

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

AYLA MARGIE DE LEÃO CRAIG

Análise de suscetibilidade a instabilização de taludes rodoviários  
utilizando o método de talude infinito em ambiente SIG

São Carlos

2016

VERSÃO CORRIGIDA

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa



AYLA MARGIE DE LEÃO CRAIG

ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES  
RODOVIÁRIOS UTILIZANDO O MÉTODO DE TALUDE INFINITO EM  
AMBIENTE SIG

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título de  
mestre em Ciências, Programa: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto  
Filho

São Carlos  
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C886a Craig, Ayla Margie de Leão  
Análise de suscetibilidade a instabilização de taludes rodoviários utilizando o método de talude infinito em ambiente SIG / Ayla Margie de Leão Craig; orientador Oswaldo Augusto Filho. -- São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Área de concentração Geotecnia). -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Movimentos de massa. 2. Obras rodoviárias. 3. Suscetibilidade. 4. SIG. 5. Determinístico. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **AYLA MARGIE DE LEÃO CRAIG**.

Título da dissertação: "Análise de suscetibilidade a instabilização de taludes rodoviários utilizando o método de talude infinito em ambiente SIG".

Data da defesa: 21/10/2016.

### Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Oswaldo Augusto Filho**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Reinaldo Lorandi**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **José Eduardo Zaine**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Rio Claro)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

### Resultado:

Aprovada

Aprovada

Aprovada



*À minha mãe, Yara, por ser meu maior exemplo, por tanto amor, apoio e por ter dedicado toda a sua vida ao cuidado e educação de seus filhos.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter iluminado o meu caminho com boas pessoas e oportunidades.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho, pela paciência no ensino, colaboração e por estar sempre disposto a me ajudar e a compartilhar seus conhecimentos. Muito Obrigada!

Aos docentes do Departamento de Geotecnia da EESC/USP pelos ensinamentos e disponibilidade em esclarecimento de ideias, em especial ao Prof. Dr. Lázaro Zuquette, pela também amizade e bons conselhos.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Geotecnia: Maristela, Neiva, Álvaro, Oscar, José Luiz, Seu Antônio e Dito pela simpatia, boa vontade e grande gentileza ao sempre me ajudar.

A todos os colegas da Geotecnia em especial aos amigos que fiz aqui: Vanessa, Gian, Breno, Monique e Cahio. Sem vocês não teria sido a mesma coisa, obrigada por acompanharem a minha jornada e por estarem ao meu lado nessa etapa.

Ao pessoal do mapeamento por terem me auxiliado quando eu tinha dúvidas quanto ao programa. Obrigada!

À minha turma de mestrado, em especial à Paula, Milena e Fernanda, por termos nos mantido sempre unidas do começo ao fim. Valeu meninas!

Àqueles que pacientemente dispuseram muito do seu tempo me ajudando e me ensinando mecânica dos solos e das rochas: Gian, Breno e Roberto. Vocês foram fundamentais. Obrigada demais!

Aos amigos de sempre, de Aracaju e Ouro Preto que sempre me deram forças e tornaram especiais grandes momentos da minha vida, e à Raquel por ter me acolhido em São Carlos e ter se tornado uma querida amiga.

À minha família que sempre esteve ao meu lado, em especial à minha mãe, Yara e meu irmão, Alexandre. Muito obrigada pelo companheirismo, amizade, apoio e por sempre terem acreditado em todos os meus sonhos. Essa é pra vocês. À minha tia Aimara, pela grande amizade, por acreditar na minha capacidade e incentivar as minhas empreitadas. Ao meu tio Luiz Socó (*in memorian*), por todos os maravilhosos momentos vividos e por ter me ensinado a simplicidade da vida antes da partida. Amo vocês mais que tudo.

Aos meus queridos tios de Aracaju, às famílias Formoso, Litwinsky e Pedrosa, em especial ao saudoso e singular Tio Litrão (*in memorian*), por serem queridos amigos presentes e especiais e acompanharem todas as fases da minha vida.

À Universidade de São Paulo, pelo ensino e estrutura públicos e de excelente qualidade.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo auxílio financeiro e apoio no desenvolvimento deste projeto de mestrado.

*“Nunca se vence uma guerra lutando sozinho...”*

Raul Seixas – Por quem os sinos dobram.



## RESUMO

CRAIG, A. **Análise de suscetibilidade a instabilização de taludes rodoviários utilizando o método de talude infinito em ambiente SIG.** 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O desenvolvimento de movimentos de massa em obras rodoviárias é um grande problema a ser enfrentado tanto nas fases de implantação, como nas etapas de manutenção e conservação das mesmas. Os escorregamentos em rodovias muitas vezes são produtos de projetos mal planejados e executados, e podem provocar danos estruturais e econômicos à estrada, além de transtornos e riscos à comunidade local e ao meio ambiente. Diante desta problemática, o mapeamento geotécnico se apresenta como uma relevante ferramenta de auxílio à concepção do traçado da malha e instrumento de gestão rodoviária. A presente pesquisa buscou estudar a aplicabilidade do modelo determinístico do tipo talude infinito em ambiente SIG na análise da suscetibilidade a escorregamentos em rodovia, e ainda complementar o estudo com análises de estabilidade de taludes pelo método de Bishop Simplificado em seções geológico-geotécnicas de detalhe. O local da pesquisa é um trecho da rodovia Luís Augusto de Oliveira, entre os quilômetros 170 ao 192,5, que engloba os municípios de São Carlos, Ribeirão Bonito e Dourado, compreendendo 23 km de extensão, considerando uma faixa de 500m para cada lado a partir do eixo da rodovia, o que resultou em uma área de 23,44 km<sup>2</sup>. A modelagem foi executada utilizando-se os *softwares* ArcGis 10.1 para o estudo em escala 1:10.000, e o GeoStudio (SLOPE/W) nas seções de detalhe. A análise regional apontou que, em sua maioria, o trecho estudado possui muito baixa suscetibilidade a escorregamentos. Já as seções de detalhe auxiliaram na validação do modelo e no ajuste de parâmetros geomecânicos de entrada. O método do talude infinito ainda apresentou limitações relacionadas principalmente aos parâmetros geomecânicos do solo. De uma maneira geral, o modelo se mostrou satisfatório e versátil, refletindo a realidade do local e podendo ser constantemente realimentado à medida que se obtém dados mais precisos da região, tornando-se cada vez mais refinado e condizente com a realidade.

Palavras-chave: Movimentos de massa. Obras rodoviárias. Suscetibilidade. SIG. Determinístico.



## ABSTRACT

CRAIG, A. **Susceptibility analyses of road embankments using the infinite slope method in GIS environment.** 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2016.

The development of mass movement on road constructions is a big problem to be faced during its implementation, maintenance and conservation stages. Road landslides oftentimes are products of poorly planned and executed projects, and can provoke structural and economic damage to the road, besides disorders and risk to the local community and the environment. Before this problem, geotechnical mapping it is presented as a relevant supporting tool in the conception of the tracing mesh and the management of the road. This research sought to study the applicability of the deterministic infinite slope model in GIS environment in the analyses of slope susceptibility on roads, and complement the study with slope stability analyses through Bishop Simplified method on geological-geotechnical sections of detail. The search location is a stretch of Luís Augusto de Oliveira highway, between kilometer 170 to 192,5, and encompasses the municipalities of São Carlos, Ribeirão Bonito and Dourado, comprising 23 km of extension, considering a 500m range from each side of the road, resulting in a 23,44 km<sup>2</sup> area. The modeling was executed using softwares ArcGis 10.0 for studies in 1:10.000 scale, and GeoStudio (SLOPE/W) on the detail analyses sections. The regional analyses pointed out that the studied stretch has very low slope susceptibility. The detail sections were helpful in the validation of the model and on the adjustment of the geomechanical parameters of entrance. The infinite slope method presented some limitations related mainly to the geomechanical parameters of the soil. Generally, the model proved satisfactory and versatile, reflecting the local reality, being constantly fed back as user obtain more accurate data of the region, becoming increasingly refined and consistent with reality.

Keywords: Mass movement. Road constructions. Susceptibility. GIS. Deterministic.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfil de uma encosta com taludes de corte e aterro .....	29
Figura 2 - Exemplo de rastejo .....	37
Figura 3 - Forma típica de corrida .....	38
Figura 4 - Esquema de escorregamento rotacional.....	39
Figura 5 - Exemplo de "descaçamento", ruptura por queda .....	40
Figura 6 - Mapa correspondente a suscetibilidade a escorregamentos realizado através do método TRIGRS .....	54
Figura 7 - Resultado do cálculo do FS pelo método do talude infinito em ambiente SIG .....	55
Figura 8 - Mapa da área estudada com as classes de Fator de Segurança e perigo de escorregamento .....	56
Figura 9 - Mapa do FS da estabilidade da estabilidade das vertentes a deslizamentos .....	57
Figura 10 - Representação das estruturas vetorial e raster.....	59
Figura 11 - forças atuantes em um talude de inclinação $i$ . Onde: $\sigma_v$ : tensão vertical devida ao peso ( $P$ ), $\sigma_n$ e $\sigma_s$ : componentes normal e tangencial de $\sigma_v$ e $\tau$ : resistência ao cisalhamento. ....	62
Figura 12 - parâmetros envolvidos na análise de um talude infinito, com altura de nível d'água ( $h_2$ ), considerando fluxo paralelo ao talude .....	63
Figura 13 - valores de $\tau$ e $\sigma_n$ para um ponto P situado a uma profundidade $z$ (FIORI; CARMIGNANI, 2009). ....	64
Figura 14 - Profundidade Crítica $P_c$ de uma encosta de solo coesivo .....	65
Figura 15 - Método das fatias.....	66
Figura 16 - Forças atuantes numa fatia pelo método de Bishop Simplificado .....	67
Figura 17 - Fluxograma das atividades. ....	70
Figura 18 - Processamento do cálculo de FS em ambiente SIG.....	78
Figura 19 - Área de estudo da pesquisa.....	82
Figura 20 - Articulação das sete folhas A3 da área de estudo. ....	89
Figura 21 - Trecho da área de estudo referente à Base Cartográfica Digital. ....	91
Figura 22 - Resultado da validação do MDT. ....	92
Figura 23 - Trecho da área de estudo referente ao Mapa Hipsométrico. ....	94

Figura 24 - Trecho da área de estudo referente ao mapa de declividade.....	97
Figura 25 - Trecho da área de estudo referente Às unidades geológicas da região.	99
Figura 26 - Modelo da ficha de campo.....	103
Figura 27 - Foto do ponto P1 exibindo cicatriz de escorregamento em solo residual da formação Adamantina.....	105
Figura 28 - Foto do ponto P8 da formação Serra Geral, composto por solos residuais de coloração vermelho escura e textura argilosa. ....	106
Figura 29-Foto do ponto P14 correspondente a um local de aterro cuja inclinação encontra-se maior que 30°, o que não é recomendado para aterros não reforçados. ....	106
Figura 30 - Foto do ponto P25 com estrutura sedimentar com acamamento fino, existindo nesse ponto o contato entre as formações Botucatu e Serra Geral/Intrusivas Básicas. ....	107
Figura 31 - Foto do ponto P25, apresentando afloramento de rochas básicas.....	107
Figura 32 - Foto do ponto P27 correspondente à formação Botucatu, onde é possível verificar cicatriz de escorregamento em solo residual arenoso. ....	108
Figura 33 - FS x Inclinação evidenciando o valor de declividade de inversão para a formação Botucatu.....	113
Figura 34 - Foto dos taludes do ponto P16 presentes na Formação Botucatu. ....	115
Figura 35 – Análise de estabilidade pelo método de grid e raio no cálculo de FS para o aterro. ....	121
Figura 36 - Foto do ponto PD1 correspondente à Fm. Adamantina e o resultado da retroanálise na seção rompida ( $c'=4\text{KPa}$ ; $\gamma_{\text{nat}}= 18,25\text{Kn/m}^3$ ; $\phi'=24,1$ ). ....	122
Figura 37 - Foto do ponto PD2 correspondente a Fm. Serra Geral e resultado da modelagem para esta seção.....	123
Figura 38 - Foto do ponto PD4 correspondente ao material de aterro e resultado da modelagem para esta seção.....	124
Figura 39- Foto do ponto PD6 correspondente a Fm. Botucatu e resultado da modelagem para esta seção.....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos principais problemas em taludes de rodovias do Estado de São Paulo.....	26
Tabela 2 - Agentes e causas dos escorregamentos .....	33
Tabela 3 - Fatores deflagradores dos movimentos de encostas .....	34
Tabela 4 - Classificação dos movimentos de encostas .....	35
Tabela 5 - Características dos principais grandes grupos de movimentos de massa .....	36
Tabela 6 - Classes hierárquicas dos diferentes tipos de documentos cartográficos considerando os procedimentos de elaboração e conceitos .....	46
Tabela 7 - Diferentes produtos cartográficos de caracterização do meio físico .....	47
Tabela 8 - Tipos de cartas geotécnicas.....	47
Tabela 9 - Vantagens e desvantagens das abordagens para estudo de suscetibilidade.....	52
Tabela 10 - Classes de suscetibilidade a deslizamentos e processos erosivos de acordo com a declividade.....	74
Tabela 11 - Classes de FS adotadas .....	77
Tabela 12 - Formações que ocorrem no local da pesquisa e suas características gerais.....	84
Tabela 13 - Distribuição das classes hipsométricas (em %) da área total de estudo. ....	93
Tabela 14 - Distribuição das classes hipsométricas (em %) por folha A3. ....	93
Tabela 15 - Classes de suscetibilidade a deslizamentos e processos erosivos de acordo com a declividade.....	95
Tabela 16 - Distribuição em área percentual total das classes de declividade.....	95
Tabela 17 - Distribuição das Classes de Declividade (em %) por folha A3.....	96
Tabela 18 - Distribuição em área percentual total de cada unidade.....	100
Tabela 19 - Distribuição dos materiais geológicos (em %) por folha A3.....	100
Tabela 20 - Distribuição dos materiais geológicos (em %) por classes de declividade. ....	100
Tabela 21 - Valores encontrados na bibliografia para os materiais geológicos da área de pesquisa.....	101

Tabela 22 - Principais pontos cadastrados e suas características gerais.....	104
Tabela 23 - Distribuição dos pontos de campo por quilômetro estudado. ....	105
Tabela 24 - Valores dos parâmetros geomecânicos adotados para a simulação dos cenários 1, 2 e 3. ....	109
Tabela 25 - Variação do FS em função da declividade e profundidade de ruptura. ....	110
Tabela 26 - Variação do FS em função da declividade e coesão efetiva.....	111
Tabela 27 - Variação do FS em função da declividade e ângulo de atrito. ....	111
Tabela 28 - Variação do FS em função da declividade e nível d'água ....	112
Tabela 29 - Valor da declividade a partir da qual ocorre aumento de FS para os taludes da Formação Botucatu .....	113
Tabela 30 - Distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação do cenário 1 .....	114
Tabela 31 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 do cenário 1 .....	114
Tabela 32 - Valores de FS para os taludes de corte e aterro. ....	116
Tabela 33 - Distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação do cenário 2.....	117
Tabela 34 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 do cenário 2.....	117
Tabela 35 - Distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação do cenário 3.....	119
Tabela 36 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 do cenário 3.....	119
Tabela 37 - Resultado da retroanálise realizado no ponto PD1.....	122

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHD	Análise Hierárquica de Decisão
AHP	Analytical Hierarchy Process
ESRI	Environmental Systems Research Institute
AID	Área de Influência Direta
<i>dpi</i>	dots per inch
<i>TIFF</i>	<i>Tagged Image File Format</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
VDM	Volume Diário Médio
SRM	Solo Residual Maduro
SRJ	Solo Residual Jovem
UGRHI	Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
FS	Fator de Segurança
IAEG	<i>International Association Engineering Geology</i>
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDT	Modelo Digital de Terreno

P <sub>c</sub>	Profundidade Crítica
RAP	Relatório Ambiental Preliminar
RIMA	Relatório de Impactos ao Meio Ambiente
SHALSTAB	<i>Shallow Landslide Stability Analysis</i>
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SMA	Secretaria de Meio Ambiente
SPT	<i>Standart Penetration Ttest</i>
TRIGRS	<i>Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional Slope Stability</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
2. OBJETIVOS.....	28
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	29
3.1. Movimentos de Massa .....	31
3.2. Processos Erosivos em Encostas/Taludes .....	41
3.3. Classificação dos Maciços Naturais .....	42
3.4. Cartografia Geotécnica .....	45
3.4.1. Mapeamento Geotécnico em Obras Lineares .....	48
3.4.2. Mapeamento de Suscetibilidade com Métodos determinísticos .....	51
3.5. Sistemas de Informações Geográficas – SIG.....	58
3.6. Métodos Determinísticos de Análise de Estabilidade.....	60
3.6.1. Talude Infinito .....	61
3.6.2. Bishop Simplificado .....	66
4. MÉTODO .....	69
4.1. Planejamento .....	71
4.2. Inventário .....	71
4.2.1. Base Cartográfica Digital .....	72
4.2.2. Modelo Digital de Terreno (MDT) .....	72
4.2.2.1. Mapa Hipsométrico .....	73
4.2.2.2. Mapa de Declividades .....	74
4.2.2.3. Mapa de Sombreamento.....	74
4.2.3. Mapa de Materiais Geológicos .....	75
4.2.4. Levantamentos de Campo.....	75
4.3. Análise de Semi-Detalhe .....	76
4.4. Análise de Detalhe .....	79
4.5. Síntese .....	79
5. ÁREA DE ESTUDO .....	80
5.1. Aspectos geológico-geotécnicos.....	83
5.1.1. Materiais Inconsolidados .....	84
5.1.1.1. Materiais Inconsolidados Residuais da Formação Adamantina .....	85
5.1.1.2. Materiais Inconsolidados Residuais da Formação Botucatu .....	85

5.1.1.3. Materiais Inconsolidados Residuais das Formações Serra Geral/Intrusivas Básicas .....	86
5.1.1.4. Materiais Inconsolidados Retrabalhados (Colúvios).....	87
6. RESULTADOS E ANÁLISES .....	88
6.1. Inventário.....	88
6.1.1. Base Cartográfica Digital.....	88
6.1.2. Modelo Digital de Terreno .....	92
6.1.3. Mapa Hipsométrico .....	93
6.1.4. Mapa de Declividades .....	95
6.1.5. Mapa de Materiais Geológicos.....	98
6.1.6. Levantamentos de Campo .....	101
6.2. Análise de Semi-Detalhe .....	108
6.2.1. Caracterização Geológico-Geotécnica Preliminar.....	108
6.2.2. Aplicação do Modelo do Talude Infinito .....	109
6.2.3. Limitações do Modelo de Análise de Estabilidade do Tipo Talude Infinito .....	110
6.2.4. Cenário 1.....	113
6.2.4.1. Taludes Naturais .....	114
6.2.4.2. Taludes de Corte e Aterro .....	116
6.2.5. Cenário 2.....	117
6.2.6. Cenário 3.....	118
6.3. Análise de Detalhe em Taludes Críticos .....	120
7. CONCLUSÕES .....	127
REFERÊNCIAS .....	129
APÊNDICES .....	141
Apêndice A – Base Cartográfica Digital.....	143
Apêndice B – Cenário 1 (Folhas 04 e 05).....	145
Apêndice C – Cenário 2 (Folhas 04 e 05) .....	147
Apêndice D – Cenário 3 (Folhas 04 e 05) .....	149

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de instabilização de taludes e encostas são um dos maiores problemas enfrentados quando se fala em manutenção e conservação de estradas, pois além de provocarem danos econômicos potenciais à própria rodovia, podem gerar problemas ambientais no entorno e colocar em risco ocupações lindeiras ao corpo estradal.

As obras lineares, como rodovias, possuem a característica de cortar diferentes unidades geológicas e sistemas de relevo durante sua fase de execução, resultando em um comportamento distinto diante das diferentes solicitações que lhes são impostas. Com isso, se tornam fundamentais estudos preliminares de cunho geológico-geotécnico do local, evitando futuras complicações no terreno e na rodovia.

Nesses estudos preliminares, os taludes de corte e aterro merecem atenção especial. Produtos das obras de abertura de rodovias, eles são o principal motivo da interdição e fechamento de estradas quando mal executados, principalmente nos períodos de chuva, onde os processos de instabilização de taludes se fazem mais frequentes. Isso inclui os movimentos de massa de uma maneira geral, como escorregamentos, corridas, quedas, etc.

Dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2011) informam que em 2011 foram investidos em torno de R\$ 150 milhões na recuperação de danos e restauração de estradas federais danificadas por escorregamentos de encostas e processos erosivos que ocorreram nos períodos chuvosos.

Em São Paulo, um levantamento realizado junto às regionais do Departamento de Estradas de Rodagem-SP (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991), identificou os principais problemas relacionados à instabilidade de talude nas rodovias do estado, como mostra a Tabela 1. Dentre os principais problemas, pode-se observar que os escorregamentos são aqueles que possuem uma maior diversidade de causas. Isso demonstra que esse tipo de movimento merece destaque, haja vista que a sua ocorrência pode ser mais frequente quando comparado aos demais movimentos do levantamento realizado.

Tabela 1 – Classificação dos principais problemas em taludes de rodovias do Estado de São Paulo.

Tipo de Problema	Forma de ocorrência	Principais causas
Erosão	> em talude de corte e aterro (em sulcos e diferenciada.)	> deficiência de drenagem. > deficiência de proteção superficial.
	> longitudinal ao longo da plataforma.	> concentração de água superficial.
	> localizada e associada a obras de drenagem (ravinas e boçorocas).	> concentração de água superficial e/ou interceptação do lençol Freático.
	> interna em aterros ( <i>piping</i> ).	> deficiência ou inexistência de drenagem interna.
Desagregação superficial	> empastilhamento superficial de corte.	> secagem e umedecimento do Material. > presença de argilomineral expansivo ou desconfinamento do material.
Escorregamento em corte	> superficial. > profundo.	> inclinação acentuada do talude. > relevo enérgico.
	> forma e dimensões variadas	> descontinuidades do solo e rocha.
	> superficial em corte ou encostas naturais. > profundos em corte.	> saturação do solo.
	> formas e dimensões variadas. > movimentação de grandes dimensões e generalizada em corpo de tálus.	> evolução por erosão. > corte de corpo de tálus. > alteração de drenagens.
Escorregamento em aterro	> atingindo a borda do aterro.	> compactação inadequada da borda.
	> atingindo o corpo do aterro.	> deficiência de fundação. > deficiência de drenagem. > deficiência de proteção superficial. > má qualidade do material. > compactação inadequada. > inclinação inadequada do talude.
Recalque em aterro	> deformação vertical da Plataforma.	> deficiência de fundação. > deficiência de drenagem. > rompimento de bueiro. > compactação inadequada.
Queda de blocos	geralmente em queda livre	> ação da água e de raízes nas descontinuidades do maciço rochoso.
Rolamento de blocos	movimento de bloco por rolamento no corte ou encosta	> descalçamento da base por erosão.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991).

Diante disso, se torna importante a observação da natureza desses processos, a fim de evitar problemas sociais e econômicos associados a escorregamentos, sendo o

mapeamento geológico-geotécnico uma relevante ferramenta de análise, identificação e previsão desses eventos, além de atuar como instrumento de planejamento e gestão de rodovias.

Neste contexto se insere este trabalho, que busca analisar a suscetibilidade a instabilização de taludes rodoviários em um trecho de rodovia se embasando em modelos determinísticos e tendo como auxílio ferramentas de modelagem espacial (Sistema de Informações Geográficas – SIG).

O local da pesquisa é o trecho da Rodovia Luís Augusto de Oliveira (SP-215) que compreende os quilômetros 170 ao 192,5 e abrange os municípios de São Carlos, Ribeirão Bonito e Dourado, localizada no interior do estado de São Paulo. A rodovia possui 63 quilômetros de extensão entre São Carlos e a rodovia Comandante João Ribeiro de Barros (SP-255), na qual se chega à Jaú, Bauru e outras cidades da região.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o uso do modelo de estabilidade do tipo talude infinito em ambiente SIG para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos, complementado por análises com o método de Bishop Simplificado em seções geológico-geotécnicas de detalhe.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de se obter o melhor entendimento acerca da pesquisa proposta, algumas definições devem ser apresentadas e discutidas, como a definição dos termos **talude e encostas**.

Augusto Filho e Virgili (1998, grifo do autor) definem taludes como:

Os taludes ou as encostas naturais são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solos e rochas), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos. Podem apresentar modificações antrópicas, tais como cortes, desmatamentos, introdução de cargas, etc. O termo **encosta** é mais empregado em estudos de caráter regional. **Talude de corte** é entendido como um talude originado de escavações antrópicas diversas. **Talude artificial** refere-se ao declive de aterros construídos, a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens, incluindo rejeitos industriais, urbanos ou de mineração.

Gerscovich (2012, p.13), de uma maneira mais simplificada, apresenta a seguinte definição: “talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode ser natural, também denominado encosta, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes”.

Segundo Wolle (1980), talude é o termo utilizado para definir encostas próximas às obras lineares, possuindo um caráter mais geotécnico e relacionado a áreas restritas.

Stochalak (1974), diz que as encostas podem ser definidas como toda superfície natural inclinada que une outras duas, caracterizadas por diferentes energias potenciais gravitacionais.

De uma maneira geral, entende-se que os termos talude e encostas podem ser representados segundo a Figura 1:

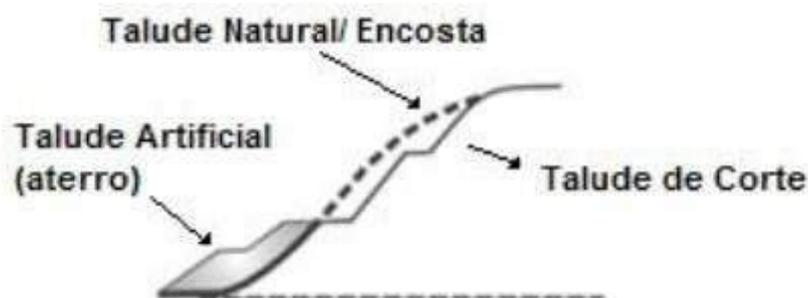


Figura 1 - Perfil de uma encosta com taludes de corte e aterro  
Fonte: Carvalho, Macedo e Ogura, (2007)

Outros termos que merecem atenção e precisam ser definidos neste trabalho estão relacionados ao significado das palavras **mapa, carta e mapeamento geotécnico**.

Muitas vezes os termos “mapa” e “carta” são utilizados em publicações como sinônimos, no entanto, essas palavras possuem significados diferentes. De acordo com Zuquette e Nakazawa (1998), “o termo **mapa** deve ser utilizado para o documento que registra as informações (atributos), obtidas de um determinado aspecto do meio físico em questão, sem que sejam realizadas interpretações dessas informações”.

Segundo os mesmos autores, “o termo **carta** refere-se a um documento cartográfico que apresenta as interpretações de informações contidas em mapas para uma finalidade específica”.

Trazendo essas definições para o campo da geotecnia, esses documentos gráficos dão origem aos **mapas e cartas geotécnicos** (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998).

A Associação Internacional de Geologia de Engenharia (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 1976) define o mapa geotécnico como “um tipo de mapa geológico que classifica e representa os componentes do ambiente geológico, os quais são de grande significado para todas as atividades de engenharia, planejamento, construção, exploração e preservação do ambiente”.

Já com relação ao termo **mapeamento geotécnico**, Zuquette (1987) considera que o mapeamento geotécnico é um conjunto de ações que pode ser entendido como:

Um processo que tem por finalidade básica levantar, caracterizar, classificar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico sejam geológicos, hidrogeológicos 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, e, ao final, representadas em mapas, cartas e anexos descritivos, sempre respeitando os princípios básicos que regem a execução do mapeamento geotécnico conforme proposto por Thomas (1970).

No trabalho aqui apresentado, será utilizado o termo **mapas** para designar todos os documentos de cunho cartográfico elaborados ao longo da pesquisa.

Esta revisão aborda inicialmente algumas definições para o termo movimentos de massa, seus agentes e causas e as principais classificações dos movimentos bem como a definição dos diferentes processos a ele relacionados, além dos processos erosivos e a classificação de maciços de uma maneira geral.

Em seguida, trata-se da cartografia geotécnica considerando as diferentes tipologias de cartas e a sua aplicação no mapeamento de obras lineares, dando relevância ao mapeamento de suscetibilidade e a análise de estabilidade utilizando os métodos determinísticos.

### 3.1. Movimentos de Massa

Os movimentos de massa podem ocasionar problemas ambientais catastróficos e perigo para áreas densamente povoadas, podendo causar impactos no meio físico e biótico, muitas vezes gerando vítimas fatais e consideráveis perdas econômicas (MARTINI et al. 2006).

O início dos estudos acerca dos movimentos de massa no país está diretamente relacionado ao caráter catastrófico do fenômeno e também ao nível de desenvolvimento técnico na época em que esses fenômenos estavam ocorrendo. Apesar das encostas brasileiras sempre apresentarem eventos de instabilidade, foi somente com o advento da Mecânica dos Solos no Brasil que os movimentos de massa puderam ser propriamente interpretados e analisados pelo corpo técnico, datando do início da década de 50 os primeiros trabalhos sobre esse assunto (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Assim como os termos listados no tópico anterior, o termo “movimentos de massa” possui uma série de definições.

Para Freire (1965, apud GUIDICINI; NIEBLE, 1984, p.1), no sentido amplo do termo, o escorregamento “é a afirmação da natureza coletiva do deslocamento de partículas, mediante a qual se faz a distinção entre esses fenômenos e os processos de transferência individual de partículas sob a ação de um agente exterior, como a água e o vento (...)”. O termo “escorregamento” definido por Freire então, engloba os movimentos de massa de uma maneira geral, e não especificamente o escorregamento como em classificação.

Tominaga (2009) define movimentos de massa como:

Movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos.

Os movimentos de massa, assim como os processos erosivos e intempéricos, são importantes agentes atuantes na evolução das formas de relevo, desempenhando função importante na dinâmica superficial, responsável pela “modelagem” da superfície da terra (INFANTI JÚNIOR; FORNASARI FILHO, 1998). Segundo Bloom (1988), as encostas se alteram constantemente, tendendo a um estado central de equilíbrio com os processos atuantes, buscando manter a configuração estrutural mais estável possível.

Os Escorregamentos encontram-se relacionados a diversos fatores como geometria e inclinação do talude, seu material de formação (parâmetros mecânicos intrínsecos ao tipo

de solo ou rocha) e também a atividades antrópicas (uso e ocupação inadequados), no entanto, a ação da água se distancia de qualquer fator em importância.

A grande maioria dos processos de movimentação de massa em território brasileiro encontra-se associada a eventos de elevada pluviosidade, de duração que variam entre algumas poucas horas ou até alguns dias. Os escorregamentos em rochas tendem a ser mais suscetíveis a chuvas mais concentradas, enquanto que os processos em solo dependem também dos índices pluviométricos acumulados nos dias anteriores. Michel et al. (2011) buscaram estimar a quantidade de água necessária para deflagrar escorregamentos, e concluíram que, para a sua área de estudo (Bacia do Rio Cunha-SC), os movimentos de massa se deram após um longo período chuvoso. Nielsen e Turner (1975) estabeleceram que alguns critérios de análise são decisivos nesse sentido: intensidade dos períodos de tempestade, quantidade de água acumulada antes e depois dos eventos e o tempo de duração das chuvas. Os autores enfatizaram também a existência de um valor limite para cada região, acima do qual, ocorrerá a desestabilização de um talude.

De acordo com Guidicini e Nieble (1984) a ocorrência de um elevado índice de pluviosidade é condição necessária, mas nem sempre é condição suficiente para que haja deflagração de um escorregamento. Um exemplo disso é o escorregamento ocorrido na encosta do morro dos Cabritos no Rio de Janeiro. Simulações dos padrões de fluxo na encosta (GERCOVICH; CAMPOS; VARGAS JÚNIOR, 2006) em associação com estudos de estabilidade (GERSCOVICH, 1994; GERSCOVICH; CAMPOS; VARGAS JÚNIOR, 2008) confirmaram que o principal mecanismo deflagrador da ruptura não estava relacionado à infiltração de água de chuva, e sim às variações de poropressão, em virtude da infiltração de água pelas fraturas do embasamento, justificando todo o fenômeno de movimentação de massa (GERSCOVICH, 2012).

De uma maneira geral, o processo de deflagração dos movimentos de massa e consequentemente do fenômeno de instabilidade de taludes, é controlado por uma série de eventos, muitas vezes de caráter cíclico, que tem sua origem com a formação da própria rocha e toda a sua história geológica e geomorfológica subsequente, como movimentos tectônicos, intemperismo, erosão e ação antrópica (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998). No entanto, existem alguns fatores condicionantes que podem atuar de forma mais direta e imediata, denominados **agentes e causas**, na deflagração destes processos.

Segundo Guidicini e Nieble (1984, p. 36), entende-se por *causa*, “o modo de atuação de determinado *agente* ou, em outros termos, um agente poder se manifestar por meio de uma ou mais causas na instabilização de um talude ou encosta”. Os autores citam como exemplo o caso da água como agente, que pode influenciar na instabilidade de diversas formas.

Os agentes da deflagração podem ser divididos em **predisponentes** e **efetivos**. Denomina-se agentes predisponentes o conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais em que o movimento irá ocorrer, ou seja, trata-se das propriedades e características naturais do local, nelas não atuando a ação antrópica. Já os agentes efetivos estão relacionados ao conjunto de elementos diretamente responsáveis pelo fenômeno do movimento de massa, neles se incluindo a ação humana.

Aos agentes efetivos pode ainda caber nova subdivisão em função da sua forma de atuação (mais ou menos direta) no período que antecede a ruptura, em **preparatórios** e **imediatos**. Como exemplo dos agentes efetivos preparatórios tem-se: pluviosidade, erosão pela água ou vento, congelamento e degelo, variações de temperatura, dissolução química etc.. Entre os agentes efetivos imediatos, podemos citar: chuva intensa, fusão de gelo e neve, terremotos e etc.

Com relação às causas, estas podem ser subdivididas como *externas*, *internas* e *intermediárias*. As causas internas levam à ruptura do talude ou encosta sem que haja qualquer mudança na geometria da estrutura, e são resultado da perda de resistência interna do material. As causas externas levam à ruptura do talude ou encosta através de um aumento nas tensões de cisalhamento, sem que haja diminuição da resistência do material (ex.: mudanças na geometria). Por último, as causas intermediárias são resultado dos efeitos causados por agentes externos no interior do talude (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

A Tabela 2 resume as terminologias utilizadas por Guidicini e Nieble (1984), no que tange os agentes e causas dos movimentos de massa.

Tabela 2 - Agentes e causas dos escorregamentos

Agentes			Causas		
Predisponentes	Efetivos		Internas	Externas	Intermediárias
	Preparatórios	Imediatos			
Complexo geológico, complexo morfológico, complexo climático-hidrológico, gravidade, calor solar, tipo de vegetação.	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação do freático, ação de animais e antrópica.	Chuvas intensas, fusão do gelo e neves, erosão, terremoto, ondas, vento, ação do homem.	Efeito das oscilações térmicas; Redução dos parâmetros de resistência por intemperismo.	Mudanças na geometria do sistema; Efeitos de vibrações; Mudanças naturais na inclinação das camadas.	Elevação do nível piezométrico em massas "homogêneas"; Elevação da coluna d'água em discontinuidades; Rebaixamento rápido do lençol freático; Erosão por pipping; Diminuição da coesão aparente.

Fonte: Guidicini e Nieble (1984).

No entanto, além das denominações acima citadas, Varnes (1978) ainda aponta os principais agentes condicionantes e mecanismos de deflagração dos movimentos de massa,

relacionando os fatores que aumentam a sollicitação e os que reduzem a resistência dos maciços, com os respectivos fenômenos naturais e antrópicos a que estão atrelados.

A Tabela 3 resume os principais fatores deflagradores dos movimentos de massas propostos por Varnes (1978).

Tabela 3 - Fatores deflagradores dos movimentos de encostas

Ação	Fatores		Fenômenos naturais/antrópicos
Aumento da sollicitação	Remoção de massa (lateral ou base)		Erosão, escorregamento e cortes Peso da água de chuva, neve, granizo, etc.
	Sobrecarga		Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros, etc.
	Sollicitações dinâmicas		Terremotos, ondas, vulcões, etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos.
Redução da resistência	Pressões laterais		Água em trincas, congelamento, material expansivo.
	Características inerentes ao material	Textura, estrutura, geometria, etc.	Características geomecânicas do material, estado de tensões iniciais.
	Mudanças ou fatores variáveis	Mudanças nas características do material	Intemperismo, redução de coesão, ângulo de atrito, elevação do nível d'água.
	Outras causas		Enfraquecimento devido ao rastejo progressivo. Ação das raízes das árvores e buracos de animais.

Fonte: Varnes (1978).

Segundo Augusto Filho e Virgili (1998), os principais condicionantes dos movimentos de massa e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira são:

- Características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas/taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas;
- Características geomorfológicas, com destaque para a geometria do perfil da encosta (retilíneo, convexo e côncavo);
- Regime das águas de superfície e subsuperfície;
- Características do uso e ocupação da área, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e etc.

Sendo assim, diante da exposição dos diferentes agentes e causas e também das definições de movimentos de massa apresentadas, esse fenômeno pode então tomar diferentes formas e proporções, apresentando algumas classificações.

A literatura conta com uma série de autores que discorrem sobre a classificação dos movimentos de massa. Trata-se de um assunto de grande importância, pois possibilita associar os tipos de movimentos a um conjunto de características, proporcionando um melhor entendimento acerca do fenômeno e permitindo a formulação correta de modelos de remediação e correção.

No entanto, ainda é um tema bastante complexo já que esses processos envolvem uma variedade de materiais, que por sua vez desenvolvem diferentes tipos de movimentos. Dessa forma, as classificações se baseiam em parâmetros distintos como velocidade e mecanismo do movimento, característica dos materiais, modo de deformação, geometria do movimento e quantidade de água envolvida (SELBY, 1993), tornando difícil sua unificação.

Existem diversas propostas de sistemas de classificação, cuja maioria possui aplicabilidade regional, influenciadas pelas condições climáticas e geológicas do ambiente em que o autor as elaborou.

A classificação elaborada por Sharpe (1938) foi o primeiro modelo largamente utilizado, funcionando como base para muitas classificações posteriores. O autor correlaciona simplificada, o tipo e a velocidade de movimentação com a natureza do material da massa em movimento, relacionando essa massa aos ambientes geomorfológicos e climáticos.

Após a proposta de Sharpe, muitos outros sistemas de classificação surgiram, como o de Varnes (1978) e Hutchinson (1968). A classificação elaborada por Varnes (1978) subdivide os movimentos em: queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamentos e corridas, sendo aplicável para solos e rochas. Esse modelo de classificação é o mais utilizado internacionalmente sendo adotada pela International Association Of Engineering Geology. A Tabela 4 apresenta resumidamente a sua proposta.

Tabela 4 - Classificação dos movimentos de encostas

Tipo de Movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de Rocha De blocos rochosos	Abatimento de detritos De blocos de detritos	Abatimentos de terra De blocos de terra
	Translacional	Muitas unidades	De rocha	De detritos	De terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				(Rastejo de solos)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimento					

Fonte: Varnes (1978).

Já a classificação de Hutchinson (1968) pode ser subdividida em duas partes: a primeira se refere a todos os movimentos relacionados à encosta independentemente do material (solo ou rocha), se baseando inicialmente na morfologia da massa em movimento, dos seus mecanismos, material e na taxa de movimentação; a segunda possui finalidades unicamente geotécnicas, se baseando em reconhecer as condições que controlam a resistência do solo.

Como já mencionado, a maioria das classificações elaboradas possui aplicabilidade apenas regional, sendo necessárias as devidas adaptações. Diante disso, existem algumas propostas que adequam a classificação dos movimentos de massa a ambientes de clima tropical, como é o caso do Brasil. Augusto Filho (1992), ao revisar a proposta de classificação de Varnes (1978), ajustou as características dos principais grupos de processos de escorregamentos às características ambientais brasileiras. A proposta deste autor encontra-se na Tabela 5, onde os movimentos de massa foram agrupados em rastejos ou fluência, escorregamentos, quedas e corridas ou fluxos.

Tabela 5 - Características dos principais grandes grupos de movimentos de massa

Processos	Caracterização do movimento
Rastejo ou fluência	Vários planos de deslocamento (internos). Velocidades muito baixas (cm/ano) e baixas e decrescentes com a profundidade. Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes. Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada. Geometria indefinida.
Escorregamento	Poucos planos de deslocamento (externos). Velocidades médias (km/h) e altas (m/s). Pequenos a grandes volumes de material. Geometria e materiais variáveis. Planares -> solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza. Circulares -> solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas. Em cunha -> solos e rochas com dois planos de fraqueza.
Queda	Sem planos de deslocamento. Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado. velocidades muito altas (vários m/s). Material rochoso. Pequenos a médios volumes. Geometria variável: lascas, placas, blocos e etc. Rolamento de matacão. Tombamento.
Corrida	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação). Movimento semelhante a de um líquido viscoso. Desenvolvimento ao longo das drenagens. Velocidades médias a altas. Mobilização de solos, rochas, detritos e água. Grandes volumes de material. Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Augusto Filho (1992).

Ante as classificações acima apresentadas, faz-se necessária a definição dos principais movimentos de massas citados até então.

### ***Rastejos ou fluência***

Trata-se de uma movimentação lenta e contínua das encostas, cujos limites são indefinidos, podendo envolver grande quantidade de material, sem que haja diferenciação entre a massa em movimento e a massa estacionária.

Isso acontece, pois, além da movimentação ser provocada pela ação da gravidade, ocorre intervenções dos efeitos devido às variações de temperatura e umidade no local, que tem como consequência a expansão e contração dos materiais envolvidos. Sendo assim, a camada superior da encosta, que sofre com esses efeitos começa a se mover em função desse ciclo. Já a camada inferior, somente desenvolverá rastejo por ação da gravidade, sem a participação de outros agentes, resultando em uma movimentação constante (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

O mecanismo de deformação desse movimento de massa então apresenta certa peculiaridade, se assemelhando a de um líquido muito viscoso. De acordo com Guidicini e Nieble (1984), o mecanismo de deformação dos rastejos pode ser explicado da seguinte maneira:

A tensão a partir da qual os terrenos passam a sofrer fluência é menor do que a tensão de cedência ao cisalhamento e pode ser designada por “tensão de fluência”, e depende logicamente da curva de tensão deformação do material particular presente no talude. Enquanto as tensões que agem no sentido de movimentar uma determinada massa de material estiverem abaixo da tensão de fluência, o talude permanecerá estável. Quando excederem aquele valor, o terreno iniciará sua movimentação num estado de rastejo, e, quando atingirem valores iguais ao de resistência máxima ao cisalhamento, iniciar-se-á o escorregamento.

Os rastejos podem ser observados em superfície, a partir do posicionamento inclinado de postes, cercas, árvores e etc., conforme a Figura 2.

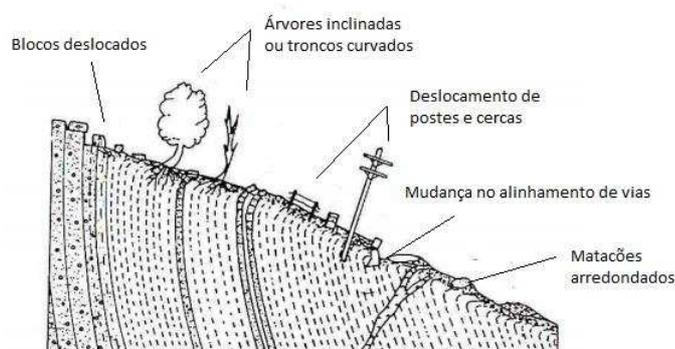


Figura 2 - Exemplo de rastejo  
Fonte: Sharpe (1938).

## **Corridas**

De acordo com Gerscovich (2012), as corridas são movimentos que ocorrem em altas velocidades (superiores a 10 km/h) provocadas pela perda completa das propriedades de resistência dos solos (atrito interno), devido à destruição de sua estrutura em presença de água em excesso. Com isso, a massa de solo passa a se comportar como um fluido e os deslocamentos atingem extensões significativas.

O processo de fluidificação presente nas corridas pode ocorrer das seguintes formas (GUIDICINI; NIEBLE, 1984):

- Adição de água em solos predominantemente arenosos;
- Efeito de vibrações (agentes dinâmicos) como terremotos, cravação de estacas e etc.;
- Amolgamento em argilas classificadas como muito sensíveis (Quick Clays).

O grau de fluidez pode então ser extremamente variável, e isso se encontra diretamente relacionado à quantidade de água que foi adicionada ao sistema.

A forma na qual a corrida se apresenta é constituída de três elementos: a região de montante, denominada raiz, que concentra o material antes intacto que sofrerá deslocamento; a parte central, mais alongada, denominada corpo; e a área da base, que corresponde ao local de acumulação final do material transportado. O modelo representativo do fenômeno da corrida pode ser observado na Figura 3.

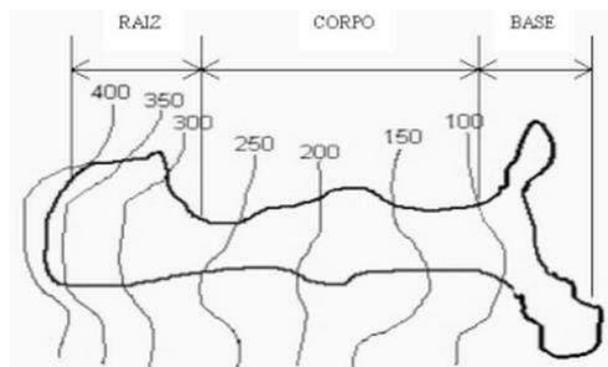


Figura 3 - Forma típica de corrida  
Fonte: Zaruba e Mencl (1982).

## **Escorregamentos**

Os escorregamentos são movimentos rápidos, de duração geralmente curta, com a presença de uma superfície de ruptura bem definida. A velocidade de movimentação de um escorregamento cresce mais ou menos rapidamente, vindo a decrescer logo em seguida até um valor bem pequeno.

Durante a fase inicial do escorregamento, a massa em movimento se desloca com velocidade acelerada. No entanto, à medida que o escorregamento se efetua, há uma tendência de diminuição das forças que determinam o movimento e a massa atinge posições cada vez mais estáveis. Com isso, o movimento vai se retardando e tende ao repouso, ou assume configuração de rastejo (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Os escorregamentos também recebem classificação, podendo ser **rotacionais** ou **translacionais**, sendo essa classificação realizada em função das condições geomorfológicas e das superfícies de ruptura (planares, circulares, em cunha ou mistas).

- Escorregamentos rotacionais

Nesse tipo de escorregamento, o movimento de massa ocorre por ruptura ao longo da superfície de escorregamento e consequente “rotação” em torno do centro C do arco conforme a Figura 4.

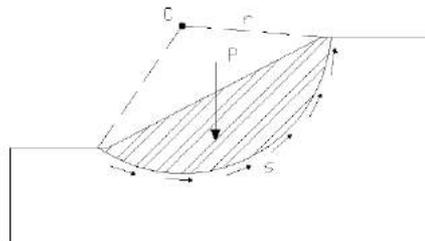


Figura 4 - Esquema de escorregamento rotacional  
Onde: C: centro do arco; r: raio do arco; s: resistência ao cisalhamento; P: força peso.  
Fonte: Tonus (2009).

Esse tipo de escorregamento é comum em solos homogêneos, residuais, de grande espessura, como os brasileiros, levando à mobilização do manto de alteração, sendo que a ruptura, tanto em rochas quanto em solos, segue o caminho de menor resistência.

A superfície de mobilização é bem definida, podendo acontecer ao longo de um plano de ruptura qualquer ou ao longo da própria superfície da rocha. Esse tipo de evento é comum em taludes mais íngremes e resultam em consequências catastróficas.

- Escorregamentos translacionais

Os escorregamentos translacionais ocorrem geralmente em solos com elevada anisotropia, a qual se relaciona a superfície de escorregamento desse tipo de movimento. E trata-se do modelo mais comum de escorregamento.

Diferentemente dos escorregamentos rotacionais, esse tipo de evento ocorre geralmente em solo coluvionar de pequena espessura (solo raso) e subjacente a um embasamento rochoso. É justamente essa diferença de parâmetros, principalmente relacionado à permeabilidade, que promove o surgimento de uma superfície preferencial de

movimento, que pode existir tanto no contato rocha-solo como também entre os horizontes do perfil que se formou (horizontes com diferentes permeabilidades).

Selby (1993) confirma isso ao definir:

Os escorregamentos translacionais possuem essencialmente planos de ruptura que normalmente se desenvolvem ao longo do limite entre materiais inconsolidados de diferentes densidades ou permeabilidades.

### **Quedas**

As quedas envolvem particularmente materiais rochosos, que por ação da gravidade desenvolvem movimento de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfícies de movimentação.

Segundo Guidicini e Nieble (1984), as quedas de blocos ocorrem pela ação alternada de congelamento e degelo ao longo de fraturas e juntas, por ciclagem térmica em massas rochosas, por perda de apoio de blocos causada pela ação erosiva da água, por processo de desconfinamento lateral de maciços rochosos, por alívio de tensões, por vibrações, por empuxo hidrostático ao longo de juntas verticais, ou então, pelo conjunto desses processos (Figura 5).

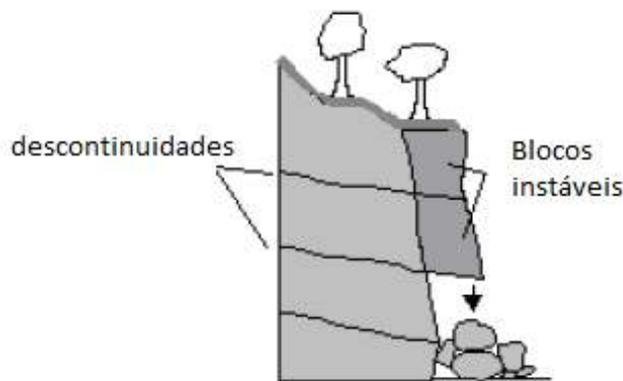


Figura 5 - Exemplo de "descaçamento", ruptura por queda  
Fonte: (Modificado de MANUAL..., 2000 *apud* GERSCOVICH, 2012).

Os processos erosivos, apesar de constituírem movimentos de massa em encostas e taludes, não se encontram inclusos nos sistemas de classificação, pois configuram objeto de grande complexidade e preocupação em virtude dos danos que podem promover. Os seus mecanismos de deflagração podem ser constituídos de vários agentes, tornando necessário tratar esse tema separadamente.

### 3.2. Processos Erosivos em Encostas/Taludes

Segundo Selby (1993, p. 219), erosão pode ser definida por “um termo que caracteriza o desprendimento e remoção de partículas de solo e rocha sob a ação do escoamento da água, vento, ondas, gelo e movimentos de massa”.

Salomão e Iwasa (1995) complementam esse significado definindo: “erosão é o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou de fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo e organismos (plantas e animais)”.

Para o caso exclusivo das encostas, Selby (1993, p. 219) completa “para as encostas, na maioria dos casos, os processos dominantes estão sob a ação das águas das chuvas, do escoamento superficial, da água em subsuperfície e pelos movimentos de massa. A ação das ondas, gelo ou vento, pode estar relacionada a casos especiais, restrito a ambientes peculiares”.

Além das causas naturais citadas acima, o desenvolvimento do processo erosivo encontra-se diretamente relacionado à ação antrópica que ao executar e disponibilizar obras e materiais de maneira inadequada acaba por promover um desequilíbrio ambiental culminando em perda e enfraquecimento dos solos, vindo a resultar em movimentações das camadas mais superficiais.

Dessa forma, segundo Infanti Júnior e Fomasari Filho (1998), existem duas maneiras de se abordar e dividir os processos erosivos:

- Erosão natural ou geológica: erosão que se desenvolve em condições de equilíbrio com a formação do solo;
- Erosão acelerada ou antrópica: cuja intensidade é superior à da formação do solo, impossibilitando a sua recuperação natural (resiliência).

Um dos principais agentes envolvidos quando se trata de instabilidade de taludes, sem dúvida é a água das chuvas. O processo erosivo então pode ser deflagrado basicamente pelos seguintes mecanismos: impacto das chuvas, provocando o desprendimento das partículas; remoção e transporte pela ação do escoamento superficial, e por fim, deposição dos sedimentos produzidos, vindo a formar depósitos de assoreamento.

O escoamento superficial pode se desenvolver de diferentes maneiras ao longo de uma encosta, e a partir disso, gerar dois tipos de erosão: a *erosão laminar*, causado pelo escoamento difuso das águas das chuvas, tendo como resultado a remoção progressiva das camadas superficiais do solo, e a *erosão linear*, provocada pela concentração das linhas de

fluxo das águas do escoamento superficial, tendo como resultado a formação de sulcos, cujo desenvolvimento leva à formação de ravinamentos (INFANTI JÚNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

Com o desenvolvimento do processo de erosão linear, por ação tanto das águas superficiais como pela ação das águas subterrâneas, pode haver a formação de outro processo erosivo, a *voçoroca*.

As voçorocas são um dos principais agentes erosivos responsáveis pelo fenômeno de instabilidade de taludes, já que, com ela, outros processos podem se desenvolver, como a erosão subterrânea, solapamentos, desmoronamentos, escorregamentos, que, em conjunto conferem a esse processo rápida evolução e elevado poder destrutivo (SALOMÃO; ISAWA, 1995).

Um exemplo disso é o estudo realizado por Futai, Almeida e Lacerda (2005), que buscou relacionar a problemática dos escorregamentos à dinâmica de evolução de voçorocas. Na pesquisa, pode-se observar que a água que infiltra no talude, provoca redução na sucção e, a depender da duração e intensidade dos eventos chuvosos, pode deflagrar um escorregamento. Em seguida, o material que resultou do processo de escorregamento, pode sofrer carreamento por águas de subsuperfície ou pela própria água da chuva. Quando os períodos chuvosos dão lugar aos de estiagem, a sucção torna a aumentar, elevando os parâmetros de resistência do solo, tornando o talude mais seguro.

Essa ciclagem de elevação e queda da sucção do solo pode provocar novos escorregamentos e conseqüentemente acarretar num maior transporte de sedimentos, levando à progressão do processo erosivo, nesse caso, a voçoroca.

Os principais fatores condicionantes dos processos erosivos, além daqueles relacionados à ação antrópica (desmatamentos e uso e ocupação inadequados) são: chuva, cobertura vegetal, relevo, tipo dos solos e o substrato rochoso sob o qual o solo erodido se desenvolveu (INFANTI JÚNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

### 3.3. Classificação dos Maciços Naturais

Os solos são produtos da decomposição das rochas a partir dos processos de intemperismo físico e químico que as mesmas sofrem ao aflorar na superfície da terra. As rochas apresentam-se fraturadas e fragmentadas em função da sua origem, movimentos tectônicos ou pela ação antrópica.

É justamente através dessas fraturas que ocorre a ação dos processos intempéricos que atuam por meio de mecanismos que modificam a rocha e seus minerais, alterando as suas propriedades físicas (morfologia, resistência, textura, etc.) e químicas (composição química e estrutura cristalina).

A formação dos solos (pedogênese) então ocorre quando as modificações causadas nas rochas pela ação do intemperismo são químicas, mas principalmente estruturais, com reorganização e transferência dos minerais formadores do solo, entre os níveis superiores do manto de alteração (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2003).

O intemperismo e a pedogênese levam à formação de um perfil de alteração de solo, que se estrutura verticalmente partindo da sua rocha de origem. O tipo de solo encontra-se diretamente relacionado a uma série de fatores como: a natureza da rocha matriz, o clima, a topografia, as condições de drenagem e os processos orgânicos/agentes biológicos.

O perfil de alteração pode ser definido como a sequência de camadas com diferentes propriedades físicas, formadas *in situ* por processos de alteração física e química, e que permanecem recobrando o maciço rochoso (DEERE; PATTON, 1971).

Para Casagrande (1948), toda investigação de solos deveria incluir sua classificação geológica, estabelecendo dois tipos de solos de acordo com a origem: residuais, produzidos pela alteração “*in situ*” da rocha e transportados, dividindo esses últimos de acordo com o seu processo deposicional.

Muitos autores propuseram uma terminologia para a caracterização das diferentes camadas que compõem um perfil de alteração, resultando em uma diversidade de termos, que até os dias de hoje não foram padronizados. Esta padronização é fundamental, pois viabiliza uma linguagem comum na área da geologia de engenharia e geotecnia possibilitando correlações entre as camadas e as propriedades de modo mais conciso.

Em 1953, Vargas propôs a primeira classificação genética dos solos classificando-os em três horizontes principais: solo residual maduro, argiloso e poroso; solo residual jovem, silto-arenoso, com presença de estruturas reliquiares e rocha alterada, que necessitava do uso de explosivos para sua remoção.

Em seguida, Vaz (1969) apresentou uma classificação baseada no perfil de intemperismo, composto por cinco horizontes, dentre os quais dois de solo e três de rocha: solo superficial, homogêneo e isotrópico; solo de alteração, heterogêneo e anisotrópico; rocha alterada mole, escavável à picareta e rocha alterada dura e sã, sendo estas últimas escaváveis somente com explosivos.

Vargas (1974) adere à classificação baseada em perfis de intemperismo apresentando cinco horizontes, sendo três de solo e dois de rocha: horizonte I, de solo residual maduro; horizonte II de solo com vestígios eventuais de estruturas reliquiares da

rocha; horizonte III, de solo com estruturas e matacões (saprolito); horizonte IV, de rocha alterada com zonas decompostas e horizonte V de rocha sã.

Pastore (1995) propôs uma padronização da terminologia para a descrição de perfis de alteração se baseando na análise de várias proposições anteriores acerca desse assunto. Esta descrição caracteriza sete horizontes num perfil de alteração completo, onde as denominações dos horizontes são:

- Horizonte de solo orgânico (I);
- Horizonte laterítico (II);
- Horizonte de solo saprolítico (III);
- Horizonte saprolítico ou saprolito (IV);
- Horizonte de rocha muito alterada (V);
- Horizonte de rocha alterada (VI);
- Horizonte de rocha sã (VII).

Quando ocorre o transporte dos solos residuais em função da ação da gravidade, a pequenas distâncias, esse material é denominado de solo **coluvionar**, **colúvio** ou **tálus**. Esse material se deposita no pé das encostas naturais e podem ser constituídos de solos e blocos de rochas. Os solos coluvionares podem ser transportados partindo dos movimentos de massa como, por exemplo, os escorregamentos.

Com relação à resistência desses materiais, os solos saprolíticos possuem elevada resistência ao cisalhamento. No entanto, podem apresentar planos de fraqueza ao longo das estruturas herdadas da rocha, como juntas e fraturas preenchidas com solos de baixa resistência.

Os solos mais superficiais, em virtude do processo de laterização, comum nos países de clima tropical, apresentam elevada resistência à erosão, justamente em função da ação cimentante dos óxidos de ferro, suportando cortes e escavações praticamente subverticais (MASSAD, 2003).

Os taludes naturais formados em solo residual geralmente são considerados estáveis e tendem a permanecer desta maneira, ao menos que suas condições internas sejam alteradas pela ação de eventos naturais ou por interferência humana (MENDES, 2008). Em se tratando especificamente dos movimentos de massa em encostas, de acordo com Massad (2003), as causas são consideradas naturais, pois existe uma tendência na natureza à peneplanização. Dessa forma, pode-se dizer que o FS das encostas encontra-se próximo a 1, bastando apenas uma chuva atípica ou uma pequena intervenção antrópica para deflagrar o escorregamento.

### 3.4. Cartografia Geotécnica

A abertura de rodovias conta com a exposição de taludes de corte e a construção de taludes de aterro, e também com a manutenção de encostas, que a depender de diversos fatores, já descritos nos tópicos anteriores, podem vir a apresentar sinais de instabilidade.

Essa instabilidade pode acarretar problemas de cunho econômico, já que a interrupção do tráfego ocasiona prejuízo, no caso de transportes de produtos e bens de consumo dos mais variados gêneros, mas também podem provocar transtornos sociais, ao atingirem locais habitados, havendo eventualmente a ocorrência de vítimas fatais.

Nesse sentido, se torna interessante o uso de tecnologias que visem à prevenção desses problemas, evitando a sua ocorrência. Uma dessas tecnologias é a aplicação da cartografia geotécnica voltada à análise de estabilidade de encostas, que na maioria das vezes ocorre por escorregamento.

De acordo com Cerri (1990), a cartografia geotécnica é a representação cartográfica dos atributos do meio físico, aplicada às obras de engenharia, englobando a distribuição espacial de solos e rochas (principalmente suas propriedades geológico-geotécnicas), das feições de relevo, da dinâmica dos principais processos superficiais atuantes e das possíveis alterações decorrentes da ação humana.

Para Zuquette e Nakazawa (1998) a cartografia geotécnica é uma poderosa ferramenta de gestão ambiental, atuando também no planejamento urbano e territorial e na manutenção e monitoramento do desempenho ambiental dos mais diversos empreendimentos.

Observando a importância do mapeamento geotécnico nesse sentido, diversas metodologias foram desenvolvidas a fim de se obter resultados concisos e confiáveis acerca do local mapeado, estando elas relacionadas ao objetivo final do estudo, produzindo diferentes tipos de cartas geotécnicas.

A depender do rigor do conteúdo, forma e a representação, os mapas e cartas geotécnicos podem ser enquadrados em diferentes níveis hierárquicos, que estão diretamente relacionados ao seu grau de detalhamento. É importante ressaltar que a elaboração de documentos com alto nível hierárquico é sempre dependente dos níveis anteriores, evidenciando a relevância na precisão dos dados para a elaboração da base de informações (ZUQUETTE, 2015). A Tabela 6 descreve e exemplifica os diferentes níveis hierárquicos.

Tabela 6 - Classes hierárquicas dos diferentes tipos de documentos cartográficos considerando os procedimentos de elaboração e conceitos

Nível Hierárquico	Descrição	Exemplo de documentos cartográficos
Nível 1	Fundamental Básico: registra as características dos componentes dos meios físico, biológico e antropogênico.	> Mapa de materiais inconsolidados. > Mapa de elementos do Meio Ambiente.
Nível 2	Fundamental de Síntese: sintetiza as informações de uma região sem uma análise para fins específicos em unidades.	> Mapa Geotécnico.
Nível 3	Derivado e interpretativo: reflete o resultado de uma análise para uma condição pré-definida. Cada unidade delimitada neste documento é classificada quanto ao comportamento natural do meio diante de uma determinada situação de uso.	> Carta das condições de escavação.
Nível 4	Analítico Básico: Contempla um conjunto de informações sobre os componentes básicos do meio que permitem a avaliação da probabilidade de ocorrência de um ou mais processos naturais.	> Carta de suscetibilidade a erosão por sulco.
Nível 5	Prognóstico: de eventos naturais e antropogênicos, de estimativas, de consequências, de problemas e de limitações e refletem a interação de características dos componentes do meio ambiente.	> Carta de prognóstico de eventos perigosos de erosão por sulco.
Nível 6	índices Ambientais: Elaborados a partir de combinações de informações contidas nos níveis anteriores e cenários futuros.	> Carta de Vulnerabilidade.
Nível 7	Finais	> Carta de estimativa de riscos associados à erosão por sulco. > Cartas de riscos residuais associados a erosão por sulco.
Nível 8	Procedimentos: Considera as vantagens e limitações das diferentes zonas e traz medidas a serem adotadas para as diversas finalidade. Considerando os usos e população, por exemplo.	> Carta de distribuição das bacias de acúmulos de sedimentos.
Nível 9	Viabilidade (potencial) para os usuários: deve ter como base todas as informações do meio ambiente, fatores antropogênicos e sócio econômicos.	> Carta para implantação de aterros sanitários.
Nível 10	Orientações: Deve permitir a tomada de decisões administrativas ou econômicas. Tem como base os documentos das fases anteriores e estudos das demandas futuras.	> Carta pra definição de metragem máxima construtiva.

Fonte: Zuquette (1993).

Cerri (1990) apresenta uma síntese dos diferentes produtos cartográficos de caracterização do meio físico, distribuindo-os entre mapas de informações básicas, produtos intermediários e produto final (Tabela 7).

Tabela 7 - Diferentes produtos cartográficos de caracterização do meio físico

informações Básicas	Produto Intermediário	Produto Final
Mapas temáticos Mapas analíticos Mapas básicos	Mapas derivados Mapas interpretativos Mapas de síntese	Cartas geotécnicas Mapas geotécnicos Cartas de planejamento regional Cartas geoambientais Mapas de zoneamento ambiental Mapas de zoneamento geotécnico Mapas de zoneamento urbano Mapas de aptidão Cartas de vulnerabilidade Mapas de potencial natural Mapas de 1ª, 2ª e 3ª ordens Cartas de risco Zoneamento de risco

Fonte: Cerri (1990).

Já Bitar, Cerri e Nakazawa (1992) (Tabela 8), dispõem as características das cartas geotécnicas classificando-as em quatro tipos diferentes, sendo a cartografia de suscetibilidade uma tipologia particular de carta geotécnica.

Tabela 8 - Tipos de cartas geotécnicas.

Carta Geotécnica	Objetivo/Características
DIRIGIDA	A partir da identificação de problemas de natureza geológica-geotécnica decorrentes do uso do solo, expõem as limitações e as potencialidades dos terrenos, estabelecem alternativas de solução desses problemas e apontam as diretrizes para o adensamento e a expansão da ocupação ante uma ou mais formas de uso do solo.
CONVENCIONAL	Apresentam a distribuição geográfica das características dos terrenos, a partir de atributos do meio físico e de determinados parâmetros do meio físico e as diferentes formas de uso dos solo.
SUSCETIBILIDADE	Indicam a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em áreas de interesse ao uso do solo, expressando a suscetibilidade segundo classes de probabilidade de ocorrência.
RISCO	Prepondera a avaliação de dano potencial à ocupação, expresso segundo diferentes graus de risco, resultantes da conjugação da probabilidade de ocorrência de manifestações geológicas naturais ou induzidas e das consequências sociais e econômicas decorrentes.

Fonte: Modificado de Bitar, Cerri e Nakazawa (1992)

Diante dessas diferentes tipologias de cartas e seus níveis de detalhamento, diversos trabalhos foram desenvolvidos na área das obras lineares, a fim de subsidiar o planejamento e o gerenciamento desses empreendimentos.

### 3.4.1. Mapeamento Geotécnico em Obras Lineares

Nos últimos anos uma maior atenção vem sendo direcionada à conservação e preservação de estradas, seja em função das políticas ambientais, que legislam acerca do impacto e gerenciamento de rodovias, seja com relação aos próprios órgãos de financiamento internacionais que tornam os estudos de impactos, exigências para a concessão de empréstimos (GARIBALDI; SOARES; AUGUSTO FILHO, 2012)

De acordo com Coelho et al. (2013), no estado de São Paulo os procedimentos de licenciamento ambiental de obras lineares são determinados pela Secretaria de Meio Ambiente (SMA), onde o empreendedor deve apresentar um relatório ambiental preliminar (RAP) que será analisado indicando ao final uma entre três alternativas: 1) a inviabilidade ambiental do empreendimento; 2) a exigência de EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impactos ao Meio Ambiente) ou 3) a viabilidade ambiental do empreendimento e emissão de licença prévia.

Ainda nesse sentido, Coelho et al. (2013), identificaram que nos EIA/RIMAs mais detalhados realizados para o licenciamento de rodovias no estado de São Paulo as informações de caráter geológico, pedológico e geomorfológico passaram a ser integradas na forma de cartas temáticas e de cunho geotécnico. Dessa forma, inserindo o mapeamento geotécnico nesse contexto, muitas metodologias vêm sendo propostas a fim de contribuir com o gerenciamento ambiental de obras lineares e promover um planejamento eficiente da malha, bem como auxiliar na conservação e manutenção de estradas, tanto na faixa de domínio, quanto no entorno da mesma.

Dessa maneira, o mapeamento geológico-geotécnico de obras lineares se torna um importante recurso, compondo também um importante documento no cenário do licenciamento ambiental e também no de Gestão Ambiental.

Nogami e Villibor (1979) enfatizam a importância e as dificuldades na elaboração de mapeamento geotécnico em solos tropicais para fins de construção de rodovias de baixo custo, levando em consideração também a necessidade de medidas de proteção à erosão dos taludes rodoviários, o que também pode reduzir os custos de manutenção de estradas.

Garibaldi, Soares e Augusto Filho (2012) verificaram em estudos feitos no Brasil, que a grande maioria dos problemas e passivos ambientais relacionados às rodovias estão associados aos movimentos de massa, em taludes naturais e de corte e aterro e também à qualidade da manutenção durante a operação da rodovia.

Sendo assim, a seguir são mencionados alguns estudos onde o mapeamento geotécnico, o sensoriamento remoto e a observação são utilizados como subsídio em

projetos de planejamento, gestão e análise de suscetibilidade e outras avaliações a movimentos de massa em rodovias e outras obras lineares.

Penido, Kux e Mattos (1998), fizeram aplicação da técnica de sensoriamento remoto e SIG na qualificação de uma área na região metropolitana de São Paulo para fins de locação e construção do primeiro rodoanel Metropolitano de São Paulo. O estudo buscou subsidiar o processo de investigação da fase de reconhecimento do projeto rodoviário através do levantamento do uso antrópico e da cobertura vegetal da região e integração desses dados com as informações de declividade e geomorfologia. Com isso foi possível analisar as alternativas de traçados da rodovia definidas para o trecho oeste do Rodoanel.

Monguilhott et al. (2010), realizaram estudos de áreas suscetíveis a movimentos de massa na sub-bacia hidrográfica do Rio Três Forquilhas, onde se encontra a rodovia Rota do Sol (RS). Para isso, similarmente à Penido, Kux e Mattos (1998), os autores empregaram técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na elaboração de mapas de vulnerabilidade ambiental, partindo do emprego das variáveis (uso do solo, geomorfologia, geologia, Modelo Digital de Elevação, declividade e índice de vegetação) e do método de Análise Hierárquica de Decisão (AHD).

Lopes (2007) buscou desenvolver uma metodologia para mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários, através da aplicação de SIG e levantamento geológico-geotécnico de seções de detalhe em um trecho da Rodovia Washington Luís (SP-310) no estado de São Paulo, se apoiando no método multicriterial. Para isso, foi aplicada à totalidade da área a ponderação dos atributos de percentual de declividade, materiais inconsolidados, curvatura de encostas e direção de vertentes, obtendo-se então o Mapa de Potencial de Instabilização.

Mattos (2009) realizou estudos direcionados à investigação de processos erosivos e deslizamentos que afetavam os taludes da rodovia Castelo Branco (SP-280) no sudoeste do estado de São Paulo. O projeto se baseou na elaboração de base cartográfica e mapas temáticos, levantamentos de campo, ensaios laboratoriais e análise de estabilidade de taludes com o uso de software específico. A pesquisa teve como objetivo também estabelecer diretrizes gerais para as correções dos processos de instabilização identificados, propondo soluções para recuperação desses taludes.

Fernandes (2008) elaborou em sua pesquisa uma carta geotécnica de suscetibilidade a processos geodinâmicos na rodovia Marechal Rondon (SP-300), no estado de São Paulo, se apoiando nas ferramentas de SIG e geoprocessamento. Como metodologia, fez uso de mapas de declividade, da observação e mapeamento dos processos da dinâmica superficial, da delimitação de unidades fisiográficas através de fotointerpretação e da análise do uso e ocupação do solo.

Rodrigues (2012), com o objetivo de estudar o diagnóstico geotécnico da estrada de Castelhanos no município de Ilha Bela (SP), realizou uma análise integrada e um mapeamento geológico-geotécnico da região, também se embasando nas técnicas de SIG. O autor, no desenvolvimento de sua metodologia, fez uso da análise dos elementos do meio físico partindo de trabalhos de campo e das técnicas de fotogeologia, a fim de identificar, descrever e classificar as diferentes unidades fisiográficas do relevo no local. Baseado nessas informações e unindo-as às características litológicas e dos perfis de alteração dos compartimentos, o mapeamento final então identificou oito trechos diagnósticos da situação da estrada.

Augusto Filho, Magalhães e Gramani (2005) realizaram estudos relacionados à suscetibilidade a escorregamentos e corridas de massa na Serra do Mar (SP), em seis bacias hidrográficas que eram atravessadas pela rodovia Anchieta-Imigrantes. A metodologia utilizada se apoiou nas ferramentas de SIG e geoprocessamento, utilizando os atributos de declividade, direção das vertentes, curvatura das encostas, perfil de intemperismo, litologia, feições pré-existentes, drenagens e uso e ocupação dos solos. Os autores ainda realizaram análise observando dois cenários de chuva, eventos chuvosos com período de retorno de 10 e 100 anos.

Gomes e Sobreira (2012) apresentaram um estudo da avaliação de perigo da queda de blocos em rodovias do estado do Espírito Santo, baseando-se essencialmente em levantamentos geológico-geotécnicos de taludes rochosos e geométricos e de trafegabilidade de 12 segmentos rodoviários do estado. O projeto visou a classificação e hierarquização de trechos com problemas de queda de blocos, se amparando nas classificações geomecânicas e caracterização de maciços rochosos para a avaliação geotécnica dos taludes, definindo assim, taludes com prioridade para intervenção.

Miranda (2008) fez uso de técnicas de SIG ao mapear as unidades geotécnicas da região adjacente à obra de duplicação da rodovia BR-101 entre os municípios de Osório e Torres, no estado do Rio Grande do Sul. A metodologia do mapeamento se embasou no cruzamento e análise das informações contidas nos mapas geológicos, pedológicos e topográficos, fazendo-se uma generalização taxonômica para agrupar classes de materiais com características geotécnicas semelhantes. Para este projeto, também foi elaborado um banco de dados contendo informações de ensaios SPT (*standart penetration test*), dados de granulometria e material fotográfico que contribuíram para a conclusão da pesquisa.

Vaz (2014) analisou a suscetibilidade a escorregamentos em taludes naturais da sub-bacia do Rio São João, as margens da rodovia BR-376 que liga Curitiba (PR) a Garuva (SC). A autora se baseou no método determinístico de equilíbrio-limite em sua pesquisa, ao fazer uso do método do talude infinito para o cálculo do fator de segurança em toda a área

de estudo, obtendo como resultado final um mapa de fatores de segurança. Os valores das variáveis coesão, ângulo de atrito e profundidade de ruptura utilizadas na equação, foram obtidos por meio de cálculos baseados em sondagens SPT. Já os valores utilizados para o peso específico do solo natural foram baseados em trabalhos anteriores.

Ridente Júnior e Cerri (2014) analisaram a qualidade das informações de cartas geotécnicas em diferentes escalas, com o intuito de usá-las na gestão ambiental de rodovias. A pesquisa foi realizada em um trecho da rodovia Marechal Rondon (SP-300), nos municípios de Anhembi e Botucatu, no estado de São Paulo. Para isso, os autores elaboraram cartas de suscetibilidade a processos erosivos em diferentes escalas (1:50.000 e 1:10.000), utilizando a fotointerpretação, a análise das declividades do terreno, dados topográficos, visitas à campo e descrição dos perfis geológico-geotécnicos das unidades de terreno.

Carvalho e Riedel (2005) elaboraram uma carta de suscetibilidade a escorregamentos translacionais nos entornos dos polidutos de Cubatão, no litoral do estado de São Paulo. O projeto fez uso do Processo Analítico Hierárquico (AHP – Analytical Hierarchy Process), uma ferramenta de suporte a decisão, que permite a ponderação de cada variável envolvida no processo, de forma a refletir a sua importância relativa no problema em análise. Dessa forma, foram gerados mapas temáticos, com pesos atribuídos aos mesmos, que representam os condicionantes do processo, e também às classes dos mapas, constituindo-se numa soma ponderada para gerar a carta de suscetibilidade a escorregamentos translacionais do local.

Silva et al. (2013) realizaram o mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos em um trecho do duto ORBEL ( que interliga as cidades do Rio de Janeiro e Belo Horizonte), localizado nos municípios de Duque de Caxias, Nova Iguaçu e Belfort Roxo, no estado do Rio de Janeiro, através da técnica da análise multicriterial ponderada. Conforme já mencionado anteriormente, neste método são analisados os condicionantes do processo, sendo atribuídos pesos para cada mapa temático elaborado, e também para as classes de cada mapa. Neste projeto os mapas temáticos foram: litológico, de sistemas de relevo, de declividade e de formas de vertentes.

#### 3.4.2. Mapeamento de Suscetibilidade com Métodos determinísticos

Os estudos relacionados à suscetibilidade estão voltados para a identificação de características (atributos) que irão condicionar a predisposição a movimentos gravitacionais

de massa e a individualização de áreas com o mesmo número de predisposição em função da interação dos atributos entre si.

As cartas de suscetibilidade apresentam dados sobre os locais onde há maior predisposição ao início do movimento, classificando a estabilidade dos taludes em níveis de suscetibilidade.

De acordo com Soeters e Van Westen (1996), a suscetibilidade corresponde à probabilidade de um dado evento ocorrer em uma determinada área de acordo com suas condições locais. Sendo assim, fica excluída a probabilidade temporal, levando-se em consideração apenas a probabilidade espacial.

Os procedimentos de mapeamento de suscetibilidade se resumem às abordagens heurísticas, estatísticas, determinísticas e multicriterial, além do mapa de inventário. A Tabela 9 exhibe as principais vantagens e desvantagens dos tipos de enfoques para o estudo de suscetibilidade.

Tabela 9 - Vantagens e desvantagens das abordagens para estudo de suscetibilidade

Enfoque	Vantagens	Desvantagens
Multicriterial (AHP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Transformação de dados quantitativos em dados qualitativos.</li> <li>&gt; Avaliação da importância relativa de cada atributo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Exige uma enorme quantidade de informações, por isso um tempo grande de trabalhos preliminares.</li> <li>&gt; Para análises de muitas classes e atributos se faz necessário uso de ferramenta computacional (MathLab, MathCad).</li> </ul>
Determinístico	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Análise quantitativa com obtenção do fator de segurança.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Aplicável em pequenas áreas, em escala local de trabalho.</li> </ul>
Heurístico (Geomórficos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Método de fácil análise, não necessitando de ferramentas computacionais muito avançadas para tal.</li> <li>&gt; Gera boas potencialidades relativas entre os atributos, aproximando-se mais da realidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; O conhecimento disponível dos fatores que influenciam os deslizamentos pode ser inadequado e subjetivo dependendo da experiência do pesquisador.</li> <li>&gt; Inviabiliza a comparação com outros autores (grau de subjetividade).</li> </ul>
Estatístico (Bivariada e Multivariada)	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Relacionam o aspecto probabilístico.</li> <li>&gt; Objetividade.</li> <li>&gt; Trabalha com dados qualitativos e quantitativos.</li> <li>&gt; Capacidade de analisar a influência de cada atributo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; As multivariadas necessitam de dados abundantes e de qualidade.</li> </ul>

Fonte: Modificado de Amaral Júnior (2007).

A maioria desses métodos utiliza os dados locais de pluviosidade, mapeamento geológico, dados geotécnicos e ferramentas de geoprocessamento para estimar a distribuição do potencial de escorregamento de uma dada região (SAVAGE; GODT; BAUM, 2004).

Como esta pesquisa se baseia no mapeamento da suscetibilidade utilizando-se dos recursos determinísticos, maior atenção será dada a essa metodologia.

Os modelos considerados determinísticos se baseiam nas leis da física de conservação da massa, energia ou momento. Para o caso dos métodos de estabilidade de taludes, existem dois grupos de abordagem determinística: a do equilíbrio limite, e a da tensão-deformação.

O método de equilíbrio limite é a abordagem mais utilizada e trata-se de uma ferramenta empregada pela teoria da plasticidade para analisar o equilíbrio dos corpos, admitindo-se as seguintes hipóteses (VILAR; BUENO, notas de aula):

- Existência de uma linha de escorregamento de forma conhecida: planar, circular e etc. Que delimita acima dela a porção instável do maciço. Esta massa de solo instável movimenta-se, pela ação da gravidade como um corpo rígido;
- Respeito a um critério de resistência, normalmente Mohr-Coulomb, ao longo da linha de escorregamento;

As forças que participam do processo, e que são utilizadas nos cálculos de Fator de Segurança (FS), são as causadoras do deslizamento e as resistivas (forças motoras e resistências).

O modelo de talude infinito, desenvolvido por Skempton e Delory (1957), é aplicado a taludes que se caracterizam pela sua grande extensão e reduzida espessura (MASSAD, 2003). Dessa maneira, configuram escorregamentos do tipo translacional, paralelos à superfície do talude, desprezando-se assim os efeitos das extremidades.

De acordo com Savage, Godt e Baum (2004), os enfoques determinísticos se fundamentam na aplicação de modelos de fluxo de água subterrânea (distribuição das poropressões) combinados com a abordagem e conceito de talude infinito para estimar o potencial de instabilidade de taludes em ambiente SIG. Existem alguns programas que podem ser utilizados nessa análise, tais como o Shallow Landslide Stability Analysis (SHALSTAB) e o Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional Slope Stability (TRIGRS), esses programas geralmente são utilizados na estimativa de escorregamentos translacionais rasos. A disponibilidade de Modelos Digitais de Terreno (MDT) torna possível a discretização da morfologia do terreno, sendo uma etapa muito importante nesse processo (FERNANDES et al., 2001).

Para Fernandes et al. (2001), as maiores limitações da utilização dos modelos determinísticos estão associadas ao conhecimento incompleto de muitos dos processos envolvidos e à dificuldade dos dados exigidos pelos modelos, em especial quando aplicados a grandes áreas. De uma maneira geral, os dados das principais propriedades dos materiais no campo estão disponíveis em pequenas quantidades, possuindo baixa qualidade, sendo raros os estudos que incorporam a questão da variabilidade espacial, e mesmo temporal dessas propriedades.

Relacionados à utilização desse método na análise de suscetibilidade, encontra-se o trabalho de Vieira (2007) (Figura 6), Park, Nikhil e Lee (2013) e Gioia et al. (2014), que fizeram uso do software TRIGRS na análise de locais suscetíveis a escorregamentos e corridas.

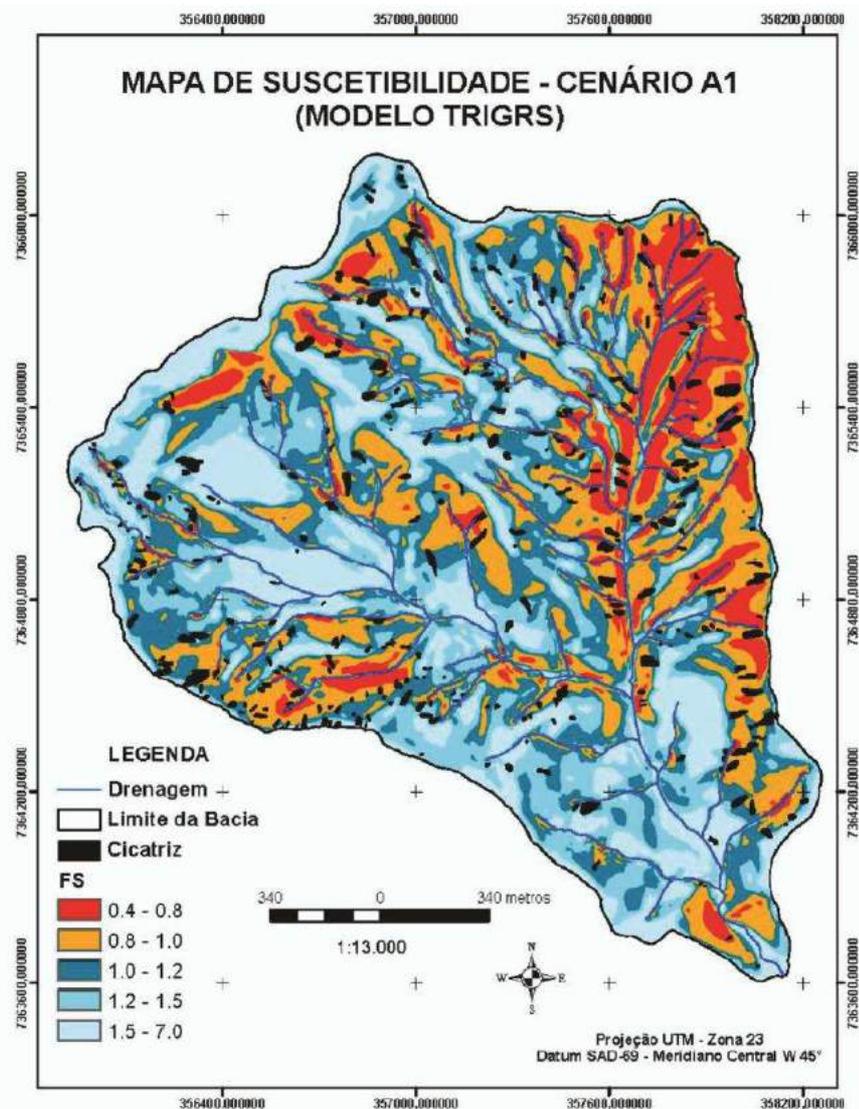


Figura 6 - Mapa correspondente a suscetibilidade a escorregamentos realizado através do método TRIGRS

Fonte: Vieira (2007).

Rosniecek e Imai (2013) utilizaram o software SHALSTAB no mapeamento e análise de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos em uma região de Santa Catarina. Semelhante a isso, tem-se o estudo de Ramos et al. (2002), que utilizaram o mesmo programa no mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na Região do Quadrilátero Ferrífero.

Augusto Filho (2001) fez uso do modelo de talude infinito na elaboração de cartas de risco a escorregamentos no mapeamento da área urbana e periurbana de Caraguatatuba, qualificando o mapa em 5 classes de fator de segurança (Figura 7).

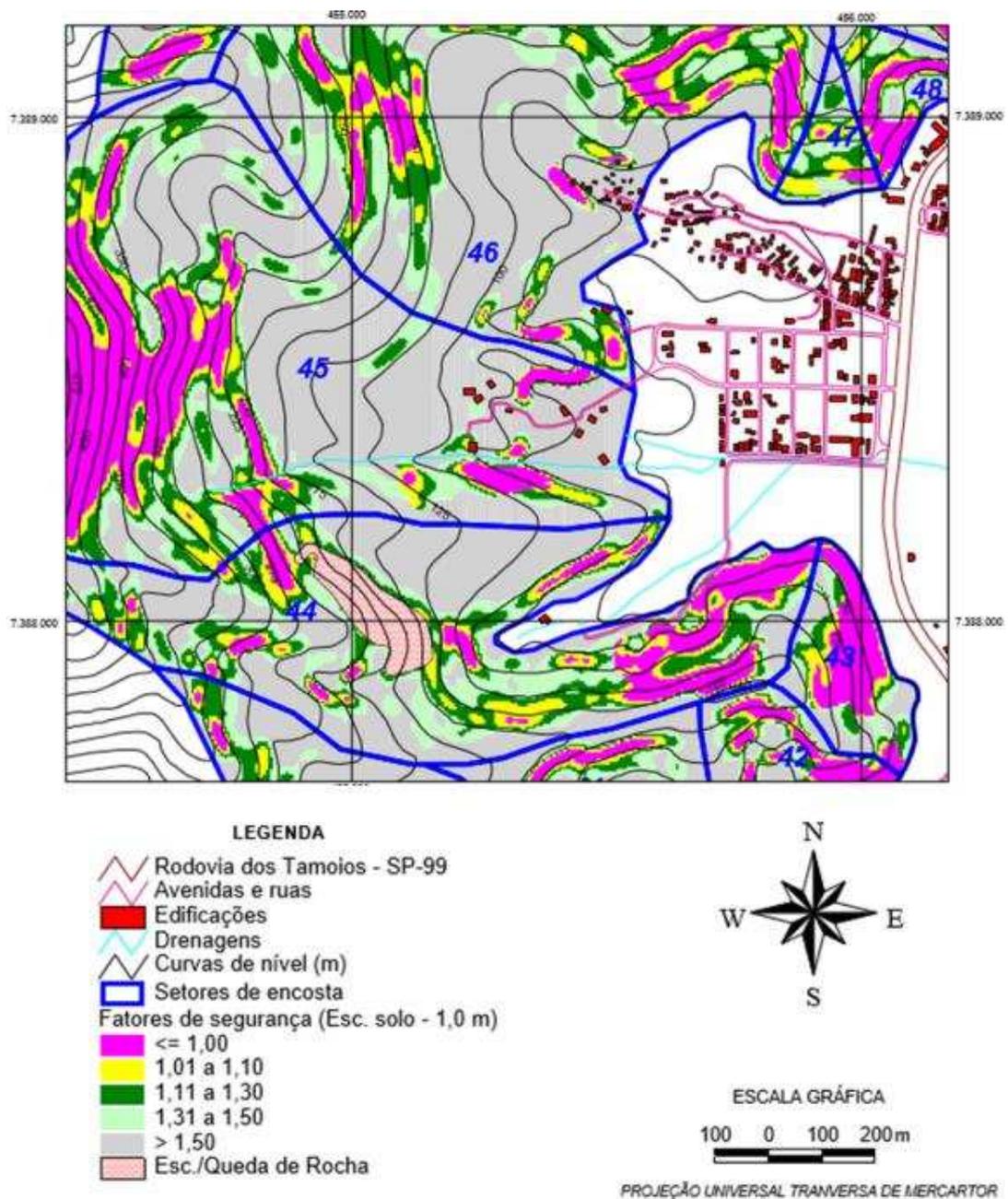


Figura 7 - Resultado do cálculo do FS pelo método do talude infinito em ambiente SIG  
Fonte: Augusto Filho (2001).

Wu e Abdel-Latif (2000), fizeram uso do modelo de talude infinito para situações de escorregamentos planares no estudo de mapeamento de perigo, obtendo um mapa composto por 5 classes de fator de segurança (Figura 8).

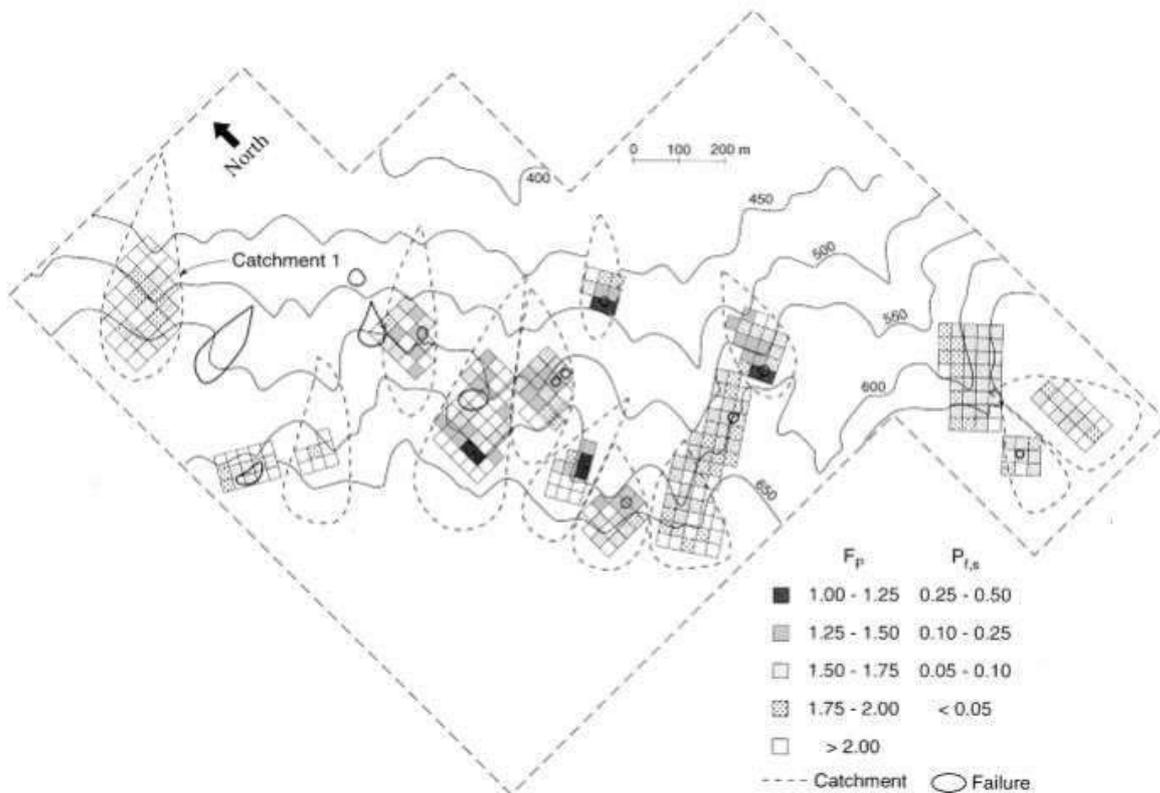


Figura 8 - Mapa da área estudada com as classes de Fator de Segurança e perigo de escorregamento

Fonte: Wu; Abdel-Latif (2000).

Silveira et al. (2012), também fizeram uso do modelo do talude infinito, desta vez na análise de suscetibilidade de ocorrência de movimentos de massa nas vertentes na bacia do Rio Jacareí, Serra do Mar paranaense, subdividindo a área em 4 classes de Fator de Segurança (Figura 9).

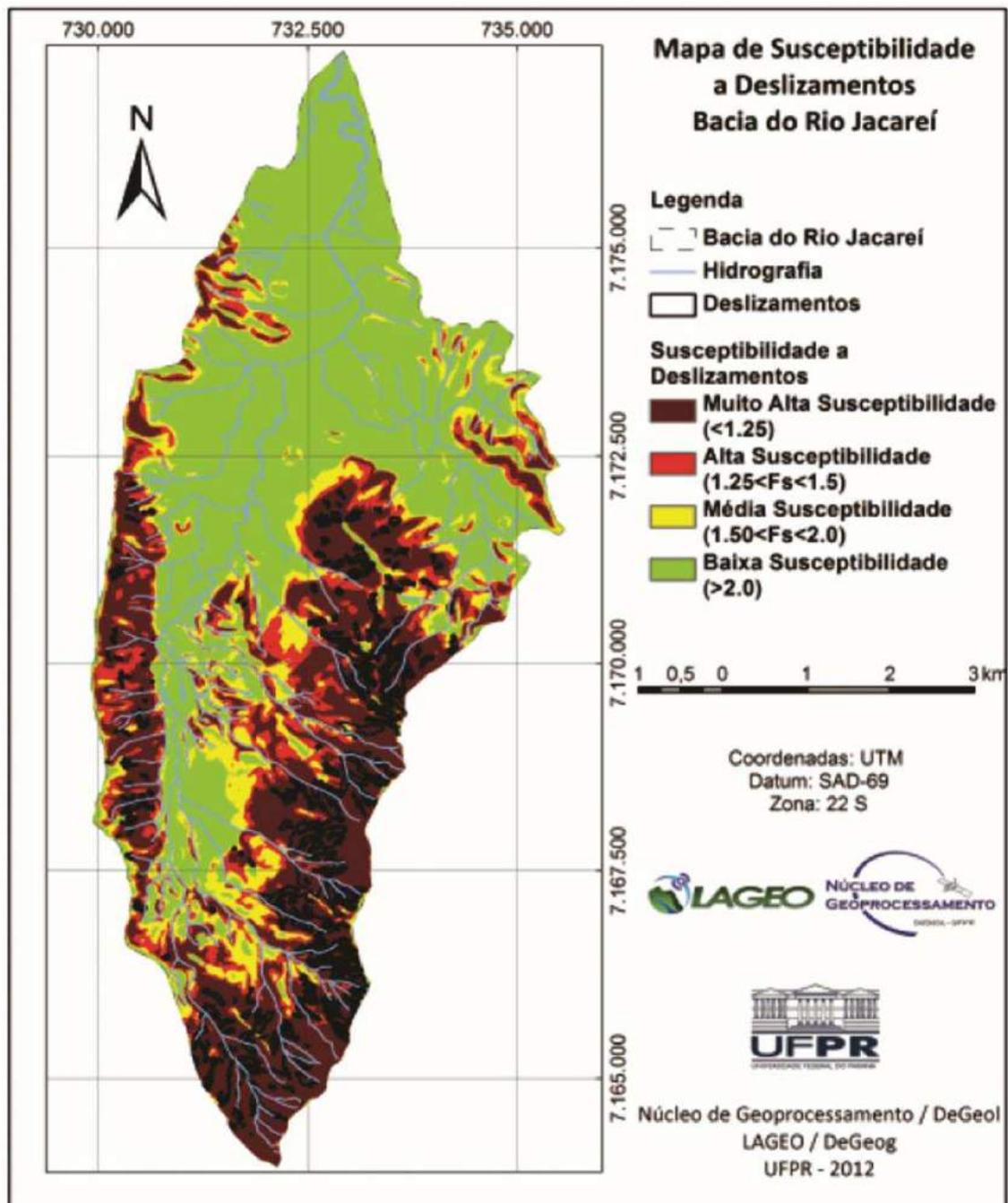


Figura 9 - Mapa do FS da estabilidade da estabilidade das vertentes a deslizamentos  
Fonte: Silveira et al. (2012).

De um modo geral, os modelos determinísticos são mais apropriados a fornecer informações quantitativas acerca da suscetibilidade a escorregamentos. No entanto, essa metodologia requer uma grande quantidade de dados detalhados, advindos de ensaios de laboratório e de medidas de campo, sendo mais indicados para estudos realizados a grandes escalas.

### 3.5. Sistemas de Informações Geográficas – SIG

As ferramentas de modelagem vêm tomando cada vez mais lugar no meio científico, tornando possível a representação, mesmo que de forma aproximada, da realidade de um determinado ambiente e a previsão dos eventos que nele ocorrem (GUIMARÃES et al. 2003). Nesse tópico serão discutidos os principais aspectos relacionados à utilização de Sistemas de Informações geográficas (SIG).

Segundo Câmara e Davis (2001, grifo do autor) “Se **onde** é importante para o seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho”.

O Geoprocessamento é a disciplina do conhecimento que se utiliza de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica com aplicações frequentes nas áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Territorial, se inserindo no Geoprocessamento os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (CÂMARA; DAVIS, 2001)

Os Sistemas de Informações Geográficas constituem sistemas automatizados utilizados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica do evento seja uma característica inerente à informação e indispensável para a sua análise e entendimento (DAVIS JUNIOR, 1997).

Felgueiras (1999) define Sistemas de Informações Geográficas como sendo um banco de dados georeferenciados que permitem a integração de dados de sensoriamento remoto, temáticos, cadastrais, tabulares e de modelagem digital de terreno.

Para Medeiros (2012), o sistema é composto não apenas de softwares, mas também por metodologias aplicadas, dados a serem coletados e tratados, hardwares específicos, como *scanners* e coletores de dados GPS e também recursos humanos. Sendo assim, os Sistemas de Informações Geográficas permitem a execução de diferentes atividades como o processamento de dados armazenados em locais adequados, análise e aplicação de modelos, previsões e estimativas, pós-processamento de resultados e mapeamento dos dados (GOODCHILD, 1993), tornando possível o armazenamento de localizações geográficas em sistemas computacionais através dos sistemas de coordenadas.

A visualização no programa é feita de maneira simultânea através da organização de camadas, onde são verificados não apenas os atributos e características do meio físico, mas também informações referentes ao resultado do processamento de dados da região. Dessa forma, existem dois tipos de representação dos dados no SIG: em formato vetorial (*features*) ou em formato *raster*.

Os dados vetoriais são representados sob a forma de pontos, linhas e polígonos sempre relacionados a um conjunto de coordenadas geográficas. Esse tipo de estrutura

geralmente é utilizada para representar características físicas do local, como rios, lagos, drenagens, altimetria, obras de engenharia, etc.

Já as estruturas em *raster* se caracterizam por representar as informações de um determinado local em formato de imagem, podendo representar também o resultado de processamento de dados. Neste formato, é possível a realização de operações matemáticas, sendo melhor na representação de dados contínuos. Com isso, no formato *raster*, a região de estudo é dividida em células organizadas em linhas e colunas, sendo também atreladas a um conjunto de coordenadas geográficas.

A figura 10 exemplifica a representação das duas estruturas.

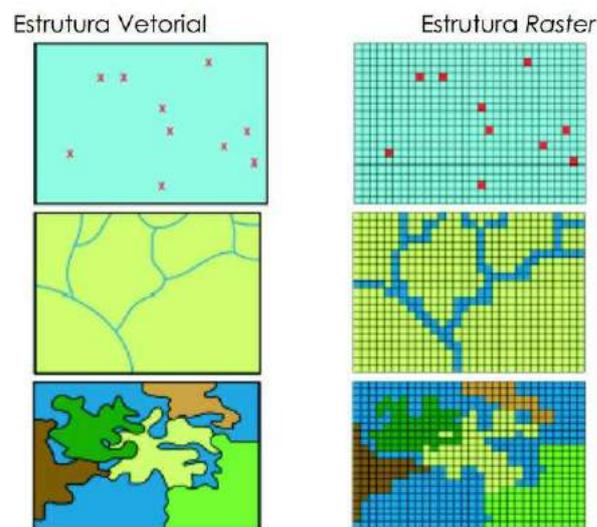


Figura 10 - Representação das estruturas vetorial e raster  
Fonte: Coelho (2006).

O software ArcGis, opera um Sistema de Informações Geográficas (SIG), e trata-se de uma base cartográfica digital onde é possível armazenar, editar e analisar dados georreferenciados.

O programa foi criado pela empresa americana “Environmental Systems Research Institute” (ESRI) sendo composto por um conjunto integrado de softwares de SIG, como o ArcCatalog, ArcToolBox e ArcMap. Dessa maneira, o software é capaz de atuar em diversas funções como edição de dados tabulares, geração de mapas de alta qualidade, conexão com banco de dados, digitalização de dados vetoriais na tela ou em mesa digitalizadora, geração de análises espaciais com dados vetoriais e raster, processamento de imagens de satélite etc.

Segundo Redy e Bonham-Carter (1991), a modelagem de dados em ambiente SIG pode ser realizada através de dois grupos de processos: a modelagem baseada em dados (“*Data Driven*”) e a modelagem baseada no conhecimento (“*Knowledge Driven*”).

A modelagem baseada no conhecimento geralmente é realizada por especialistas, e o processo de seleção e atribuição dos parâmetros utilizados no modelo é ditado pela experiência e julgamento do executor.

Já a modelagem baseada em dados, é aquela cujos parâmetros são estimados através de cálculos estatísticos executados em locais selecionados para treinamento, através da avaliação dos relacionamentos espaciais do fenômeno, sendo, portanto, menos subjetiva que a modelagem baseada em conhecimento (ARAÚJO, 2004).

Diante disso, o conjunto de pacotes do software ArcGis torna-se uma ferramenta de suma importância no auxílio ao estudo de suscetibilidade a instabilização de taludes em rodovias, fornecendo os subsídios necessários para a elaboração de mapas de alta qualidade e com os atributos indispensáveis à manipulação e interpretação dos dados.

### 3.6. Métodos Determinísticos de Análise de Estabilidade

Os métodos determinísticos de análise de estabilidade de encostas envolvem um conjunto de processos que buscam atribuir a um índice a quantificação do quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra se baseando em um conjunto específico de condicionantes como pressões neutras, geometria, cargas, material do talude e etc. (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

De acordo com Gama (1984), existem diversos métodos de se determinar a estabilidade de uma encosta, sendo a escolha deste baseada em função do grau de conhecimento acerca do local de análise. Alguns desses métodos são: os analíticos, a retroanálise e o da projeção estereográfica.

Augusto Filho e Virgili (1998) ainda organizam os métodos de análise em três grandes grupos principais:

- Métodos analíticos;
- Métodos experimentais;
- Métodos observacionais.

Os métodos analíticos podem ser divididos em dois grupos principais, o do equilíbrio-limite e o da tensão deformação. O método do equilíbrio-limite visa o cálculo de um valor, determinado como Fator de Segurança (FS) que é obtido através do quociente entre as forças de resistência e as forças motoras ao longo de uma superfície de movimentação. Quando o talude encontra-se na iminência da ruptura então, pressupõe-se  $FS=1$ .

Nesse método, o critério de ruptura de Morh-Coulomb é assumido como hipótese, sendo as condições de equilíbrio determinadas pelo equilíbrio das forças e dos momentos. Dessa forma, admite-se que a ruptura ocorrerá através de uma superfície preferencial.

A Norma NBR 11682 fixa as diretrizes e as condições exigíveis no estudo e controle da estabilidade de taludes e ainda estipula valores mínimos de fatores de segurança para locais onde há possibilidade de perdas de vidas ou prejuízo ambiental e material.

Já o método da tensão deformação necessita do conhecimento das resistências ao cisalhamento residual e de pico e do estado de tensões iniciais do maciço, para determinar, através de métodos numéricos a distribuição de tensões do talude, estabelecendo a forma geométrica do volume sujeito a deslizar e avaliando sua estabilidade (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998; GAMA;1984).

Neste tópico serão abordados os métodos analíticos de equilíbrio-limite do talude infinito e de Bishop Simplificado, utilizados nos cálculos do fator de segurança deste projeto.

### 3.6.1. Talude Infinito

De acordo com Massad (2003, p. 68) “trata-se de taludes de encostas naturais, que se caracterizam pela sua grande extensão, centenas de metros, e pela reduzida espessura do manto de solo, de alguns metros”. Sua ruptura é do tipo translacional, com linha crítica de ruptura situada no contato solo-rocha (terreno firme). Para Dunn, Anderson e Kiefer (1980), qualquer talude de grande extensão, apresentando perfis de solo essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerado como um talude de extensão ilimitada, ou talude infinito.

O método pressupõe que uma determinada vertente, que se estenda por uma distância relativamente longa e tenha um perfil de solo suficientemente constante, possa ser analisada como sendo um talude infinito, sendo a superfície de ruptura paralela à superfície da vertente (SHARMA, 2002).

Este modelo se baseia em uma série de simplificações, que fazem com que o mesmo se torne bastante maleável para a aplicação em diferentes situações. Isso faz com que o modelo seja amplamente utilizado na análise de estabilidade de encostas naturais apresentando uma boa compatibilidade com programas computacionais, principalmente os que envolvem o auxílio de SIG's (AHRENDT, 2005).

A Figura 11 ilustra o esquema de decomposição de forças para a situação de um talude infinito sem percolação de água. Sendo assim, considerando um prisma de terra de

largura  $b$ , altura  $z$  e comprimento unitário, sobre ele atuam quatro forças que deverão estar em equilíbrio na condição de equilíbrio limite, sendo elas (FIORI; CARMIGNANI, 2009):

- A força Peso ( $P$ );
- As forças  $E_1$  e  $E_2$  que atuam nas faces laterais do prisma;
- E a força de reação a força peso ( $R_p$ ), igual e oposta a  $P$ .

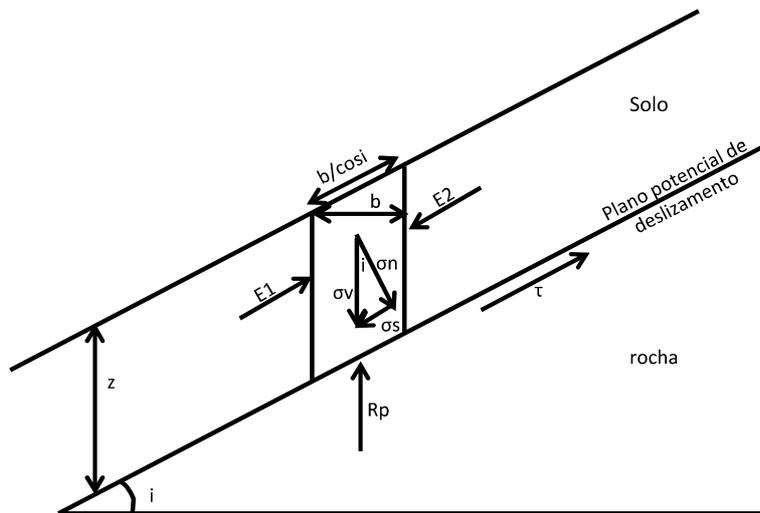


Figura 11 - forças atuantes em um talude de inclinação  $i$ . Onde:  $\sigma_v$ : tensão vertical devida ao peso ( $P$ ),  $\sigma_n$  e  $\sigma_s$ : componentes normal e tangencial de  $\sigma_v$  e  $\tau$ : resistência ao cisalhamento.

Fonte: Fiori e Carmignani (2009).

A hipótese de talude infinito permite que, por simetria, se possa afirmar que os empuxos de terra nas laterais das lamelas se equivalham e se anulem mutuamente quando realizado o equilíbrio de forças (WOLLE, 1980). Dessa maneira  $E_1$  e  $E_2$  são iguais em magnitude, com sua ação paralela à superfície do terreno e de sentidos opostos.

Para essa situação, o cálculo do FS é dado pela seguinte equação (Equação 1):

$$FS = \frac{c' + \gamma_{nat} \times z \times \cos^2 i \times \tan \phi'}{\gamma_{nat} \times z \times \cos i \times \sin i} \quad (1)$$

Onde:

$c'$ : coesão efetiva do solo;

$\gamma_{nat}$ : peso específico natural do solo;

$\phi'$ : ângulo de atrito efetivo do solo;

$z$ : profundidade de ruptura;

$i$ : inclinação do talude.

Considerando o caso em que a vertente não está completamente saturada e o nível do lençol freático alcança uma determinada altura ( $h_2$ ) acima do plano de escorregamento, o esquema fica da seguinte maneira (Figura 12):

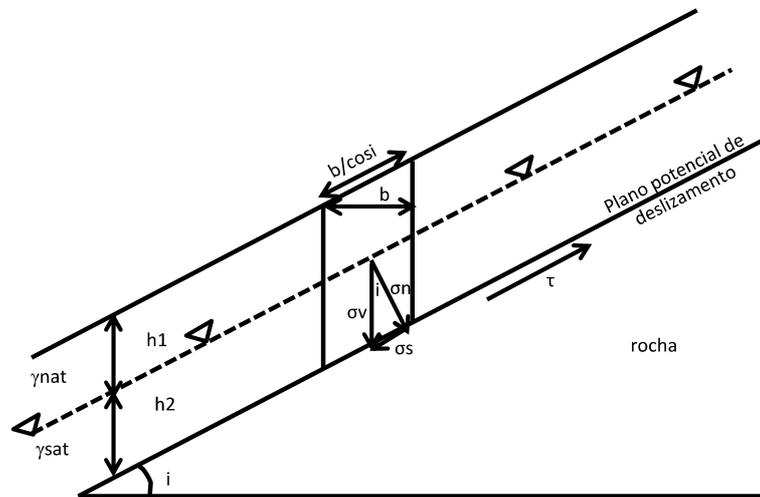


Figura 12 - parâmetros envolvidos na análise de um talude infinito, com altura de nível d'água ( $h_2$ ), considerando fluxo paralelo ao talude  
Fonte: Fiori e Camignani (2009).

Para essa condição de saturação, o cálculo de FS é dado pela seguinte equação (Equação 2):

$$FS = \frac{c' + (h_1 \times \gamma_{nat} + h_2 \times \gamma_{sub}) \cos^2 i \times tg \phi'}{(h_1 \times \gamma_{nat} + h_2 \times \gamma_{sub} + h_2 \times \gamma_a) \text{sen} i \times \text{cos} i} \quad (2)$$

Onde,

$c'$ : coesão efetiva do solo;

$\gamma_{nat}$ : peso específico natural do solo;

$\gamma_{sub}$ : peso específico submerso do solo;

$\gamma_a$ : peso específico da água;

$\phi'$ : ângulo de atrito efetivo do solo;

$z$ : profundidade de ruptura;

$i$ : inclinação do talude.

Diante disso, podem ser feitas algumas simplificações, como por exemplo, pro caso de talude arenoso, onde o efeito da coesão pode ser considerado nulo, o cálculo de FS então fica da seguinte maneira (Equação 3):

$$FS = \frac{tg \phi'}{tg i} \quad (3)$$

Onde,

$\phi$ : ângulo de atrito;

$i$ : inclinação do talude;

Nesta situação, valores de FS maiores que 1 (com  $i < \phi$ ), indicam que as forças resistentes são maiores que as solicitantes, estando o talude analisado em equilíbrio. O mesmo é válido para o oposto (com  $i > \phi$ ), estando o talude em desequilíbrio.

Ao plotarmos (Figura 13) os valores correspondentes a  $\sigma_n$  e  $\tau$  no diagrama de Mohr considerando solos não coesivos ( $c=0$ ), define-se um ponto P qualquer que representa as condições de tensão atuantes em um ponto situado a uma profundidade  $z$  do talude estudado (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

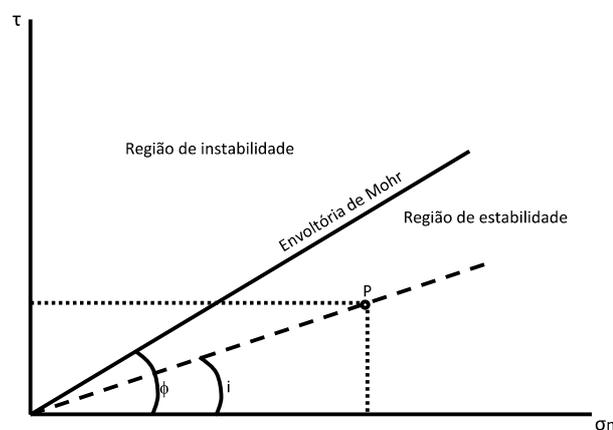


Figura 13 - valores de  $\tau$  e  $\sigma_n$  para um ponto P situado a uma profundidade  $z$  (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Diante da Figura 13, pode-se observar que, conforme dito anteriormente, se  $i$  for menor que  $\phi$ , então o talude estará em uma condição segura, já que se encontra completamente inserido no campo de estabilidade do diagrama. O equilíbrio-limite é alcançado quando  $i = \phi$  ( $FS=1$ ), e o escorregamento é iminente. Quando temos  $i > \phi$ , o talude entrará na região de instabilidade, estando em desequilíbrio.

No entanto, ao analisarmos uma situação considerando solos coesivos, mesmo em casos onde a inclinação do talude for maior que o ângulo de atrito do solo, haverá um intervalo no diagrama de Mohr no qual o talude ainda estará em situação de estabilidade. Ao plotarmos o diagrama para este caso específico (Figura 14), obteremos o ponto F, indicando que em profundidades maiores que aquelas correspondentes à tensão no ponto F, o talude adentra a região de instabilidade.

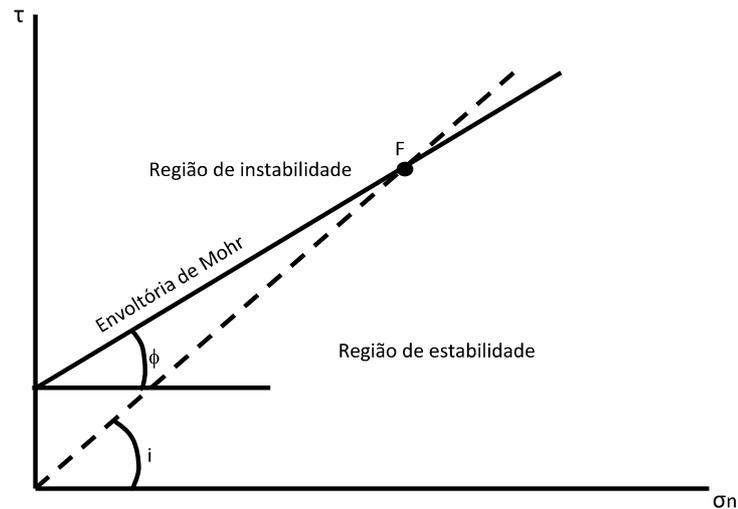


Figura 14 - Profundidade Crítica  $P_c$  de uma encosta de solo coesivo  
Fonte: Fiori e Carmignani (2009).

A profundidade de ruptura do talude para essa situação de pressão-limite chama-se “profundidade crítica” ( $P_c$ ) (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Mitchell e Soga (1976, p. 355) chegam à seguinte conclusão “a inclinação de um talude em solos coesivos pode exceder o valor do ângulo de atrito do solo, desde que a profundidade do solo seja menor que um dado valor crítico determinado pela magnitude do peso específico e do intercepto coesivo do material”.

Esta profundidade crítica deve ser calculada então para a condição de equilíbrio-limite, onde  $FS=1$ . Dessa forma, para o caso onde temos talude infinito e sem percolação de água (Equação 1), deve-se substituir  $z$  por  $P_c$ , obtendo-se a seguinte equação (Equação 4):

$$\frac{c}{\gamma_{nat} \times P_c} = \cos^2 i (tgi - tg\phi) \quad (4)$$

Onde:

$c$ : coesão do solo;

$\gamma_{nat}$ : peso específico natural do solo;

$P_c$ : profundidade crítica;

$\phi$ : ângulo de atrito do solo;

$i$ : inclinação do talude.

### 3.6.2. Bishop Simplificado

De acordo com Pacheco (2005), para que o método escolhido seja aplicável à situações reais, deve-se considerar a variação das propriedades do material ao longo do maciço. Dessa forma, deu-se origem ao método das fatias (ou lamelas), que consiste na subdivisão da região do solo delimitada pela potencial superfície de ruptura em um número qualquer de fatias verticais, analisando-se as condições de equilíbrio das forças atuantes em cada fatia isoladamente (Figura 15).

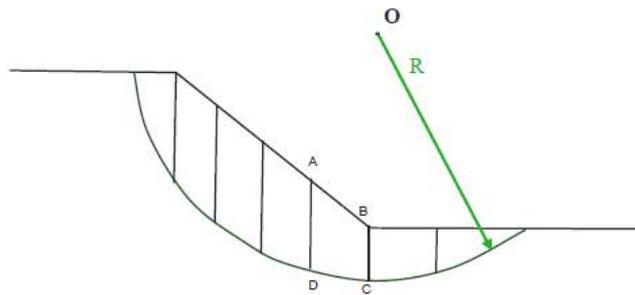


Figura 15 - Método das fatias

Onde: O: centro do arco de circunferência, R: raio do arco de circunferência, ABCD: representação de uma fatia.

Fonte: Modificado de Gerscovich (2009).

O método das fatias, desenvolvido por Fellenius (1936), consiste em realizar um equilíbrio de forças e momentos nas fatias divididas, considerando que a linha de ruptura seja um arco de circunferência. No entanto, para satisfazer às equações, cujo sistema apresenta um número de incógnitas maior que o número de equações, é necessário a adoção de algumas hipóteses com o objetivo de simplificá-las, dando origem então os diversos métodos de análise de estabilidade, caracterizando-os como mais ou menos conservadores (MENEZES, 2012).

Dentre os métodos existentes podemos citar a proposta de Fellenius, que de uma maneira geral, assume que para cada lamela a resultante das forças interlamelares é nula, realizando um equilíbrio de momentos para o cálculo da estabilidade.

Em seguida, o método desenvolvido por Bishop (1955) representa uma modificação do método inicial elaborado por Fellenius levando em consideração as reações existentes entre as fatias vizinhas, enquanto Fellenius as desconsidera (FIORI; CARMIGNANI, 2009). Além disso, o método de Bishop realiza não somente o equilíbrio de momentos resistentes e atuantes, mas também o equilíbrio das forças que agem em cada lamela (GAIOTO, 1978). Segundo Rogério (1977), o método de Fellenius leva a uma superestimativa do fator de

segurança, da ordem de 15%, em relação ao método elaborado por Bishop, resultando assim em um valor considerado conservador.

Já o método de Bishop Simplificado leva em consideração o mesmo equilíbrio de forças e momentos proposto inicialmente por Bishop, mas despreza as forças laterais entre as lamelas. Neste método, o equilíbrio das forças é feito na direção vertical, e a direção da resultante das forças laterais que atuam nas faces verticais das lamelas é horizontal (Figura 16) (MASSAD, 2003).

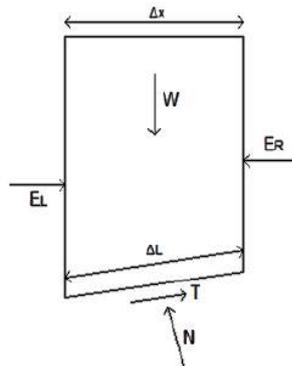


Figura 16 - Forças atuantes numa fatia pelo método de Bishop Simplificado

Onde:  $E_L$ : componente horizontal atuante na lateral esquerda da fatia;  $E_R$ : componente horizontal atuante na lateral direita da fatia;  $W$ : peso da fatia;  $T$ : força tangencial atuante na base da fatia;  $N$ : força normal atuante na base da fatia;  $\Delta L$ : comprimento da base da fatia;  $\Delta x$ : Comprimento do topo da fatia.

Fonte: Silva et al. (2013).

O método de Bishop Simplificado fornece resultados mais próximos aos dos métodos considerados mais rigorosos, quando comparado ao método de Fellenius.

Atualmente muitos programas vêm sendo utilizados na análise de estabilidade de taludes, sendo um deles o GeoStudio, que trata-se de um pacote de softwares difundido mundialmente e muito utilizados pelos profissionais da área de Geotecnia. O programa é composto por alguns módulos, dentre os quais estão o SLOPE/W, SIGMA/W e SEEP/W.

A extensão responsável pela análise de estabilidade de taludes é o SLOPE/W. Este módulo permite analisar desde problemas simples aos mais complexos baseados nos métodos determinísticos de equilíbrio limite (critério de Mohr-Coulomb) já mencionados nesse trabalho, resultando no menor fator de segurança encontrado para diferentes metodologias.

O programa também pode realizar a análise da estabilidade de talude utilizando parâmetros de entrada probabilísticos.

Dentre os principais métodos de análise possíveis no GeoStudio, destacam-se os métodos de Jambu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1967).

Para a modelagem é possível realizar a simulação de diferentes condições de ruptura relacionadas à superfície, à distribuição das poro-pressões, às propriedades do solo (solos heterogêneos) e à possíveis carregamentos e estruturas de contenção.

O SLOPE/W pode também atuar em conjunto com outras extensões do software, sendo o mais comum a sua combinação como o módulo SEEP/W. Dessa forma, as poro-pressões podem ser simuladas e importadas para a análise de estabilidade de taludes.

## 4. MÉTODO

A escolha de uma metodologia específica nos estudos de mapeamento geotécnico encontra-se relacionada ao objetivo final do projeto e ao uso e destinação das informações contidas na carta.

Neste projeto, o mapeamento de suscetibilidade a instabilização de taludes rodoviários é de grande relevância desde a fase de projeto, auxiliando no planejamento do traçado da malha rodoviária, até a sua fase de implantação, manutenção e conservação, se tornando uma importante ferramenta durante toda a vida útil do empreendimento.

O método desta pesquisa está embasado nos conceitos e nas abordagens gerais de mapeamento geológico-geotécnico proposto por Cerri (1990) e Zuquette (1993).

Entre os principais tipos de cartas geotécnicas propostos por Bitar, Cerri e Nakazawa (1992), os mapas de suscetibilidade aos processos geológicos estão diretamente relacionados à presente pesquisa.

Dessa forma, dentre os métodos dispostos na bibliografia sobre o tema, este projeto emprega um método de elaboração do mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa em taludes rodoviários apoiado na utilização de modelos físico-matemáticos de análise de estabilidade em ambiente SIG, como apresentado nos trabalhos de Wu e Abdel-Latif (2000), Augusto Filho (2001), Ramos et al. (2002), Vieira (2007) e Silveira et al. (2012).

O trabalho também utiliza no mapeamento da suscetibilidade aos movimentos de massa, avaliações da estabilidade baseadas em seções geológico-geotécnicas de detalhe levantadas nos taludes, conforme discutido nas pesquisas de Lopes (2007), Tonus (2009) e Menezes (2012).

Se apoiando nas abordagens metodológicas acima e a fim de alcançar o objetivo final desse projeto de mestrado, foram definidas cinco etapas de trabalho e as principais atividades realizadas, dispostas na Figura 17 e discutidas nos itens a seguir.

Em todas as etapas de trabalho foi utilizado o software ArcMap® 10.1 do programa ArcGis®, como ferramenta básica para armazenamento e análise de dados. A escala principal dos produtos cartográficos foi de 1:10.000, a mesma da base topográfica utilizada no estudo.

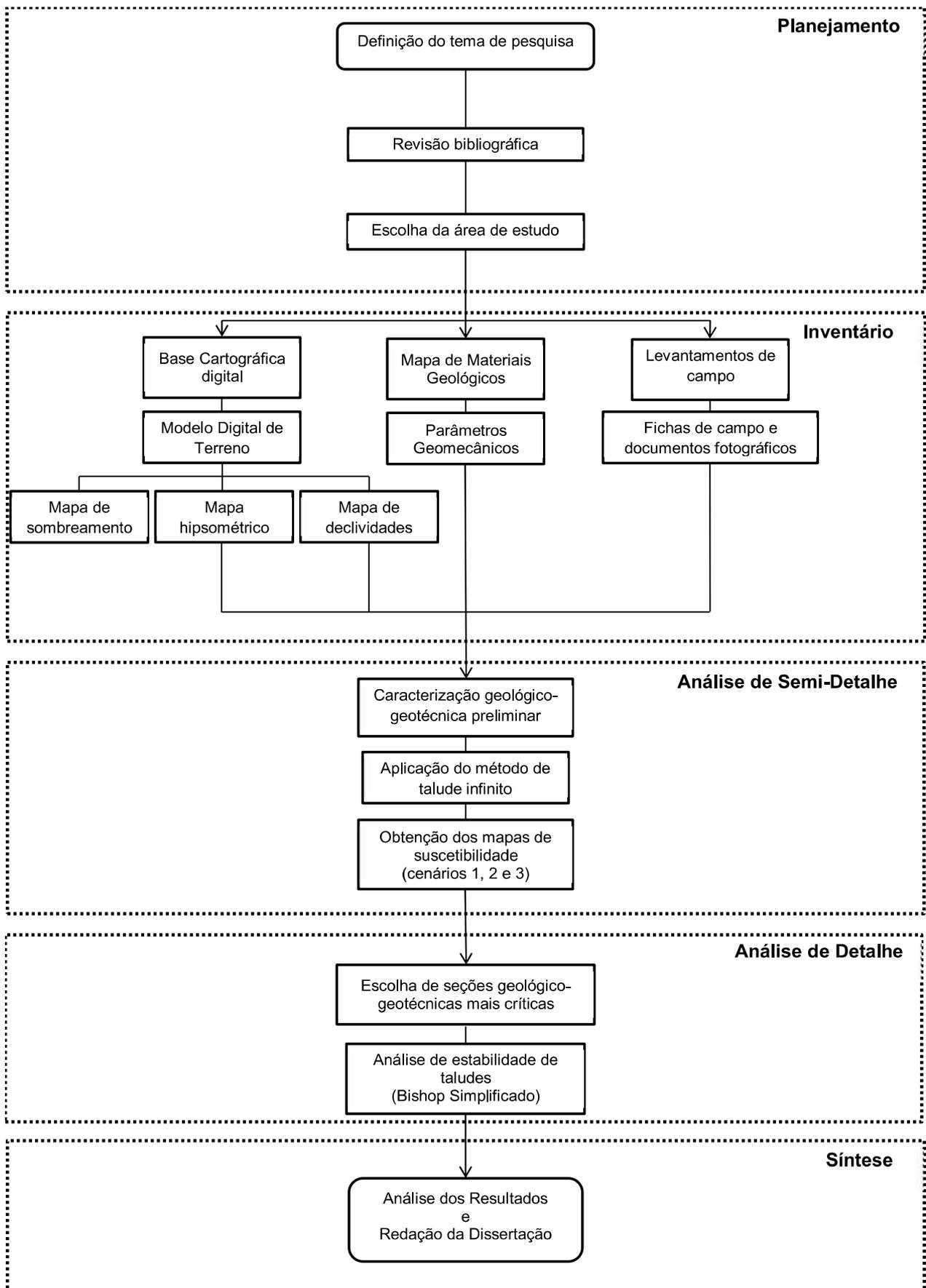


Figura 17 - Fluxograma das atividades.

#### 4.1. Planejamento

O tema desta pesquisa foi definido em função da importância do mapeamento geológico-geotécnico de empreendimentos rodoviários, a fim de identificar áreas suscetíveis a processos de instabilização de taludes que possam desencadear problemas ambientais, sociais e econômicos de grandes proporções.

Diante deste assunto, foi elaborada uma revisão bibliográfica que buscou fornecer o embasamento teórico necessário para o melhor entendimento do tema abordado, além de propiciar subsídios para futuras discussões acerca dos resultados obtidos.

A primeira parte da revisão bibliográfica tratou dos movimentos de massa de uma maneira geral, pontuando as principais classificações e seus agentes e causas, abordando também os processos erosivos. Em seguida, trata-se da cartografia geotécnica voltada à estabilidade de encostas, os métodos de mapeamento e a sua relação com as ferramentas de modelagem espacial, bem como os métodos de análise de estabilidade de taludes, com ênfase nos métodos do talude infinito e Bishop simplificado. Foi utilizado como banco de dados, o acervo bibliográfico da Universidade de São Paulo, além de artigos, dissertações e teses disponíveis para consulta na biblioteca da universidade e nos veículos de publicação de trabalhos científicos.

Na etapa de planejamento, também foi definida a área de estudo da pesquisa. O trecho entre os km 170 ao km 192,5 da Rodovia Luís Augusto de Oliveira (SP-215) foi definido a partir de idas preliminares ao campo, onde se pode verificar a existência de taludes terrosos e rochosos em diferentes formações geológicas e pontos apresentando sinais de instabilização com o desenvolvimento de movimentos de massa.

Foi considerada uma faixa de 500 metros para cada lado da estrada, partindo-se do seu eixo. Essa faixa de terreno também é adotada como Área de Influência Direta (AID) em estudos de impacto ambiental no processo de licenciamento de rodovias no Estado de São Paulo.

#### 4.2. Inventário

Na fase de inventário foi elaborada a base cartográfica digital e os mapas de sobreamento, hipsométrico, de declividade e o de materiais geológicos, necessários para a análise de suscetibilidade e essenciais para o alcance da proposta deste projeto. Além

disso, ainda foi realizado o cadastramento e a observação das feições do local e dos principais movimentos de massa atuantes, considerando as características do meio físico que podiam auxiliar o estudo, através do preenchimento de fichas de campo e registros fotográficos.

#### 4.2.1. Base Cartográfica Digital

A elaboração da base cartográfica digital se iniciou pela seleção e aquisição das folhas topográficas 1:10.000 do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) necessárias para a cobertura do trecho selecionado da Rodovia SP-215. As folhas foram escaneadas na resolução de 300 dots per inch (*dpi*) em formato Tagged Image File Format (*TIFF*), georreferenciadas em coordenadas geográficas e logo em seguida recortadas em seus limites externos (comando *clip*), para que pudessem finalmente ser agrupadas dando origem a um único mosaico (comando *mosaic*, módulo *raster dataset*) composto por 7 folhas.

Cumpridas essas etapas, o mosaico foi projetado para coordenadas *Universal Transversa de Mercator* (UTM) fuso 22S, para que pudesse ser dado início a fase de vetorização. Utilizando a ferramenta *Arcscan*, foram vetorizados os taludes de corte/aterro, os limites da área de estudo (AID), as curvas de nível, os pontos cotados, as drenagens e os cursos e espelhos d'água.

Um mosaico de imagens Google Earth® na maior escala possível da área de estudo também foi elaborado. Isso foi feito importando o limite da Área de Influência Direta (AID) para o programa (Google Earth Pro®), e em seguida salvando imagens respeitando esse limite. As imagens salvas foram agrupadas dando origem à uma imagem mosaicada.

A base cartográfica digital foi organizada a partir da articulação em sete folhas na escala 1:10.000 e forneceu os dados necessários para a elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT), fundamental para a confecção dos mapas temáticos deste projeto como os mapas de declividade, o mapa hipsométrico e o mapa de sombreamento.

#### 4.2.2. Modelo Digital de Terreno (MDT)

O MDT foi produzido com o comando *topo to raster* (formato matricial) do módulo *3D Analyst Tools*. Essa ferramenta realiza uma interpolação hidrologicamente correta de uma

superfície partindo dos dados de entrada relacionados aos pontos cotados, drenagens, limites e curvas de nível, obtidos na etapa anterior.

A malha de interpolação utilizada correspondeu a um tamanho de 2,5m, sendo este um parâmetro bastante importante na elaboração do MDT. Já que se baseia no erro cartográfico admissível que é de 0,5mm na escala de trabalho, sendo de 5m para mapas na escala 1:10.000. Dessa maneira o valor de 2,5m encontra-se 50% inferior ao erro admissível.

O MDT gerado foi submetido à ferramenta *filter* do módulo *Spatial Analyst Tools*, para que eventuais ruídos da interpolação fossem corrigidos, procedimento esse recomendado por ESRI (2010).

Em seguida o MDT foi validado qualitativamente. Para isso, foi feito o uso do método proposto no manual do próprio programa, que sugere a produção de curvas de nível a partir do MDT gerado e a sua comparação visual com as curvas de nível originais obtidas das folhas topográficas vetorizadas.

A produção das curvas de nível a partir do MDT gerado foi feita com o uso da ferramenta *contours* do módulo *3D Analyst Tools*, sendo adotada a metade do intervalo das curvas de nível originais presentes das folhas topográficas iniciais. Dessa forma, adotou-se um intervalo de 2,5, já que as curvas originais apresentam 5 metros de intervalo.

O MDT final resultante desta etapa foi utilizado na elaboração dos mapas hipsométrico, de declividades e de sombreamento.

#### 4.2.2.1. Mapa Hipsométrico

O mapa hipsométrico é um fatiamento da superfície do terreno, baseado nas cotas altimétricas, partindo do MDT da área.

Dessa maneira, com base no MDT gerado anteriormente, foi utilizada a ferramenta *Reclass* do módulo *Spatial Analyst Tools*, para classificar a área em 6 classes altimétricas com intervalos de 50 m em função da escala de trabalho.

Diante disso, foram feitos cálculos de frequência da área de cada uma delas, com valores em porcentagens da área total e com relação a cada uma das sete folhas articuladas em escala 1:10.000.

#### 4.2.2.2. Mapa de Declividades

O mapa de declividades foi confeccionado a partir do MDT, utilizando o comando *Slope* do módulo *Surface*.

A declividade foi calculada em intervalos contínuos de graus e reorganizada em cinco classes expressas em percentagens da seguinte maneira: de 0 a 6%, de 6 a 12%, de 12 a 20%, de 20 a 50% e maiores que 50%.

O mapa de declividades em graus foi utilizado na etapa de semi-detalhe, no cálculo do FS pelo método do talude infinito. Já a classificação em classes de percentagens foi utilizada como base para o diagnóstico geológico-geotécnico preliminar.

Essas classes foram assim definidas de acordo com trabalhos anteriores e representam limites críticos como indicativos do vigor dos processos erosivos e da suscetibilidade a escorregamentos como mostra a Tabela 10.

A partir dessa classificação foi calculada a distribuição em área percentual de cada classe de declividade tanto com relação à área total, como com relação a cada uma das sete folhas em escala 1:10.000.

Tabela 10 - Classes de suscetibilidade a deslizamentos e processos erosivos de acordo com a declividade.

Intervalos de classes (%)	Suscetibilidade
0 -6	baixa erosão e muito baixo deslizamento
6 - 12	média erosão e muito baixo deslizamento
12 - 20	alta erosão e baixo deslizamento
20 - 50	muito alta erosão e médio deslizamento
>50	muito alta erosão e alto deslizamento

#### 4.2.2.3. Mapa de Sombreamento

Partindo do MDT gerado, foi confeccionado o mapa de sombreamento da área através da ferramenta *Hillshade* do módulo *3D Analyst Tools*.

Esta ferramenta obtém a iluminação hipotética de uma superfície, através da determinação dos valores de iluminação para cada célula em um raster. Isso é realizado através da criação e posicionamento de uma fonte de luz hipotética e calcula os valores de iluminação de cada célula com relação às células vizinhas.

Trata-se de uma ferramenta de grande importância, pois auxilia na visualização da superfície de análise criando um efeito 3D na imagem.

Dessa forma foi adotado 315° de azimute e 45° de ângulo de altitude da fonte de luz, valores normalmente adotados na representação do sombreamento para o hemisfério sul.

#### 4.2.3. Mapa de Materiais Geológicos

O mapa de materiais geológicos foi elaborado tendo-se como base o Mapa Geológico do Estado de São Paulo na escala 1:250.000 correspondendo a região estudada à folha de Bauru. Dessa maneira, o mapa geológico teve sua escala adequada à adotada para este projeto (1:10.000.).

Em função da diferença entre escalas, foram realizadas visitas de campo com o intuito de se ajustar os contatos do mapa original às unidades encontradas na área de estudo.

O mapeamento se deu percorrendo todo o trecho de pesquisa da rodovia, com o auxílio do Global Positioning System (GPS), martelo e do mapa geológico em escala 1:250.000 da folha de Bauru como base.

A partir do mapa de materiais geológicos foram então identificadas as principais unidades que cortam a região, direcionando a busca pelos parâmetros geomecânicos (coesão, ângulo de atrito e peso específico) de cada formação na bibliografia, além da realização dos cálculos de frequência da distribuição desses materiais na área.

#### 4.2.4. Levantamentos de Campo

Nesta etapa foram realizadas idas a campo para verificação das principais feições atuantes tanto com relação aos movimentos de massa, como também a observação de processos erosivos que pudessem levar à instabilização.

Foram observadas feições importantes do meio físico que auxiliaram no processo de mapeamento, tais como o material geológico (ajuste dos contatos), perfil de alteração, a localização e a situação dos taludes da rodovia, tanto os de corte quanto os de aterro. Diante disso, foi feito o cadastramento de cicatrizes de escorregamento e das principais

características dos taludes da rodovia, através do preenchimento de fichas de campo e documentos fotográficos.

Os principais pontos de controle observados em campo foram georreferenciados na base cartográfica elaborada, onde o cruzamento dos seus atributos espaciais foi analisado para definição dos modelos de análise de estabilidade.

#### 4.3. Análise de Semi-Detalhe

Com base nos dados obtidos e analisados da fase de inventário, mais especificamente dos mapas hipsométrico, de declividade, de materiais geológicos e também das fichas cadastrais e dos registros fotográficos, foi possível se obter um diagnóstico geológico-geotécnico preliminar da área de estudo. O diagnóstico identificou as principais características geotécnicas de interesse e ainda direcionou a escolha pelo modelo determinístico de análise do tipo talude infinito com base na observação dos principais movimentos de massa atuantes no local, dando seguimento às demais etapas do estudo.

Sendo assim, a análise de semi-detalle (escala 1:10.000) se caracterizou pela aplicação do modelo matemático do talude infinito na definição dos níveis de suscetibilidade a escorregamentos, através do cálculo do fator de segurança aplicado em todas as células do terreno de acordo com as características de cada uma.

Nesta etapa, foram pesquisados três cenários distintos para os valores de FS considerando os dados de altura do nível d'água e profundidade de ruptura dos taludes. Todos os cálculos foram executados adotando os valores mínimos para os parâmetros geomecânicos e máximos para os pesos específicos, a fim de representar a configuração mais crítica de análise.

As análises foram feitas simulando os seguintes cenários e condições:

- Cenário 1: Modelagem sem nível d'água, considerando apenas 1m de profundidade de ruptura;
- Cenário 2: Modelagem sem nível d'água, considerando 2m de profundidade de ruptura;
- Cenário 3: Modelagem considerando vertente não saturada de 1 m de profundidade de ruptura, com nível d'água a 0,5m de altura acima do plano de escorregamento, considerando fluxo paralelo à vertente;

Essas informações foram processadas no software ArcMap®, onde os valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico de cada célula, ao se relacionarem aos dados de

declividade do terreno e à constante profundidade de ruptura, geraram o valor de FS célula a célula, por meio da aplicação da equação 1 (Figura 18).

Os cálculos de FS foram realizados em formato raster, considerando células do terreno com dimensões de 2,5 por 2,5m, conforme especificado na elaboração do MDT. Com isso, o processamento da equação 1 em ambiente SIG ocorreu fazendo-se uso da ferramenta *Raster Calculator* do módulo *Spatial Analyst Tools*, que executa expressões matemáticas através da interação entre as células de matrizes.

Os dados de entrada da Equação 1 foram obtidos da seguinte forma:

- A inclinação do terreno em graus foi extraída do MDT gerado anteriormente, através do mapa de declividade;
- Os parâmetros geomecânicos foram obtidos a partir do mapa de materiais geológicos confeccionado na fase de inventário, que direcionou as buscas por esses parâmetros na bibliografia;
- A profundidade de ruptura foi testada em dois diferentes valores (1m e 2m) para a observação e estudo da variação do FS, sendo considerada como uma constante em cada um dos cenários analisados.

Diante da aplicação deste método foram gerados valores de Fator de Segurança para cada célula do terreno, que em seguida foram classificados em níveis de suscetibilidade por faixas, dando origem ao mapa de suscetibilidade para cada cenário analisado.

Os valores de FS foram classificados em cinco intervalos, buscando-se associar os diferentes graus de suscetibilidade dos taludes aos deslizamentos e tendo como referência os valores estipulados pela NBR 11682 que dispõe acerca dos níveis de segurança para taludes urbanos, de rodovias/ferrovias e de mineração.

Dessa forma, os níveis de suscetibilidade estabelecidos para este projeto foram:  $FS \leq 1$ ,  $1 < FS \leq 1,3$ ,  $1,3 < FS \leq 1,5$ ,  $1,5 < FS \leq 2$  e  $FS > 2$ , especificados na Tabela 11.

Tabela 11 - Classes de FS adotadas

FS	Condição de Ruptura Representada	Suscetibilidade
$\leq 1$	Em ruptura	Muito Alta
1,01 a 1,3	1% a 3% acima da condição de ruptura	Alta
1,31 a 1,5	31% a 50% acima da condição de ruptura	Média
1,51 a 2	51% a 100% acima da condição de ruptura	Baixa
$> 2$	Mais de 100% acima da condição de ruptura	Muito Baixa

Através da documentação dos taludes de corte e aterro em campo, foi verificado que a escala utilizada no mapeamento, de 1:10.000, não fornece detalhes suficientes para um cálculo preciso das declividades a partir do MDT. Isso ocorre em função das folhas topográficas utilizadas como base para elaboração do MDT estarem desatualizadas. Por esse motivo, através de uma média e das observações de campo, foi adotado para as modelagens, que a declividade dos taludes de corte era de 60°, enquanto que a declividade dos aterros era de 40°.

Outro problema verificado com relação à escala é que a maioria dos taludes tem menos de 5m de altura, sendo que as curvas de nível na base cartográfica possuem espaçamento de 5m. O que faz com que uma modelagem à parte para os taludes de corte e aterro se fizesse necessária.

Com base nos resultados obtidos dos cenários, foi realizado o cálculo da distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação e da distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3, a fim de analisar os resultados e observar os trechos críticos da rodovia.

Ao final desta etapa, foram definidos setores mais críticos para terem as seções analisadas em maior nível de detalhe.

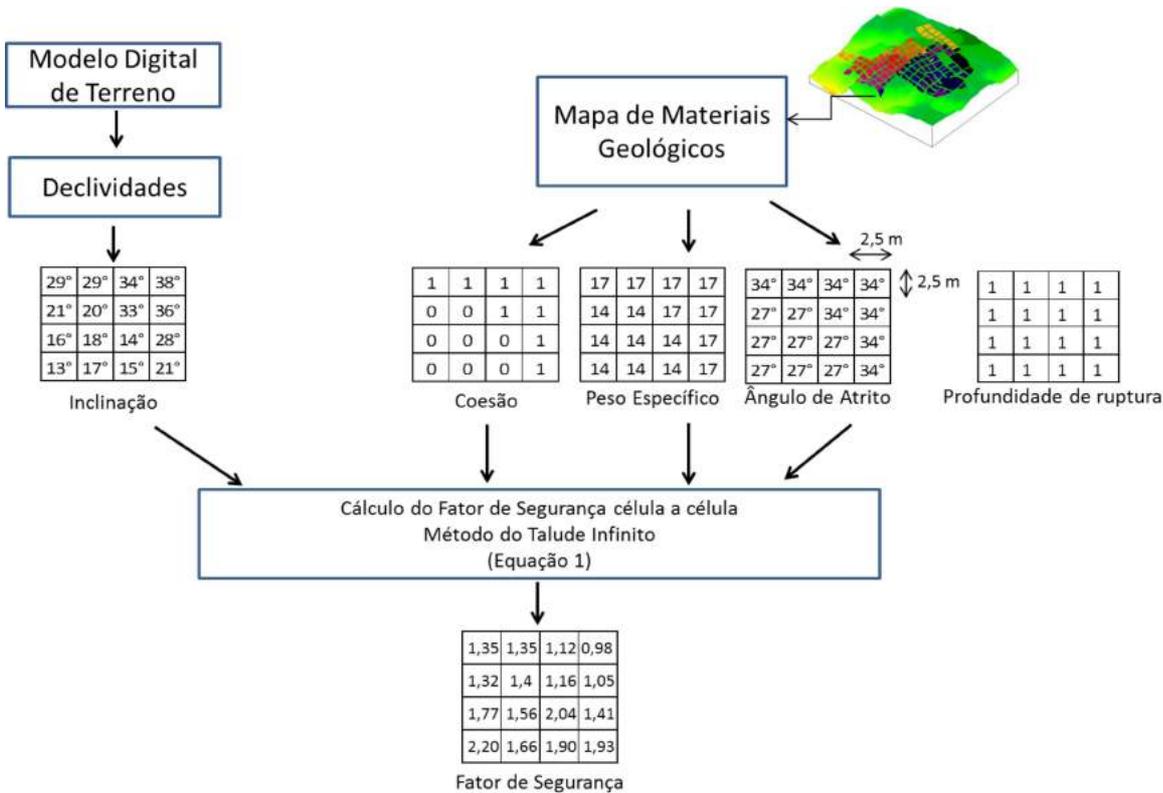


Figura 18 - Processamento do cálculo de FS em ambiente SIG.

#### 4.4. Análise de Detalhe

Com base nos mapas de suscetibilidade a escorregamentos gerados, alguns taludes representativos de setores mais críticos foram selecionados para uma análise detalhada da estabilidade. Para isso, foram feitos levantamentos de seções geológico-geotécnicas de detalhe desses locais, com o auxílio de baliza, trena e inclinômetro, a fim de se obter os dados geométricos de entrada necessários para as modelagens.

Foram selecionadas quatro seções de forma que cada uma delas representasse uma tipologia de formação geológico-geotécnica do local sendo elas: uma em solos residuais da formação Serra Geral, uma em solos residuais da formação Botucatu, uma em aterro e uma em solo residual da formação Adamantina. Nessa última sendo realizada retroanálise para o estudo e ajuste de parâmetros geomecânicos mais condizentes com a realidade do local.

As análises de estabilidade foram feitas através do método de Bishop Simplificado no programa GeoStudio®, utilizando-se a extensão SLOPE/W.

No SLOPE/W, estipulou-se a divisão da superfície de escorregamento em 30 fatias e um número de duas mil interações para cada uma das análises de estabilidade realizadas. Foi escolhida a opção “grid and radius” na determinação das superfícies críticas de ruptura. Nesse método, deve-se definir um grid de pontos que, na linguagem do programa, são interpretados como os pontos potenciais do centro da superfície circular de ruptura, devendo-se também definir os limites do raio de alcance.

A retroanálise em seção de solo residual da formação Adamantina foi realizada a partir de uma superfície de ruptura pré-existente, mantendo-se o valor do ângulo de atrito constante e variando o valor da coesão até a obtenção de FS unitário, de acordo com o método de Bishop Simplificado.

Os resultados obtidos desta etapa foram importantes na validação do modelo empregado, principalmente por que possibilitaram concluir acerca dos parâmetros geomecânicos utilizados inicialmente e encontrados na bibliografia.

#### 4.5. Síntese

Nessa fase conclusiva do projeto, foi feita a conjugação e análise das etapas anteriores (análises de semi-detalle e detalhe).

A partir disso, seguiram-se as discussões dos resultados obtidos, as conclusões cabíveis e por fim a redação da dissertação.

## 5. ÁREA DE ESTUDO

O trecho de estudo compõe a Rodovia Luís Augusto de Oliveira (SP-215), inaugurada em 1960, situada na Região Administrativa Central, no interior do estado de São Paulo, também conhecida como rodovia São Carlos-Jaú.

A rodovia tem uma extensão de 63 quilômetros, possui pista única com trechos com terceira faixa, entre São Carlos e a Rodovia Comandante João Ribeiro Barros (SP-255). O trecho da pesquisa (Km 170 ao Km 192,5) abrange os municípios de São Carlos, Ribeirão Bonito e Dourado (Figura 19), e foi escolhido por apresentar de maneira significativa taludes de corte, aterro, e outras feições interessantes para o estudo. De acordo com o DER (2015) em 2014 o Volume Diário Médio (VDM) de tráfego nesta rodovia chegou a 3.259 veículos.

A rodovia encontra-se inserida na quadrícula de Brotas (ALMEIDA; OLIVEIRA; PRADO, 1981). Peterlini (2011), ao estudar a organização espacial da vegetação natural nas quadrículas de Brotas e São Carlos, constatou que as principais representações da vegetação primitiva no local eram Cerrado, Cerradão, Mata e Campos Higrófilos.

Segundo o mesmo autor, o Cerrado encontra-se relacionado às áreas planas ou de suave ondulação, dispostas entre as vertentes e os fundos de vales. Já com relação ao Cerradão, pode-se verificar que a sua distribuição espacial está relacionada aos níveis de declividade do terreno, vindo a ocupar posições de topo e meia vertente. As regiões de Mata estão associadas às formas mais acidentadas, elevadas e íngremes. Enquanto que os Campos Higrófilos se associam aos solos hidromórficos e orgânicos que ocupam as planícies de inundação e os cursos d'água.

Atualmente, grande parte dessa vegetação primitiva foi prontamente dizimada, restando apenas fragmentos no local, principalmente pelo avanço da pecuária, pelas culturas canavieiras, de citrus e de café. No entanto, alguns núcleos de vegetação ainda persistem em função das condições naturais do terreno, o que torna difícil a sua ocupação. A presença desses núcleos está associada a regiões de declividade acentuada ou em áreas de baixa fertilidade (NISHIYAMA, 1991).

Como na maior parte do estado de São Paulo, na área de estudo o período chuvoso ocorre de Outubro a Março, sendo o trimestre mais chuvoso de Dezembro a Fevereiro. O período mais seco vai de Abril a Setembro, com o trimestre mais seco entre Junho e Agosto.

De acordo com o sistema de Köppen, dois tipos climáticos podem ser definidos no local: o tipo CWa, mesotérmico de inverno seco e a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, característico da região correspondente à Depressão Periférica, onde as cotas giram em torno 600m; o tipo CWb ocorre em regiões serranas com altitudes que

variam de 800 a 1000m, sendo a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C (NISHIYAMA, 1991).

A área de estudo desta pesquisa encontra-se inserida na Unidade 13 do mapa das Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (UGRHI), pertencendo assim à unidade Tietê/Jacaré. Mais especificamente na porção central da confluência das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçú e Jacaré-Pepira (também denominada “Sistema Jacaré”) que deságuam na região do curso médio do Rio Tietê e abrangem importantes centros urbanos além de diversificadas atividades agropecuárias e industriais (RABELO, 2006).

Segundo Corrêa (1995), o sistema Aquífero Botucatu, formado pelas rochas das formações Botucatu e Pirambóia, se constitui no principal manancial subterrâneo do sistema Jacaré (Jacaré-Guaçú/Jacaré-Pepira), de porosidade primária intersticial, predominando condições livres na maior parte do local. Este aquífero encontra-se limitado em sua base pelo terço inferior da formação Pirambóia e por formações impermeáveis (aquicluda) de idade paleozoica.

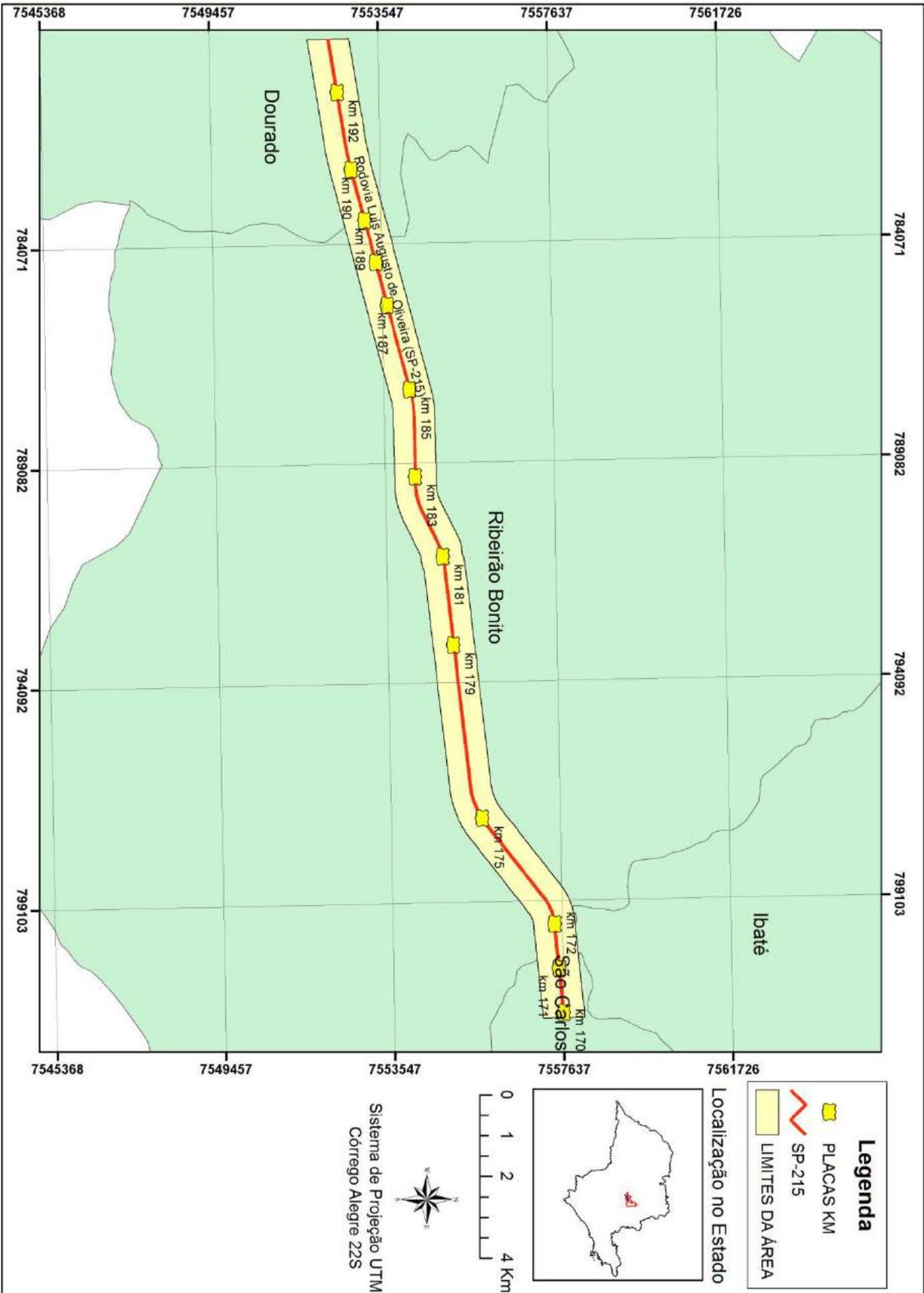


Figura 19 - Área de estudo da pesquisa.

### 5.1. Aspectos geológico-geotécnicos

De acordo com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (Ponçano, 1981), a rodovia SP-215 engloba três tipos de unidades de relevo: as colinas amplas, as mesas basálticas e as escarpas festonadas.

Os relevos colinosos se caracterizam pelo predomínio de baixas declividades (até 15%) e amplitudes locais inferiores a 100m. Dessa maneira, as colinas amplas, são caracterizadas pelos topos extensos e aplainados e vertentes com perfis retilíneos e convexos. São de drenagem de baixa densidade, com padrão subdendrítico e vales abertos. Possuindo planícies aluviais interiores restritas e presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

As mesas basálticas se caracterizam por serem sustentadas por maciços básicos, compreendendo morros testemunhos isolados, topos aplainados e arredondados, vertentes com perfis retilíneos com eventuais trechos escarpados e exposição da rocha. São feições que desenvolvem drenagem de baixa densidade.

Já as escarpas se caracterizam pelo predomínio de declividades altas (acima de 30%) e amplitudes maiores que 100m, sendo as escarpas festonadas caracterizadas por topos angulosos e vertentes com perfil retilíneo e drenagem de alta densidade.

A rodovia SP-215 se encontra na região centro-oeste do Estado de São Paulo. Essa área se insere na folha de Bauru do Mapa Geológico do estado (1:250.000), sendo a litologia da área pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná e definida pelos Grupos São Bento (Formações Botucatu e Serra Geral) e Bauru (Formação Adamantina).

A tabela 12 apresenta essas formações e suas principais características.

Tabela 12 - Formações que ocorrem no local da pesquisa e suas características gerais.

Formação Geológica	Características
Formação Adamantina	Constituída por um conjunto de fácies, sendo a principal característica a presença dos bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, cor róseo a castanho, portando estratificação cruzada, alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos de cor castanho avermelhado à cinza castanho, maciços ou com acamamento plano-paralelo grosso (SILVA; CHANG. H; CHANG. M, 2005).
Formação Botucatu	Pertencente a um ambiente desértico, constituída por arenitos de granulação fina a média, com grãos bem arredondados, superfície fosca, de cores creme e vermelho. Desfazem-se em areiões, estéreis para a agricultura e desfavoráveis para as rodovias que os atravessam. Exibem os arenitos eólicos Botucatu (SOARES, 1973; ALMEIDA; BARBOSA, 1953).
Formações Serra Geral/Intrusivas Básicas	Constituída por magmatitos básicos dentre os quais incluem derrames de lava, soleiras, diques de diabásio originados de vulcanismo de fissura e corpos de arenito intertrapeanos. Na área de estudo, os derrames aparecem sob a forma de cuevas basálticas, associados ao Platô de São Carlos (NISHIYAMA, 1991; MELO, 1995).
Depósitos Aluvionares	Os Aluviões são depósitos inconsolidados de argila, silte, areia ou cascalho que se encontram relacionando às linhas de drenagens principais (LOPES, 2007). Para Zaine (2000), os aluviões são compostos por sedimentos arenosos e argilosos, com espessura inferior a 5 m, geralmente associados a solos hidromórficos e orgânicos com baixa capacidade de suporte, formando as planícies de inundação. Nestas áreas, o lençol freático tende a ser pouco profundo estando o solo do local geralmente saturado.

### 5.1.1. Materiais Inconsolidados

Os diferentes materiais inconsolidados encontrados na área de estudo encontram-se relacionados aos litotipos da mesma região, citados no item anterior. Neste projeto, os materiais inconsolidados serão subdivididos em *residuais* e *retrabalhados*.

Os *materiais inconsolidados residuais* se caracterizam por terem se desenvolvido diretamente da meteorização da sua rocha de origem (“in situ”), não sofrendo qualquer tipo de transporte ou retrabalhamento. Já os *materiais inconsolidados retrabalhados* distinguem-se por terem sofrido ação de algum agente mobilizador, que se encarregou pelo transporte desse material do seu local de origem, após a decomposição da rocha matriz (colúvios e alúvios) (NISHIYAMA, 1991).

#### 5.1.1.1. Materiais Inconsolidados Residuais da Formação Adamantina

Os materiais inconsolidados da Formação Adamantina associados aos arenitos do Grupo Bauru, encontram-se na fase inicial do trecho do local da pesquisa, se caracterizando por um solo arenoso, de cor amarelada, com baixo teor de finos e em alguns pontos apresentando linha de seixos.

Godoy (2013), ao estudar amostra indeformada de material residual da formação Adamantina concluiu que os principais minerais presentes nesse solo são quartzo, gibbsite e haloisita, minerais típicos dos latossolos. Com relação à granulometria, o solo foi caracterizado como predominantemente arenoso, já que 79,4% do material é composto pela fração areia, o que é esperado já que trata-se de um material proveniente de arenito.

Neste mesmo trabalho, também foram realizados ensaios de condutividade hidráulica, obtendo-se como resultado valores na ordem de  $10^{-4}$  cm/s a  $10^{-3}$  cm/s, condizentes com as características dos solos arenosos.

Rodrigues et. al. (2014) estudaram uma unidade composta por este tipo de solo, descrevendo-os como areno-argilosos, pouco coesos, se desenvolvendo em locais de declividades médias, topos planos e vertentes suaves. O trabalho também concluiu que os solos desta unidade eram de baixa suscetibilidade aos processos erosivos naturais.

#### 5.1.1.2. Materiais Inconsolidados Residuais da Formação Botucatu

Segundo Nishiyama (1991), os materiais residuais provenientes da Formação Botucatu se caracterizam por apresentar porcentagem de areia acima de 80%, ausência de coesão e espessuras que podem superar 20 m.

Encontram-se recobertos pelos sedimentos arenosos cenozóicos, ou muitas vezes interrompidos pelos residuais de rochas básicas e pelas profundas incisões provocadas pelo Rio Jacaré-Guaçu.

Características comuns à formação Botucatu como: coloração avermelhada, estratificação cruzada, consistência friável e baixa quantidade de matéria orgânica, fazem com que os solos que se desenvolvem sobre essa formação, sejam arenosos, friáveis, pobres em nutrientes e também dotados de baixo teor de matéria orgânica (PETERLINI, 2011).

Os solos derivados da Formação Botucatu, também denominados Neossolos Quartzarênicos, localizados em relevo suave ondulado, relacionam-se com coberturas cenozóicas da Formação Rio Claro, na Depressão Periférica e com coberturas correlatas na Serra de Santana, tendo o cerrado como vegetação nativa (PETERLINI, 2011).

Uma das mais marcantes características desse solo é a sua textura predominantemente arenosa, tendo no quartzo o seu principal mineral constituinte. A fração areia perfaz ao menos 80% de sua granulometria, a argila não compõe 15% e os minerais intemperizáveis, responsáveis pela constituição dos cátions trocáveis e dos nutrientes, não chegam a 3%, sendo quase inexistentes.

Para Wu e Caetano-Chang (1992), a quase ausência de minerais intemperizáveis nos solos derivados dessa formação se dá em função das características de transporte e deposição das Formações Pirambóia e Botucatu, onde os grãos destes arenitos sofreram energicamente a ação abrasiva eólica, eliminando os minerais de baixa dureza, permanecendo somente os minerais mais duros. De acordo com Adámoli et al. (1985), a fração areia desses solos é 98% composta por quartzo, sendo os 2% restantes compostos por concreções argilo-ferruginosas, magnetita e detritos.

Os materiais inconsolidados da Formação Botucatu diferem dos residuais da Formação Pirambóia, pela menor quantidade de finos (NISHIYAMA, 1991).

#### 5.1.1.3. Materiais Inconsolidados Residuais das Formações Serra Geral/Intrusivas Básicas

Os materiais inconsolidados da Formação Serra Geral, originados da meteorização das rochas básicas (Basalto, Diabásio), ocorrem de forma significativa na área de estudo, estando associados a relevos mais acidentados.

Caracterizam-se por um solo residual maduro (SRM) bastante argiloso homogêneo de coloração vermelho escuro. Sob esta camada, ocorre o solo residual jovem (SRJ), composto por basalto extremamente alterado (rocha mole), disperso em matriz argilosa de cor vermelho escuro. À medida que se avança para a base do perfil, aumenta-se a quantidade de blocos.

Trata-se de solos normalmente rasos, havendo na superfície diversos blocos de rocha alterada, arredondados, com alteração tipicamente esferoidal de coloração ocre, comuns nos perfis de alteração de rocha básica.

Segundo Nishiyama (1991), esses materiais apresentam textura predominantemente argilosa, porém em alguns pontos estudados na quadricula de São Carlos, a fração silte torna-se preponderante, especialmente nos níveis próximos à rocha matriz, onde a evolução pedogenética ainda se faz incipiente.

Para Oliveira e Prado (1984), a composição mineralógica da fração argila é representada principalmente pela caulinita e gibbsita e a fração areia fina pelo quartzo, magnetita e ilmenita. Com base nisso, é provável que estes materiais residuais não venham a apresentar problemas relacionados à expansibilidade.

#### 5.1.1.4. Materiais Inconsolidados Retrabalhados (Colúvios)

Fonseca et al. (2002) definem solos coluvionares como depósitos a meia encosta provenientes de massas de solos que foram deslocados por ação da gravidade. Em uma encosta pode haver várias camadas de colúvio, cada uma com uma idade diferente, que se originaram a partir de vários escorregamentos que se sucederam ao longo do tempo (MASSAD, 2003).

Nem sempre os colúvios mais profundos são necessariamente os mais antigos, pois o colúvio pode sofrer escorregamentos sucessivos que alteram a sua ordem de deposição (FONSECA et al., 2002), encontrando-se muitas vezes associados à presença de linhas de seixo na sua base, compostos essencialmente de minerais de quartzo.

Os solos coluvionares apresentam estratigrafia bastante heterogênea e complexa, além de se apresentarem suscetíveis a movimentos de massa de diversos tipos, o que torna difícil a determinação de seus parâmetros de resistência para possíveis análises de estabilidade.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são abordados os resultados e as discussões referentes às etapas de trabalho para a aplicação do método de análise da suscetibilidade a instabilização de taludes proposto neste projeto.

Inicialmente, são discutidos os resultados da fase de inventário. Em seguida, são apresentados os resultados referentes à aplicação do método do talude infinito em toda a área de estudo. Por fim, são abordadas as análises de detalhe dos taludes mais críticos.

### 6.1. Inventário

#### 6.1.1. Base Cartográfica Digital

A base cartográfica digital representa um trecho da Rodovia Luís Augusto de Oliveira (SP-215), entre os Km 170 ao Km 192,5, englobando parte dos municípios de São Carlos, Ribeirão Bonito e Dourado. O trecho possui aproximadamente 23 km de extensão, compondo uma área total de 23,44 km<sup>2</sup>.

Esta base está articulada em sete folhas em tamanho A3 (Figura 20) para visualização em tela e impressão na escala 1:10.000. Para melhor visualização dos seus dados, foi utilizado o mapa de sombreamento em conjunto, conferindo um efeito 3D às imagens apresentadas.

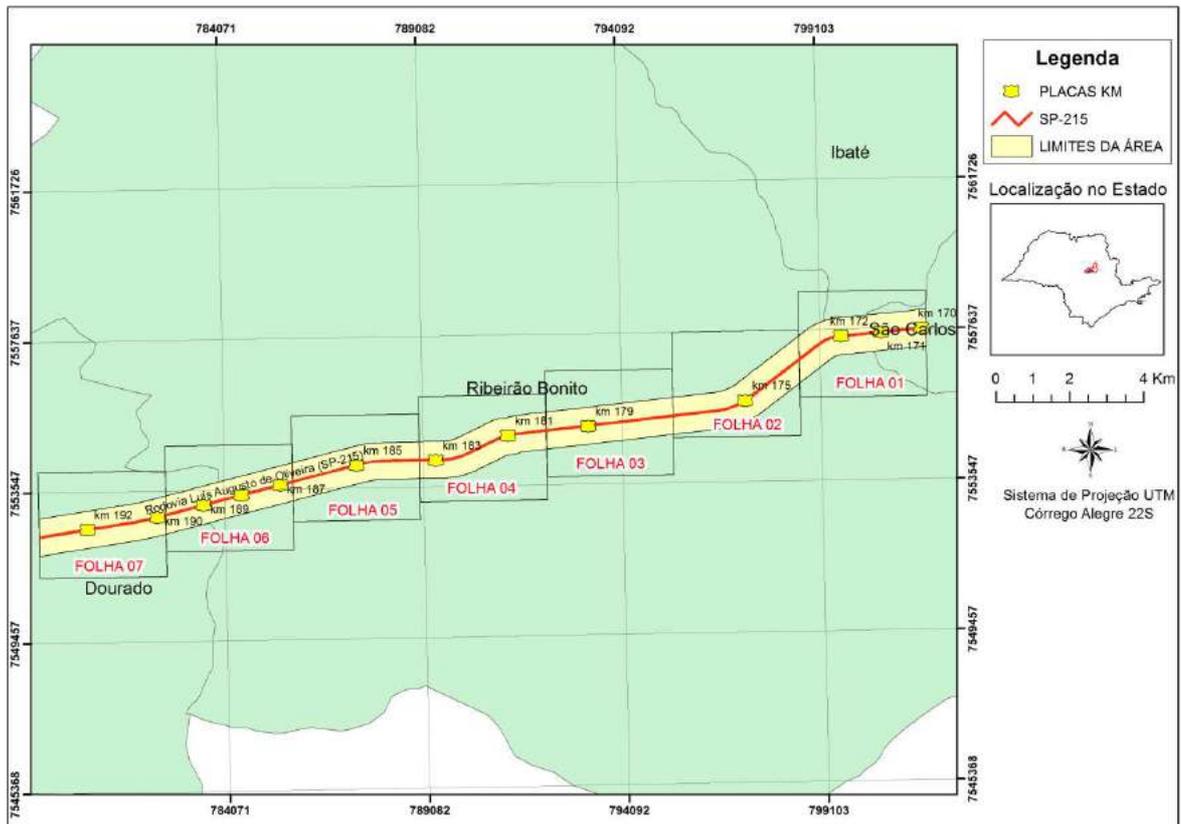


Figura 20 - Articulação das sete folhas A3 da área de estudo.

O mapa de sombreamento também foi utilizado na apresentação dos mapas hipsométrico, de declividade e de materiais geológicos, na facilitação da visualização dos mesmos.

Na base é possível observar as principais informações relacionadas aos aspectos físicos da região e de grande importância para a pesquisa como as curvas de nível, os pontos cotados, as drenagens, os espelhos d'água, os taludes de corte e aterro, os limites do trecho da rodovia estudado, os pontos de controle coletados nos levantamentos de campo e o uso e ocupação da área de estudo.

O menor valor de curva de nível encontrado para o local foi de 535m, sendo o ponto mais elevado correspondente a 760m.

Para os pontos cotados, o menor valor foi de 543m, estando o maior valor na cota 762m.

A vetorização das drenagens a partir das folhas topográficas serviu de auxílio na descrição hidrográfica do local da pesquisa.

Através dos levantamentos de campo, houve a inserção de alguns taludes de corte e aterro que, em função da escala e das datas das folhas topográficas, não haviam sido documentados nas mesmas, o que tornou a base e a modelagem mais completas. No total foram cadastrados 64 taludes, sendo 36 de corte e 28 de aterro.

Com relação ao uso e ocupação do solo da área, foi elaborado um mosaico de imagens Google Earth do trecho da rodovia que auxiliou, juntamente com as idas a campo, na observação espacial do terreno. As imagens são dos anos de 2008 e 2009, e estão na escala 1:2.000.

De uma maneira geral o trecho é composto por vegetações do tipo cerrado, com a presença de gramíneas e espécies arbustivas e também de uma vegetação mais densa em alguns pontos. Ainda foram observadas algumas propriedades rurais, com predomínio da atividade pecuária e de cultivo de cana-de-açúcar.

Também se utilizou a base cartográfica como orientação para os trabalhos de campo, já que nela são verificados os aspectos importantes da região, além da localização dos taludes de corte e aterro, principais objetos desse estudo.

Todas as informações contidas na base cartográfica digital foram utilizadas na representação dos demais documentos cartográficos elaborados neste trabalho.

A Figura 21 representa um trecho da área de estudo correspondente à base cartográfica digital.

As sete folhas A3 em escala 1:10.000 da base cartográfica digital encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

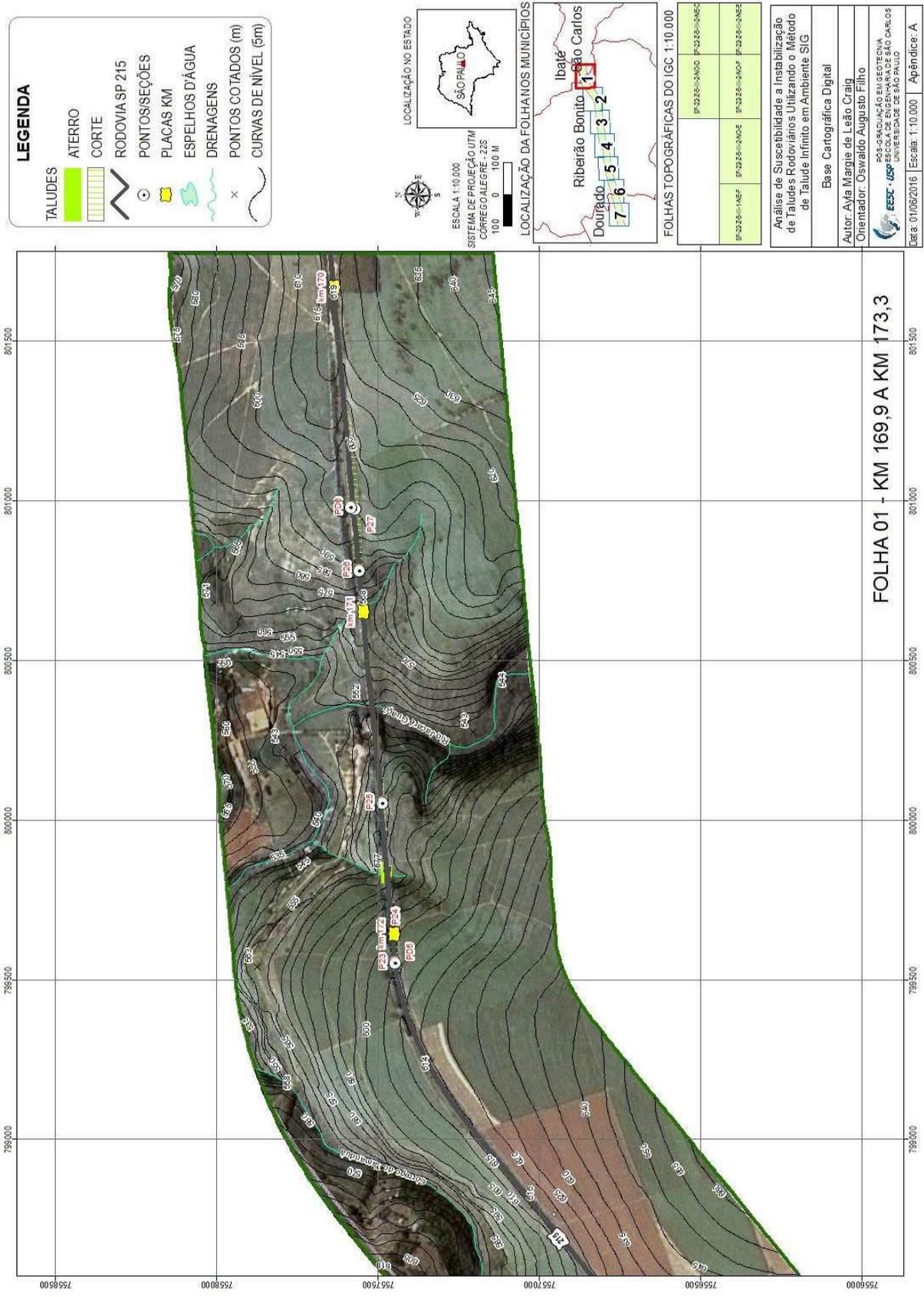


Figura 21 - Trecho da área de estudo referente à Base Cartográfica Digital.

### 6.1.2. Modelo Digital de Terreno

O MDT gerado apresentou maior elevação no valor de 761,98m e menor elevação no valor de 533,82m.

Após a obtenção do MDT, o mesmo foi submetido a uma validação qualitativa, cujo resultado se encontra na Figura 22.



Figura 22 - Resultado da validação do MDT.

Diante do resultado, pode-se concluir que as curvas de nível produzidas a partir do MDT geraram resultados satisfatórios, já que visualmente pode-se observar a compatibilidade entre as curvas do MDT e as originais da folha topográfica, validando o MDT elaborado para este trabalho.

### 6.1.3. Mapa Hipsométrico

O mapa hipsométrico é um fatiamento do MDT considerando um intervalo de cotas de elevação (Figura 23).

Neste trabalho, fatiou-se o MDT em 6 intervalos de elevação, e, partindo desta classificação, calculou-se a distribuição das classes hipsométricas em área percentual total e em área percentual com relação a cada uma das sete folhas articuladas em escala 1:10.000 (Tabelas 13 e 14).

Tabela 13 - Distribuição das classes hipsométricas (em %) da área total de estudo.

Classes hipsométricas	% da Área
533,82 - 550	1,3
550 - 600	8,8
600 - 650	28,0
650 - 700	25,9
700 - 750	34,6
750 - 761,8	1,4

Tabela 14 - Distribuição das classes hipsométricas (em %) por folha A3.

Classes hipsométricas	Folha 1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
533,82 – 550	8,7	0	0	0	0	0	0
550 – 600	43,4	7,5	5,5	3,8	0	0	0
600 – 650	44,9	53,3	41,2	45,1	6,2	1,9	0
650 – 700	3	39,2	53,3	25,9	22,2	15,8	21,8
700 – 750	0	0	0	21,6	65,4	82,3	78,2
750 – 761,98	0	0	0	3,6	6,2	0	0

Dos resultados das tabelas, verifica-se que em cerca de 88% da área predominam as classes de hipsometria entre 600m e 750m, havendo um aumento das cotas à medida que se avança o percurso, partindo da folha 1 em sentido à folha 7. Existindo ainda um local de maior elevação entre as folhas 4 e 5.

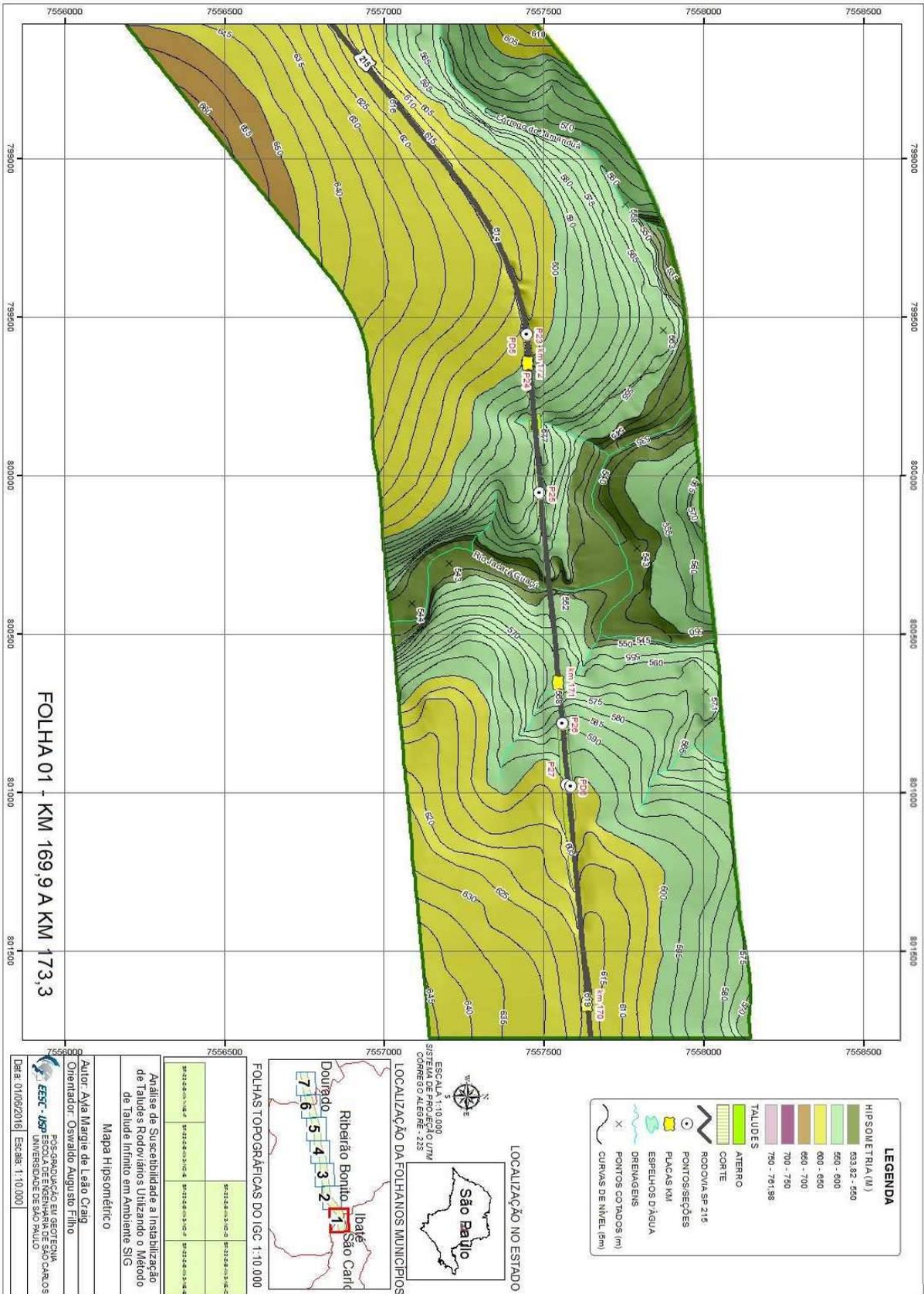


Figura 23 - Trecho da área de estudo referente ao Mapa Hipsométrico.

#### 6.1.4. Mapa de Declividades

O mapa de declividades (Figura 24) foi calculado em intervalos contínuos de graus sendo reclassificado em cinco classes expressas em porcentagens, sendo elas: de 0% a 6%, de 6% a 12%, de 12% a 20%, de 20% a 50% e maiores que 50%, que foram assim determinadas de acordo com trabalhos anteriores (classe de uso da terra e de trabalhos de escorregamentos da Serra do Mar) e indicam a suscetibilidade a deslizamentos e processos erosivos em função da declividade, conforme a Tabela 15.

Partindo desta classificação, foi calculada a distribuição em área percentual de cada classe de declividade tanto com relação à área total, como com relação a cada uma das sete folhas em escala 1:10.000 (Tabelas 16 e 17).

Tabela 15 - Classes de suscetibilidade a deslizamentos e processos erosivos de acordo com a declividade.

Intervalos em %	Suscetibilidade
0 - 6	baixa erosão e muito baixo deslizamento
6 - 12	média erosão e muito baixo deslizamento
12 - 20	alta erosão e baixo deslizamento
20 - 50	muito alta erosão e médio deslizamento
>50	muito alta erosão e alto deslizamento

Tabela 16 - Distribuição em área percentual total das classes de declividade.

Classes de Declividade (%)	% da área
0 - 6	38,0
6 - 12	40,7
12 - 20	13,4
20 - 50	6,5
>50	1,4

Tabela 17 - Distribuição das Classes de Declividade (em %) por folha A3.

Classes de Declividade (%)	Folha1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
0 – 6	15,4	27,1	67,0	24,9	41,5	41,3	51,2
6 – 12	51,6	49,4	26,0	44,8	31,9	41,6	38,0
12 – 20	20,5	20,1	6,0	15,6	10,7	11,4	8,6
20 – 50	11,8	3,4	1,0	11,7	11,1	4,5	2,1
>50	0,7	0	0	3,0	4,8	1,2	0,1

Diante das informações das tabelas, verifica-se que cerca de 78% da área total pertencem às classes que vão de 0% a 12%, apresentando baixa a média suscetibilidade a erosão e muito baixa à deslizamentos. Ainda, observando os dados da Tabela 17, esse resultado se confirma, já que para a maioria das folhas as classes de 0% a 12% são predominantes. Sendo a folha 3 a que apresenta as menores classes de declividades e as folhas 4 e 5 as que apresentam as maiores.

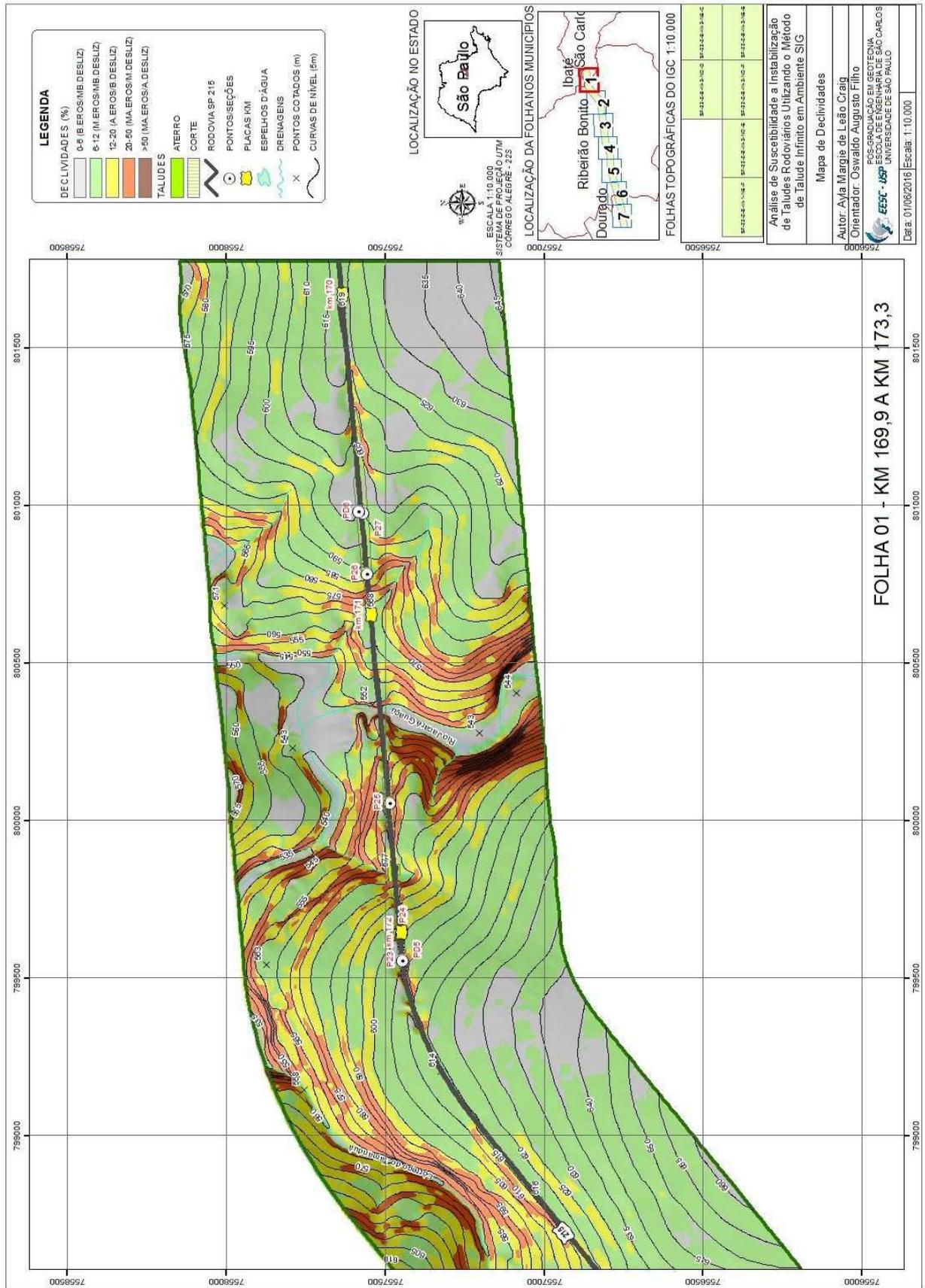


Figura 24 - Trecho da área de estudo referente ao mapa de declividade.

Os locais mais críticos, correspondentes à classe de declividades maiores que 50% estão presentes em apenas 1,4% de toda a área e encontram-se relacionados principalmente aos canais de drenagem e às áreas onde o relevo é mais acidentado associados às estruturas basálticas da formação Serra Geral.

#### 6.1.5. Mapa de Materiais Geológicos

O mapa de materiais geológicos (Figura 25) foi confeccionado utilizando-se como base o Mapa Geológico do Estado de São Paulo na escala 1:250.000 que guiou o levantamento das principais unidades geológicas da área de estudo.

Dessa maneira, foram necessárias idas a campo e o caminhamento pela rodovia para o ajuste de contatos das principais formações encontradas na folha original, a fim de gerar um mapa de materiais geológicos em escala 1:10.000 da AID da rodovia para o trecho estudado.

No local da pesquisa, foram encontrados materiais das Formações Adamantina, Serra Geral e Botucatu, e também depósitos aluvionares e resquícios de Rochas Intrusivas Básicas.

Além do material residual advindo dessas formações e do solo transportado, também foi incorporada à modelagem os solos artificiais, que correspondem aos aterros da rodovia.

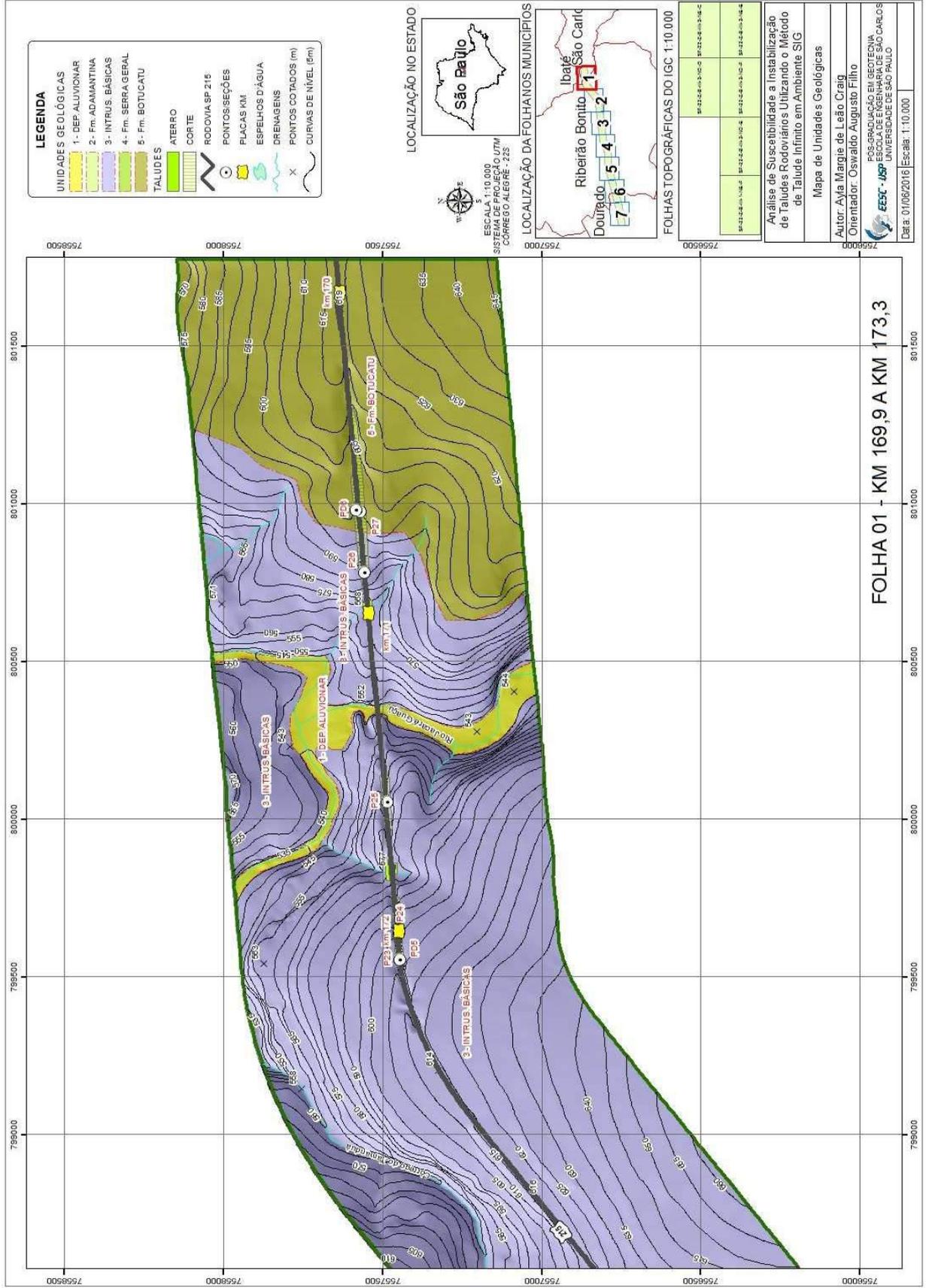


Figura 25 - Trecho da área de estudo referente às unidades geológicas da região.

Diante dessa classificação, foi feito o cálculo da distribuição em área percentual total de cada unidade mapeada, em área percentual com relação a cada uma das sete folhas em escala 1:10.000 e em área percentual com relação às classes de declividade (Tabelas 18, 19 e 20).

Tabela 18 - Distribuição em área percentual total de cada unidade.

Materiais Geológicos	% da Área
Dep. Aluvionar	0,8
Fm. Adamantina	31,7
Intrusivas Básicas	17,4
Fm. Serra Geral	19,6
Fm. Botucatu	30,5

Tabela 19 - Distribuição dos materiais geológicos (em %) por folha A3.

Materiais Geológicos	Folhas						
	Folha 1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
Dep. Aluvionar	3,4	1,8	0	0	0	0	0
Fm. Adamantina	0	0	0	11,4	46,3	72,8	96,1
Intrusivas Básicas	71,0	45,5	0	0	0	0	0
Fm. Serra Geral	0	0	0	55,3	52,3	27,2	3,9
Fm. Botucatu	25,6	52,7	100	33,3	1,4	0	0

Tabela 20 - Distribuição dos materiais geológicos (em %) por classes de declividade.

Classes de Declividade (%)	Formações			
	Botucatu	Serra Geral/Int. Básicas	Adamantina	Dep. Aluvionares
0 - 6	51,1	15,9	50,3	66,2
6 - 12	38,6	44,2	39,0	25,8
12 - 20	8,5	21,6	8,9	6,1
20 - 50	1,8	14,6	1,7	1,9
>50	0	3,7	0,1	0

Do resultado das tabelas, observa-se o maior predomínio das formações Adamantina e Botucatu na área total, com frequências de 31,7% e 30,5%, respectivamente. Com relação à distribuição por folhas, verifica-se a presença da Formação Adamantina em grande porcentagem nas folhas 5, 6 e 7, e a presença da formação Botucatu em porcentagens elevadas nas folhas 2 e 3. Já com relação à Tabela 20, observa-se que a Formação Serra Geral/Intrusivas Básicas é a única que possui regiões inseridas nas classes de declividade acima de 50%, consideradas de muito alta suscetibilidade a erosão e alta suscetibilidade a deslizamentos.

Uma das principais funções deste mapa foi o de direcionar a busca pelos parâmetros geomecânicos dos materiais residuais provenientes das formações, depósitos e materiais de aterro encontrados no local. Esses valores serviram como os dados de entrada da equação 1, adequando o modelo de talude infinito proposto.

A partir disso, foi montada uma tabela com os valores utilizados neste trabalho e encontrados na bibliografia, de acordo com os materiais geológicos observados em campo. Buscou-se por diferentes valores de cada material dispostos na literatura, no entanto, em alguns casos como o da formação Adamantina, os depósitos aluvionares e para os aterros, foi encontrado apenas um par de valores, adotados como mínimos. A Tabela 21 exibe os valores adotados e suas respectivas referências bibliográficas.

Tabela 21 - Valores encontrados na bibliografia para os materiais geológicos da área de pesquisa.

Materiais Geológicos	$c'$ (Kpa)	$\phi'$ (°)	$\gamma_{nat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	Referências Bibliográficas
Fm. Adamantina	20	38,1	18,25	Queiroz (1986)
Fm. Botucatu	2	28	15,32	Fernandes (2016)
Fm. Botucatu	8	32	15,32	Fernandes (2016)
Fm. Botucatu	5	30	15,32	Fernandes (2016)
Fm. Serra Geral/I.B.	13	31,5	14,9	Pinto et al. (1993)
Fm. Serra Geral/I.B.	35	20	17,9	Pinto et al. (1993)
Fm. Serra Geral/I.B.	19	29	16,4	Pinto et al. (1993)

#### 6.1.6. Levantamentos de Campo

Os levantamentos em campo se realizaram nos dias 3 e 17 de setembro de 2015 e no dia 2 de março de 2016, com o auxílio de GPS de precisão de 5m, fichas cadastrais (Figura 26) e documentos fotográficos dos principais pontos observados na área de estudo, sendo também fundamentais na confecção do mapa de materiais geológicos citado no tópico anterior.

Ao longo da rodovia observou-se três tipos de solos: solos residuais, solos coluvionares e depósito de tálus, além da presença de taludes terrosos, rochosos e mistos.

Nesta etapa foram cadastrados 33 pontos de campo, dentre os quais 27 (P1 a P27) se destinaram à análise regional dos 3 cenários e 6 (PD1 a PD6) se destinaram aos estudos de detalhe. Os pontos foram selecionados considerando sua relevância quanto ao tipo de material, presença de cicatrizes, processos erosivos atuantes, presença de linhas de seixos, contato entre formações, tipo de taludes, feições erosivas, afloramentos, textura e coloração

do material, estrutura das rochas, presença de água e existência de obras de drenagem ou contenção.

Como foi observada a existência de três formações principais: Adamantina, Botucatu e Serra Geral, foram verificados no local, pontos com diferenças texturais e de coloração.

A Tabela 22 expõe a relação dos pontos de campo registrados na área de estudo, relacionando-os aos seus respectivos materiais geológicos e às suas principais observações e características gerais.

Nesta etapa também foram cadastradas as placas indicativas da quilometragem da rodovia, importante instrumento de orientação em rodovias. No total, foram cadastradas 13 placas de quilometragem, cuja relação com os pontos de campo encontra-se na Tabela 23.

<b>Ficha de Campo</b>				
Nº Ponto:		Data:		Autor: Ayla Margie de Leão Craig
Local:			Coordenadas	
Km:				
Talude:	<input type="checkbox"/> Corte	<input type="checkbox"/> Aterro	Altura:	Extensão:
Inclinação:				
Condições para amostragem:				
<b>Material Rochoso</b>			<b>Formação</b>	
Litologia			<input type="checkbox"/> Formação Adamantina	
Estrutura			<input type="checkbox"/> Formação Botucatu	
Grau de Alteração			<input type="checkbox"/> Formação Serra Geral	
			<input type="checkbox"/> Depósitos Aluviais	
			<input type="checkbox"/> Intrusivas Básicas	
<b>Materias Inconsolidados</b>				
<input type="checkbox"/> Residual			<input type="checkbox"/> Retrabalhado	
Textura (tátil-visual):	Cor:	<input type="checkbox"/> Coluvionar		<input type="checkbox"/> Tálus
				<input type="checkbox"/> Aluvião
Textura (tátil-visual):		Cor:		
Espessura:			Espessura:	
<b>Surgência de Água/N.A</b> <input type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não			Contexto:	
<b>Ocupação</b> Atual:			Pretérita:	
<b>Processos</b>				
<b>Erosão</b>	Tipo	Atividade	Dimensões	Causas
<b>Movimentos de Massa</b>	Tipo	Atividade/Recente?	Dimensões	Causas
			raso	
<b>Observações</b>				
<b>Fotos</b>				

Figura 26 - Modelo da ficha de campo.

Tabela 22 - Principais pontos cadastrados e suas características gerais.

Pontos Cadastrados	Unidades Geológicas	Observações Principais
P1, P3, P4, P5, P6, P7, P11 e P12	Fm. Adamantina	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Solo residual de textura Areia Fina a Média (tátil-visual), com pouca quantidade de finos, de coloração amarelada.</li> <li>&gt; Observação de linha de seixos: P1, P5 e P12.</li> <li>&gt; Contato entre duas formações (diferenças texturais): P6 (Serra Geral).</li> <li>&gt; Cicatriz de escorregamento: P1.</li> <li>&gt; Material retirado para empréstimo (aterro/suavização): P1 e P11.</li> </ul>
P6, P8, P9, P10, P13 e P15	Fm. Serra Geral	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Solo residual de caráter argiloso (tátil-visual), de coloração vermelho escuro.</li> <li>&gt; Presença de rocha básica alterada dura e diversos blocos de rocha sã próximos à superfície na área correspondente à esta formação.</li> <li>&gt; Contato entre duas formações (diferenças texturais): P6 (Adamantina) e P15 (Botucatu).</li> <li>&gt; Obras instaladas de maneira inadequada: P15.</li> <li>&gt; Taludes de corte em trincheira: P8, P9 e P13.</li> </ul>
P21, P22, P23, P24, P25 e P26	Intrusivas Básicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Solo residual de caráter argiloso (tátil-visual), de coloração vermelho escuro.</li> <li>&gt; Presença de rocha básica alterada dura e diversos blocos de rocha sã.</li> <li>próximos à superfície na área correspondente à esta formação.</li> <li>&gt; Todos os taludes são de corte em trincheira.</li> <li>&gt; Presença de rochas básicas extremamente alteradas, com Solo Residual Jovem (SRJ) de coloração ocre (típica cor de alteração das rochas básicas).</li> <li>&gt; Presença de blocos de diabásio: P21, P23 e P24.</li> <li>&gt; Queda de bloco por erosão: P23.</li> <li>&gt; Presença de estrutura sedimentar que pode ser de um arenito silicificado pela rocha básica apresentando acamamento fino: P25.</li> <li>&gt; Presença de afloramento de arenito: P26.</li> </ul>
P15, P16, P18, P19 e P27	Fm. Botucatu	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Solo residual de caráter arenoso (tátil-visual), de coloração vermelho róseo e alaranjado.</li> <li>&gt; Contato entre duas formações (diferenças texturais): P15 (Serra Geral).</li> <li>&gt; Material retirado para empréstimo (aterro/suavização): P16.</li> <li>&gt; Solo arenoso bastante laterizado: P18.</li> <li>&gt; Cicatriz de escorregamento: P27.</li> </ul>
P2, P14, P17 e P20	Aterro	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Talude de aterro com berma: P2.</li> <li>&gt; Observado lançamento de água da pista no aterro: P17.</li> </ul>
P17 e P20	Depósitos Aluvionares	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Correspondem aos pontos de aterro por onde necessariamente passam linhas de drenagens.</li> </ul>

Tabela 23 - Distribuição dos pontos de campo por quilômetro estudado.

Placas Km	Pontos de Controle
Km 192,5 ao Km 192	P1, PD1
Km 192 ao Km 190	P2, P3, P4
Km 190 ao Km 189	P5
Km 189 ao Km 188	P6
Km 188 ao Km 187	P7, P8
Km 187 ao Km 185	P9, PD2, P10
Km 185 ao km 183	P11, P12
Km 183 ao Km 181	P13, PD3, P14, P15
Km 181 ao Km 179	PD4, P16, P17, P18
Km 179 ao Km 175	P19, P20, P21
Km 175 ao Km 172	P22, P23, PD5, P24
Km 172 ao Km 171	P25
Km 171 ao Km 170	P26, P27, PD6

As Figuras 27 a 32 exibem imagens de alguns pontos englobando todas as formações.



Figura 27 - Foto do ponto P1 exibindo cicatriz de escorregamento em solo residual da formação Adamantina.



Figura 28 - Foto do ponto P8 da formação Serra Geral, composto por solos residuais de coloração vermelho escura e textura argilosa.



Figura 29-Foto do ponto P14 correspondente a um local de aterro cuja inclinação encontra-se maior que 30°, o que não é recomendado para aterros não reforçados.



Figura 30 - Foto do ponto P25 com estrutura sedimentar com acamamento fino, existindo nesse ponto o contato entre as formações Botucatu e Serra Geral/Intrusivas Básicas.



Figura 31 - Foto do ponto P25, apresentando afloramento de rochas básicas.



Figura 32 - Foto do ponto P27 correspondente à formação Botucatu, onde é possível verificar cicatriz de escorregamento em solo residual arenoso.

## 6.2. Análise de Semi-Detalhe

### 6.2.1. Caracterização Geológica-Geotécnica Preliminar

Após a conclusão da etapa de inventário foi possível realizar uma caracterização geológico-geotécnica preliminar da área de estudo, utilizando como base para isso os mapas hipsométrico, de declividades e o de materiais geológicos e ainda as fichas de campo e os registros fotográficos.

Essa caracterização subsidiou o estudo dos cenários elaborados nesta etapa de semi-detalhe, fornecendo um diagnóstico inicial do trecho estudado, principalmente com relação à predisposição aos movimentos gravitacionais de massa.

O mapa hipsométrico e a tabela de distribuição das classes de hipsometria por folha A3 (Tabela 14) auxiliaram na visualização dos trechos da rodovia com maiores e menores cotas descrevendo o perfil altimétrico da estrada. Sendo assim, o início do trecho (Folha 1) é composto por cotas mais baixas, que variam de 550m a 650m, havendo a elevação das classes de hipsometria à medida em que se avança o percurso, atingindo cotas que variam de 700m a 750m.

O mapa de declividades forneceu a distribuição das classes de declividades ao longo da rodovia, tornando possível verificar que cerca de 78% da área total é composta por declividades nas classes de 0% a 12%, classificando o trecho da pesquisa como de baixa a

média suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos e muito baixa suscetibilidade aos deslizamentos.

A distribuição das principais unidades geológicas do local concluiu que mais de 60% da região é recoberta por materiais inconsolidados das formações Adamantina e Botucatu, compostos por solos predominantemente arenosos. Enquanto que o restante da região é, em sua maioria (37%), recoberta por materiais originados da meteorização das rochas básicas, que se caracterizam por solos argilosos.

Os levantamentos de campo e os registros fotográficos, feitos em setembro de 2015, confirmam o resultado preliminar obtido do mapa de declividades, já que foram observadas somente duas cicatrizes antigas de escorregamento no trecho estudado (pontos P1 e P27).

Alguns taludes apresentaram escorregamento em março de 2016 e foram registrados numa etapa posterior, sendo utilizados para a análise de detalhe a partir do levantamento de seções.

#### 6.2.2. Aplicação do Modelo do Talude Infinito

As modelagens realizadas nesta etapa foram definidas com base na caracterização geológico-geotécnica preliminar simulando três diferentes cenários, a fim de se comparar os resultados obtidos para cada um deles e observar o comportamento das tipologias de materiais residuais frente às alterações quanto à profundidade de ruptura e as condições de saturação dos taludes.

A Tabela 24 mostra os valores adotados para cada tipo de solo nas modelagens dos cenários.

Tabela 24 - Valores dos parâmetros geomecânicos adotados para a simulação dos cenários 1, 2 e 3.

Formação	$c'$ (Kpa)	$\phi'$ (°)	$\gamma_{nat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	Referências Bibliográficas
Fm. Adamantina	20	38,1	18,25	Queiroz (1986)
Fm. Botucatu	2	28	15,32	Fernandes (2016)
Fm. Serra Geral/I.B.	13	20	17,9	Pinto et al. (1993)
Aterros	0	33,8	17,5	Magnani (2006)

O solo residual das Rochas Intrusivas Básicas foi considerado ter parâmetros geomecânicos semelhantes ao solo residual da formação Serra Geral. Com isso, os valores dos parâmetros foram iguais para essas duas tipologias de solos.

### 6.2.3. Limitações do Modelo de Análise de Estabilidade do Tipo Talude Infinito

Durante as modelagens iniciais do cálculo do FS pelo método do talude infinito, observou-se que para valores de declividade acima de 60° acontecia um aumento no valor de FS ao invés da sua redução.

A partir desta constatação foram feitas algumas simulações e uma revisão bibliográfica específica sobre esse assunto para tentar entender a limitação do modelo de análise de estabilidade adotado.

Essas simulações se basearam na variação dos parâmetros geomecânicos, das declividades, das profundidades de ruptura e das condições de saturação do talude, com o objetivo de entender e observar o comportamento do modelo do talude infinito diante dessas variações.

Dessa maneira, tomando como exemplo a Formação Botucatu e seus parâmetros de resistência (Tabela 21), foram simuladas as situações de FS vs inclinação e profundidade de ruptura, coesão efetiva, ângulo de atrito e nível d'água acima da superfície de ruptura.

As Tabelas 25 a 28 exibem os resultados dessas simulações.

Tabela 25 - Variação do FS em função da declividade e profundidade de ruptura.

FS	Inclinação (°)	Profundidade de Ruptura
3,49	30	0,5
2,65	50	
2,77	60	
3,48	70	
6,22	80	
2,29	30	1
1,58	50	
1,57	60	
1,85	70	
3,16	80	
1,69	30	2
1,05	50	
0,96	60	
1,04	70	
1,64	80	
coesão = 8 KPa		$\phi = 32^\circ$

Tabela 26 - Variação do FS em função da declividade e coesão efetiva

FS	Inclinação (°)	Coesão Efetiva
3,49	30	
2,65	50	
2,77	60	8
3,48	70	
6,22	80	
2,29	30	
1,58	50	
1,57	60	4
1,85	70	
3,16	80	
1,69	30	
1,05	50	
0,96	60	2
1,04	70	
1,64	80	
$\phi = 32^\circ$	profundidade de ruptura = 0,5m	

Tabela 27 - Variação do FS em função da declividade e ângulo de atrito.

FS	Inclinação (°)	Ângulo de Atrito
3,49	30	
2,65	50	
2,77	60	32
3,48	70	
6,22	80	
3,22	30	
2,51	50	
2,68	60	25
3,42	70	
6,19	80	
2,72	30	
2,27	50	
2,51	60	10
3,31	70	
6,14	80	
coesão = 8 KPa	Profundidade de ruptura = 0,5m	

Tabela 28 - Variação do FS em função da declividade e nível d'água

FS	Inclinação (°)	Nível d'água
1,84	30	
1,31	50	
1,32	60	0,5
1,60	70	
2,78	80	
1,65	30	
1,20	50	
1,22	60	0,75
1,49	70	
2,62	80	
1,48	30	
1,09	50	
1,13	60	1
1,40	70	
2,47	80	

coesão = 8 KPa      Profundidade de ruptura = 1m  
 $\phi = 32^\circ$

Diante dos resultados analisados, foi possível observar que a equação para o cálculo do fator de segurança pelo método do talude infinito possui algumas limitações.

As tabelas mostraram que quanto menor o valor da profundidade de ruptura adotado para o cálculo e maior for a coesão efetiva, menor será a declividade onde ocorre inversão do FS, ou seja, menor será o intervalo de declividades que o modelo do talude infinito apresenta resultados coerentes para os cálculos de FS.

Ainda pode-se concluir que o ângulo de atrito e as alturas de nível d'água acima da superfície de ruptura reduzem o valor de FS, mas não influenciam o valor da declividade a partir da qual ocorre aumento do FS.

Duncan, Wright e Brandon (2014), afirmam que o método determinístico do talude infinito é apropriado para solos sem coesão, já que a análise independe do valor da profundidade de ruptura. Segundo os autores, o método também se aplica aos solos coesivos, desde que haja uma camada impermeável paralela à face do talude que limite a profundidade de ruptura, e que esta camada possua espessura reduzida quando comparada a extensão do talude.

Para encontrar a declividade a partir da qual ocorre inversão do decréscimo de FS, deve-se derivar a equação do FS com relação à declividade para achar um valor ao qual está associado um valor mínimo de FS. Dessa forma, tomando como exemplo os solos residuais da Formação Botucatu ( $c=8$  Kpa;  $\gamma_{nat}=15,32$  KN/m<sup>3</sup>;  $\phi= 32^\circ$ ; profundidade de

ruptura=0,5m), foi calculada a declividade a partir da qual ocorre acréscimo no valor de FS com o auxílio do software Mathematica® versão 9.0 (Tabela 29).

Tabela 29 - Valor da declividade a partir da qual ocorre aumento de FS para os taludes da Formação Botucatu

Inclinação (°)	FS
51,6	2,640723551
51,65	2,640718207
51,6565	2,640718135
51,7	2,640721355
51,8	2,640753175

Visualmente, podemos verificar este valor no gráfico plotado com auxílio do Mathematica® 9.0 (Figura 33).

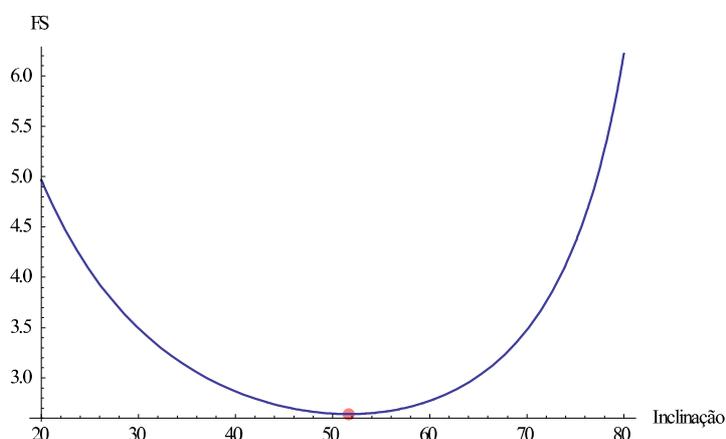


Figura 33 - FS x Inclinação evidenciando o valor de declividade de inversão para a formação Botucatu.

Diante de todos os resultados, então se pode concluir a existência de uma limitação na aplicação da equação do talude infinito, já que visivelmente existe uma elevação deste valor a partir de certa inclinação.

#### 6.2.4. Cenário 1

Neste cenário foi feito o cálculo de FS considerando 1m de profundidade de ruptura e ausência de nível d'água. A aplicação do modelo do talude infinito considerando essas configurações foi realizada tanto nos taludes naturais quanto nos talude de corte e aterro.

No entanto, em função da limitação deste modelo de análise, a modelagem dos taludes de corte e aterro se restringiu apenas a este cenário, não sendo simulado para os demais.

#### 6.2.4.1. Taludes Naturais

O menor valor de FS obtido para esta situação foi de 1,22 e o maior valor de 18922,9.

Os valores acima de 10000 encontram-se relacionados à Formação Adamantina a baixíssimas inclinações (abaixo de 0,001°) e correspondem à apenas 0,0001% da área, considerado um valor insignificativo.

O valor de FS=1,22 encontra-se atribuído apenas aos taludes da Formação Botucatu.

Com base nos resultados, foi feito o cálculo da distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação (Tabela 30) e da distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 (Tabela 31).

Tabela 30 - Distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação do cenário 1

Classes de Suscetibilidade	Formações			
	Botucatu	Serra Geral/Int. Básicas	Dep. Aluvionares	Adamantina
<1,0	0	0	0	0
1,0 a 1,3	0,001	0	0	0
1,3 a 1,5	0,02	0	0	0
1,5 a 2,0	0,18	0,38	0	0
>2,0	99,799	99,62	100	100

Tabela 31 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 do cenário 1

Classes de Suscetibilidade	Folhas						
	Folha 1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
<1,0	0	0	0	0	0	0	0
1,0 a 1,3	0	0	0	0,003	0	0	0
1,3 a 1,5	0	0,02	0,001	0,018	0	0	0
1,5 a 2,0	0,1	0,16	0,09	0,181	0,6	0,21	0
>2,0	99,9	99,82	99,909	99,979	99,4	99,79	100

Verifica-se que as faixas de suscetibilidade para valores de FS entre 1,0 e 1,5 (alta a média suscetibilidade) só foram observadas nos taludes da Formação Botucatu como mostra a Tabela 30.

Observando a mesma tabela, para a faixa de suscetibilidade que considera FS entre 1,5 e 2,0, indicando baixa suscetibilidade, tanto os materiais residuais da Formação Botucatu quanto os residuais das formações Serra Geral/Intrusivas básicas se encaixam neste perfil de segurança.

Com relação à distribuição por folhas (Tabela 31), a Folha 4 é a única que apresenta valores de FS entre 1,0 e 1,3, a faixa de suscetibilidade mais crítica para este cenário.

Ainda pode-se concluir que, em todas as folhas mais de 99% da área estão em situação de muito baixa suscetibilidade, confirmando o verificado na caracterização geológico-geotécnica preliminar.

Analisando os pontos de controle coletados em campo, o ponto P16, localizado na Formação Botucatu, é o mais crítico, possuindo áreas nas faixas de suscetibilidade que vão de alta até muito baixa suscetibilidade.

As fichas de campo indicam que no ponto P16 (Figura 34) constam taludes de corte em trincheira, possuindo em torno de 150m de extensão com inclinação entre 45° e 50°.



Figura 34 - Foto dos taludes do ponto P16 presentes na Formação Botucatu.

#### 6.2.4.2. Taludes de Corte e Aterro

Os taludes de corte e aterro mapeados no trecho da rodovia foram analisados separadamente, em função da incompatibilidade das declividades observadas em campo e no mapa de declividades, sendo obtidos os valores da Tabela 32.

Tabela 32 - Valores de FS para os taludes de corte e aterro.

Formação	Resultado de FS
Fm. Adamantina	2,98
Fm. Botucatu	0,6
Fm. Serra Geral/Intrusivas Básicas	1,88
Aterros	0,79

Os taludes de corte da Formação Botucatu são os que exibem menor valor de FS quando estipulados a 60°. Este valor não condiz com a realidade do local da pesquisa, que apresenta apenas um ponto para esta Formação apresentando sinais de ruptura.

No tópico 6.2.3, foram expostas as limitações do modelo do talude infinito, estando essas limitações diretamente relacionadas às propriedades mecânicas dos solos. Dessa maneira, os valores obtidos para as formações Serra Geral/Intrusivas Básicas e Adamantina, sofrem com esta limitação, à medida que têm seus valores de FS aumentados com o aumento da declividade.

Com auxílio do Software Mathematica® 9.0, foi possível encontrar os valores de declividade a partir do qual, o valor de FS começa a aumentar, sendo de 50,7793° para a Formação Serra Geral/Intrusivas Básicas e de 52,6385° para a formação Adamantina, portanto menores que 60°.

Talvez o método do talude infinito não seja apropriado para modelar taludes com essas características, necessitando de aplicação de outra técnica de análise de estabilidade que ofereça resultados mais satisfatórios.

Finalmente, os valores obtidos para os taludes de aterro (FS=0,7978) são muito baixos, e não condizem com a realidade observada no local, onde não foram observados sinais de ruptura em aterros, sendo possível que os parâmetros adotados se encontrem abaixo do que ocorre na região.

Os resultados da modelagem para o cenário 1 encontram-se no Apêndice B deste projeto. No entanto, optou-se por apresentar apenas os resultados referentes às folhas 4 e 5 do trecho da pesquisa, considerados os mais críticos em todos os cenários.

## 6.2.5. Cenário 2

No cenário 2 foi feito o cálculo de FS considerando 2m de profundidade de ruptura e ausência de nível d'água. O menor valor de FS obtido foi de 1,03, sendo o maior valor de 13407.

Novamente os valores associados aos elevados valores de FS encontram-se relacionados à Formação Adamantina. Dessa forma, os valores acima de 10000 correspondem a locais de baixíssima declividade (abaixo de 0,0007°), correspondendo a cerca de 0,00003% de toda a área.

O menor valor de FS (1,03) encontra-se relacionado à Formação Serra Geral, associados a uma inclinação acima de 50,5°.

Da mesma forma que para o cenário anterior, foi realizado o cálculo da distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação (Tabela 33) e da distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 (Tabela 34).

Tabela 33 - Distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação do cenário 2

Classes de Suscetibilidade	Formação			
	Botucatu	Serra Geral/Int. Básicas	Dep. Aluvionares	Adamantina
<1,0	0	0	0	0
1,0 a 1,3	0,02	0,70	0	0
1,3 a 1,5	0,05	1,66	0	0
1,5 a 2,0	0,28	4,38	0,06	0,01
>2,0	99,65	93,26	99,94	99,99

Tabela 34 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 do cenário 2.

Classes de FS Suscetibilidade	Folhas						
	Folha 1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
<1,0	0	0	0	0	0	0	0
1,0 a 1,3	0,16	0,02	0,001	0,28	1,08	0,33	0
1,3 a 1,5	0,29	0,05	0,012	1,56	2,02	0,50	0,005
1,5 a 2,0	1,51	0,25	0,17	4,09	5,00	1,01	0,05
>2,0	98,04	99,68	99,817	94,07	91,9	98,16	99,945

Os taludes de alta a média suscetibilidade a escorregamentos foram verificados apenas nas formações Serra Geral/Intrusivas Básicas e Botucatu, como observado na tabela 33.

Os resultados desta tabela ainda possibilitam concluir que houve um aumento significativo da porcentagem das faixas de alta a média suscetibilidade nas formações Serra Geral/Intrusivas Básicas, quando comparados ao cenário 1.

De uma maneira geral, o aumento da profundidade de ruptura faz com que os valores de FS diminuam e os valores expostos nas tabelas refletem essa queda, na medida em que ocorre o aparecimento de uma maior porcentagem em área nas classes de suscetibilidade mais críticas.

Com relação à distribuição por folhas (Tabela 34), as folhas 4 e 5 correspondem aos trechos mais críticos da rodovia, possuindo a maior porcentagem em área dos taludes com alta a média suscetibilidade a escorregamentos. Ainda assim, de forma similar ao verificado para o cenário anterior, verifica-se que mais de 90% da área de cada folha encontra-se em segurança, possuindo muito baixa suscetibilidade a escorregamentos.

Os pontos de controle da rodovia que correspondem aos taludes das formações Serra Geral/Intrusivas Básicas se encaixam apenas na faixa de suscetibilidade para valores de baixa suscetibilidade, sendo eles os pontos P9 e P25.

Já os pontos de controle que correspondem à Formação Botucatu, se encaixam nas faixas de alta a muito baixa suscetibilidade, e se relacionam aos pontos P16, P18 e P19, sendo o P16 o mais crítico para esta formação.

O resultado da modelagem do cenário 2 encontra-se no Apêndice C deste trabalho, onde foram expostas somente as folhas 4 e 5, consideradas de maior criticidade.

#### 6.2.6. Cenário 3

Para este cenário, foi considerado 1m de profundidade de ruptura e 0,5m de altura do nível d'água acima da profundidade de ruptura. Sendo assim, o menor valor de FS encontrado foi de 0,92, e o maior valor de FS foi de 16322,1.

Somente para este cenário foram verificados valores de FS menores que 1, associados somente à Formação Botucatu.

Os valores de FS acima de 10000 encontram-se associados somente à formação Adamantina, para valores de inclinação abaixo de 0,009°, e correspondem a apenas 0,0001% da área.

Diante dos dados, foi realizado o cálculo da distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação (Tabela 35) e da distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 (Tabela 36).

Tabela 35 - Distribuição em área percentual das classes de suscetibilidade por Formação do cenário 3.

Classes de Suscetibilidade	Formação			
	Botucatu	Serra Geral/Int. Básicas	Dep. Aluvionares	Adamantina
<1,0	0,002	0	0	0
1,0 a 1,3	0,08	0	0	0
1,3 a 1,5	0,12	0	0	0
1,5 a 2,0	0,59	1,05	0,1	0
>2,0	99,208	98,95	99,9	100

Tabela 36 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidade por folha A3 do cenário 3.

Classes de Suscetibilidade	Folhas						
	Folha 1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
<1,0	0	0	0	0,005	0	0	0
1,0 a 1,3	0,005	0,08	0,02	0,05	0,01	0	0
1,3 a 1,5	0,02	0,11	0,07	0,04	0,01	0	0
1,5 a 2,0	0,33	0,53	0,3	0,7	1,66	0,5	0
>2,0	99,645	99,28	99,61	99,205	98,32	99,5	100

As classes de suscetibilidade mais críticas, que vão de muito alta a média suscetibilidade a escorregamentos, estão associadas apenas à Formação Botucatu.

Com base na tabela 35, pode-se concluir que o aumento da profundidade de ruptura (cenário 2) provoca um decréscimo significativo nos valores de FS correspondentes à Formação Serra Geral/Intrusivas Básicas, não sendo este decréscimo tão significativo quando ocorre o incremento do nível d'água. Isso pode ser verificado a partir dos menores valores de FS encontrados para os cenários 2 e 3. Enquanto que no cenário 2 o menor valor se associa aos solos residuais da formação Serra Geral, no cenário 3 o menor valor se associa aos solos da Formação Botucatu.

Isso pode ocorrer em função das maiores declividades (acima de 20%) estarem associadas principalmente à Formação Serra Geral/Intrusivas Básicas, conforme a Tabela 20.

Ainda assim, no cenário 3 ocorre o decréscimo dos valores de FS, quando comparado ao cenário 1, já que ocorre incremento de poropressão positiva.

Analisando a Tabela 36, observa-se que o trecho mais crítico da rodovia encontra-se mais uma vez associado às folhas 4 e 5. No entanto, da mesma maneira que o verificado para os demais cenários, grande parte da área das folhas (mais de 98%) se encontra em situação de muito baixa suscetibilidade.

Da mesma forma que para o cenário 2, neste cenário, os pontos de campo mais críticos pertencem à Formação Botucatu, sendo eles os pontos P16, P18 e P19, apresentando desde muito alta a muito baixa suscetibilidade a escorregamentos.

O resultado da modelagem do cenário 3 encontra-se no Apêndice D deste trabalho, onde estão expostas as folhas 4 e 5 do trecho da rodovia estudada.

Diante das simulações dos cenários, pode-se concluir que o cenário 2 apresenta resultados mais críticos, já que nele ocorre maior porcentagem de área nas faixas de suscetibilidade estabelecidas neste trabalho. Principalmente quando analisamos os trechos correspondentes às folhas 4 e 5 (Tabela 34), onde as porcentagens em área das classes de suscetibilidade mais críticas são mais significativas.

Com relação à Formação Adamantina, verificou-se em todos os cenários praticamente 100% do material residual desta formação possuem muito baixa suscetibilidade a escorregamentos. Esses resultados podem indicar o rigor dos parâmetros geomecânicos adotados nas modelagens dos cenários, já que no trecho de estudo da rodovia, no ponto P1, pertencente a esta formação existe cicatriz de escorregamento.

### 6.3. Análise de Detalhe em Taludes Críticos

Com o objetivo de complementar a fase de mapeamento, também foi considerada nesta pesquisa a análise de detalhe de taludes classificados como críticos e de maior relevância quanto ao seu material residual e a presença de cicatrizes de escorregamento.

Foram cadastrados seis pontos em campo (PD1, PD2, PD3, PD4, PD5 e PD6), no entanto, apenas quatro seções que representavam as principais tipologias de materiais encontrados na região tiveram seus dados coletados para análise em detalhe.

Foram obtidos os dados geométricos das seções de taludes em solos residuais das formações Adamantina, Botucatu, Serra Geral e material de aterro. Em virtude de eventos chuvosos nos meses que antecederam a coleta dos dados, foi verificada cicatriz de escorregamento em pontos que englobavam todas as formações, viabilizando a realização de retroanálise.

Foi selecionado o talude rompido da formação Adamantina para realização da retroanálise, no intuito de se obter os parâmetros geomecânicos mais coerentes para esta formação no local da pesquisa, já que os dados utilizados nos cenários foram considerados elevados.

Dessa maneira, os dados geomecânicos e geométricos de cada seção foram importados para o software GeoStudio, onde a análise de estabilidade de taludes pelo método de Bishop Simplificado foi realizada, através da análise “grid and radius” (Figura 35) para a determinação da superfície crítica de ruptura.

Os pontos onde foram feitos levantamentos de seções foram: PD1, PD2, PD4 e PD6. As figuras 36 a 39 exibem as imagens desses pontos em conjunto com o resultado das modelagens das seções no GeoStudio.

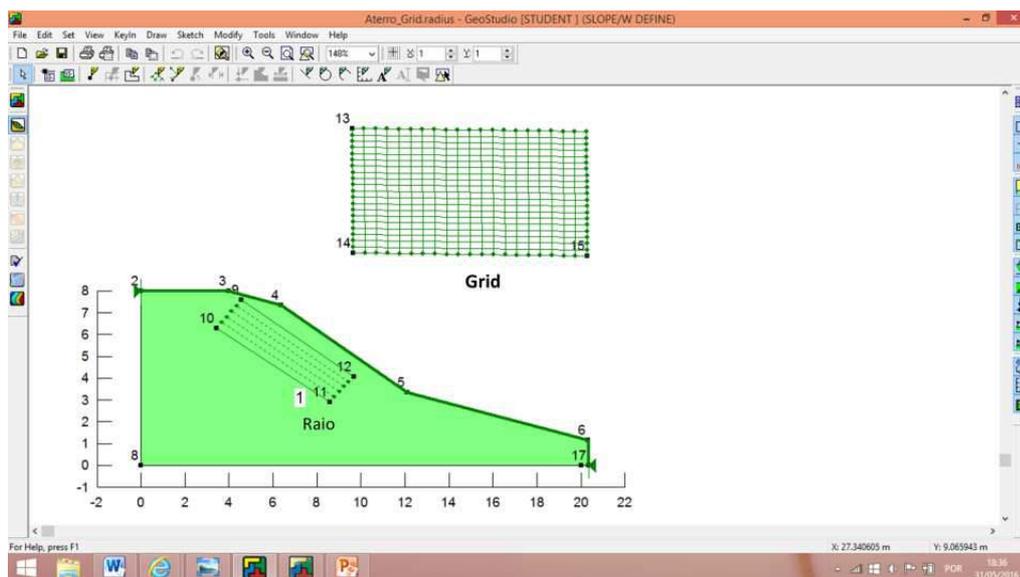


Figura 35 – Análise de estabilidade pelo método de grid e raio no cálculo de FS para o aterro.

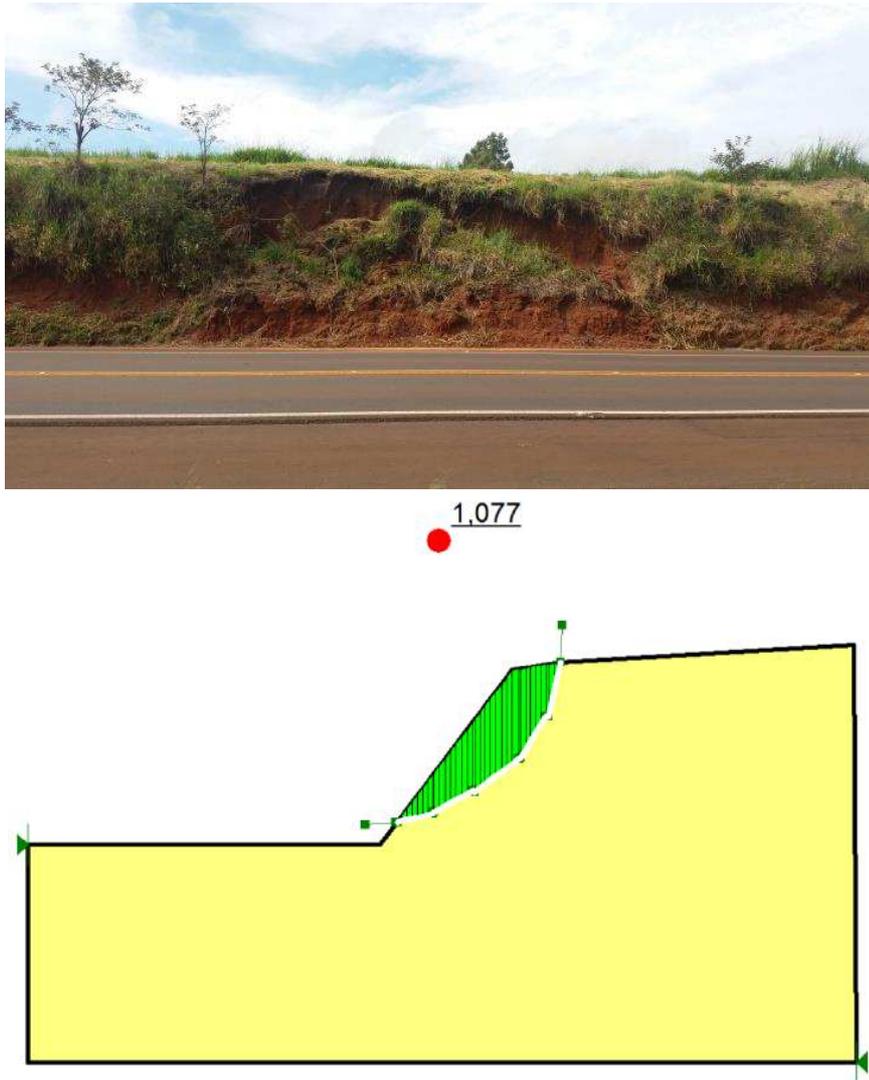


Figura 36 - Foto do ponto PD1 correspondente à Fm. Adamantina e o resultado da retroanálise na seção rompida ( $c'=4\text{KPa}$ ;  $\gamma_{\text{nat}}= 18,25\text{Kn/m}^3$ ;  $\phi'=24,1$ ).

Tabela 37 - Resultado da retroanálise realizado no ponto PD1.

$c'$ (KPa)	$\phi'$ (°)	FS
0	36,1	1,074
0	34,1	0,997
1	32,1	1,028
0	32,1	0,924
2	30,1	1,061
3	28,1	1,097
3	26,1	1,032
4	24,1	1,077
4	22,1	1,017
5	20,1	1,068
5	18,1	1,013
5	16,1	0,959
6	16,1	1,07
6	14,1	1,019

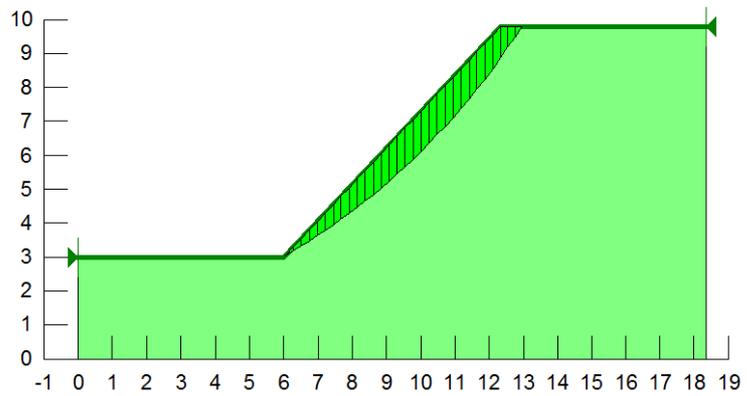
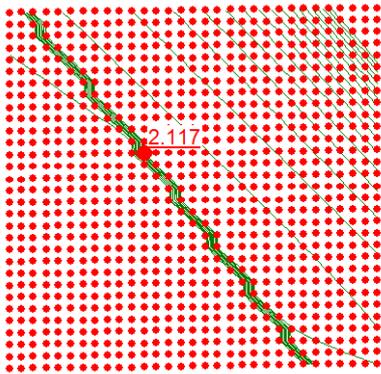


Figura 37 - Foto do ponto PD2 correspondente a Fm. Serra Geral e resultado da modelagem para esta seção.

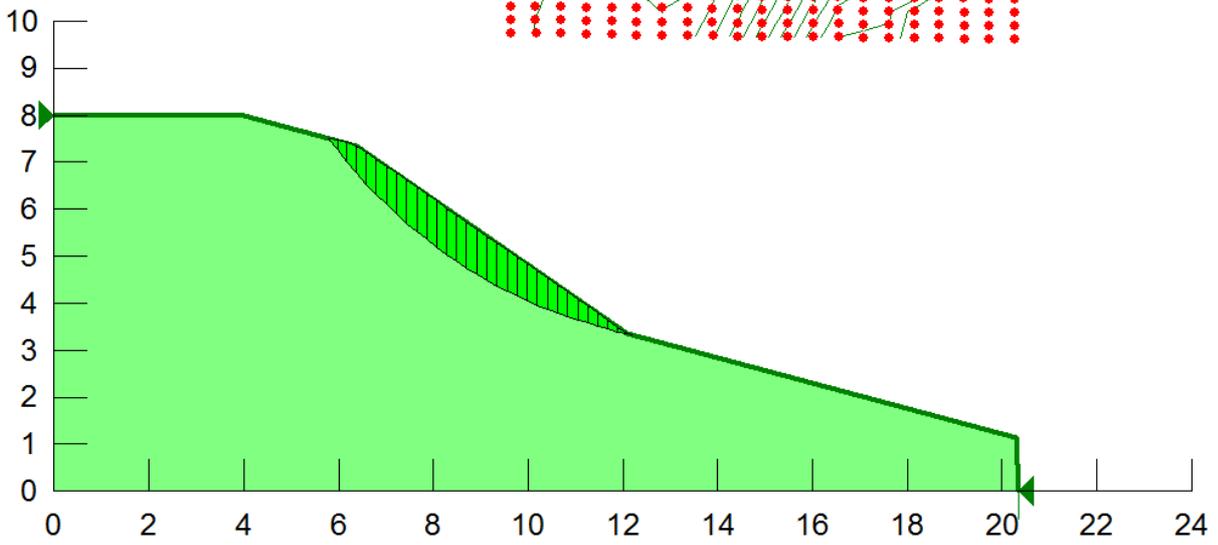
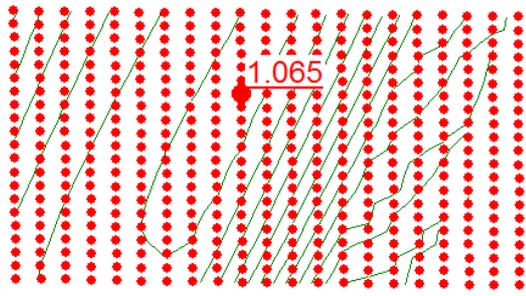


Figura 38 - Foto do ponto PD4 correspondente ao material de aterro e resultado da modelagem para esta seção.

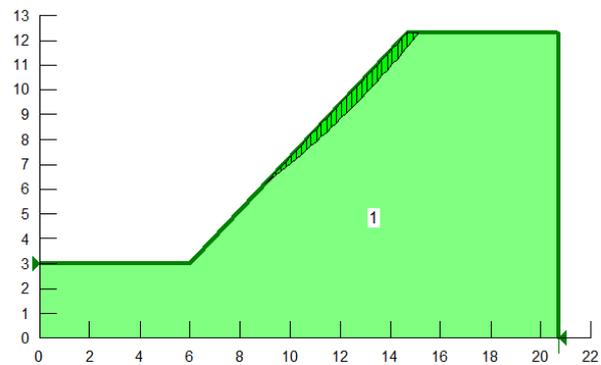
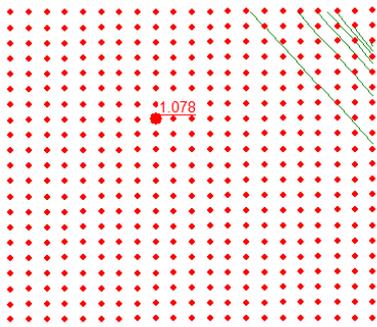


Figura 39- Foto do ponto PD6 correspondente a Fm. Botucatu e resultado da modelagem para esta seção.

A Figura 36 mostra cicatriz de escorregamento em solos residuais da formação Adamantina. Nessa seção foi realizada retroanálise no software GeoStudio, cujo resultado encontra-se na Tabela 37.

Pode-se verificar que os dados utilizados para a modelagem regional (Tabela 24) encontram-se muito elevados para a realidade da área de estudo, já que ocorre ruptura nos solos dessa Formação.

Na Figura 37, observa-se cicatriz de escorregamento na Formação Serra Geral, correspondendo ao ponto PD2. Neste ponto, foi feito levantamento de seção, no entanto sem realização de retroanálise.

O resultado da modelagem dessa seção, com valor de FS igual a 2,117, mostra que os parâmetros utilizados para esta formação estão um pouco elevados, já que a modelagem acusa FS alto, quando no local houve ruptura para os solos residuais desta formação.

Na Figura 38 observa-se talude composto por material de aterro, correspondendo ao ponto PD4, não apresentando sinais de ruptura, cujo resultado da modelagem da seção encontra-se na mesma figura.

O resultado da modelagem apresentou valor de FS igual a 1,065, o que indica que os parâmetros utilizados para este material estão um pouco baixos quanto ao valor da coesão efetiva, principalmente. Isso pode ser explicado, pois o valor de FS aponta que o talude encontra-se na iminência da ruptura, quando não foi verificado nenhum talude de aterro na região nessa situação ou apresentando cicatrizes de escorregamento.

Por fim, a Figura 39 mostra a seção rompida de solos residuais provenientes da Formação Botucatu. O resultado da análise de estabilidade apresentou FS igual a 1,078, o que indica que os parâmetros geomecânicos utilizados estão condizentes com a realidade da região, já que houve o escorregamento para esta seção.

Pode-se verificar pela imagem da Figura 39 que o escorregamento é raso e se dá a partir da ocorrência de uma nítida frente de umedecimento, o que reduziu a resistência interna do talude, levando-o à ruptura.

## 7. CONCLUSÕES

A abordagem utilizada na avaliação de suscetibilidade a instabilização dos taludes de um trecho da rodovia SP-215, teve em seu escopo a fase inicial de inventário, seguida de uma análise de semi-detálhe e por fim um estudo detalhado de alguns taludes mais críticos.

O produto da fase de inventário, composto pela elaboração dos mapas hipsométrico, de declividades e de materiais geológicos, em conjunto com as fichas de campo, possibilitou a realização de um diagnóstico geológico-geotécnico inicial que concluiu que o trecho da rodovia estudado possui muito baixa suscetibilidade ao desenvolvimento de movimentos de massa, baseando-se principalmente no mapa de declividades do local.

O estudo dos mapas temáticos ainda viabilizou a observação dos trechos mais críticos da rodovia, através da análise de suscetibilidade por folhas, onde se pode concluir que os trechos mais críticos correspondem às folhas 4 e 5, do quilômetro 180,1 ao quilômetro 187,3.

Os cenários elaborados na etapa de semi-detálhe refletiram a baixa suscetibilidade observada na caracterização geológico-geotécnica preliminar, na medida em que todas as análises realizadas mostraram que mais de 90% da área de estudo apresentam muito baixa suscetibilidade a escorregamentos. Assim como também apontaram os trechos mais críticos da rodovia, que, de maneira semelhante ao verificado anteriormente confirmou as folhas 4 e 5 como sendo as mais críticas.

Com relação ao modelo determinístico utilizado, foi observada limitação na aplicabilidade da equação para o cálculo do Fator de Segurança através do método do talude infinito, já que se verificou inversão no decréscimo do valor de FS a partir de uma determinada inclinação em função dos parâmetros geomecânicos do material.

Notou-se que essa limitação encontrava-se relacionada principalmente aos valores de coesão efetiva e profundidade de ruptura adotados. Quanto maior o valor da coesão e menor o valor da profundidade de ruptura, menor o intervalo de declividades em que o modelo do talude infinito apresenta resultados coerentes para os cálculos de FS.

Outro fator limitante se relacionou à escala. A maioria dos taludes documentados possuía menos de 5m de altura, sendo que as curvas de nível possuíam espaçamento de 5m. Essa característica não forneceu detalhes suficientes para o cálculo das declividades nesses pontos, sendo necessária uma modelagem à parte pros taludes de corte e aterro.

A modelagem à parte dos taludes de corte e aterro adotando-se inclinação de 60° mostrou-se pouco satisfatória. Pois, além de ter sido afetada pela limitação do próprio modelo determinístico, a análise de detalhe apontou inclinações mais brandas, em torno de

45° a 50°, devendo-se talvez realizar outra modelagem para estes taludes considerando inclinações menores.

Os estudos realizados em detalhe foram importantes tanto para a validação do modelo adotado, quanto para a verificação e adequação dos parâmetros geomecânicos considerados inicialmente.

A observação dos escorregamentos ao longo do trecho da rodovia confirmou os dados da Tabela 1 que destaca esse tipo de movimento de massa como um dos mais frequentes problemas observados nas rodovias do estado de São Paulo.

O levantamento das seções concluiu acerca do rigor na adoção dos parâmetros de resistência do material residual da Formação Adamantina, cuja retroanálise resultou em pares de valores mais satisfatórios e reais para as características da região. Conclusão semelhante foi obtida para as formações Serra Geral/Intrusivas Básicas, onde também não foram verificadas influências de materiais expansivos na instabilidade.

Já para os materiais de aterro, foi verificado que possivelmente os valores adotados na modelagem estejam um pouco abaixo do encontrado na região.

Os dados adotados para a Formação Botucatu foram os que se apresentaram mais condizentes com a realidade do local da pesquisa, isso pode ser explicado já que os dados foram obtidos de ensaios realizados na própria rodovia.

Diante disso, talvez fosse interessante realizar a modelagem dos cenários novamente, adotando novos valores de parâmetros geomecânicos com o intuito de adequar a modelagem à realidade local.

Apesar de suas limitações, o modelo determinístico estudado se mostrou satisfatório. O diagnóstico geológico-geotécnico preliminar, juntamente com a modelagem dos cenários se mostraram condizentes com a realidade do trecho da rodovia estudado, que possui poucos sinais de instabilização, o que prova a aplicabilidade do método.

O modelo ainda se mostrou bastante versátil, pois, à medida que se obtém maiores informações acerca do local da pesquisa como os dados referentes aos parâmetros de resistência e altura de nível d'água, o mesmo pode ser realimentado e aprimorado se tornando cada vez mais refinado e condizente com as características da região estudada.

## REFERÊNCIAS

ADÂMOLI, J. et al. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Embrapa - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados/Nobel, 1985. cap.2 , p. 33-38.

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão**: aplicação urbana na área de Campos do Jordão - SP. 2005. 364 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ALMEIDA, C. L. F.; OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de Brotas. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1981. Escala 1:100.000).

ALMEIDA, F. F. M.; BARBOSA, O. **Geologia das quadrículas de Rio Claro e Piracicaba, Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: SERGRAF do IBGE, 1953. Boletim (Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral. Divisão de Geologia e Mineralogia); Coleção Ibgiana.

AMARAL JÚNIOR, A. F. **Mapeamento geotécnico aplicado à análise de processos de movimentos de massa gravitacionais**: Costa Verde-RJ – escala 1:10.000. 2007. 210 f. (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ARAÚJO, P. C. de. **Análise de suscetibilidade a escorregamentos**: uma abordagem probabilística. 2004. 172 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2004.

ARCGIS, E. S. R. I. 10.0. **Redlands, CA: ESRI**, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: estabilidade de taludes e encostas. Rio de Janeiro, 2006. 33 p.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas**: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMD, 1992. p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O. **Carta de risco de escorregamento quantificada em ambiente de SIG como subsídio para planos de seguro em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba, SP.** 2001. 196 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2001.

AUGUSTO FILHO, O.; MAGALHÃES, F. S.; GRAMANI, M. F. Mass movements susceptibility map of a highway system using GIS technology: a case study in Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF GEOLOGY AND LINEAR INFRASTRUCTURES, 2005, Lyon. **Proceedings...** Orléans: BRGM, 2005. p. 1-11.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. In: \_\_\_\_\_. **Geologia de engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. p. 243-269.

BISHOP, A. W. The Use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Geotechnique**, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.

BITAR, O. Y.; CERRI, L. E. S.; NAKAZAWA, V. A. Carta de risco geológico e carta geotécnica: uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil. In: SIMPOSIO LATINO AMERICANO SOBRE RIESGO GEOLOGICO URBANO, 2., 1992, Pereira. **Anais...** Pereira: [S.I.], 1992. p. 35-41.

BLOOM, A. L. **Superfície da Terra.** Trad. de S. Perri e R. Ellert. São Paulo: Edgard Bluncher/Edusp, 1988. (Série de Textos Básicos de Geociências).

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Orgs.). **Introdução à ciência da Geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001. cap. 1, p. 1-5. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

CARVALHO, C. M.; RIEDEL, P. S. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas ao estudo da suscetibilidade a escorregamentos translacionais nos entornos dos polidutos de Cubatão-SP.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 2901-2908.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Orgs.). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.** Brasília: IPT, 2007.

CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 113, n. 1, p. 901 – 930, 1948.

CERRI, L. E. S. Carta geotécnica: contribuições para uma concepção voltada as necessidades brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6., 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: ABGE, 1990. p. 309-317, v. 1.

COELHO, G. B. **Análise e simulação do processo de transformação de chuva em vazão com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

COELHO, J. O. M. et al. A Abordagem do meio físico e a delimitação de áreas de influência estudos de impacto ambiental de obras rodoviárias no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14., 2013, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE/UFRJ, 2013.

CORRÊA, U. M. P. **Estudos das águas subterrâneas das Bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçú e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo**. 1995. 107 f. Dissertação – (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

DAVIS JUNIOR, C. GIS: dos conceitos básicos ao estado da arte. **Fator GIS**, p. C1-C4, 1997.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 4., 1971, San Juan. **Proceedings...** New York: American Society of Civil Engineers, 1971. p. 87-170, v. 1.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Volume Diário Médio das Rodovias (VDM)**. 2015. Disponível em: <<http://der.sp.gov.br/website/Acessos/MalhaRodoviária/VolumeDiario/>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Notícias**. 2011. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/noticias/dnit-recupera-rodovias-federais-afetadas-por-chuvas.2011>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil strength and slope stability**. Hoboken: Wiley, 2014.

DUNN, I. S.; ANDERSON, L. R.; KIEFER, L. W. **Fundamentals of geotechnical analysis**. New York: Wiley, 1980.

FELGUEIRAS, C. A. **Análise sobre modelos digitais de terreno em ambientes de sistemas de informações geográficas**. DPI/INPE, p. 1-12, 1999.

FELLENIIUS, W. **Calculation of stability of earth dams**. In: CONGRESS ON LARGE DAMS, 2., Washington, 1936. **Proceedings...** [Knoxville]: [Tennessee Valley Authority], [1936]. v. 4.

FERNANDES, F. M. **Carta Geotécnica de suscetibilidade aos processos da dinâmica superficial do trecho Km 215 ao 249 da rodovia Marechal Rondon- SP-300**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2008.

FERNANDES, M. A. **Caracterização geológico-geotécnica para estudo de estabilidade de talude de solos não-saturado no Centro-Oeste Paulista**. In: XVII Cong. Bras. de Mec. Solos e Eng. Geotécnica; VII Cong. Luso-Brasileiro de Geotecnia; VI Simp. Bras. De Me. Rochas; VI Cong. Bras. De Jovens Geotécnicos, 2014, Goiânia. COBRAMSEG. São Paulo: ABMS, 2014. v. 1. p. 1 – 8.

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

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. 2. ed. rev. e ampl. Curitiba: UFPR, 2009.

FONSECA, A. P. et al. **Resistência ao cisalhamento de solos coluvionares de diferentes idades**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 12., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS-NRSP, 2002. p. 499-505, v. 1.

FREIRE, E. S. de MAGALHÃES. **Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática**. Construção, Rio de Janeiro, v. 8, n. 95, p. 10-18, 1965.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LACERDA, W. A. **Evolução de uma voçoroca por escorregamentos retrogressivos em solo não saturado**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 4., Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA-Escola Politécnica, 2005. p. 443-452.

GAIOTO, N. **Estabilidade de taludes**. São Carlos : EESC/SGS, 1978.

GAMA, C. D. da. **Métodos computacionais de projetos de taludes em mineração**. 1984. Tese (Livre Docência) - São Carlos, 1984.

GARIBALDI, C. M.; SOAREAS, F.; AUGUSTO FILHO, O. Sistemática para gestão de passivos ambientais associados a escorregamentos em rodovias. **Geotecnia**, v. 12, n. 125, p. 41-68, 2012.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GERSCOVICH, D. M. S. **Fluxo em meios porosos saturados/não saturados: modelagem numérica com aplicações ao estudo da estabilidade de encostas na**

**cidade do Rio de Janeiro**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

GERSCOVICH, D. M. S.; CAMPOS, T. M. P.; VARGAS JÚNIOR, E. A Retroanálise da ruptura de encosta no Rio de Janeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 11., 2008, Coimbra. **Anais...** Coimbra: [s.n.], 2008. v. 2. p. 1-12.

GERSCOVICH, D. M. S.; CAMPOS, T. M. P.; VARGAS JÚNIOR, E. The Evaluation of unsaturated flow in a residual soil slope in Rio de Janeiro, Brazil. **Engineering Geology**, n. 88, p. 23-40, 2006.

GIOIA, E. et al. Using the TRIGRS model to predict rainfall-induced shallow landslides over large areas. **Geophysical Research Abstracts**, v. 16, EGU2014-14134, 2014.

GODOY, V. A. **Estudo dos mecanismos de transporte de sódio, fosfato e amônio em colunas indeformadas de material inconsolidado residual de arenitos da Formação Adamantina**. 2013. 227 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

GOMES, G. J. C.; SOBREIRA, F. G. Avaliação do perigo de queda de blocos em rodovias. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 35, n. 2, p. 14-27, 2012.

GOODCHILD, M. F. The State of GIS for environmental problem-solving. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Eds.). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 8-15.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Bluncher, 1984.

GUIMARÃES, R. F. et al. Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos SHALLOW STABILITY. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 2, p. 133-150, 2003.

HUTCHINSON, J. N. Mass movement. In: \_\_\_\_\_. **Geomorphology**. Springer Berlin Heidelberg, 1968. p. 688-696.

INFANTI JÚNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. **Geologia de Engenharia**, p. 131-152, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Taludes de rodovias**: orientação para diagnóstico e soluções para os seus problemas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991. (Publicação IPT, n. 1843).

\_\_\_\_\_. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. (Série Monografias, 5), 2 v.

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

JAMBU, N. **Application of composite slip surfaces for stability analysis**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON STABILITY OF EARTH SLOPES, Stockholm, 1954. **Proceedings...** Stockholm: Royal Swedish Geotechnical Institute, 1954. p. 43-49.

LOPES, A. P. R. **Mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310**. 146 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MANUAL técnico de encostas: Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: GeoRio, 2000.

MARTINI, L. C. P. et al. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial baseada em Sistemas de Informações Geográficas. **Geologia USP. Série Científica**, v. 6, n. 1, p. 41-52, jul. 2006.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MATTOS, K. C. A. **Processos de instabilização de taludes rodoviários em solos residuais arenosos: estudo na rodovia Castelo Branco (SP-280), Km, 305 a 313**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MEDEIROS, A. M. L. **Artigos sobre conceitos em geoprocessamento**. 2012. Disponível em: <<http://andersonmedeiros.com/e-book-sobre-conceitos-em-geoprocessamento/>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

MELO, M. S. de. **A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenoica na depressão periférica paulista**. 1995. 144 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. 236 f. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MENEZES, I. P. **Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas**. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MICHEL, G. P. et al. **Estimativa da quantidade de chuva necessária para deflagrar escorregamentos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** [S.l.]: ABRH, 2011. p. 1-20.

MIRANDA, T. C. **Mapeamento das unidades geotécnicas e desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas para área de abrangência da rodovia BR-101/RS**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: Wiley, 1976.

MONGUILHOTT, M. et al. **Estudo de áreas suscetíveis a movimentos de massa na rodovia RS 486, Rota do Sol**. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, n. 61, p. 61-69, jan./abr., 2010.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79-93, 1965.

NIELSEN, T. H.; TURNER, B. L. Influence of rainfall and ancient landslides deposits on recent landslides. *Geological Survey Bulletin*. Washington: Department of Interior, 1975.

NISHIYAMA, L. **Mapeamento geotécnico preliminar da quadricula de São Carlos – SP**. 1991. 228 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bullettin of the International Association of Engineering Geology*, n. 19, p. 196 – 199, 1979.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadricula de São Carlos: II**. Campinas: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Agricultura e Abastecimento, Coordenadoria da Pesquisa Agropecuária, Instituto Agrônomo, 1984. (Boletim Técnico Instituto Agrônomo, n. 98).

OLIVEIRA, H. M. de. **Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

PACHECO, P. G. M. **Análise Numérica Do Fluxo E Da Estabilidade De Uma Pilha De Lixiviação De Minério De Cobre**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

PARK, D. W.; NIKHIL, N. V.; LEE, S. R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 11, p. 2833-2849, 2013.

PASTORE, E. L. **Weathering profiles**. In: X PANAMERICAN CONFERENCE IN SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1995. Guadalajara. [S.l.: s.n.], 1995. **Proceedings...** p. 353-364.

PENIDO, L. R.; KUX, H. J. M.; MATTOS, J. T. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e GIS como subsídio ao planejamento rodoviário. Estudo de Caso: Trecho Oeste do rodovial metropolitano de São Paulo, Brasil. **Anais... IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 9., 1998, Santos. Santos: INPE/SELPER, 1998. p. 661-673.

PETERLINI, R. F. **Organização espacial da vegetação natural nas quadriculas de São Carlos e Brotas/SP**. 177 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PINTO, C. S. et al. Propriedades dos solos residuais. In: SOLOS DO INTERIOR DE SÃO PAULO, 1993, São Carlos. **Anais...** São Paulo: ABMS-NRSP/EESC-USP. p. 95-142.

PONÇANO, W. L. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. [São Paulo]: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais: Companhia de Promoção de Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de São Paulo, 1981.

QUEIROZ, R. C. **Aplicação do método de retroanálise no estudo da estabilidade de taludes de estradas situadas em solos oriundos da formação Adamantina**. 1986. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, São Carlos, 1986.

RABELO, J. L. **Estudo da recarga do aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê**. 2006. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RAMOS, V. A et al. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente Arcview, para o mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 49-67, 2002.

REDY, R. K. T.; BONHAM-CARTER, G. F. A Decision-tree approach to mineral potential mapping in snow lake area, Manitoba. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 2, p. 191-200, 1991.

RIDENTE JÚNIOR, J. L.; CERRI, L. E. S. Análise de cartas de suscetibilidade à erosão em diferentes escalas para a gestão ambiental de rodovias. **Geotecnia**, n. 131, p. 29-55, jun./jul. 2014.

RODRIGUES, F. H. **Análise integrada aplicada ao mapeamento geológico-geotécnico na escala de 1:20.000 da estrada de Castelhanos, Ilhabela-RJ**. 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2012.

RODRIGUES, F. H et al. Avaliação da possibilidade de erosão natural e induzida na bacia hidrográfica do Ribeirão das Pedras, Quirinópolis (GO). **Geociências**, v. 33, n. 2, p. 339-359, 2014.

ROGÉRIO, P. R. **Cálculo da estabilidade de taludes de terra pelo método de Bishop Simplificado**. São Paulo: Edgard Blüncher, 1977.

ROSNIECEK, A.; IMAI, H. N. **Mapeamento geotécnico e análise de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos da bacia do Rio Ratonos – aplicação do modelo SHALSTAB**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SALOMÃO, F. X. T.; IWASA, O. Y. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: BITAR, O. Y. (Coord.). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE/IPT, 1995. cap. 3, p. 31-57.

SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W.; BAUM, R. L. Modeling time-dependent areal slope stability. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF LANDSLIDES, 9., Rio de Janeiro, 2004. **Proceedings...** London: A. A. Balkema, 2004. v. 1, p. 23-36.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes**. Oxford: Oxford University Press, 1993.

SHARMA, S. Slope stability concepts. In: ABRAMSON, L. W. **Slope stability and stabilization methods**. New York: Wiley, c2002. p. 329-461.

SHARPE, S. F. S. **Landslides and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock**. [Paterson]: Pageant Books, 1938.

SILVA, C. A. C. et al. Análise da suscetibilidade ao escorregamento em trecho do duto ORBEL, Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14., Rio de Janeiro, 2013. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.  
SILVA, F. P.; CHANG, H. K.; CHANG, M. R. C. **Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (k) no Estado de São Paulo**. Águas Subterrâneas, v. 19, n. 2, p. 19-36, 2005.

SILVEIRA, C. T. et al. Análise do fator de segurança na estabilidade das vertentes na Bacia do Rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.3, Jul./Set., p. 287-297, 2012.

SKEMPTON, A. W.; DELORY, F. A. **Stability of natural slopes in London clay**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION, 4., 1957, London. London: Butterworth Scientific, 1957. v. 2, p. 378-381.

SOARES, P. C. et al. **Geologia do nordeste do Estado de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1973, Aracaju- Sergipe: Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. p. 209-228

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope instability recognition, analyses and zonation. **Transportation Research Board**, v. 247, p. 129-177, 1996.

SPENCER, E. A Method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slices forces. **Geotechnique**, n. 17, p. 11-26, 1967.

STOCHALAK, J. The Classification of slope deposit from engineering geological point of view. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ENGINEERING GEOLOGY, 2., 1974, São Paulo. **Anais...** [São Paulo] : O Associação, [1974].

TERZAGHI, K. **Mecanismo dos escorregamentos de terra**. São Paulo : Gremio Politecnico, 1974.

THOMAS, A. Réflexions sur la cartographie géotechnique. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE IAG, 1., 1970, Paris. **Proceedings...** Paris: IAEG, 1970. v.2, p. 960-970.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELPHI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. Oficina de Textos, 2003. cap. 8 , p. 139 – 166.

TOMINAGA, L. K. Escorregamentos. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Orgs.). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo, Instituto Geológico, 2009. p. 25-38.

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

VARGAS, M. **Engineering properties of residual soils from South Central region of Brazil**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2., 1974, São Paulo. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1974. v. IV, p. 5.1 – 5.26.

VARGAS, M. **Some engineering properties of residual clay soils occurring in Southern Brazil.** In: ICSMFE, 3, v. 3, Zurich, 1953.

\_\_\_\_\_. **Some engineering properties of residual clay soils occurring in Southern Brazil.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING , 3., Haifa, 1973. [Jerusalem]: Jerusalem Academic Press, 1973.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. **Transportation Research Board**, n. 176, p. 11-33. 1978.

VAZ, A. P. M. S. **Estudo de áreas suscetíveis a escorregamento em sub-bacia do Rio São João, BR376 entre os Km 665 e 668.** 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, 2014.

VAZ, L. F. Estudo geológico de barragens. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 1., São Paulo, 1969. **Anais...** São Paulo : APGA, 1969. p. v-1-v-22.

VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas.** 2007. 194 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

WOLLE, C. M. **Taludes naturais – mecanismos de instabilização e critérios de segurança.** 1980. 345 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

WU, FU-TAI.; CAETANO-CHANG, M. R. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. **Revista IG** v. 13, n. 1, p. 58-68, jan./jun. 1992.

WU, T. H. & ABDEL-LATIF, M. A. Prediction and mapping of landslide hazard. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 4, p. 781-795, 2000.

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).** 2000. 149 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2000.

ZARUBA, Q; MENCL, V. **Landslides and their control:** development in geotechnical engineering. Amsterdam: Elsevier, 1982.

ZUQUETTE, L. V. Cartografia geotécnica e geoambiental e as novas perspectivas para o planejamento territorial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 9., Cuiabá, 2015. **Anais...** Cuiabá. 2015. p. 1 -18.

ZUQUETTE, L. V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** 1993. 368 f. Tese (Livre-Docência) - Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

ZUQUETTE, L. V.; NAKAZAWA, V. A. Cartas de geologia de engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO S. N. A. de. (Eds.). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. p. 283-300.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** 1987. 673 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

## **APÊNDICES**



## Apêndice A – Base Cartográfica Digital



Apêndice B – Cenário 1 (Folhas 04 e 05)



Apêndice C – Cenário 2 (Folhas 04 e 05)



Apêndice D – Cenário 3 (Folhas 04 e 05)