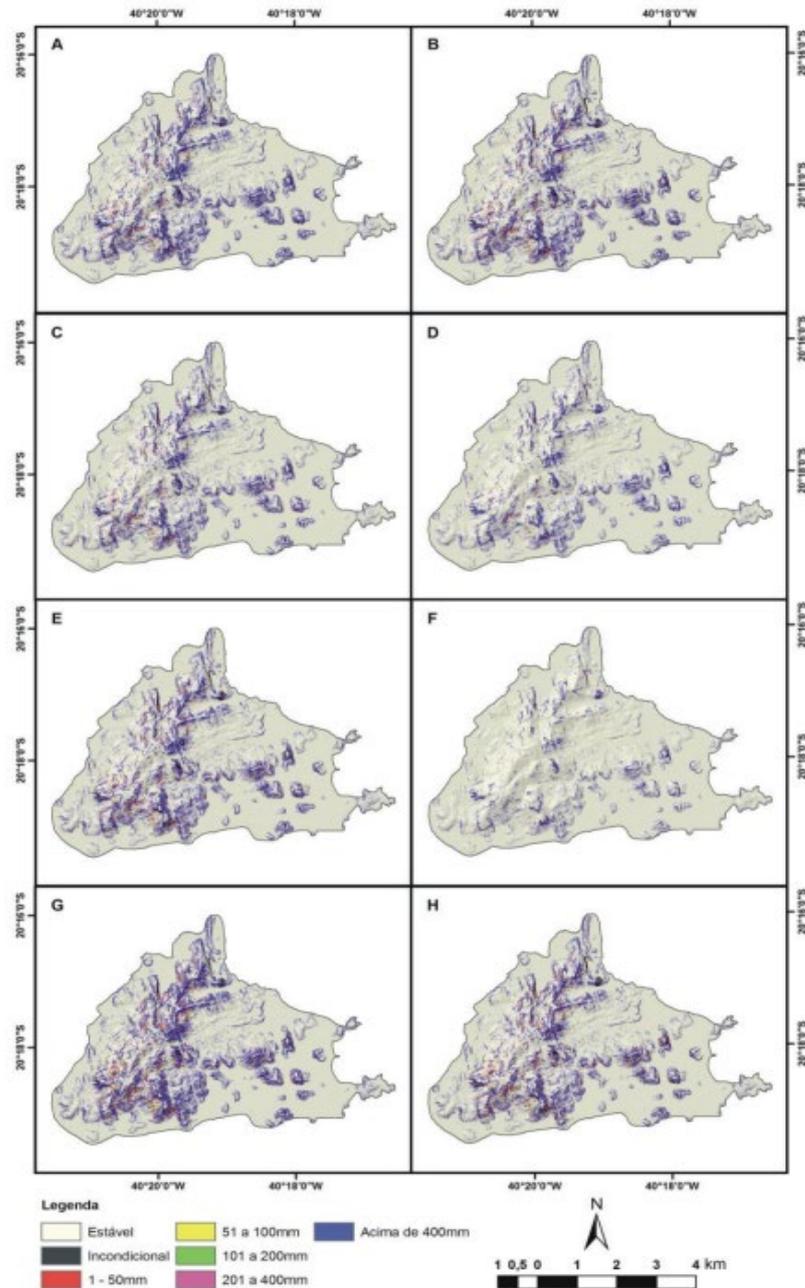
Outro estudo que foi realizado em uma região costeira é o de Lima e Silva et al. (2013), onde os autores caracterizaram a suscetibilidade de deslizamentos translacionais em Vitória – ES. A pesquisa surgiu da necessidade de explorar melhor o território do município principalmente pelo aumento populacional de Vitória que ocorreu entre as décadas de 60 e 70, devido à transferência da base econômica, essencialmente cafeeira, para a atividade industrial e esse aumento culminou, em muitos casos, na ocupação desordenada do solo, inclusive em encostas, ampliando o risco de deslizamentos (IJSN, 2008). Com o auxílio do SHALSTAB foram realizadas 8 simulações para diferentes cenários, variando os parâmetros de resistência, com intuito de mapear as regiões onde existe maiores tendências a sofrerem deslizamentos. Diferentemente da pesquisa realizada por Ramos e Vieira (2015), o mapa gerado foi comparado com regiões onde já havia sido registrado algum tipo de deslizamento, pois na área de estudo nunca havia sido realizado um mapeamento deste tipo. A Figura 22 apresenta a quantidade de deslizamentos por bairro no município de Vitória e a Figura 23 os resultados do mapeamento.

Figura 22 – Registro de deslizamentos por bairro em Vitória - ES



Fonte: Lima e Silva, Eliane; Trancoso Gomes, Roberto Arnaldo; Fontes Guimarães, Renato; de Carvalho Júnior, Osmar Abílio (2013)

Figura 23 – Mapeamento de áreas com suscetibilidade a deslizamentos translacionais em Vitória -ES



Fonte: Lima e Silva, Eliane; Trancoso Gomes, Roberto Arnaldo; Fontes Guimarães, Renato; de Carvalho Júnior, Osmar Abílio (2013)

A discussão dos autores acerca dos resultados foi que o mapeamento específico das cicatrizes é fundamental para avaliar o grau de acerto do modelo e que apesar de não se poder fazer um teste de validação por não existir um mapeamento prévio, a pesquisa foi de grande importância para a gestão do município, pois permitiu orientar ações de prevenção, preparação e resposta às emergências e com isso aprimorar as políticas públicas locais de gestão de risco de desastres.

Assim como o objeto desta pesquisa é comparar dois métodos de mapeamento geotécnico, outras pesquisas também o fizeram. MICHEL, KOBIYAMA E GOERL (2012) realizaram uma comparação entre dois modelos de estabilidade de encosta, SHALSTAB e SINMAP (*Stability Index Mapping*), que consideram aspectos hidrológicos, pedológicos e topográficos da bacia em suas formulações. Os modelos foram aplicados à bacia do Rio Cunha, município de Rio dos Cedros/SC, onde inúmeros deslizamentos foram registrados em novembro de 2008. O modelo SINMAP trabalha em termos de limites máximos e mínimos para seus parâmetros. De acordo com os autores, o índice de estabilidade (SI) é definido como a probabilidade de uma região ser estável, assumindo distribuições uniformes de parâmetros sobre esses intervalos de incerteza. Normalmente, os valores de SI podem variar entre 0 (mais instável) e 1 (menos instável). A formulação final do SINMAP é muito parecida com a do SHALSTAB, define 6 classes de estabilidade (Tabela 5) e é representada pela Equação 28.

$$FS = \frac{c_a + \cos \theta \cdot \left[ 1 - \text{Min} \left( \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta}, 1 \right) \cdot r \right] \cdot \tan \phi}{\sin \theta} \quad (28)$$

Onde  $c_a$  é a forma adimensional da coesão ( $c_a = \left( \frac{c_r + c_s}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta} \right)$ ) e  $r$  é a relação entre a densidade da água e a densidade do solo úmido ( $r = \frac{\rho_w}{\rho_s}$ ).

As Figuras 24 e 25 representam os mapas gerados a partir desses dois modelos e a Tabela 5 as definições dos índices de estabilidade para o modelo SINMAP.

Figura 24 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos usando SHALSTAB

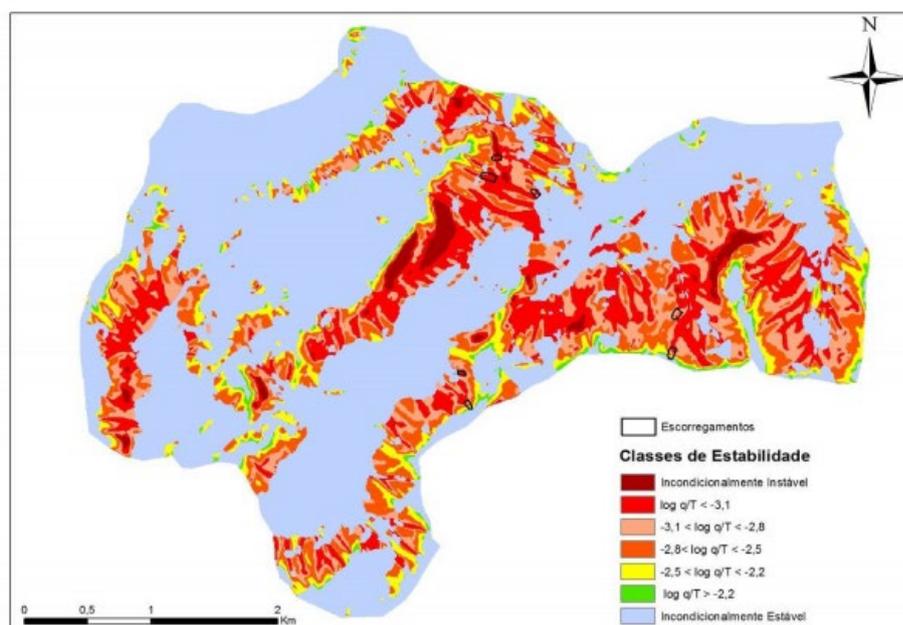
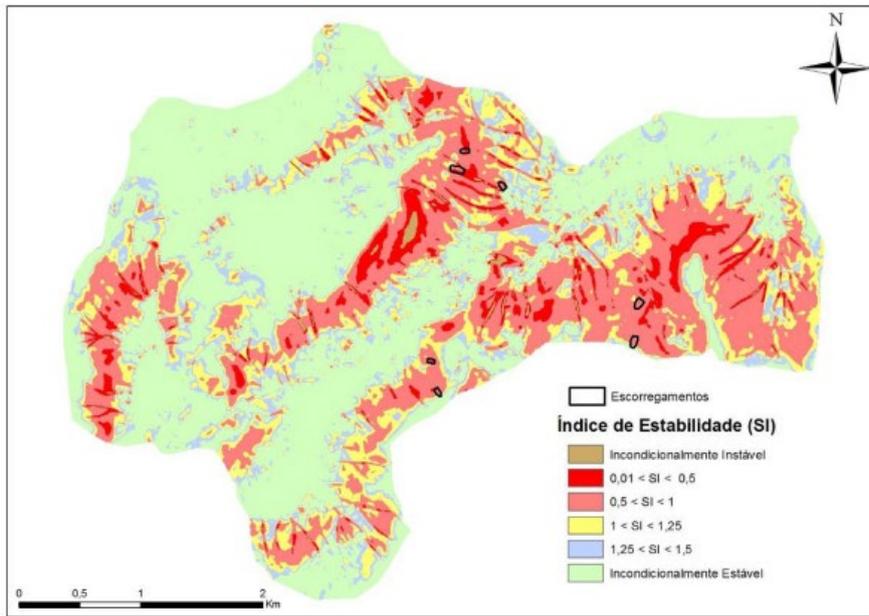


Figura 25 – Mapa de suscetibilidade a deslizamento usando SINAMP



Fonte: Michel, Kobiyama e Goerl (2012)

Tabela 5 – Definição das classes de estabilidade SINMAP

Índice de Estabilidade	Classes de Estabilidade	Intervalo dos Parâmetros	Possível influência de fatores não modelados
$SI > 1,5$	Incondicionalmente Estável	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes significativos para gerar instabilidade
$1,5 > SI > 1,25$	Estabilidade moderada	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes moderados para gerar instabilidade
$1,25 > SI > 1,0$	Estabilidade baixa	Instabilidade não prevista	São necessários fatores desestabilizantes mínimos para gerar instabilidade
$1,0 > SI > 0,5$	Limiar inferior de instabilidade	Combinação pessimista prevê instabilidade	Fatores desestabilizantes não são necessários para gerar instabilidade
$0,5 > SI > 0,0$	Limiar superior de instabilidade	Combinação otimista prevê estabilidade	Fatores estabilizantes podem gerar estabilidade
$0,0 > SI$	Incondicionalmente Instável	Estabilidade não prevista	Fatores estabilizadores são necessários para gerar estabilidade

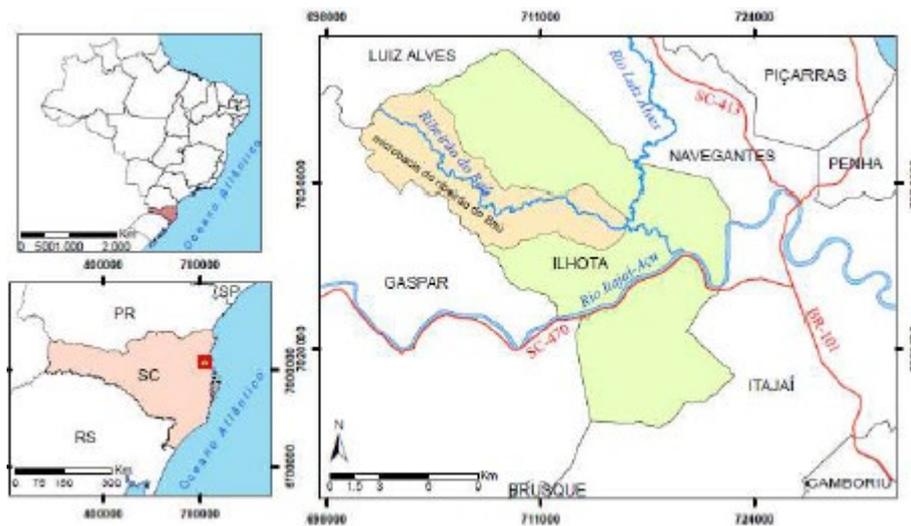
Fonte: Michel, Kobiyama e Goerl (2012)

De acordo com os autores, o SHALSTAB demonstrou melhor desempenho na identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos. Entretanto, recomenda-se o uso do SINMAP para fins menos específicos como zoneamento de perigo e orientação da expansão urbana.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Ribeirão do Baú é um rio dentro do estado de Santa Catarina situado no município de Ilhota e tem aproximadamente 25 km de extensão. A área em questão nesse estudo localiza-se a noroeste do município, totalizando uma microbacia de aproximadamente 62 km<sup>2</sup> (Figura 22).

Figura 26 - Localização microbacia Ribeirão do Baú, Ilhota - SC



Fonte: Sbroglia (2015)

#### 3.1 Clima e vegetação

De acordo com a classificação de A. Strahler, a área de estudo apresenta um clima subtropical úmido, característico da porção Sul do Brasil. A massa de ar predominante é a Tropical Atlântica, com influência de massas polares durante o inverno, de modo que o encontro dessa frente polar com frentes quentes provoca as chamadas *chuvas frontais*. Nessa faixa climática, as chuvas são constantes e bem distribuídas ao longo do ano, existindo secas apenas em casos de anomalias climáticas eventuais. O índice médio de pluviosidade anual gira em torno de 1500 mm e as temperaturas médias variam entre 18 e 22°C mensais.

A área de estudo está inserida no Bioma Mata Atlântica, na fitofisionomia classificada como Floresta Ombrófila Densa nas formações Submontana e Montana (IBGE, 2012), desde áreas com maciços preservados, como no Parque Botânico Morro do Baú, até áreas em estágio inicial de regeneração, em propriedades agrícolas.

### 3.2 Geomorfologia

Com relação a geomorfologia, de acordo com o mapeamento realizado pelo projeto “Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (Complexo do Morro do Baú), SC” em escala original 1:50.000; na microbacia ocorrem as seguintes feições: Montanhas, morros, colinas associadas a gnaisse e a núcleos maficos-ultramaficos (pertencentes ao domínio morfoestrutural Embasamentos em Estilos Complexos); Montanhas, morros, colinas associadas a arenitos, a folhelhos e a conglomerados (pertencentes a Coberturas Molassoides e Vulcanitos associados); Planícies aluviais e Rampas de colúvio (pertencentes a Depósitos Sedimentares Quaternários).

### 3.3 Geologia e litologia

A microbacia do Ribeirão Baú, ainda de acordo com o mapa elaborado pelo projeto “Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (Complexo do Morro do Baú), SC”, é composta pelos seguintes domínios geológicos e litológico.

- O Complexo Granulítico que está cortado por diversas falhas e zonas de cisalhamento. Estas estruturas controlam os vales fluviais profundos e retilíneos que apresentam encostas com altas declividades, onde ocorrem grandes movimentos de massa condicionados pelo relevo acidentado associado a grandes espessuras no manto de intemperismo (TOMAZOLLI, 2012). Predominam as rochas metamórficas de fácies granulito, retrometamorfisadas ou não para as fácies de xisto verde.

- O Grupo Itajaí é constituído, predominantemente, por rochas metassedimentares anquimetamórficas (com metamorfismo incipiente), representadas principalmente por argilitos, siltitos e arenitos de natureza turbidítica, associadas com rochas vulcânicas e subvulcânicas de composição riolítica dominante sobre os termos básicos, com raras camadas de tufos finos.

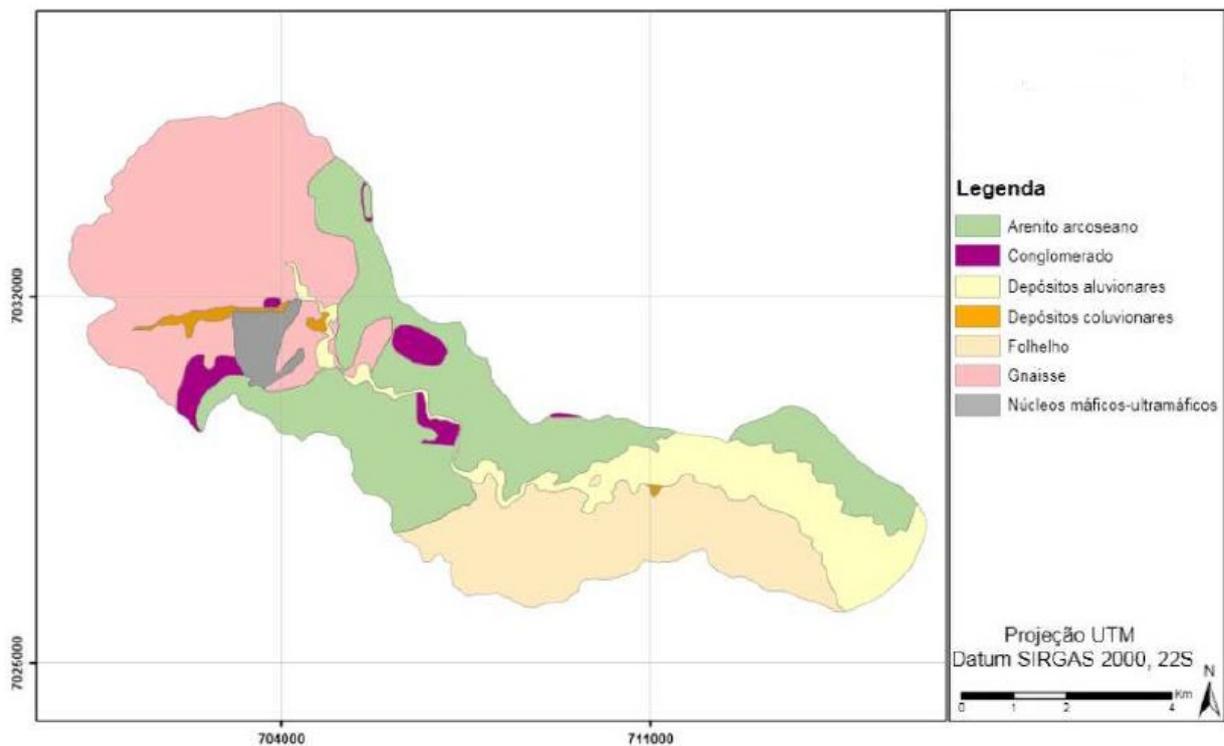
- O Conglomerado Baú, situado na porção basal no Grupo Itajaí, está representado por conglomerados petromíticos. Essas rochas ocorrem em camadas superpostas com pequenas médias de inclinações para sul-sudeste, constituindo elevações do tipo mesa, estes raros, ou em forma de cuesta, devido às inclinações mais pronunciadas. O próprio Morro do Baú pode ser interpretado como uma elevação desse tipo. É constituído pela superposição de camadas

inclinadas de conglomerado e arenito que, nesse caso, estão mais fortemente cimentadas por sílica, conferindo grande resistência dessas rochas à erosão diferencial.

- Por fim temos os depósitos aluvionares quaternários que são constituídos por sedimentos argilosos, silticos, arenosos ou cascalhos inconsolidados, depositados no fundo dos vales. Localizam-se em maior área a leste da microbacia – nas áreas mais baixas, na jusante do Ribeirão Baú.

A Figura 27 apresenta as rochas predominantes de cada unidade geológica na microbacia do Ribeirão do Baú.

Figura 27 - Mapa litológico microbacia Ribeirão do Baú

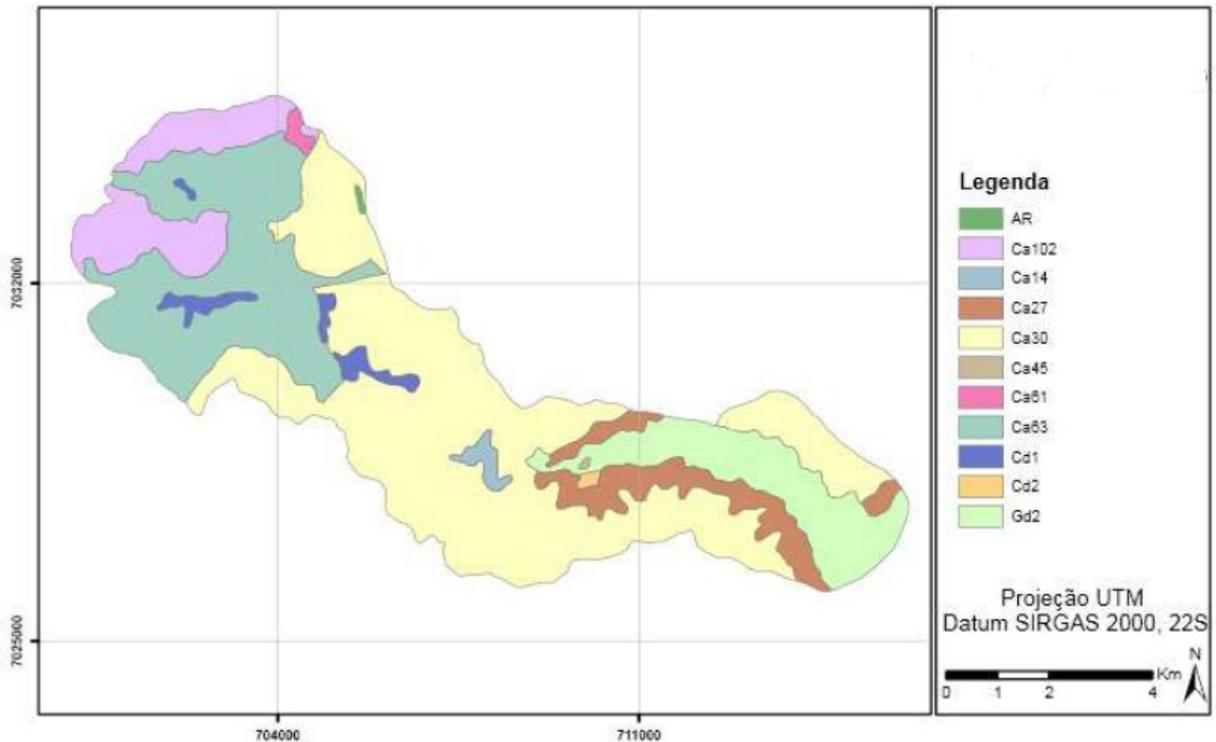


Fonte: Sbroglia (2015)

### 3.4 Pedologia

A classificação dos principais tipos de solo encontrados na região são: Gleissolo distrófico (Gd2), Cambissolo, diferenciado em álicos (Ca14, Ca27, Ca30, Ca45, Ca61, Ca63 e Ca102) e distrófico (Cd1 e Cd2). Nas siglas a letra maiúscula representa os tipos de solo (Gleissolo ou Cambissolo), a letra minúscula as características de fertilidade e o número as informações referentes a textura e relevo, conforme o mapeamento realizado pelo projeto GERCO - 3a fase em 2003, em escala 1:100.000.

Figura 28 - Mapa pedológico microbacia Ribeirão do Baú



Fonte: Sbroglia (2015)

Os Cambissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial - exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura – (EMBRAPA, 2013). São encontrados em condições climáticas variadas, tendo em vista essa diversidade, são classificados em álicos, distróficos e eutróficos.

Os Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50 cm da superfície do solo ou a profundidades entre 50 cm e 150 cm desde que imediatamente abaixo do horizonte A ou E ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos (EMBRAPA, 2013). São medianamente profundos, mal drenados e com permeabilidade muito baixa. Possuem textura variável, mas com predomínio das frações argila e silte sobre a fração areia no horizonte subsuperficial.

O Afloramento Rochoso compõe a parte superior do Morro Baú, onde há exposição da rocha conglomerado e arenito. Aparecem comumente associados aos solos Litólicos com relevo montanhoso e/ou escarpado.

Para critérios de pesquisa, foi feita uma simplificação da classificação das unidades pedológicas da área de estudo, os quais são representadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação pedológica simplificada

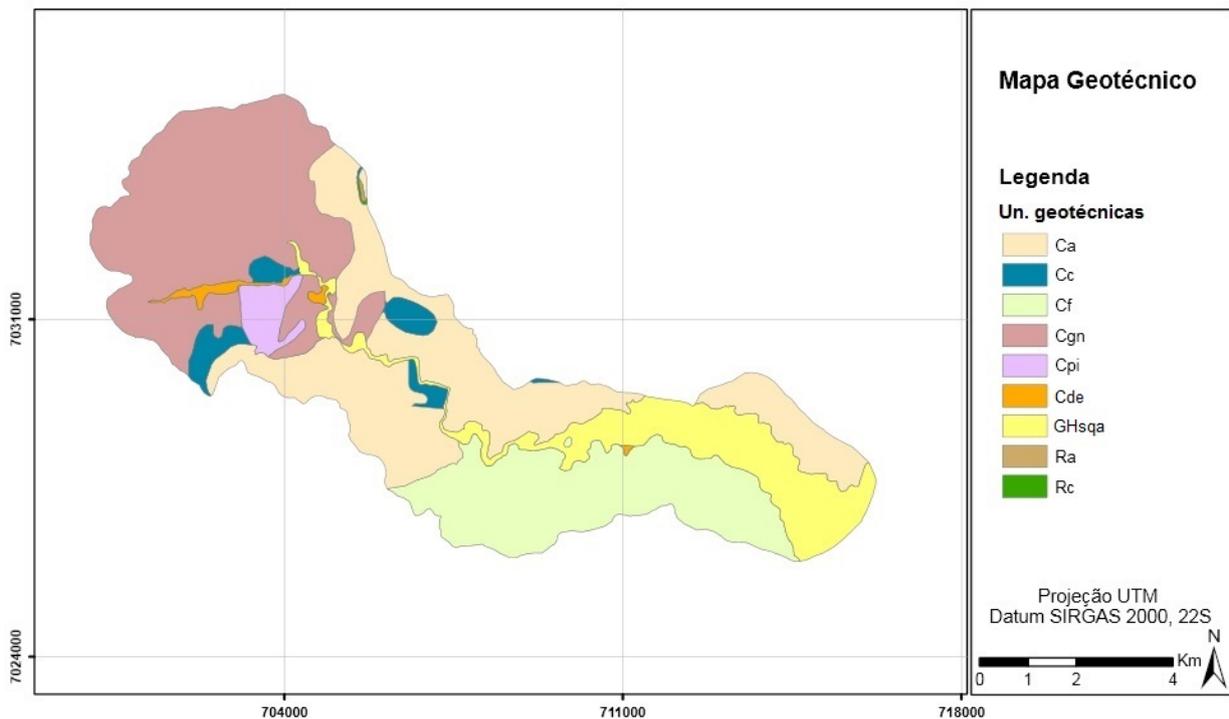
Pedologia	Propriedades	Sigla Original	Primeira Generalização	Segunda Generalização
Cambissolo	Álico	Ca14	Ca	C
		Ca27		
		Ca30		
		Ca45		
		Ca61		
		Ca63		
	Ca102			
	Distrófico	Cd1	Cd	
		Cd2		
Gleissolo	Distrófico	Gd2	Gd	GH
Afloramento Rochoso			AR	R

Fonte: Sbroglia (2015)

### 3.5 Mapa Geotécnico

Estão apresentadas na Figura 29 e Tabela 7 as unidades geotécnicas encontradas na região da área de estudo e sua caracterização.

Figura 29 – Mapa geotécnico da área de estudo



Fonte: Sbroglia (2015)

Ca – Cambissolo com substrato de arenito: Corresponde a 29,6% da área da microbacia. É formada por solo residual e constituído pela rocha arenito arcoseano, pertencente ao Grupo Itajai. O termo arenito corresponde a areia litificada. A rocha é composta por quartzo, feldspato (ou outros minerais de origem ígnea) e fragmentos líticos. Os arenitos arcoseanos ou arcósios contém mais de 25% de feldspato de origem detrítica. O arcósio típico é uma rocha de granulação grossa e coloração cinza ou rosea-avermelhada, esta última atribuída a fragmentos de feldspatos potássicos (SBROGLIA, 2015).

Cc – Cambissolo substrato conglomerado: Corresponde a 3,4% da área de estudo. Seu substrato é composto pela rocha conglomerado, pertencente ao Grupo Itajaí. É uma rocha derivada de depósito fluvial formado num ambiente de águas muito agitadas (alta energia) que já passou por diversos processos de deformação devido a reativação da bacia do Itajaí (SBROGLIA, 2015).

Cf – Cambissolo substrato folhelho: Representa 19,7% da área de estudo. Seu substrato é composto pela rocha folhelho, pertencente ao Grupo Itajaí. Folhelhos são rochas sedimentares detríticas, ricas em elementos de fração fina, como os siltes e argilas. Uma de suas características mais marcantes é a propriedade que algumas rochas possuem de se partir facilmente em placas com superfícies planas aproximadamente paralelas e finamente espaçadas, oriunda da orientação paralela dos constituintes micáceos durante o processo de deposição, compactação e com a concomitante recristalização (SBROGLIA, 2015).

Cgn – Cambissolo substrato gnaíse: Corresponde a 30,8% O substrato dessa unidade geotécnica é composto pela rocha gnaíse, pertencente ao domínio geológico Complexo Luiz Alves. A rocha possui estrutura foliada ou bandada com direções variadas, e coloração em geral cinza esverdeada. O substrato rochoso é cortado por numerosas falhas e zonas de cisalhamento que colocam as rochas deste complexo em contato com as rochas do Grupo Itajaí. A unidade Cgn caracteriza-se por possuir solo residual, com um horizonte C profundo e horizonte B incipiente, sem lençol freático próximo a superfície (SBROGLIA, 2015).

Cpi – Cambissolo substrato piroxenito: Corresponde a 2,15% da área de estudo. O substrato dessa unidade é composto pela rocha piroxenito, pertencente aos chamados núcleos máficos e ultramáficos do Complexo Luiz Alves. Apresenta cor preta ou cinza escuro e textura equigranular geralmente grossa, cujo principal mineral é o piroxênio. O solo é argiloso e apresenta ainda, uma elevada média do índice de vazios, elevados valores do teor de umidade natural, de densidade e de coesão (SBROGLIA, 2015).

Cde – Cambissolo substrato depósito de encosta: Corresponde 0,82% da área de estudo. É um solo resultante da movimentação de solos que sedimentaram em cotas mais baixas. O seu comportamento depende do seu grau de desenvolvimento, sendo que os colúvios mais recentes são os mais instáveis aos movimentos de massa (DUARTE, 1999).

GHsqa – Gleissolo substrato sedimento quaternários aluviais. Corresponde a 13,4% da área de estudo. Geologicamente, é constituída por areias, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos inconsolidados, depositados em planície de inundação, terraços e calhas da rede fluvial no período Holocênico (KAUL et al., 2002). A unidade é formada por solos de origem sedimentar, classificados como solos aluviais. Foi mapeado como gleissolo, que se caracteriza por ser medianamente profundo, mal drenado e com permeabilidade muito baixa (SBROGLIA, 2015).

Ra e Rc – Litólico substrato arenito e conglomerado: Representam apenas 0,08% da área de estudo. No Morro do Baú há o substrato das rochas arenito arcoseano e o chamado “conglomerado baú”, que ocorre em uma pequena faixa intercalada dentro do arenito. Esses conglomerados antigamente eram tidos como depósitos glaciais até que Freitas (1945) verificou a origem flúvio-piemôntica (SBROGLIA, 2015).

Tabela 7 - Caracterização das unidades geotécnicas

Sigla	Unidade Geotécnica	Área (km <sup>2</sup> )	%	Origem do solo	Relevo predominante	Uso do solo predominante
<i>Ca</i>	Cambissolo substrato arenito	18,56	29,61	Residual	Forte ondulado /Montanhoso	Mata
<i>Cc</i>	Cambissolo substrato conglomerado	2,12	3,39	Residual	Forte ondulado	Mata/ Reflorestamento
<i>Cf</i>	Cambissolo substrato folhelho	12,34	19,69	Residual	Forte ondulado /Montanhoso	Mata
<i>Cgn</i>	Cambissolo substrato gnaise	19,33	30,85	Residual	Forte ondulado /Montanhoso	Mata
<i>Cpi</i>	Cambissolo substrato piroxenito	1,35	2,15	Residual	Forte ondulado	Mata/ Reflorestamento
<i>Cde</i>	Cambissolo substrato depósito de encosta	0,52	0,82	Sedimentar de origem residual	Ondulado	Pastagem
<i>GHsqa</i>	Gleissolo substrato sedimentos quaternários aluviais	8,40	13,41	Sedimentar	Plano	Rizicultura
<i>Ra</i>	Litólico substrato arenito	0,03	0,04	Residual	Escarpado	Mata
<i>Rc</i>	Litólico substrato conglomerado	0,03	0,04	Residual	Escarpado	Mata
<b>Microbacia Rib. Baú</b>	-	<b>62,68</b>	<b>100,00</b>	-	-	-

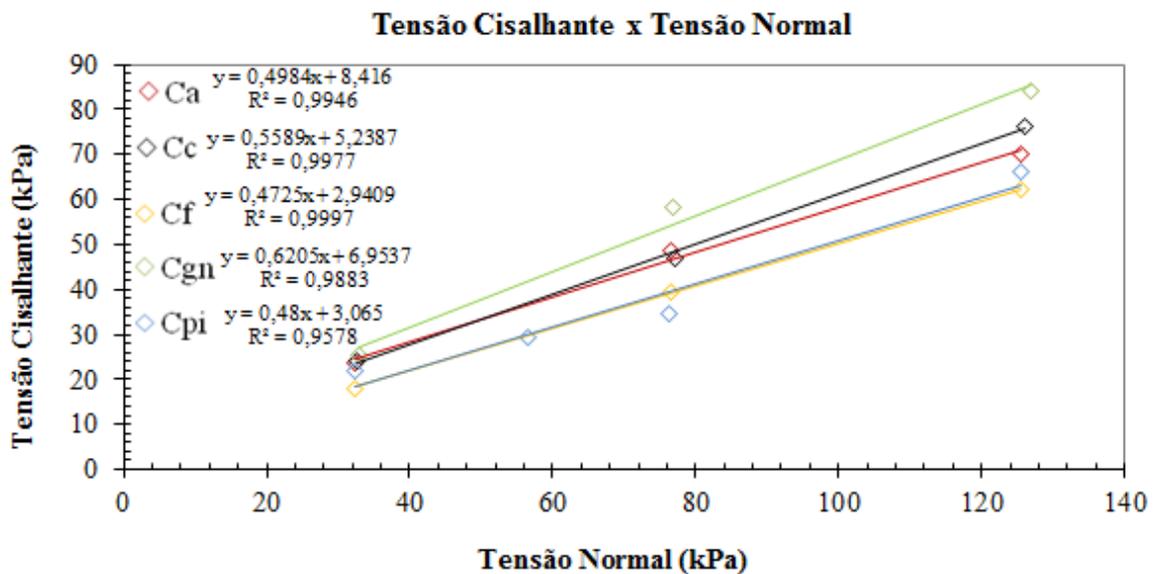
### 3.6 Parâmetros do solo

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos por ensaio de cisalhamento direto na condição inundada. Isto foi feito para garantir a condição mais desfavorável possível do solo, como em um período com grande índice pluviométrico.

A Figura 37 apresenta o gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal, os pares de valores para cada solo foi obtido nos 3 estágios do ensaio, com tensões normais de 33, 78 e 128kPa. O solo da unidade Cpi foi cisalhado com um quarto estágio, onde foi aplicada uma tensão intermediária de 58kPa, como já mencionado no item 4.1.2.

Por intermédio da envoltória, foram obtidos os parâmetros de resistência do solo: coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ); e a partir do ensaio, pôde-se ainda, calcular o peso específico natural do solo ( $\gamma_{nat}$ ).

Figura 30 - Gráfico Tensão Cisalhante x Tensão Normal



Fonte: Sbroglia (2015)

Os parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto para os solos das unidades geotécnicas em que ocorreram deslizamentos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto

<u>Unidade</u> <u>Geotécnica</u>	<u>c</u> <u>[Kpa]</u>	<u><math>\varphi</math></u> <u>[°]</u>	<u><math>\gamma_{nat}</math></u> <u>[kN/m<sup>3</sup>]</u>	<u><math>\gamma_{sat}</math></u> <u>[kN/m<sup>3</sup>]</u>
<u>Ca</u>	8,42	26,5	17,4	18,4
<u>Cc</u>	5,24	29,2	16,8	17,8
<u>Cf</u>	2,94	25,3	16,8	17,8
<u>Cgn</u>	6,95	31,8	17,3	18,3
<u>Cpi</u>	12,96	15,8	14,9	15,9

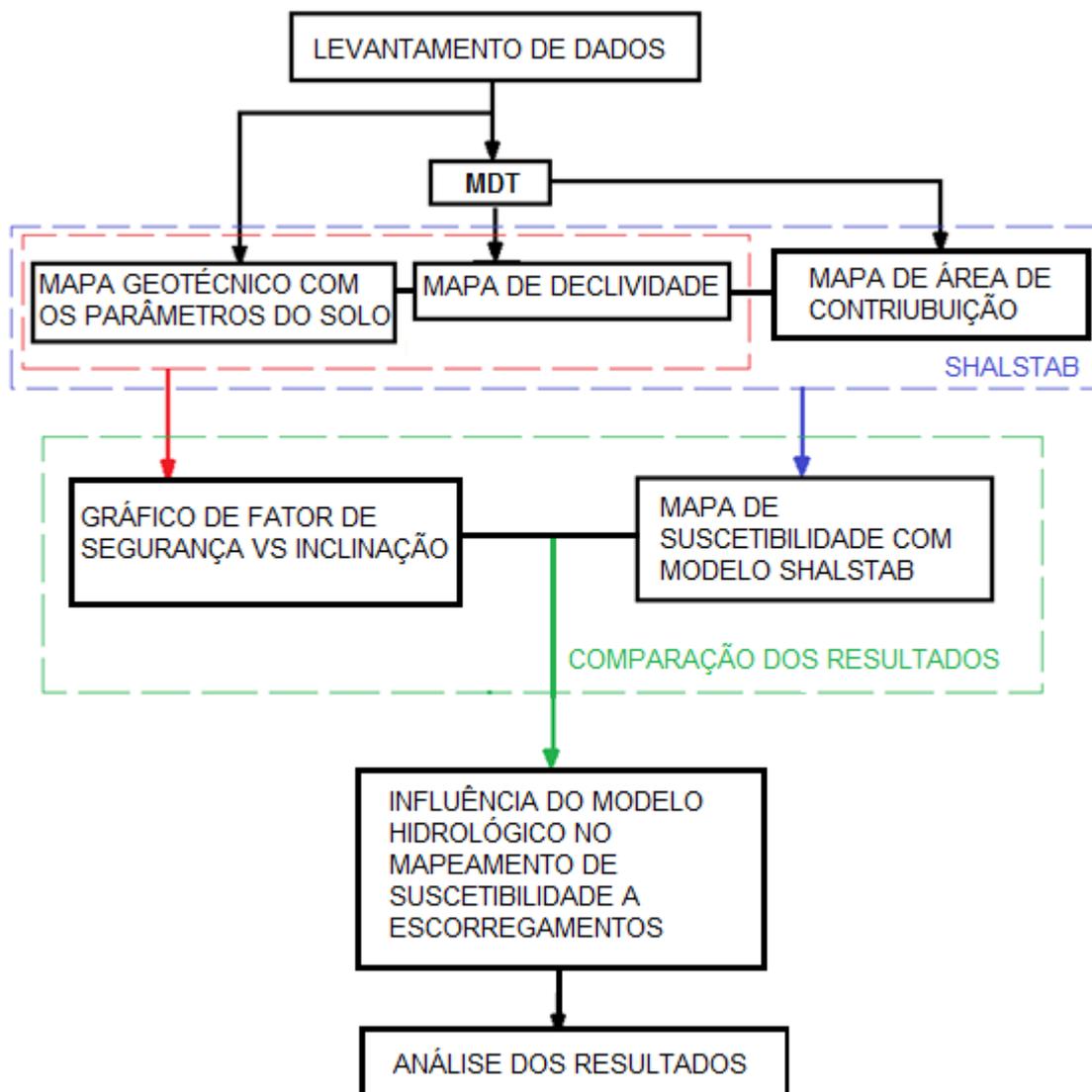
Fonte: Sbroglia (2015)

Percebe-se que a coesão efetiva varia em torno de 3 a 13 kPa, resultados esperados para um solo residual em horizonte C.

## 4 MÉTODO

A metodologia dessa pesquisa se deu de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 29.

Figura 31 - Fluxograma das etapas de estudo



Fonte: Autor (2019)

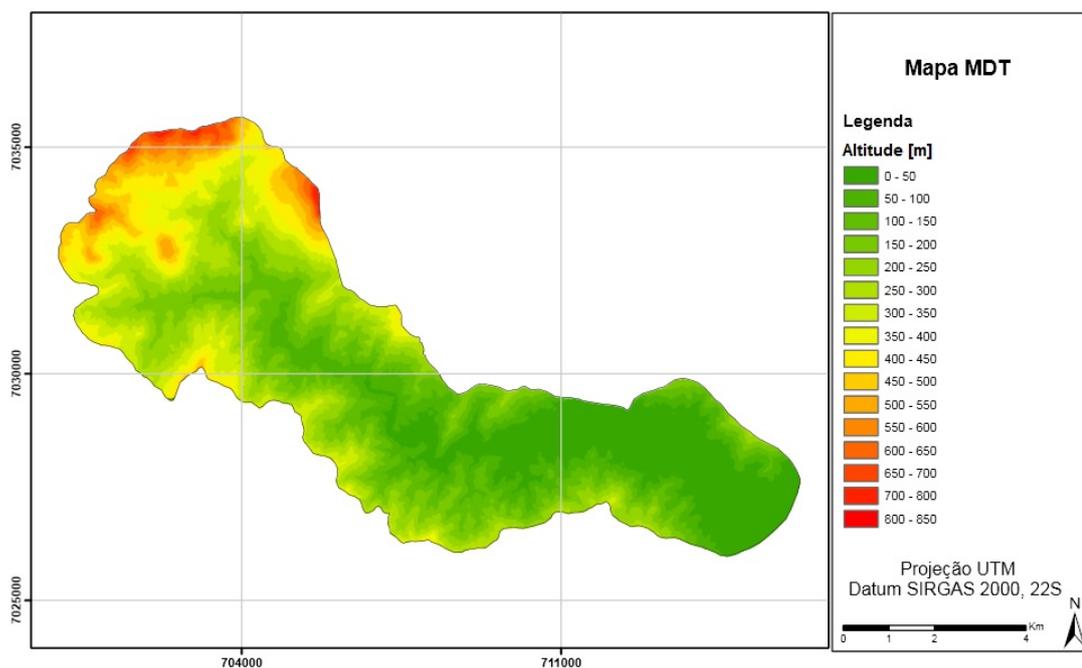
#### 4.1 Levantamento de dados

Esta etapa consiste na obtenção dos dados de entrada necessários para a elaboração dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais utilizando a equação dos taludes infinitos e o modelo SHALSTAB. Os dados compreendem o MDT e o Mapa Geotécnico da área em estudo.

O Modelo Digital do Terreno (MDT) foi cedido pela Secretária de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDS), com resolução espacial de 1 m (Figura 26). Em relação ao Mapa Geotécnico, este foi elaborado por Sbroglia (2015) na escala 1:50.000, o qual individualiza as unidades geotécnicas presentes na microbacia e os seus respectivos parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico.

Destaca-se que os parâmetros de resistência dos solos e peso específico foram determinados no ensaio de cisalhamento direto (CD) realizado na condição inundada.

Figura 32 - Modelo Digital do Terreno



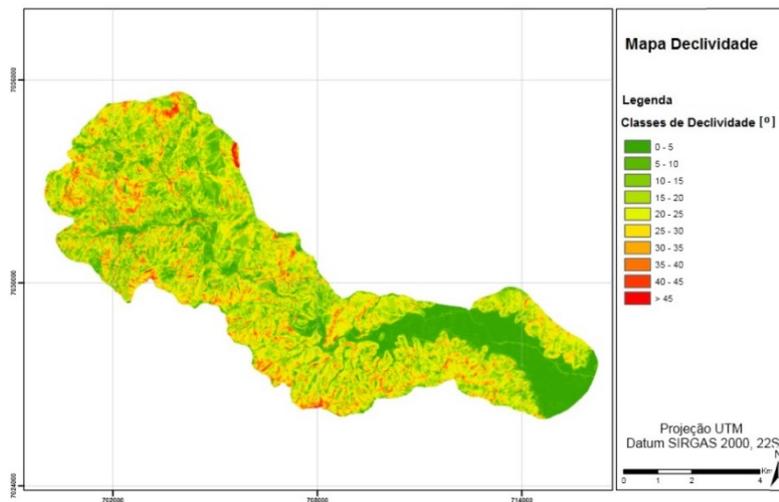
Fonte: Sbroglia (2015)

Observa-se no MDT que as maiores altitudes se encontram na porção noroeste, mas não necessariamente as mais instáveis, pois deve-se levar em consideração, também, o mapa geotécnico para verificar as áreas mais suscetíveis a deslizamentos.

#### 4.1.1 Mapa de declividade

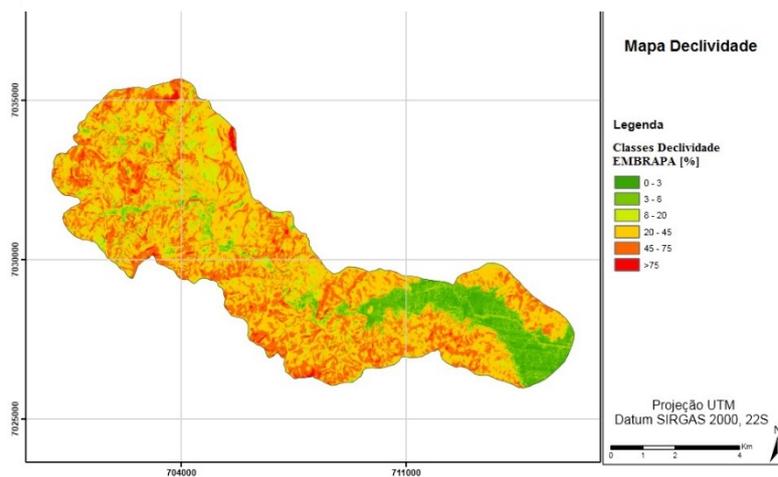
A partir do MDT, utilizando a ferramenta 'Slope' do Arc Gis foi possível elaborar o mapa de declividade da microbacia do Ribeirão do Baú, em graus e em porcentagem, conforme apresentado nas Figuras 31 e 32.

Figura 33 - Mapa de declividade em graus



Fonte: Sbroglia (2015)

Figura 34 - Mapa de declividade em porcentagem



Fonte: Sbroglia (2015)

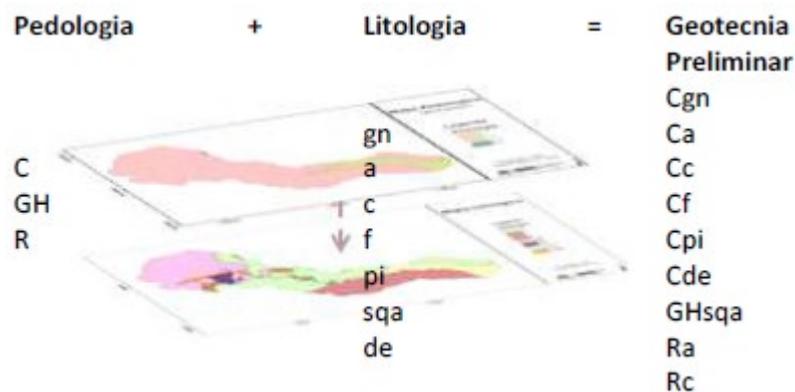
Observa-se as maiores declividades nas unidades geotécnicas de Cf e Cpi. Além disso, a maioria dos intervalos se encontra entre 10° e 30°.

#### 4.1.2 Mapa Geotécnico e parâmetros de resistência do solo

A caracterização geotécnica da área de estudo, obtidos pelos mapas litológicos e pedológicos, que somados com os parâmetros de resistência e físico do solo, serviram para a modelagem usando a equação dos taludes infinitos. Essa mesma caracterização agregada do mapa de área de contribuição, serviram como dados de entrada no modelo SHALSTAB, em ambas as metodologias, e auxiliaram na identificação e caracterização das unidades de mapeamento geotécnico e áreas instáveis.

Sbroglia (2015) definiu o Mapa Geotécnico com a sobreposição dos mapas pedológicos e litológicos de acordo com a Figura 33.

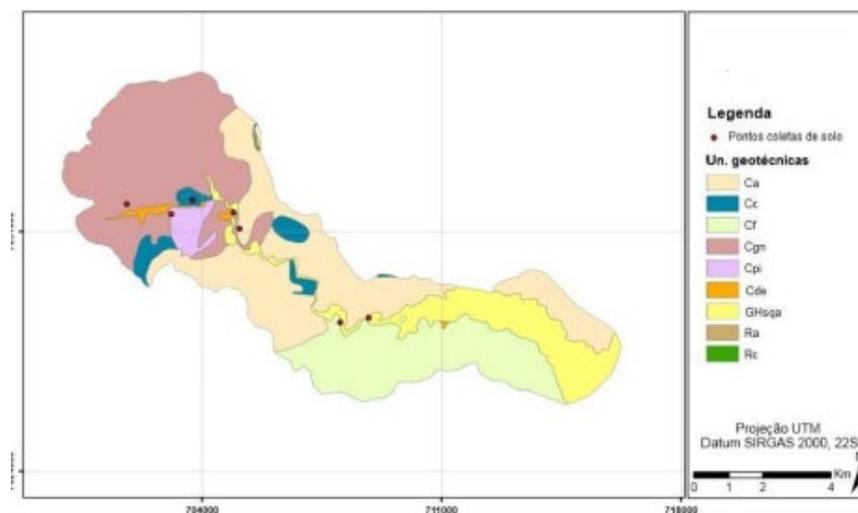
Figura 35 - Sobreposição de mapas para geração do mapa geotécnico



Fonte: Sbroglia (2015)

As amostras foram coletadas em diferentes unidades geotécnicas, durante o período de novembro de 2012 e outubro de 2013 (Figura 34).

Figura 36 - Mapa Geotécnico com pontos de coleta do solo



Fonte: Sbroglia (2015)

A amostra foi cisalhada a uma velocidade de 0,307 mm/min. Para cada amostra coletada, foram ensaiados três corpos de prova utilizando as seguintes tensões normais (tensões de consolidação: 33, 78 e 128 kgf, obtendo-se assim três conjuntos de valores de  $\sigma$  e  $\tau$  para a elaboração da envoltória de ruptura.

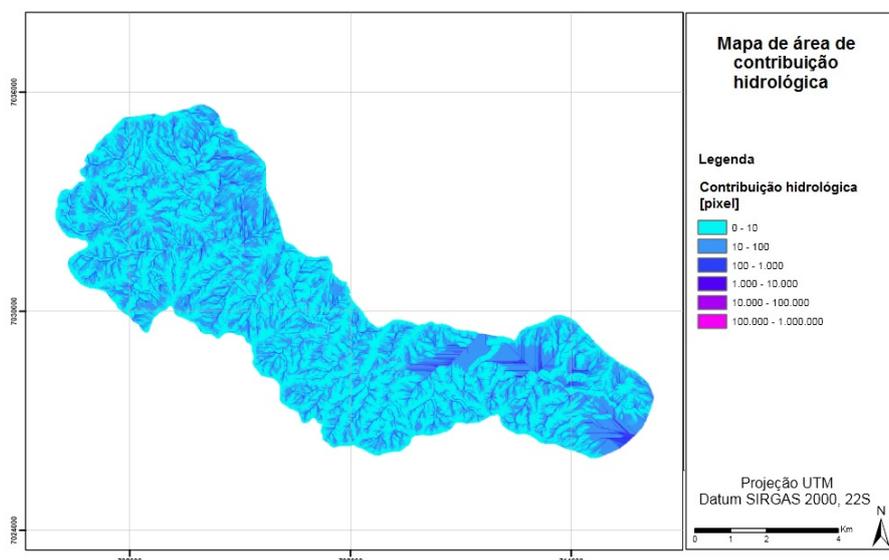
Com exceção da unidade Cpi que, por apresentar o valor do coeficiente angular da reta (R2) no gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal não satisfatório (0,95), foi coletado e ensaiado um novo corpo de prova. A tensão normal aplicada foi intermediária entre as já utilizadas, de 58 kgf. Depois de construído o gráfico da tensão cisalhante máxima versus tensão normal, pode-se obter os parâmetros de resistência do solo: coesão (c) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ). A partir do ensaio de cisalhamento direto, pode-se ainda, calcular o peso específico natural do solo ( $\gamma_s$ ).

#### 4.1.3 Mapa de Área de Contribuição

O mapa de área de contribuição foi confeccionado por meio da ferramenta 'Shaltopo' (Contributing Area) do SHALSTAB. De acordo com Reginatto (2013), este parâmetro está relacionado com a capacidade de drenagem da microbacia e incorpora ao modelo SHALSTAB a influência das porções côncavas do relevo nos caminhos em que a água percorre, os quais são identificados como potenciais pontos de inundação e, logo, de instabilidade.

Este mapa consiste na criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir da direção de fluxo, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 37 - Mapa de área de contribuição



É possível observar que as áreas de maior concentração de fluxo encontram-se na base das encostas onde, normalmente, o relevo apresenta uma forma côncava, sugerindo a presença de maior acúmulo de água. Também ficou evidenciado que no trajeto do canal principal da microbacia constam-se as maiores áreas de contribuição.

#### 4.2 Equação dos Taludes Infinitos

Para a caracterização desse método foram feitos gráficos com o objetivo de comparar o comportamento do fator de segurança em função da inclinação do talude para cada unidade geotécnica. Sendo assim, com auxílio da Equação (7) e dos dados dos ensaios dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e o mapa de declividade foi possível, para cada unidade geotécnica de solo residual, apresentar um gráfico que é feito variando-se a inclinação de 5 a 40 graus, que é o intervalo onde ocorre maiores zonas de instabilidade, e plotou-se o gráfico com auxílio da ferramenta Excel 2016.

#### 4.3 Equação SHALSTAB

Além de necessitar dos mesmos dados de entrada do item 4.2 o modelo SHALSTAB ainda leva em consideração o mapa de área de contribuição por unidade de contorno (a/b). A partir da compilação desses mapas somados a resolução da Equação (27) em função de  $q$  e  $T$  foi gerado um mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais.

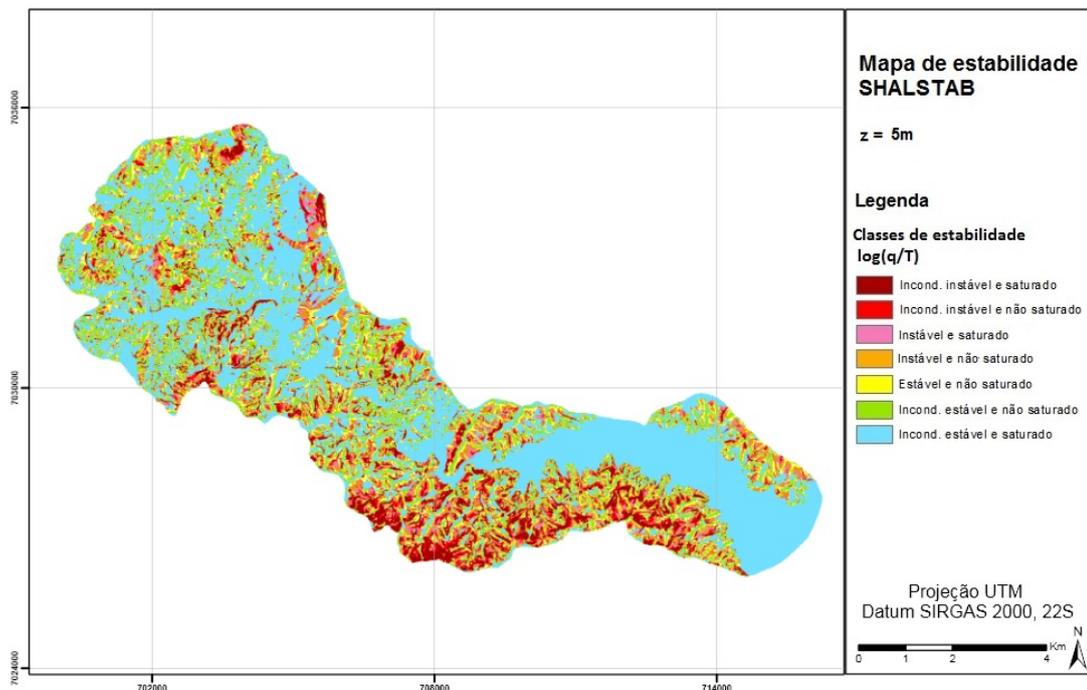
## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão mostrados os resultados da utilização da metodologia adotada, assim como sua análise.

### 5.1 Aplicação do modelo SHALSTAB

Como já mencionado as características topográficas de entrada foram extraídas do MDT: inclinação ( $\theta$ ) e área de contorno ( $a/b$ ). E com o ensaio de CD foram obtidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento ( $c$  e  $\phi$ ) e o peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ). A profundidade  $z$  foi definida em 5 m, pois uma vez que se tratam de deslizamentos superficiais e as literaturas indicam esta profundidade como de máxima ocorrência. A compilação desses dados, para cada unidade geotécnica, gera um mapa de suscetibilidade a deslizamento apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Mapa de suscetibilidade microbacia Ribeirão do Baú com SHALSTAB



Fonte: Sbroglia (2015)

As unidades Cde e GHsq são compostas quase integralmente pelas classes incondicionalmente estáveis. Em contrapartida, as unidades Ra e Rc são compostas por áreas

incondicionalmente instáveis. Observa-se que as regiões mais instáveis se encontram nas regiões de Cf e Cpi, enquanto as regiões mais estáveis estão presentes em Cgn.

## 5.2 Aplicação da equação dos Taludes Infinitos

A seguir, como descrito no item 4.2, será mostrado os resultados da análise do fator de segurança quando se varia as inclinações para cada unidade geotécnica. Os dados são oriundos da Tabela 7 e será considerada a Equação (7) para cálculo do gráfico na condição da poropressão ( $\mu$ ) ser nula e percolação de água constante.

$$FS_s = \frac{c}{\gamma_{\text{sat}} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{\text{sat}} \tan \beta}$$

### 5.2.1 - Cambissolo de substrato de arenito

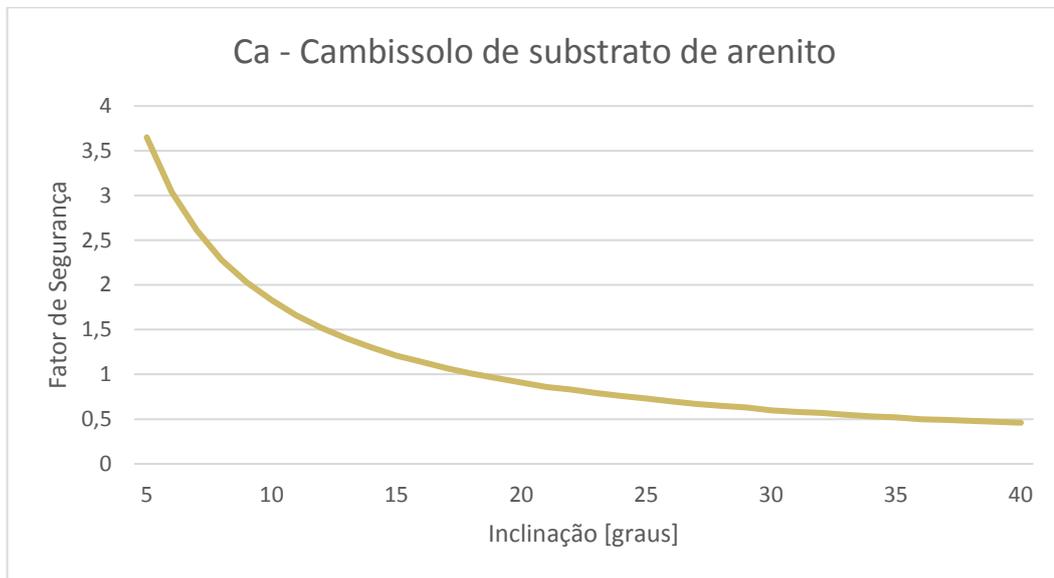
Figura 39 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Ca

Coesão (kPa)	8.42
Peso específico do solo natural (kN/m <sup>3</sup> )	17.4
Profundidade (m)	5
Inclinação (graus)	X
Fator de segurança	Y
Ângulo de atrito (graus)	26.50
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	10
Peso específico do solo saturado (kN/m <sup>3</sup> )	18.4

Fonte: Autor (2019)

Variando as inclinações em função do fator de segurança tem-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 40.

Figura 40 - Fator de segurança vs Inclinação para Ca



Fonte: Autor (2019)

A partir da análise do gráfico é possível estabelecer declividades limite que devem ser respeitadas de acordo com um determinado fator de segurança definido pela norma que definem regiões de estabilidade como: regiões de alta estabilidade para um FS maior que 1,5 (verde); média-alta estabilidade para um FS entre 1,5 e 1,3 (amarelo); média-baixa estabilidade para um FS entre 1,3 e 1,15 (laranja) e baixa estabilidade para um FS menor que 1,15 (vermelho). A Tabela 8 apresenta os resultados para a unidade geotécnica Ca.

Tabela 8- Declividade limite para Ca

FATOR DE SEGURANÇA	> 1.5	1.5 < FS < 1.3	1.3 < FS < 1.15	< 1.15
DECLIVIDADE LIMITE [graus]	< 12	12 < DL < 14	14 < DL < 17	> 17

Fonte: Autor (2019)

### 5.2.2 - Cambissolo de substrato de conglomerado

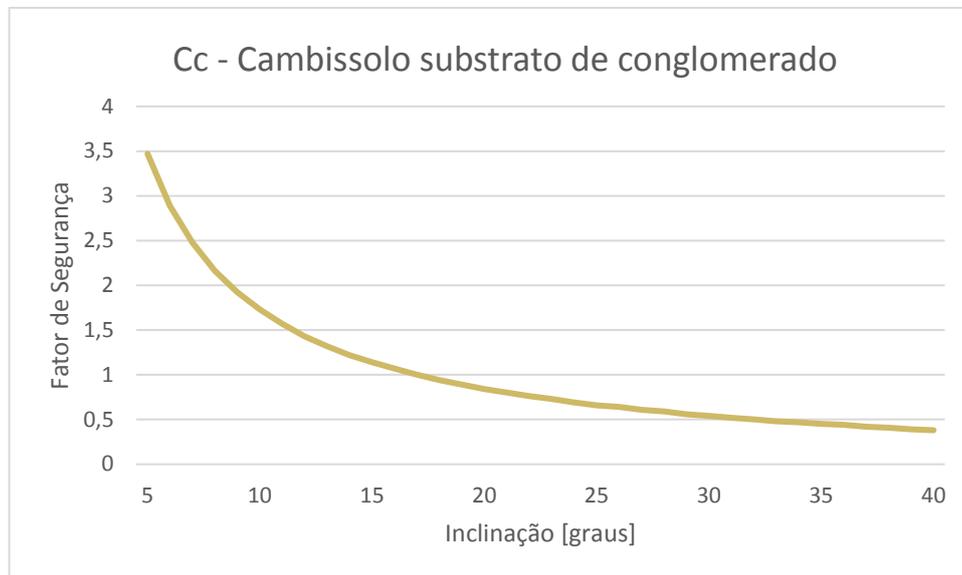
Figura 41 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cc

Coesão (kPa)	5.24
Peso específico do solo natural (kN/m <sup>3</sup> )	16.8
Profundidade (m)	5
Inclinação (graus)	X
Fator de Segurança	Y
Ângulo de atrito (graus)	29.20
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	10
Peso específico do solo saturado (kN/m <sup>3</sup> )	17.8

Fonte: Autor (2019)

Variando as inclinações em função do fator de segurança tem-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 42.

Figura 42 - Fator de segurança vs Inclinação para Cc



Fonte: Autor (2019)

Assim como na unidade Ca, a análise do gráfico estabelece declividades limite para determinados fatores de segurança. São apresentados na Tabela 9 as declividades limites para a unidade Cc.

Tabela 9 - Declividade limite para Cc

FATOR DE SEGURANÇA	> 1.5	1.5 < FS < 1.3	1.3 < FS < 1.15	< 1.15
DECLIVIDADE LIMITE [graus]	< 10	10 < DL < 13	13 < DL < 16	> 16

Fonte: Autor (2019)

### 5.2.3 - Cambissolo de substrato de folhelho

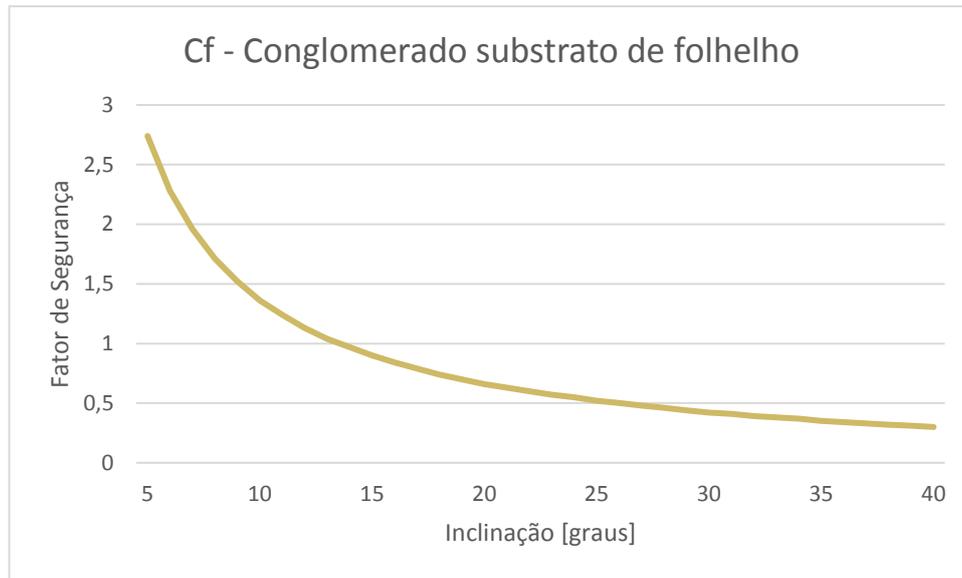
Figura 43 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cf

Coesão	2.94
Peso específico do solo natural	16.8
Profundidade	5
Inclinação	X
Fator de Segurança	Y
Ângulo de atrito	25.30
Peso específico da água	10
Peso específico do solo saturado	17.8

Fonte: Autor (2019)

Variando as inclinações em função do fator de segurança tem-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 44.

Figura 44 - Fator de segurança vs Inclinação para Cf



Fonte: Autor (2019)

A Tabela 10 apresenta as declividades limite para a unidade Cf.

Tabela 10 - Declividade limite para Cf

FATOR DE SEGURANÇA	> 1,5	1,5 < FS < 1,3	1,3 < FS < 1,15	< 1,15
DECLIVIDADE LIMITE [graus]	< 9	9 < DL < 11	11 < DL < 13	> 13

Fonte: Autor (2019)

#### 5.2.4 - Cambissolo de substrato de gnaiss

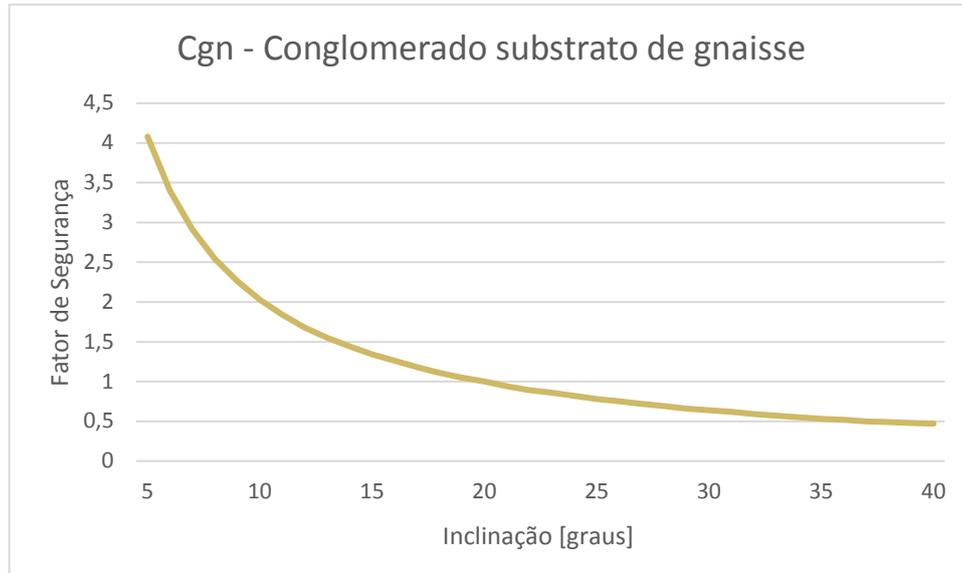
Figura 45 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cgn

Coesão (kPa)	6.95
Peso específico do solo natural (kN/m <sup>3</sup> )	17.3
Profundidade (m)	5
Inclinação (graus)	X
Fator de Segurança	Y
Ângulo de atrito (graus)	31.80
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	10
Peso específico do solo saturado (kN/m <sup>3</sup> )	18.3

Fonte: Autor (2019)

Variando as inclinações em função do fator de segurança tem-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Fator de segurança vs Inclinação para Cgn



Fonte: Autor (2019)

A Tabela 11 apresenta as declividades limite para a unidade Cgn.

Tabela 11 - Declividade limite para Cgn

FATOR DE SEGURANÇA	> 1.5	1.5 < FS < 1.3	1.3 < FS < 1.15	< 1.15
DECLIVIDADE LIMITE [graus]	< 13	13 < DL < 16	16 < DL < 19	> 19

Fonte: Autor (2019)

### 5.2.5 - Cambissolo de substrato de piroxenito

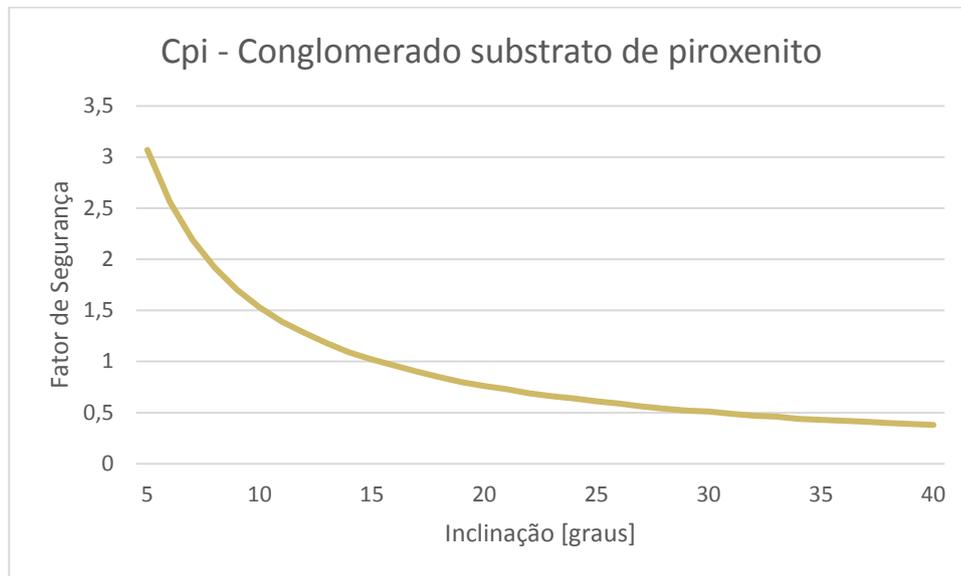
Figura 47 - Dados Equação dos Taludes Infinitos Cpi

Coesão (kPa)	12.96
Peso específico do solo natural (kN/m <sup>3</sup> )	14.9
Profundidade (m)	5
Inclinação (graus)	X
Fator de segurança	Y
Ângulo de atrito (graus)	15.80
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	10
Peso específico do solo saturado (kN/m <sup>3</sup> )	15.9

Fonte: Autor (2019)

Variando as inclinações em função do fator de segurança tem-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 48.

Figura 48 - Fator de Segurança vs Inclinação para Cpi



Fonte: Autor (2019)

A Tabela 12 apresenta as declividades limite para a unidade Cpi.

Tabela 12 - Declividade limite para Cpi

FATOR DE SEGURANÇA	> 1.5	1.5 < FS < 1.3	1.3 < FS < 1.15	< 1.15
DECLIVIDADE LIMITE [graus]	< 10	10 < DL < 12	12 < DL < 14	> 14

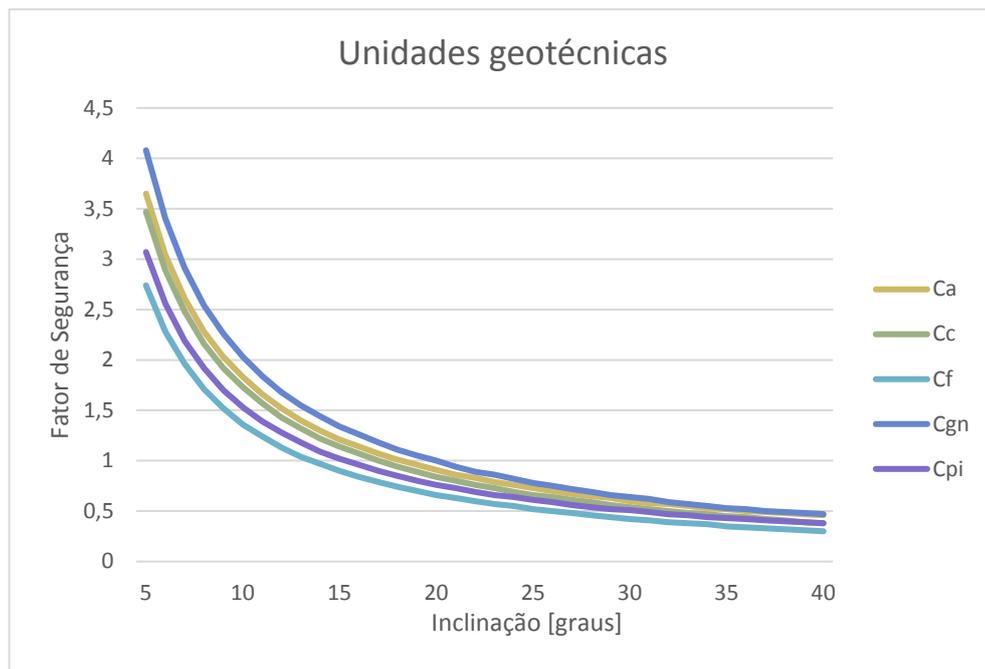
Fonte: Autor (2019)

### 5.2.6 - Compilação dos resultados

Observa-se que para todas as unidades geotécnicas o fator de segurança diminui com o aumento da inclinação. Isto significa que o solo se torna cada vez mais instável, ou seja, apresenta tendência a sofrer deslizamentos conforme se solicita uma área que possui inclinações elevadas.

A identificação das unidades geotécnicas que apresentam maiores variações dos fatores de segurança em função da inclinação do talude está presente na Figura 49.

Figura 49 - Comparativo entre as unidades geotécnicas



Fonte: Autor (2019)

Observa-se que as unidades geotécnicas que apresentam os menores fatores de segurança são as Cf e Cpi, que se deve ao fato de se encontrarem em regiões superfícies mais elevadas e apresentarem baixos valores para os parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ). Fato este que já era esperado da análise do mapa de suscetibilidade feito por Sbroglia (2015), que descreveu essas mesmas duas unidades como as que mais apresentaram áreas com suscetibilidade a deslizamentos translacionais rodado pela metodologia SHALSTAB.

A seguir será apresentado a Tabela 13 que resume as declividades limite para cada unidade geotécnica.

Tabela 13 - Tabela resumo de Declividade Limite

UNIDADE GEOTÉCNICA	Ca	Cc	Cf	Cgn	Cpi
ALTA ESTABILIDADE	< 12	< 10	< 9	< 13	< 10
MÉDIA-ALTA ESTABILIDADE	12 < DL < 14	10 < DL < 13	9 < DL < 11	13 < DL < 16	10 < DL < 12
MÉDIA-BAIXA ESTABILIDADE	14 < DL < 17	13 < DL < 16	11 < DL < 13	16 < DL < 19	12 < DL < 14
BAIXA ESTABILIDADE	> 17	> 16	> 13	> 19	> 14

Fonte: Autor (2019)

Da análise visual do mapa de suscetibilidade gerado pelo SHALSTAB da Figura 38 com o mapa de declividade da área da Figura 31 é possível observar a relação das áreas de maior instabilidade com as áreas de maiores declividades. Nota-se que assim como os menores fatores de segurança foram encontrados nas unidades Cf e Cpi, para essas mesmas unidades foram encontradas as menores declividades limite, 13 e 14 graus respectivamente (considerando a condição de baixa estabilidade).

## 6 CONCLUSÕES

O entendimento da formulação matemática do SHALSTAB, a interpretação dos dados provenientes do ensaio de cisalhamento direto do solo e uso da ferramenta Excel 2016 foram de extrema importância para a realização dessa pesquisa, pois com eles foi possível comparar uma metodologia de mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa com uma metodologia que representa de maneira gráfica a equação dos taludes infinitos.

O mapa geotécnico mostra as diferentes unidades dispostas no terreno da área de estudo. É a partir dele que se consegue realizar coletas em campo destinadas a retirar solos respectivos a cada unidade com objetivo de ensaiá-los e caracterizar os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Por meio do ensaio de cisalhamento direto na condição inundada, observou-se que os parâmetros apresentaram valores esperados para um perfil típico de solo residual em um horizonte C, com exceção do valor de coesão do solo da unidade Cf, que se apresentou abaixo da média dos outros solos. De acordo com Sbroglia (2015), apesar de ter elevada quantidade de finos em sua composição, sobretudo silte, esse baixo valor pode estar relacionado ao caráter expansivo de solos originados do folhelho. Em contrapartida, os maiores valores foram calculados na unidade Cgn, podendo ter relação, entre outros fatores, ao maior valor do ângulo de atrito e alto valor do peso específico natural e saturado do solo arenoso originado do gnaíse.

Quando se analisa uma área com rede de drenagem, como é o caso de uma bacia ou microbacia hidrográfica, é de extrema importância o estudo da área de contribuição dado no modelo SHALSTAB pelo módulo hidrológico. É a partir dele que se consegue identificar as áreas que irão apresentar maiores tendências a ter concentração de água, e isto interfere significativamente no grau de estabilidade da encosta, pois a parcela de solicitação da água vai contribuir para o desprendimento de solo e consequente deslizamento daquela região. Neste contexto o modelo SHALSTAB foi eficiente, pois gerou mapas que condizem com regiões que apresentaram ao longo dos anos um elevado número de deslizamentos, principalmente os que aconteceram em novembro de 2008.

No que diz respeito ao mapeamento com relação aos fatores de segurança, o conhecimento das unidades que apresentam declividades limites (fator de segurança abaixo do esperado) é de extrema importância na identificação de áreas com suscetibilidade a sofrerem deslizamentos translacionais, e assim, podendo prever locais que não podem ser ocupados e ainda permitir a evacuação das pessoas de locais a partir de dados de previsões do tempo,

evitando assim danos e perdas humanas. Também pode ser usado para reforçar e aprimorar as leis de uso e ocupação do solo do município, permitido aos órgãos competentes fazerem fiscalizações mais rígidas e também maior conscientização da população através do conhecimento deste estudo. Ainda pode gerar uma contribuição ambiental, pois a partir do mapeamento, áreas de maior instabilidade ficam evidentes, reforçando a necessidade da preservação da vegetação e se necessário à reestruturação da mesma.

Fica como sugestão para trabalhos futuros realizar um mapa de suscetibilidade utilizando a metodologia da equação dos taludes infinitos usada nesta pesquisa, com o objetivo de comparar de forma mais precisa as metodologias estudadas. Por fim sugere-se a realização do mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos em outras microbacias de regiões costeiras no estado de Santa Catarina.

## **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro. 2009.

AGUIAR, R.L. **Análise do mapeamento geotécnico nos processos de gestão ambiental: bases conceituais para aplicação no Distrito Federal (DF)**. São Carlos, SP, 1994. 88p. Monografia - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP.

BASTOS, C. A. B. **Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio grande do Sul. Porto Alegre, RS. 1999.

BEVILÁQUIA, F. Z. **Estudo do Comportamento Geomecânico dos Solos Residuais de Granito de Florianópolis**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, p. 117. 2004.

CARAMEZ, M. L. **Mapeamento geotécnico da microbacia do Itacorubi - Florianópolis/SC - Aplicação do modelo *SHALSTAB* para a confecção de mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, p.187. 2017.

CEMADEN. **site da cemaden**, 2016. Disponível em: <<https://www.cemaden.gov.br/deslizamentos/>>. Acesso em: 10 setembro 2018.

CERRI, L.E.S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O. & ZAINE, J.E. **Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, 1996, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, ABGE, v.2, p.537-548.

CHRIST, C. E. **Mapeamento de áreas suscetíveis ao colapso na bacia hidrográfica da lagoa da conceição**. Dissertação (Tese de Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

DIAS, J. A. **MOVIMENTOS DE MASSA Tipos de Movimentações de Massa**. **GEOLAMB**, 2006. Disponível em: <[http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA4\\_MovMassa/GA43\\_tipos/Tipos.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA4_MovMassa/GA43_tipos/Tipos.html)>. Acesso em: 6 nov. 2018.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential**. National Council for Air and Stream Improvement. 1998. 26p

DUARTE, S. B. **Utilização de sistema de informações geográficas na análise do meio físico e do uso do solo na Lagoa da Conceição**. Dissertação (Tese de Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 126. 1999.

EBAH. **ebah**, 2018. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABUO8AB/analise-estabilidade-encosta-meio-urbano-juiz-fora-bairro-santa-tereza?part=4#>>. Acesso em: 13 set. 2018.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF. 2013.

FERNANDES, N. F. et al. **Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v 2, p. 51-71, 2001. ISSN 1.

FREITAS, Eduardo de. **Deslizamento de Encostas**; Brasil Escola.

GARCIA, S. Z. N. **Comparativo entre dois métodos de taludes infinitos na geração de mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais**. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2018.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GODOY, L. **Aplicação do modelo SHALSTAB no mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, na bacia de Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco-PR. 2015.

GUIMARÃES, R. F. et al. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 6, p 159-184.

HIGASHI, R. A. R. **Manual SHASLTAB**. Florianópolis-SC. 2011.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, p. 398. 2006.

HIGASHI, R. A. R. **Utilização de um SIG no Desenvolvimento de um Banco de Dados Geotécnicos do Norte do Estado do Rio Grande do Sul**. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

IAEG (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY). **Engineering geological maps: a guide to their preparation**. Paris: Unesco Press, 1976. 79p.

IPT, I. D. P. T. **Ocupação de encostas**. IPT. São Paulo. 1991. (n 1831).

LEITE, M. E. **Geotecnologias aplicadas aos estudos geográficos**. Montes Claros: Unimontes 2013, 326 p.

MARANGON, M. **Resistência ao Cisalhamento dos Solos**, 2009. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2\\_unid05-P1.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2_unid05-P1.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2018.

MARANGON, M. ufjf. **ufjf**, 2009. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot\\_Unid04EstabilidadeTaludes01.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_Unid04EstabilidadeTaludes01.pdf)>. Acesso em: 26 set. 2018.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MEIRELLES, M. C. E.; DAVISON DIAS, R. **Estudo da Erodibilidade de Solos Residuais do Complexo Granito-Gnaissico – Município de Santo Amaro da Imperatriz, SC**. 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. São Carlos, SP, p. 465-470. 2004.

MÉNDEZ, G. A. A. slideshare. **slideshare**, 2013. Disponível em: <[https://es.slideshare.net/gonzalo\\_adolfo/estabilidad-de-taludes-18414429](https://es.slideshare.net/gonzalo_adolfo/estabilidad-de-taludes-18414429)>. Acesso em: 13 set. 2018.

MICHEL, G. P. et al. **Análise comparativa entre os modelos SHALSTAB e SINMAP na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais**. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento (2012: Foz do Iguaçu) Foz do Iguaçu. ENES, Anais, 21p.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. 2. ed., rev. e atual. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 433p.

MURK, B. W.; SKINNER, B. J.; PORTER, S. C. **Environmental geology**. Nova Iorque: John, 1996. 535 p.

O'LOUGHLIN, E.M. **Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis**. Water Resources Research, v.22, n.5, p.794-804. 1986.

ORSI, M. P. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos em Florianópolis: análise de movimentos rotacionais.** Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2018.

PINTO, C. D. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil.** São Carlos: RiMa, 2009. 392 p.

REGINATTO, G. M. P. **Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros - SC, com ênfase em escorregamentos translacionais.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Infraestrutura e Gerência Viária, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2013.

SANTOS, G. T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia.** Dissertação (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, p. 231. 1997.

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

SILVA, E. L. E. et al. (2013). **Emprego do modelo de suscetibilidade a escorregamentos rasos para a gestão de riscos de desastres no município de Vitória-ES.** *Sociedade e Natureza.* 25(1), 119-131.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of Soil Mechanics.** Nova York: John Wiley & Sons, 1948.

TOMAZZOLI, E. R.; PARIZOTO, D. G. V.; ABREU, J.; PELLERIN, J. R. G. M. **Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (Complexo do Morro do Baú), SC.** FAPESC - Convênio 16319/2010-8. UFSC, Florianópolis, 2012. 207p.

UFBA. Geotecnia UFBA. **Laboratório de Geotecnia,** 2009. Disponível em: <<http://www.geotecnia.ufba.br/?vai=Extens%20o/Ensaio%20de%20Laborat%20rio/Cisalhamento%20Direto>>. Acesso em: 29 out. 2018.

UFES. **Laboratório de Topografia e Cartografia,** 2008. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/475198-Apostila-de-arcgis-laboratorio-de-topografia-e-cartografia-universidade-federal-do-espírito-santo.html>>. Acesso em: 30 out. 2018.

UFPR. Departamento de Construção Civil, UFPR. **DCC UFPR**, 2017. Disponível em: <[http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e9/No%C3%A7%C3%B5es\\_de\\_resist%C3%AAncia\\_ao\\_cisalhamento.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e9/No%C3%A7%C3%B5es_de_resist%C3%AAncia_ao_cisalhamento.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2018.

UNESP. UNESP. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/imagens/riscos/queda1.gif>>. Acesso em: 19 set. 2018.

UNICAMP. Faculdade de Engenharia Civil. **FEC UNICAMP**, 2013. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic570/rescis.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2018.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 509 p.

VARNES, D. J. **Landslides, analysis and control**. [S.l.]: National Academy of Sciences, 1978.

VIEIRA, B. & RAMOS, H. (2015). **Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP)**. Revista Do Departamento De Geografia, 29, 161-174.

WERNECK, B. R. & DA SILVA, J. A. F. **Avaliação da susceptibilidade à degradação ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé-RJ com apoio do Geoprocessamento**. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 4, n. 2, p. 155-171, jul. / dez. 2010.

ZAINE, J.E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)**. Rio Claro, SP, 2000. 149p. Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração: Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista/Unesp.

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

ZUQUETTE, L.V. & NAKAZAWA, V.A. Cartas de Geologia de Engenharia. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 17, p.283-300.