

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Rodrigo D'Amico Flaborea

**IDENTIFICAÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DOS
MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS NO KM 407,5 DA RODOVIA SC-390 -
MUNICÍPIO DE LAURO MULLER (SC)**

Florianópolis
2018

Rodrigo D'Amico Flaborea

**IDENTIFICAÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DOS
MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS NO KM 407,5 DA RODOVIA SC-390 -
MUNICÍPIO DE LAURO MULLER (SC)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Curso de Graduação em Geologia para
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Galvão Veronez
Parizoto

Florianópolis
2018

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

Flaborea, Rodrigo
IDENTIFICAÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DOS
MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS NO KM 407,5 DA RODOVIA SC
390 - MUNICÍPIO DE LAURO MULLER (SC) / Rodrigo Flaborea ;
orientador, Daniel Galvão Veronez Parizoto, 2018.
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

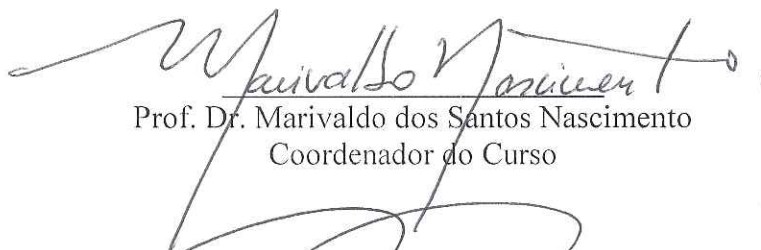
1. Geologia. 2. Movimentos de Massa. 3. Estabilidade de
Taludes. 4. Mecânica de Rochas. I. Galvão Veronez Parizoto,
Daniel. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Geologia. III. Título.

Rodrigo D'Amico Flaborea

**IDENTIFICAÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DOS
MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS NO KM 407,56 DA RODOVIA SC-390 -
MUNICÍPIO DE LAURO MULLER (SC)**

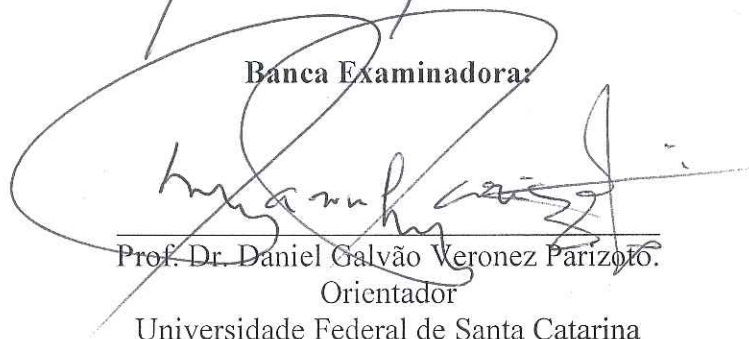
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção de Título de “Bacharel em Geologia” e
aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Geologia.

Florianópolis, 07 de Junho de 2018.



Prof. Dr. Marivaldo dos Santos Nascimento
Coordenador do Curso

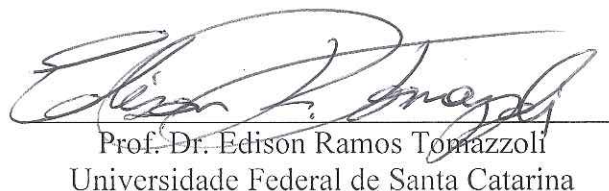
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Daniel Galvão Veronez Parizoto.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Murilo da Silva Espindola
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Edison Ramos Tomazzoli
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Bruno Flaborea e Claudia D'Amico, por me darem amor e educação para me tornar o homem que sou hoje, por me incentivarem, nos momentos mais difíceis, à seguir em diante na graduação e por me darem suporte financeiro no decorrer dela. Sem eles, seria quase impossível chegar onde estou.

Agradeço também:

Aos meus irmãos Vitor Flaborea e Rafael Flaborea, por suas amizades que me acompanharam ao longo de toda minha.

Ao Governo Federal, por oferecer professores, livros, alimentação, infra-estrutura e suporte médico à mim e meus colegas no decorrer de toda graduação.

Ao meu orientador Daniel Parizoto, por me orientar e me esclarecer dúvidas para a realização deste trabalho e por me emprestar materiais para realização do campo.

Ao professor Murilo Espíndola, pelo esclarecimento de dúvidas em relação ao tema deste trabalho e pelo auxílio na realização dos ensaios necessários.

Ao professor Roberto Sacks e ao professor Edson Tomazzoli, pelo auxílio na identificação dos minerais encontrados neste trabalho.

À professora Luana Florisbal por me emprestar sua marreta para realização do campo.

Ao técnico Sergio Paiva, por produzir a lâmina petrográfica analisada neste trabalho.

À Prefeitura de Lauro Muller, por cobrirem os gastos com alimentação e hospedagem durante meu trabalho de campo e à Defesa Civil de Lauro Muller que me ofereceu transporte, materiais de campo e um motorista/auxiliar de campo: José Geraldo da Conceição, o qual sou muito grato também.

Ao geólogo Vitor Muller, por me enviar seu relatório técnico feito na Área de Estudo deste trabalho.

Ao meu amigo Maick Oliveira por me ajudar na identificação dos minerais encontrados na análise petrográfica, por me emprestar sua lupa para realização do campo e por sua amizade que me acompanhou durante toda graduação.

Ao meu amigo geógrafo Arthur Wippel por me transportar em seu carro à Área de Estudo deste trabalho e por sua amizade que também me acompanhou durante a graduação.

Ao meu amigo Jean Veronez, por me auxiliar em campo e por sua amizade durante toda graduação.

E, finalizando, ao meu amigo Guilherme Ghizoni, por me receber em sua casa durante uma visita de campo e por me auxiliar nas atividades desenvolvidas nele.

*“Eu amei, ri e chorei
Tive minhas falhas, minha cota de derrotas
E agora, conforme as lágrimas secam,
eu acho tudo tão divertido
ao pensar que eu fiz tudo isso,
e devo dizer sem timidez,
fiz tudo do meu jeito.”*

Frank Sinatra

RESUMO

O presente trabalho analisou os aspectos geológicos de um talude localizado no km 407,56 da rodovia SC-390, onde ocorreram três movimentos de massa no primeiro semestre do ano de 2016, a fim de identificar quais desses aspectos atuaram como condicionantes geológicos de tais processos. Esses movimentos, que envolveram rocha e solo de um talude semivertical na beira da estrada, interditaram a rodovia e feriram motoristas que transitavam pelo local, tornando importante uma análise geológica dessa situação. Os aspectos analisados foram: os *sets* de descontinuidades do talude da área de estudo através da comparação, em estereograma, da posição de seus polos médios com a projeção do cone de atrito do solo que as preenchem; a coesão de tal solo que supõe-se estar presente também sobre os planos A e B, delimitadores semiverticais da maior cunha de ruptura que foi observada na porção rompida do talude estudado e que foi escolhida para o estudo do presente trabalho, e a pressão neutra da água subterrânea atuante sob esses planos, através dos cálculos dos Fatores de Segurança considerando tais parâmetros; o peso específico do maciço rochoso acima dos planos mencionados, através da comparação entre os valores das tensões resultantes desse parâmetro e a envoltória de ruptura do solo presente sobre esses planos; e o grau de alteração de uma lâmina petrográfica produzida com a rocha constituinte do talude, através de sua inserção na escala de graus de alteração adequada à seu tipo rochoso. Com os resultados dessas análises em mãos, concluiu-se que os movimentos de massa ocorridos foram do tipo “escorregamento em cunha” e que os aspectos que atuaram como condicionantes geológicos desses escorregamentos foram o padrão das descontinuidades presentes no talude estudado e o grau de alteração da rocha constituinte desse talude, enquanto que a coesão do solo presente entre as descontinuidades, a circulação das águas subterrâneas e o peso específico dos blocos rochosos acima das cunhas de ruptura foram descartados dessa categoria.

Palavras chave: Movimentos de Massa, Estabilidade de Taludes, Mecânica de Rocha.

ABSTRACT

The present work analyzed the geological aspects of a slope located at km 407,56 of the highway SC-390 (southern Brazil), where three mass movements took place in the first half of 2016, in order to identify which of these aspects acted as geological conditioners of such processes. These movements, which involved rock and soil from a semivertical slope at the roadside, interdicted the highway and injured drivers who were passing through the site, making a geological analysis necessary. The analyzed aspects were: the discontinuity *sets* of the slope of the study area by comparing, in stereogram, the position of its average poles with the projection of the cone of friction of the soil that fill them; the cohesion of such soil that is supposed to be present also on planes A and B, semivertical delimiters of the largest wedge of rupture that was observed in the ruptured portion of the studied slope and that was chosen for the study of the present work, and the water pressure of the groundwater acting under these plans, through the calculations of the Safety Factors considering such parameters; the unit weight of the rock mass above the above-mentioned planes by comparing the values of the stresses resulting from this parameter and rupture envelope of the soil present on those planes; and the weathering degree of a petrographic lamina produced with the constituent rock of the slope, through its insertion in the degree scale of alteration appropriate to its rock type. With the results of these analysis in hand, it was concluded that the mass movements occurred were wedge landslides and that the aspects that acted as geological conditioners of these landslides were the pattern of the discontinuities present in the slope studied and the weathering degree of the rock constituent of this slope, while the cohesion of the soil present between the discontinuities, the circulation of the groundwater and the specific weight of the rock blocks above the rupture wedges were discarded of this category.

Keywords: Mass Movements, Slope Stability, Rock Mechanics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Talude íngreme na rodovia SC-390, trecho da Serra do Rio do Rastro. Foto: FLABOREA, 2017.....	4
Figura 2. Movimento de Massa do dia 02/01/2016 (G1, 2016).	5
Figura 3. Carro destruído pelo Movimento de Massa no dia 14/06/2016 (CORREIO OTACILIENSE, 2016).	5
Figura 4. Serra do Rio do Rastro (SMERDUM, 2014).....	6
Figura 5. Mapa da Área de Estudo. Modificado por: FLABOREA, 2018.	7
Figura 6. Sinais de Rastejo: (A) Blocos deslocados de sua posição inicial; (B) Árvores inclinadas; (C) Estratos e camadas rochosas sofrendo variações bruscas; (D) Deslocamento de postes ou cercas; (E) Trincas em elementos rígidos; (F) Eixos de estradas sofrendo inflexões no alinhamento; (G) Matacões arredondados; (H) Linhas de seixos recobertas por regolito em movimentação (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).	9
Figura 7. Bloco diagrama de um escorregamento rotacional (LOPES, 2006).	10
Figura 8. Bloco diagrama de um escorregamento planar (TOMINAGA <i>et al.</i> , 2009).....	11
Figura 9. Bloco Diagrama do Escorregamento em Cunha (TOMINAGA <i>et al.</i> , 2009).....	11
Figura 10. Depósito de tálus resultantes de Quedas: Zion National Park , 2017 (NATIONAL PARKS TRAVELER, 2017).	12
Figura 11. Bloco-diagrama de uma Corrida (LOPES, 2006).	13
Figura 12. Fotomicrografia de um cristal de Plagioclásio com microfaturas fraturas preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro (LIMA, 2001).	15
Figura 13. Variação da altura crítica de um talude conforme se varia a inclinação das discontinuidades. (HOEK e BRAY, 1981).....	16
Figura 14. Distribuição das pressões neutras ao longo de discontinuidades rochosas.a) Em drenagens livres; b)em drenagens parcialmente impedidas (Guidicini e Nieble,1983 – modificado).	19
Figura 15. a) Representação gráfica do Cone de Atrito em um plano inclinado; b)Projeção do cone de atrito em um estereograma (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).	21
Figura 16. Parâmetros Geométricos de uma Cunha Rochosa para o cálculo do Fator de Segurança: a)Linhas de intersecção: 1- Entre o plano A e a face do talude; 2- Entre o plano B e a face do talude; 3- Entre o plano A e o topo do talude; 4- Entre o plano B e o topo do talude; 5- Entre o plano A e B. b) Altura da cunha (H) considerada no cálculo do Fator de Segurança, definida pelo início e fim da linha de intersecção 5, e distribuição da intensidade da pressão neutra na linha de intersecção 5 (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).	22
Figura 17. Grandes Círculos dos Planos A e B e seus polos Na e Nb; grandes círculos dos plano da Face e do Topo do Talude; pontos de intersecção 1, 2, 3, 4 e 5 definidos na Figura 16; e ângulos: θ_{nanb} – Entre os polos Na e Nb; θ_{1nb} – Entre a intersecção 1 e Nb; θ_{13} – Entre as intersecções 1 e 3; θ_{2na} – Entre a intersecção 2 e Na; θ_{24} – Entre as intersecções 2 e 4; θ_{35} – Entre ad intersecções 3 e 5; θ_{45} – Entre as intersecções 4 e 5; ψ_5 – Da intersecção 5 (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).	23
Figura 18. Altura do talude (H) definido como a distância vertical entre a intersecção do plano analisado com a face do talude (ponto A) e o topo do talude (ponto B); Ângulo de inclinação da face do talude (i) e Ângulo que o plano analisado faz com a horizontal (θ); Tensão vertical total (σ_v), tensão normal (σ_n) e tensão cisalhante (σ_s) atuantes no plano analisado (Das, 2007 - modificado).	24

Figura 19. Envoltória de Ruptura e os pontos: A – Localizado em um plano do talude onde não há possibilidade de ruptura; B – Localizado em um plano do talude onde a ruptura certamente ocorrerá e o ponto C – Localizado em uma posição inexistente do talude (Das, 2007 - modificado).....	26
Figura 20. Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná com a distribuição da Formação Serra Geral e localização da Área de Estudo (Frank <i>et al.</i> , 2009 - modificado).....	29
Figura 21. Mapa Geológico Local da Área de Estudo. Modificado por: FLABOREA, 2018.	31
Figura 22. Fotomicrografia de uma amostra da fácies gramado, onde identifica-se o par augita-pigeonita, característico dos basaltos baixo titânio (WILDNER <i>et al.</i> , 2004).....	31
Figura 23. Disjunções colunares envergadas de uma frente de derrame da Fácies Gramado (WILDNER <i>et al.</i> , 2004).....	32
Figura 24. Mapa Hidrogeológico Local da Área de Estudo. Modificado por: FLABOREA, 2018.....	34
Figura 25. Diagrama de intervalos de valores de coesão e ângulo de atrito interno de discontinuidades preenchidas (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).....	38
Figura 26. Corpos de Prova 1 (à esquerda) e 2 (à direita). Foto: FLABOREA, 2017.	39
Figura 27. Paisagem do Corpo de Prova em condição submersa. Foto: FLABOREA, 2017.	39
Figura 28. Corpo de Prova 2 imerso em meio aquoso e submetido à pressão negativa da Bomba de Vácuo. Foto: FLABOREA, 2017.....	40
Figura 29. Lâmina Petrográfica produzida pelo Laboratório de Laminação da UFSC. Foto: FLABOREA, 2018.	44
Figura 30. Contador manual acoplado em Microscópio Petrográfico. Foto: FLABOREA, 2018.	45
Figura 31. Talude Rochoso semivertical são (em azul) e rompido (em vermelho) à beira da SC-390, no km 407,56 (Governo de Santa Catarina, 2016 - modificado).....	48
Figura 32. Basaltos com estrutura amigdalóide onde as amígdalas são preenchidas por cristais brancos de 1 a 2cm de espessura e estão inseridas em rocha holocristalina afanítica melanocrática. Foto: FLABOREA, 2017.	49
Figura 33. Set de discontinuidades semiverticais com mergulho sentido NE (polígonos em azul), semiverticais com mergulho sentido NW (linhas e polígonos em vermelho) e semihorizontais com mergulho sentido NE (linhas e polígonos em amarelo) no talude são. Foto: CONCEIÇÃO, 2017.	49
Figura 34. Solo argiloso compactado preenchendo as discontinuidades do talude são (IGUATEMI CONSULTORIA E SERVIÇOS EM ENGENHARIA LTDA, 2016).	50
Figura 35. Planos A em azul, B em vermelho e C em amarelo, delimitadores das cunhas da superfície de ruptura e medidas da altura da maior cunha e da distância de sua base ao topo do talude. Foto: FLABOREA, 2017.	50
Figura 36. Rachadura preenchida por água na SC-390 acima do Talude da Área de Estudo. Foto: FLABOREA, 2017.....	51
Figura 37. Fluxo de água pluvial sendo desviado da valeta do acostamento para o asfalto da SC-390 acima do talude da área de estudo. Foto: FLABOREA, 2017.	51
Figura 38 - Set de discontinuidades semiverticais com mergulho sentido NW (linhas azuis), seus polos (pontos azuis) e o polo médio resultante (quadrado vermelho). Elaborado por: FLABOREA, 2018.	52
Figura 39 - Disposição do polo médio (quadrado vermelho) do set de discontinuidades semiverticais com mergulho sentido NW em relação a projeção do cone de atrito (círculo verde) do solo argiloso que preenche as discontinuidades. Elaborado por: FLABOREA, 2018.....	53

Figura 40 - <i>Set</i> de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NE (linhas azuis), seus respectivos polos (pontos azuis) e o polo médio resultante (quadrado vermelho). Elaborado por: FLABOREA, 2018.	53
Figura 41 - Disposição do polo médio (quadrado vermelho) do <i>set</i> de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NE em relação à projeção do cone de atrito (círculo verde) do solo argiloso que preenche as descontinuidades. Elaborado por: FLABOREA, 2018.	53
Figura 42 - <i>Set</i> de descontinuidades semihorizontais com mergulho sentido NW (linhas azuis), seus respectivos polos (pontos azuis) e o polo médio resultante (quadrado vermelho). Elaborado por: FLABOREA, 2018.	54
Figura 43 - Disposição do polo médio (quadrado vermelho) do <i>set</i> de descontinuidades semihorizontais com mergulho sentido NW em relação à projeção do cone de atrito (círculo verde) do solo argiloso que preenche as descontinuidades. Elaborado por: FLABOREA, 2018.	54
Figura 44 - Estereograma com os planos A, B, da face do talude e do topo do talude; e as interseções 1,2,3,4 e 5. Elaborado por: FLABOREA, 2018.	56
Figura 45. Rede Triangular Irregular do Nível Piezométrico no Sul de Santa Catarina obtida através do Nível Estático dos poços representativos da região e nível piezométrico do centro da Área de Estudo. Elaborado por: FLABOREA, 2018.	58
Figura 46 - Envoltória de Ruptura do solo argiloso presente nas descontinuidades do talude (linha vermelha) e tensões normais e cisalhantes atuantes nos planos A (ponto azul) e B (ponto verde) da Cunha Estudada. Elaborado por FLABOREA, 2018.	61
Figura 47. A- Amígdala com forma aproximadamente esférica preenchida por Clorita no centro e Zeolita na borda (nicóis paralelos); B- Amígdala com forma aproximadamente lenticular com o mesmo preenchimento (nicóis paralelos); C- Clorita com borda recoberta por Hidróxido de Ferro (nicóis paralelos); D- Clorita completamente recoberta por Hidróxido de Ferro (nicóis paralelos). Foto: FLABOREA, 2018.	62
Figura 48.A- Cristais de Plagioclásio e Augita inseridos em matriz composta de Augita, Pigeonita e Minerais Opacos Primários (nicóis perpendiculares); B- Cristais microfraturados de Augita e Pigeonita (nicóis perpendiculares); C- Cristais de Augita e Plagioclásio recobertos por Hidróxido de Ferro (nicóis paralelos); D- Minerais Opacos secundários alterando cristais de Plagioclásio (nicóis perpendiculares). Foto: FLABOREA, 2018.	63
Figura 50. Posição da Rocha analisada (quadrado vermelho) dentro do campo de Basaltos e Andesito do diagrama de Streickeisen. Elaborado por FLABOREA, 2018.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Intervalos de I_p para os graus de alteração de Basaltos, Granitos e Quartzitos.....	27
Tabela 2 - Resultados obtidos no ensaio de determinação das massas específicas seca, submersa e saturada das amostras coletadas.	55
Tabela 3 - Cálculo do Fator de Segurança na Cunha de Ruptura considerando-se somente a coesão dos solos argilosos supostamente presentes sobre os planos A e B.	57
Tabela 4 – Cálculo do Fator de Segurança na Cunha Estudada considerando a pressão neutra atuante sob o solo supostamente presente sobre os planos A e B.	59
Tabela 5 - Cálculo das tensões verticais totais, normais e cisalhantes atuantes nos planos A e B	60
Tabela 6. Análise Volumétrica da Lâmina Petrográfica.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
NBR	Norma Brasileira
NE	Nível Estático
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_{nat}	Peso Específico Natural
γ_{sat}	Peso Específico Saturado
γ_{sub}	Peso Específico Submerso
σ_s	Tensão Cisalhante
ϕ	Ângulo de Atrito Interno
FS	Fator de Segurança
Na	Polo do plano A
Nb	Polo do plano B
θ	Ângulo entre polos de um estereograma ou Ângulo que um plano de um talude faz com a horizontal
Ψ	Ângulo de um polo
c	Coesão
H	Altura da Cunha ou do Plano de Ruptura
γ_w	Peso Específico da Água
i	Ângulo que a face do talude faz com a horizontal
σ_{vt}	Tensão Vertical Total
σ_n	Tensão Normal
τ	Resistência ao Cisalhamento
I_p	Índice Micropetrográfico
Ma	Mega anos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 OBJETIVO GERAL.....	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	6
1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	7
2 REVISÃO CONCEITUAL.....	7
2.1 MOVIMENTOS DE MASSA.....	8
2.1.1 Classificação	8
2.1.2 Condicionantes Geológicos.....	14
2.2 MECÂNICA DAS ROCHAS	20
2.2.1 Projeção do Cone de Atrito.....	21
2.2.2 Cálculo do fator de segurança de uma cunha rochosa considerando-se a coesão e a pressão neutra.....	21
2.2.3 Cálculo das tensões atuantes em um plano inclinado com percolação de água pelo método de Culmann (1875).	24
2.2.4 Critério de ruptura Mohr-Coulomb.....	25
2.3 PETROGRAFIA	26
2.3.1 Índice micropetrográfico (I_p)	26
2.3.2 Grau de Alteração de Irfan e Dearman (1978).....	27
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
3.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	28
3.2 GEOLOGIA LOCAL	30
3.2.1 Aspectos Litológicos.....	30
3.2.2 Aspectos Estruturais.....	32
3.2.3 Aspectos Hidrogeológicos	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 ETAPA PRÉ-CAMPO	35
4.1.1 Análise integrada e elaboração de mapas em SIG	35
4.1.2 Levantamento bibliográfico	36
4.2 ETAPA DE CAMPO.....	36
4.3 ETAPA PÓS-CAMPO	37
4.3.1 Análise das discontinuidades do Talude São	37
4.3.2 Ensaios de determinação das massas específicas e cálculo dos pesos específicos.	38

4.3.3	Inserção dos parâmetros geométricos da Cunha Estudada e cálculo de seus ângulos no Stereonet	40
4.3.4	Cálculo do Fator de Segurança considerando a coesão do solo presente sobre os planos A e B	41
4.3.5	Análise da influência da água subterrânea nos escorregamentos	41
4.3.6	Análise da influência do peso específico nos escorregamentos	42
4.3.7	Produção da Lâmina Petrográfica	43
4.3.8	Análise Petrográfica	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1	DADOS COLETADOS EM CAMPO.....	47
5.2	ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES DO TALUDE SÃO	52
5.3	MASSAS E PESOS ESPECÍFICOS	54
5.4	INSERÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA CUNHA ESTUDADA NO ESTEREOGRAMA	55
5.5	CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA DA CUNHA ESTUDADA CONSIDERANDO A COESÃO DO SOLO SUPOSTAMENTE PRESENTE SOBRE OS PLANOS A E B.....	56
5.6	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NOS ESCORREGAMENTOS	57
5.6.1	Obtenção do nível piezométrico sob a Área de Estudo.....	58
5.6.2	Cálculo do Fator de Segurança da Cunha Estudada considerando a Pressão Neutra	58
5.7	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PESO ESPECÍFICO SATURADO NOS ESCORREGAMENTOS	59
5.7.1	Cálculo das tensões atuantes nos planos A e B	59
5.7.2	Comparação dos valores de tensões atuantes nos planos A e B com a envoltória de ruptura do solo supostamente presente sobre esses planos	60
5.8	ANÁLISE PETROGRÁFICA	62
5.8.1	Descrição Petrográfica da Lâmina.....	62
5.8.2	Análise Volumétrica da Lâmina	64
5.8.3	Classificação da Rocha segundo diagrama de Streickeisen (1967) e segundo intervalos de Índice de Cor de Streickeisen (1978).....	64
5.8.4	Cálculo do Índice Micropetrográfico e atribuição do Grau de Alteração de Irfan e Dearman (1978) à lâmina analisada	65
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	67
6.1	CONCLUSÕES	67
6.2	SUGESTÕES.....	68
6.2.1	Para evitar novos Escorregamentos.....	68

6.2.2	Para trabalhos futuros.....	69
-------	-----------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Movimentos de Massa, no estado de Santa Catarina, é um tema que merece atenção devido à grande incidência desse fenômeno natural nas últimas décadas. Segundo Herrmann (2014), durante o período de 1980 a 2010, totalizaram-se 222 ocorrências de escorregamentos em 124 municípios no estado de Santa Catarina. A autora ainda considera que a maior parte desses eventos teve como principal causa a instalação urbana em encostas de alto declive.

A Serra do Rio do Rastro, região de estudo deste trabalho, insere-se nesse contexto geográfico, localizando-se no sudeste do Estado, e apresenta aspectos geomorfológicos e antrópicos que são agravantes para a ocorrência de movimentos de massa tais como alta inclinação dos taludes e cortes de estradas íngremes (Figura 1).

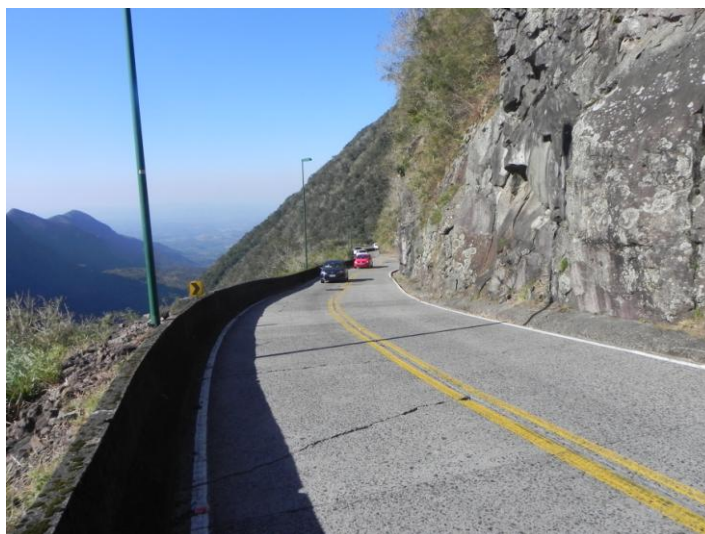


Figura 1. Talude íngreme na rodovia SC-390, trecho da Serra do Rio do Rastro. Foto: FLABOREA, 2017.

A rodovia SC-390 atravessa tal região e chamou a atenção devido à ocorrência de três movimentos de massa, envolvendo blocos de rocha e solo, no primeiro semestre de 2016 somente no km 407,56: A primeira no dia 02/01/2016, a qual interditou a rodovia por 10 dias (G1,2016) (Figura 2); a segunda no dia 25/03/2016, que interditou a rodovia por um dia (NOTÍCIAS DO DIA, 2016); e a terceira no dia 14/06/2016, a qual atingiu um carro que transitava no momento (CORREIO OTACILIENSE, 2016)(Figura 3). Ambas ocorreram após fortes chuvas no local. Tendo em vista essa situação, criou-se a necessidade de estudos aprofundados sobre os condicionantes de tais eventos.



Figura 2. Movimento de Massa do dia 02/01/2016 (G1, 2016).



Figura 3. Carro destruído pelo Movimento de Massa no dia 14/06/2016 (CORREIO OTACILIENSE, 2016).

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar os aspectos geológicos da área de estudo e identificar quais destes atuaram como condicionantes dos movimentos de massa ocorridos no km 407,56 da rodovia SC-390.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar a estabilidade ou instabilidade do talude, através da determinação, em estereogramas, das relações entre as posições dos polos médios das discontinuidades e a projeção do cone de atrito do solo que preenche essas discontinuidades;

- b) Determinar o efeito da coesão do solo, presente nas discontinuidades, na estabilidade da cunha estudada antes de sua ruptura, através do cálculo do Fator de Segurança;
- c) Verificar o efeito da circulação das águas subterrâneas na estabilidade da cunha de ruptura a partir da estimativa do nível piezométrico do talude;
- d) Avaliar a influência do peso específico na estabilidade da cunha através da relação entre as tensões atuantes na cunha e a envoltória de ruptura do solo que preenche as discontinuidades;
- e) Verificar se o grau de alteração da rocha constituinte do talude foi alto o suficiente para enfraquecer suas ligações intergranulares ao ponto de facilitar sua ruptura.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os movimentos de massa ocorridos no primeiro semestre de 2016 na SC-390 a interditaram e feriram motoristas que a transitavam. Tal rodovia é conhecida como uma das estradas mais belas do mundo, além de ser a principal ligação entre o sul e o oeste de Santa Catarina (G1,2016) (Figura 4). Sendo assim, tais desastres afetam os turistas, que vem de diversas partes do país e o trânsito de produtos de diversos setores do mercado do Estado. Portanto, se faz necessário um estudo geológico na área para esclarecer quais aspectos geológicos atuaram como condicionantes de tais movimentos e assim recomendar medidas mitigadoras de tais aspectos para evitar novas ocorrências.



Figura 4. Serra do Rio do Rastro (SMERDUM, 2014).

1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo desse trabalho é o quadrilátero de área de $1020,18\text{m}^2$ situado entre as cotas de 1100m e 1120m e com centro definido pelo km 407,56 da rodovia SC-390 (coordenadas em projeção Universal Transversa de Mercator, zona 22J: 642758m; 6858106m), no trecho da Serra do Rio do Rastro. Tal área corresponde ao trecho onde ocorreram os movimentos e seu entorno e se localiza no extremo oeste do município de Lauro Muller, que por sua vez se localiza no sudeste do Estado de Santa Catarina (Figura 5).

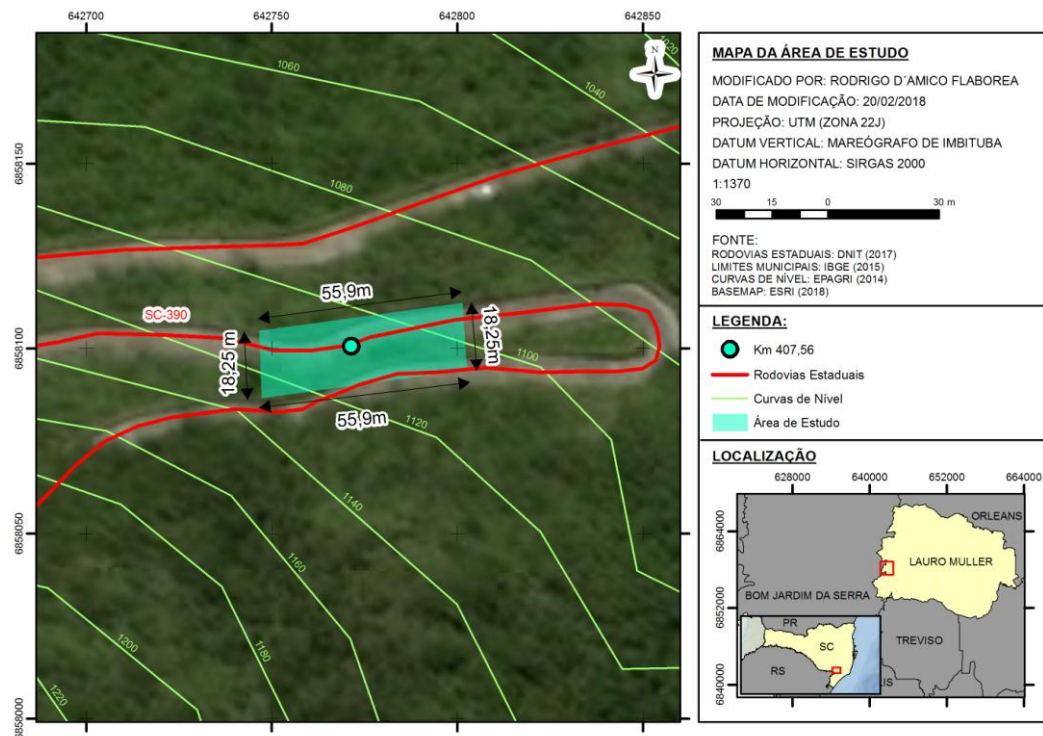


Figura 5. Mapa da Área de Estudo. Modificado por: FLABOREA, 2018.

2 REVISÃO CONCEITUAL

Nesta seção são abordados os aspectos fundamentais para compreensão do tema deste trabalho. Sem a pretensão de ser uma extensa revisão de resultados e informações disponíveis na literatura, tem apenas caráter introdutório dos principais temas envolvidos neste estudo.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Bigarella *et al.* (2003), Movimento de Massa é definido como “deslocamento de material (solo ou rocha) vertente abaixo sob influência da gravidade, sendo desencadeados pela interferência direta de outros meios ou agentes independentes, como água, gelo ou ar”.

O estudo desse tipo de fenômeno natural tem significativa importância devido aos seus efeitos diretos na sociedade. “Tais movimentos podem causar perdas de vida, danos civis ou uma interrupção geral nas atividades humanas” (WICANDER e MONROE, 2009).

Esse fenômeno pode ocorrer em uma ampla variedade de terrenos (terrenos íngremes, suavizados, tectonicamente ativos ou onde há pressão neutra atuante no subsolo), formas: (desabamentos de margens, queda de falésias, avalanches, deslocamento por fluidificação, destacamento de massas terrosas e rochosas ou subsidências); e velocidades (velocidades imperceptíveis no caso de rastejos à velocidades extremamente rápidas no caso de quedas de blocos) (WICANDER e MONROE, 2009; BIGARELLA *et al.*, 2003; GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

2.1.1 Classificação

Diferentes autores, entre eles Augusto Filho (1992), Wicander e Monroe (2009) e Bigarella *et al.* (2003), classificam os movimentos de massa segundo sua velocidade (rápido ou lento); seu tipo (quedas, escorregamentos, fluxos e etc.), seu material envolvido (rocha, solo ou detritos), seu conteúdo de água no subsolo ou seu mecanismo de ruptura. A fim de apresentar ao leitor uma tipologia básica, os movimentos foram organizados neste trabalho como:

2.1.1.1 Rastejos

Rastejos, segundo Maciel Filho e Nummer (2014), Guidicini e Nieble (1983) e Bigarella *et al.* (2003), são movimentos lentos ou imperceptíveis de geometria indefinida, contínuos ou sazonais e com vários planos de deslocamento, os quais ocorrem geralmente próximos à superfície. Na maioria dos casos envolvem grandes volumes de solo, rocha alterada ou depósitos de colúvios e tálus e tem suas causas associadas à atuação de tensões com intensidades baixas (porém com alta frequência) ou às variações de temperatura e umidade do subsolo.

Ocorrem comumente em terrenos com declividade média a alta e com argilas expansivas e resultam em árvores recurvadas, postes e cercas deslocados, trincas em muros e paredes, inflexões de estradas e deformação nos elementos estruturais de rocha e solo (Figura 6).

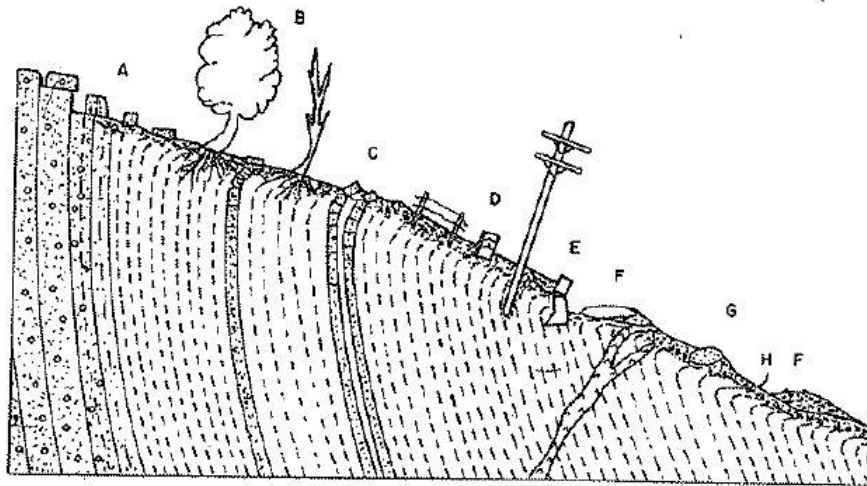


Figura 6. Sinais de Rastejo: (A) Blocos deslocados de sua posição inicial; (B) Árvores inclinadas; (C) Estratos e camadas rochosas sofrendo variações bruscas; (D) Deslocamento de postes ou cercas; (E) Trincas em elementos rígidos; (F) Eixos de estradas sofrendo inflexões no alinhamento; (G) Matacões arredondados; (H) Linhas de seixos recobertas por regolito em movimentação (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

2.1.1.2 Escorregamentos

Segundo Wicander e Monroe (2009) e Guidicini e Nieble (1983), são movimentos com geometrias, materiais (solo, rocha, rochas e solo e etc.) e volumes variáveis que se desenvolvem ao longo de uma ou mais superfícies de ruptura, as quais podem ser planares ou circulares.

Ocorrem em velocidades médias a rápidas (as quais dependem da natureza do terreno, da causa da movimentação e da inclinação da superfície de ruptura) com durações relativamente curtas, quando a relação entre a resistência ao cisalhamento do material formador do talude e a tensão cisalhante da superfície potencial de ruptura decresce gradualmente até atingir uma unidade. Após a ruptura, o corpo escorregado tem seu centro de gravidade deslocado para baixo e pode se esfacelar (adquirindo o caráter de rastejo) ou permanecer intacto.

São subdivididos em:

- a) rotacionais: Escorregamentos que se desenvolvem sobre superfície de ruptura curva (Figura 7) ao longo do qual há um movimento rotacional de um maço de solo (geralmente residual) ou material fracamente consolidado, os quais são geralmente espessos e homogêneos e podem residir sobre a superfície de ruptura ou sobre o contato com o substrato rochoso (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

São provocados, geralmente, por corte de estradas, por erosão no sopé do talude ou por sobrecarga de edificações no topo do talude (FERNANDES e AMARAL, 1996);

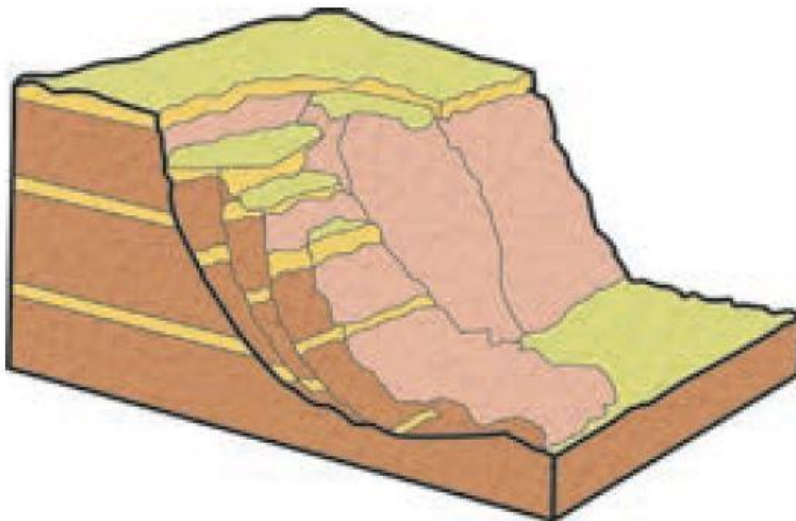


Figura 7. Bloco diagrama de um escorregamento rotacional (LOPES, 2006).

- b) Figura 8) (geralmente rasas, compridas e associadas à descontinuidades mecânicas ou hidrológicas do talude) e geralmente desencadeados por períodos de chuva intensa. Podem ocorrer em taludes íngremes ou suaves, envolvendo solo (movimentação geralmente sobre descontinuidades no manto de intemperismo condicionadas por feições estruturais da rocha sobre qual reside), rocha (movimentação sobre xistosidade, estratificação, gnaissificação, acamamento, falhas, juntas de alívio de tensões e etc.) ou solo e rocha (geralmente blocos rochosos inseridos em matriz terrosa situados no sopé de montanhas);

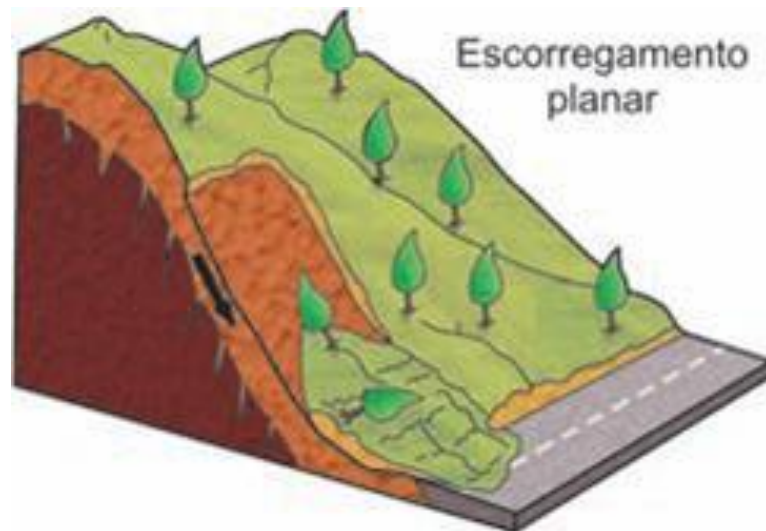


Figura 8. Bloco diagrama de um escorregamento planar (TOMINAGA *et al.*, 2009).

- c) em Cunha: Segundo Wyllie e Mah (2005), Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) e Fiori e Carmignani (2009), são movimentos condicionados por duas ou mais estruturas planares, oblíquas à face do talude e desfavoráveis à sua estabilidade, que formam cunhas de blocos rochosos isolados, os quais se deslocam na direção do eixo de intersecção de dois planos (Figura 9).

Podem ocorrer em taludes rochosos pouco ou muito alterados, em regiões onde o relevo é fortemente controlado por estruturas geológicas, em taludes de corte ou em taludes que sofreram algum tipo de desconfinamento (natural ou antrópico).

A amplitude de condições geológicas em que tais escorregamentos ocorrem é maior do que nos escorregamentos planares.

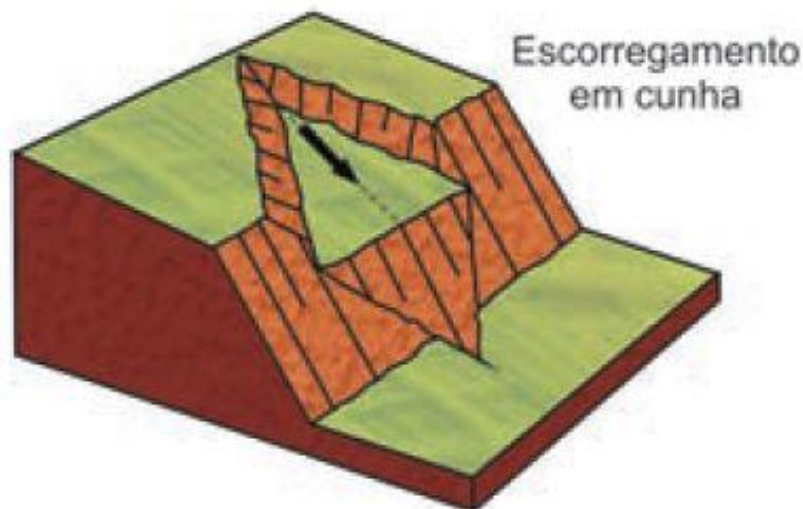


Figura 9. Bloco Diagrama do Escorregamento em Cunha (TOMINAGA *et al.*, 2009).

2.1.1.3 Quedas

Segundo Wicander e Monroe (2009), Guidicini e Nieble (1983) e Bigarella *et al.* (2003), são quedas livres extremamente rápidas a partir de uma elevação, sem superfície de movimentação, de pequenos a médios volumes de blocos, placas ou lascas de maciços rochosos (os quais podem ser muito ou pouco consolidados) que resultam, posteriormente, em depósitos de tálus (Figura 10). Tais porções rochosas sofrem colapso (devido, geralmente, à ação do intemperismo) ao longo de juntas ou acamamentos de rochas que mergulham para fora de terrenos íngremes (tais como penhascos, cânions escarpados ou cortes de estradas) e caem pela ação da gravidade chegando ao solo e se associando a outros movimentos como saltação, rolamento de blocos e fragmentação do substrato devido ao impacto.

Suas causas podem ser: corte da parte inferior dos taludes, variação térmica do maciço rochoso, perda de sustentação por ação erosiva da água, alívio de tensões de origem tectônica, vibrações, entre outros (WICANDER e MONROE, 2009; GUIDICINI e NIEBLE, 1983).



Figura 10. Depósito de tálus resultantes de Quedas: Zion National Park , 2017 (NATIONAL PARKS TRAVELER, 2017).

2.1.1.4 Corridas

Segundo Guidicini e Nieble (1984), Fernandes e Amaral (1996) e Lopes (2006), são movimentos de caráter hidrodinâmico viscoso ou plástico (Figura 11) que se constituem de grande volume de solos, rochas, detritos e água e, geralmente, possuem muitas superfícies de deslocamento. Tais movimentos, comumente, adquirem velocidades médias a altas e são

desencadeados pelo excesso de água presente entre as partículas, o que causa a perda de seu atrito interno.

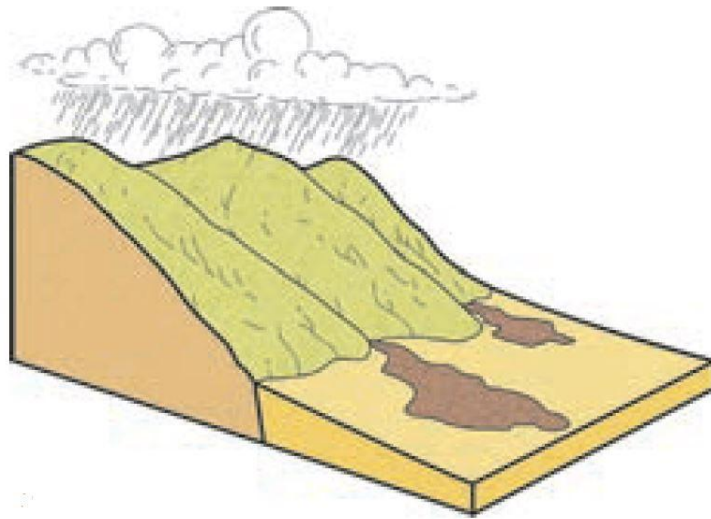


Figura 11. Bloco-diagrama de uma Corrida (LOPES, 2006).

Podem ocorrer ao longo de drenagens, em áreas montanhosas ou em áreas menos inclinadas e atingir grandes distâncias causando desastres maiores que os escorregamentos (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; FERNANDES e AMARAL, 1996; LOPES, 2006).

Segundo Wicander e Monroe (2009), são subdivididos em:

- a) fluxos de lama: Constituem-se de uma mistura hidratada de silte e argila e são as corridas mais fluidas e mais rápidas. Devido a esse caráter, tal tipo de corrida segue leitos preexistentes até que a declividade do talude diminua ou o leito se alargue. São comuns em ambientes áridos ou semiáridos, onde os regolitos são saturados por fortes aguaceiros, o que causa corridas de alto poder destrutivo;
- b) fluxos de detritos: Em comparação ao fluxo anterior, suas partículas, sua viscosidade e seu poder destrutivo são maiores, no entanto, seu conteúdo de água e sua velocidade são menores.

Diferentemente do fluxo de lama, esse tipo de fluxo raramente está confinado por leitos preexistentes;

- c) fluxos de terra: Constituem-se de regolito hidratado e adquirem as velocidades mais baixas de todos os fluxos e, assim como os fluxos anteriores, possuem dimensões variadas.

São desencadeados por escorregamentos em topo de encostas, os quais criam escarpas que criam condições para o material residual fluir lentamente encosta abaixo como uma língua espessa e viscosa.

Ocorrem comumente em climas úmidos onde os solos de encostas gramadas são encharcados por chuvas torrenciais.

2.1.2 Condicionantes Geológicos

Dentre todos os fatores condicionantes dos movimentos de massa, os geológicos são os mais importantes no processo de instabilização de uma encosta (WOLLE, 1988) e correspondem, segundo Bigarella *et al.* (2003) à:

2.1.2.1 Aspectos litológicos

Segundo Guidicini e Nieble (1983), Pinto *et al.* (2013), Lopes *et al.* (2006), Porto Jr (2012) e Vanacôr (2006), mineralogia, textura, granulometria, grau de alteração, porosidade, índice de vazios, permeabilidade, material cimentante, anisotropia (bandamentos e estratificações) e feições e efeitos associados ao intemperismo afetam de forma significativa a resistência ao cisalhamento das rochas e solos, criando, portanto, condições para a sua ruptura e sua movimentação talude a baixo

A mineralogia da rocha constituinte do talude é um aspecto a ser considerado nos movimentos de massa pois determinam a suscetibilidade da rocha ao intemperismo. Desse modo, as rochas básicas são mais suscetíveis do que as rochas quartzosas devido à presença de minerais mais instáveis quimicamente do que o quartzo em condições expostas aos agentes intempéricos (RECKZIEGEL, 2012).

Segundo Vanacôr (2006) e Reckziegel (2012), são exemplos de feições e efeitos associados ao intemperismo: Presença de minerais oxidados (Figura 12) e expansivos; desintegração de rochas granulares; microfraturas dos minerais constituintes da rocha devido à atuação do intemperismo físico (Figura 12); hidratação de argilominerais; e dissolução de minerais cimentados em rocha ou solo. Grandes proporções dessas características em uma rocha resultam em baixas intensidades de suas ligações intergranulares e, por consequência, em baixos valores de coesão, criando condições para uma posterior ruptura. Tal proporção pode ser quantificada através do Índice Micropetrográfico (I_p) de Irfan e Dearman (1978) que serve como base para a verificação do grau de alteração da Rocha e que está mais detalhado na seção 2.3.1.

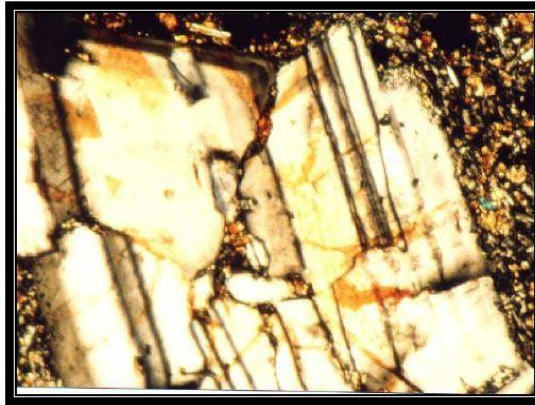


Figura 12. Fotomicrografia de um cristal de Plagioclásio com microfraturas fraturas preenchidas por óxidos e hidróxidos de ferro (LIMA, 2001).

2.1.2.2 *Padrões de descontinuidades*

Desempenham papel importante na infiltração e na circulação das águas subterrâneas e, conseqüentemente, na intemperização das rochas, a qual é mais rápida e profunda onde o sistema de descontinuidades é mais concentrado. Além disso, tal concentração, juntamente ao mergulho das descontinuidades para fora do talude, acentuam os movimentos de massa (BIGARELLA *et al.*, 2003).

Segundo Hoek e Bray (1981), as inclinações das descontinuidades desempenham um papel mais importante na desestabilização de um talude do que sua própria altura. Esse fato é ilustrado pela Figura 13, na qual a altura crítica de um talude vertical, em condições secas e saturadas, diminui de 80m com descontinuidades verticais e horizontais para 20m com descontinuidades com inclinação de 40° a 70° .

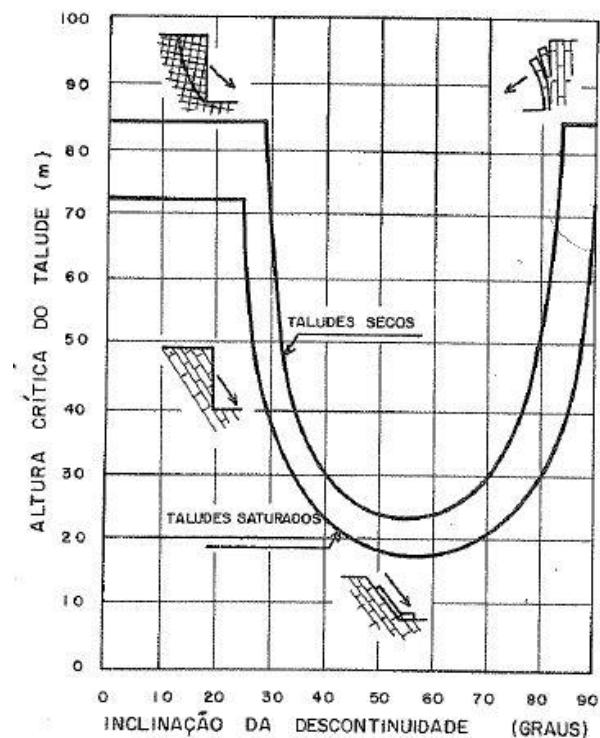


Figura 13. Variação da altura crítica de um talude conforme se varia a inclinação das descontinuidades. (HOEK e BRAY, 1981)

Tais descontinuidades podem ser: fraturas, falhas, xistosidades, dobramentos, estratificações ou contato solo-rocha.

As fraturas podem ser: herdadas de esforços pretéritos causados pelo tectonismo, consistindo principalmente de uma combinação de planos verticais, oblíquos ou horizontais; ou desenvolvidas com o progresso de denudação regional, consistindo em fraturas concêntricas que seguem a morfologia dos taludes. A combinação de dessas descontinuidades podem originar lascas de rochas com até centenas de metros cúbicos de volume que, quando expostas a ação da gravidade e da água subterrânea, são removidas e originam movimentos de massa (BIGARELLA *et al.*, 2003;).

As falhas geralmente apresentam características de fundamental importância na criação de condições para ocorrência de movimentos de massa. Algumas dessas características são: grande continuidade, influenciando grandes massas; baixa ou nenhuma coesão, a qual depende do material de preenchimento; e presença de algumas irregularidades de superfície. No entanto, dependendo de seu material de preenchimento, as falhas podem ocorrer como camadas impermeáveis, dificultando a intemperização de águas subterrâneas (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

O contato solo-rocha, por sua vez, apresenta menores resistências ao cisalhamento em superfícies lisas e regulares. Essa característica prevalece sobre as características litológicas de tal contato (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Seja qual for o tipo de descontinuidade presente em um talude, é possível verificar seu papel como condicionante ou não de um movimento de massa ao comparar, em um estereograma, a posição de seu polo com a projeção do cone de atrito do material presente entre tais descontinuidades, procedimento que está mais detalhado na seção 2.2.1.

2.1.2.3 Coesão do material formador do talude

A coesão de um maciço terroso ou rochoso é sua resistência ao cisalhamento inicial ao aplicar-se uma certa tensão cisalhante em condições de tensão normal igual a zero. Essa resistência é diretamente proporcional à intensidade de ligações intergranulares e grau de cimentação do material formador do talude (GUIDICINI e NIEBLE, 1983). Logo, a ruptura de materiais com fracas ligações intergranulares ou baixo grau de cimentação tende a ocorrer mais facilmente do que em materiais com altos valores de tais aspectos.

A coesão, bem como o ângulo de atrito interno, considerados na análise de estabilidade de um talude rochoso são muitas vezes atribuídos à natureza do solo que preenche as descontinuidades presentes nesse talude e a rugosidade dessas descontinuidades (FIORI e CARMIGNANI, 2009). Portanto, em tal análise, é necessária uma atenção às condições em que se encontram as descontinuidades e, quando preenchidas, a identificação do tipo de solo presente. Tais cuidados são suficientes para a inserção de valores corretos de parâmetros de resistência ao cisalhamento no cálculo do Fator de Segurança do talude, o qual é diretamente proporcional ao valor da coesão do solo presente nas descontinuidades e pode ser calculado considerando somente esse parâmetro, permitindo a verificação do papel da coesão como condicionante ou não de um movimento de massa. Esse cálculo está mais detalhado na seção 2.2.2.

2.1.2.4 Peso específico do material formador do talude

Segundo Fiori e Carmignani (2009), existem quatro tipos de pesos específicos:

- a) peso específico natural (γ_{nat}): Corresponde à razão entre o peso (P) da amostra do material com certo conteúdo de água entre seus grãos ou cristais e o seu volume (V) (equação 1). Tal valor representa as condições de campo do material constituinte de

um talude parcialmente saturado e é necessário para o cálculo de tensões normais e cisalhantes atuantes numa superfície potencial de escorregamento desse talude em condição parcialmente saturada .

$$\gamma_{\text{nat}} = \frac{P}{V} \quad (1)$$

- b) peso específico saturado (γ_{sat}): Corresponde à razão entre o peso total (peso de sólidos + peso de água) e o volume (volume de sólidos + volume de água) de uma amostra após ter seus vazios completamente preenchidos com água. É necessário para o cálculo de tensões normais e cisalhantes atuante em uma superfície potencial de escorregamento de um talude em condições saturadas.
- c) peso específico seco: Corresponde à razão entre o peso de sólidos e o volume total da amostra, a qual só é pesada após ser secada por uma estufa.
- d) peso específico submerso (γ_{sub}) : Corresponde ao peso específico de um material submerso em água e submetido ao empuxo de Arquimedes.

Os dois primeiros são fundamentais na análise de estabilidade de taludes devido à sua utilidade no cálculo de tensões atuantes nas superfícies potenciais de escorregamento de taludes tanto em condições saturadas quanto em condições não saturadas. Uma dessas tensões é a cisalhante (σ_s) que é a componente solicitante à ruptura do talude sobre a superfície potencial de escorregamento e cuja intensidade, dependendo da inclinação de tal superfície, é diretamente proporcional ao peso específico do maciço acima.

A comparação, em um gráfico de tensão normal x tensão cisalhante, dos valores das tensões mencionadas acima com a envoltória de ruptura do material presente na superfície potencial de escorregamento, permite a verificação do papel do peso específico do maciço acima dessa superfície como condicionante ou não de um movimento de massa. Esse procedimento está mais detalhado na seção 2.2.4.

2.1.2.5 Circulação de águas subterrâneas

Segundo Guidicini e Nieble (1983), a infiltração de água em taludes pode ocorrer de duas formas: em poros de massas homogêneas, representadas principalmente por solos e sedimentos; ou em discontinuidades de maciços rochosos representadas por juntas, diáclases e planos de fraqueza que separam blocos rochosos de baixa permeabilidade intrínseca. No primeiro caso a infiltração causa aumento uniforme e de baixa magnitude nos níveis piezométricos do solo enquanto que no segundo os níveis piezométricos das discontinuidades

aumentam de maneira heterogênea e brusca, principalmente quando a drenagem é impedida (Figura 14). Porém, em ambos os casos a água age como uma força oposta à tensão normal (chamada de pressão neutra) aplicada pelo maciço em uma determinada superfície potencial de escorregamento, contribuindo, portanto, para a diminuição de sua resistência ao cisalhamento.

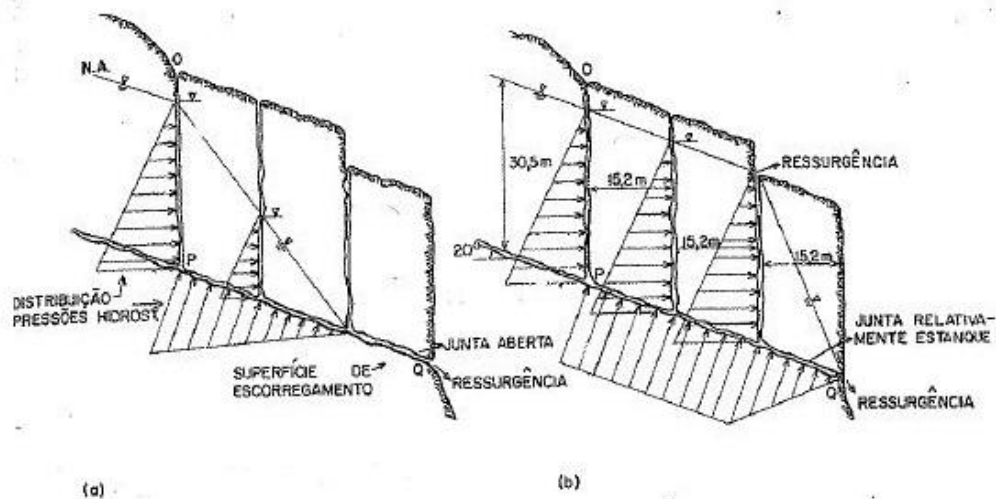


Figura 14. Distribuição das pressões neutras ao longo de descontinuidades rochosas: a) Em drenagens livres; b) Em drenagens parcialmente impedidas (Guidicini e Nieble, 1983 – modificado).

Tal contribuição para a instabilidade de um talude pode ser quantificada através do cálculo do Fator de Segurança considerando a pressão neutra atuante sob a superfície potencial de escorregamento, procedimento que é suficiente para consideração ou não da circulação das águas subterrâneas como condicionante geológico de um movimento de massa e que está mais detalhado na seção 2.2.2.

Além disso, segundo Wicander e Monroe (2009), a presença de água subterrânea, seja nos poros de taludes terrosos ou em descontinuidades de taludes rochosos preenchidas com solo, diminui o atrito interno e a coesão das partículas presentes no talude que acaba sofrendo uma diminuição de sua resistência ao cisalhamento. Os taludes que mais sofrem com esse efeito são aqueles que contêm solo argiloso, pois esse tipo de solo se caracteriza por reter grandes quantidades de água infiltrada, o que o faz se comportar como uma pasta escorregadia quando saturado.

A água também atua como solvente do material cimentante ou da argila que ligam os grãos minerais maiores de algumas rochas (FIORI e CARMIGNANI, 2009), o que pode diminuir significativamente suas coesões e, conseqüentemente, suas resistências ao cisalhamento.

2.1.2.6 Manto de Intemperismo

Segundo Bigarella *et al.* (2003) os perfis de manto de intemperismo variam de acordo com a inclinação do talude: Taludes pouco íngremes apresentam, geralmente, mantos de intemperismo que evoluem gradativamente de rocha fresca para elúvio e desse para colúvio; enquanto que, em taludes bastante íngremes, geralmente há um contato abrupto entre rocha fresca e colúvio, produzindo maiores planos de cisalhamento do talude. Contudo, o contato entre solo e rocha alterada também está relacionado com as ocorrências de movimentos de massa, fato que inclui mantos de intemperismo de taludes pouco íngremes. Tais contatos, ao apresentarem conteúdo significativo de argila, aumentam ainda mais a instabilidade das encostas devido à perda do atrito interno desse tipo de sedimento ao ser saturado pela água subterrânea, a qual acaba “lubrificando” os planos de cisalhamento definidos pelos contatos.

Além disso, segundo Bigarella *et al.* (1996) e Fernandes e Amaral (2000), outras características do manto de intemperismo tais como porosidade, permeabilidade e estruturas reliquias do embasamento rochoso criam condições para a infiltração, absorção e atuação da pressão neutra da água subterrânea no interior do talude, o qual tem sua estabilidade reduzida devido a tal processo.

2.2 MECÂNICA DAS ROCHAS

A mecânica das rochas é um ramo da Geomecânica que estuda as propriedades mecânicas e o comportamento mecânico das rochas intactas e de suas discontinuidades tais como fraturas, planos de acamamento, juntas, falhas e zonas de cisalhamento. Tal ciência é útil para prever o comportamento mecânico de maciços rochosos diante de obras de Engenharia de Minas e de Engenharia Civil. Esses tipos de obras, se forem desenvolvidas perto da superfície, tem sua estabilidade controlada geralmente pelo comportamento das discontinuidades dos maciços rochosos, enquanto que em profundidades elevadas, sua estabilidade é controlada, comumente, pelo comportamento das rochas intactas (HUDSON e HARRISON, 2007).

A seguir serão apresentados tópicos relacionados a essa área de conhecimento:

2.2.1 Projeção do Cone de Atrito

Segundo Wyllie e Mah (2005), a representação de um cone de atrito em um estereograma consiste na projeção de um cone que envolve o vetor peso de um maciço rochoso e que possui raio de base definido pelo valor do ângulo de atrito interno (ϕ) (Figura 15) do material presente entre as descontinuidades desse maciço. Esse método é uma maneira simples e prática de analisar a condição de estabilidade de um determinado plano de descontinuidade considerando somente o atrito interno do material que o preenche. Para analisar tal condição, basta inserir o polo do vetor normal ao plano da descontinuidade no estereograma e verificar se o mesmo encontra-se dentro da projeção do cone de atrito, resultando em uma condição estável do maciço acima do plano, ou fora da projeção, resultando em uma condição instável do maciço.

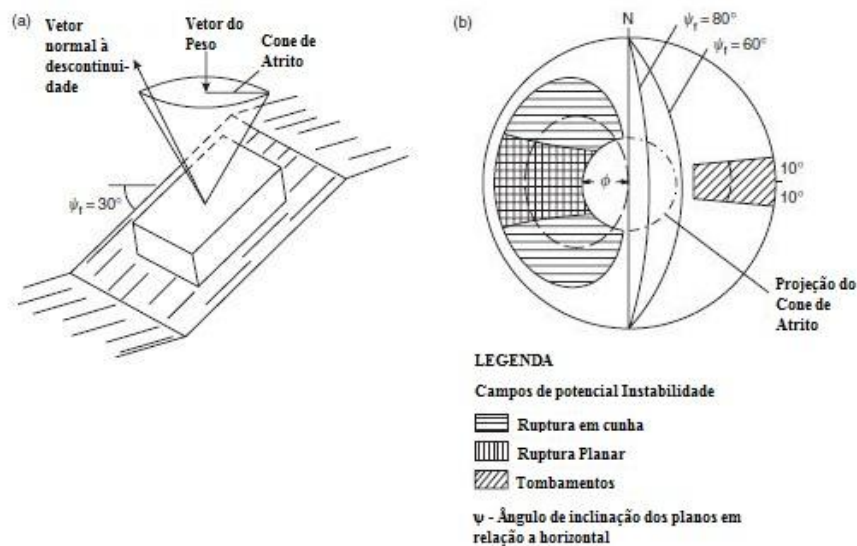


Figura 15. a) Representação gráfica do Cone de Atrito em um plano inclinado; b) Projeção do cone de atrito em um estereograma (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).

2.2.2 Cálculo do fator de segurança de uma cunha rochosa considerando-se a coesão e a pressão neutra

Para o cálculo do Fator de Segurança (FS) de uma cunha rochosa considerando-se a coesão do material de preenchimento das descontinuidades que definem os planos delimitadores da cunha e a pressão neutra exercida pela circulação de água subterrânea sob essas descontinuidades, é necessária a definição de parâmetros geométricos, físicos e de

resistência ao cisalhamento da cunha e de suas discontinuidades para inseri-los, juntamente ao valor do peso específico da água, na equação do FS.

Os parâmetros geométricos estão representados pela Figura 16, onde são definidos: os planos A e B, delimitadores da cunha; as linhas de intersecção entre tais planos; e as linhas de intersecção desses planos com a face e o topo do talude (Figura 16- a). Além disso, está representada a altura da cunha (H) considerada na equação e a distribuição da pressão neutra aplicada pela água subterrânea ao longo da linha de intersecção 5 (Figura 16- b).

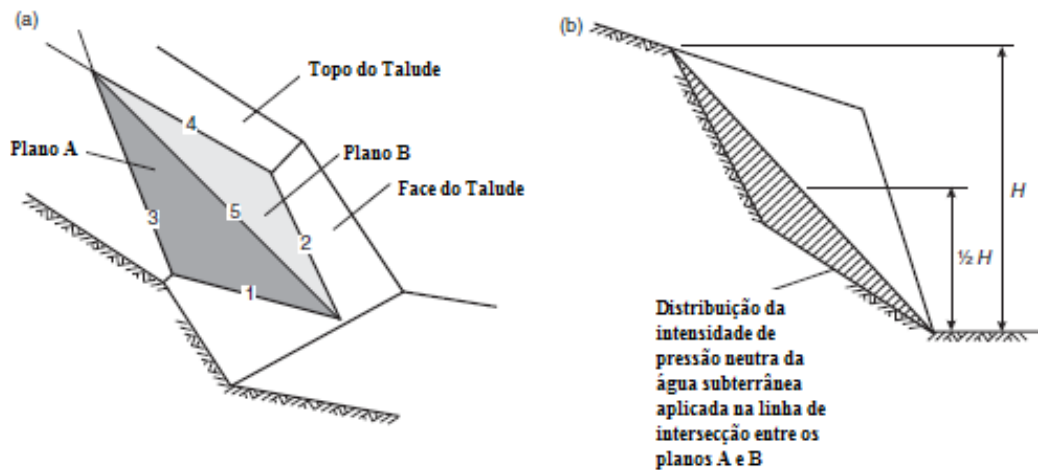


Figura 16. Parâmetros Geométricos de uma Cunha Rochosa para o cálculo do Fator de Segurança: a) Linhas de intersecção: 1- Entre o plano A e a face do talude; 2- Entre o plano B e a face do talude; 3- Entre o plano A e o topo do talude; 4- Entre o plano B e o topo do talude; 5- Entre o plano A e B. b) Altura da cunha (H) considerada no cálculo do Fator de Segurança, definida pelo início e fim da linha de intersecção 5, e distribuição da intensidade da pressão neutra na linha de intersecção 5 (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).

Para facilitar o cálculo de outros parâmetros do Fator de Segurança, os planos e as linhas de intersecção definidos na Figura 16 são inseridos em um estereograma conforme a Figura 17, onde são inseridos também os polos dos planos A (N_a) e B (N_b) e calculados os ângulos (θ) entre esses polos e os polos das linhas de intersecção que também tem ângulos entre si calculados:

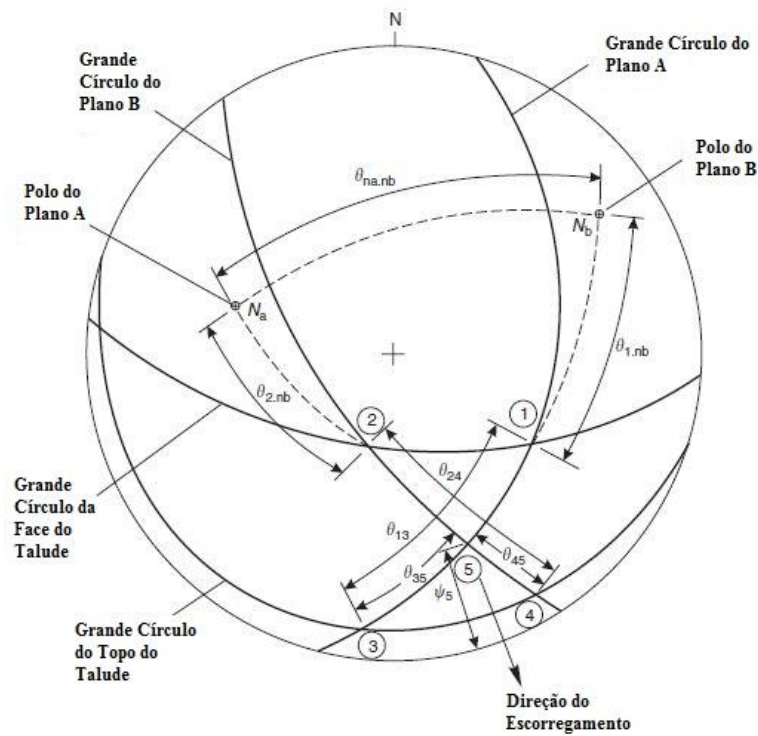


Figura 17. Grandes Círculos dos Planos A e B e seus polos N_a e N_b ; grandes círculos dos plano da Face e do Topo do Talude; pontos de intersecção 1, 2, 3, 4 e 5 definidos na Figura 16; e ângulos: $\theta_{na,nb}$ – Entre os polos N_a e N_b ; θ_{1nb} – Entre a intersecção 1 e N_b ; θ_{13} – Entre as intersecções 1 e 3; θ_{2na} – Entre a intersecção 2 e N_a ; θ_{24} – Entre as intersecções 2 e 4; θ_{35} – Entre as intersecções 3 e 5; θ_{45} – Entre as intersecções 4 e 5; ψ_5 – Da intersecção 5 (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).

Utilizando os parâmetros geométricos definidos na Figura 17, são definidas as equações dos parâmetros X (equação 2), Y (equação 3), A (equação 4) e B (equação 5), que foram extraídas de Wyllie e Mah (2005):

$$X = \frac{\text{sen}\theta_{24}}{\text{sen}\theta_{45} \cdot \text{cos}\theta_{2na}} \quad (2)$$

$$Y = \frac{\text{sen}\theta_{13}}{\text{sen}\theta_{35} \cdot \text{cos}\theta_{1nb}} \quad (3)$$

$$A = \frac{\text{cos}\psi_5 - \text{cos}\theta_{na,nb} \cdot \text{cos}\theta_{na,nb}}{\text{sen}\psi_5 \cdot \text{sen}^2\theta_{na,nb}} \quad (4)$$

$$B = \frac{\text{cos}\psi_5 - \text{cos}\theta_{na,nb} \cdot \text{cos}\theta_{na,nb}}{\text{sen}\psi_5 \cdot \text{sen}^2\theta_{na,nb}} \quad (5)$$

Finalmente, utilizando-se os parâmetros definidos pelas equações 2, 3, 4 e 5, calcula-se o Fator de Segurança (FS) da Cunha Rochosa conforme a equação 6, extraída de Wyllie e Mah (2005):

$$FS = \frac{3}{H \cdot \gamma_{nat}} \cdot (c_A \cdot X + c_b \cdot Y) + \left(A - \frac{\gamma W}{2 \cdot \gamma_{nat}} \cdot X \right) \cdot \tan\phi_A + \left(B - \frac{\gamma W}{2 \cdot \gamma_{nat}} \cdot Y \right) \cdot \tan\phi_B \quad (6)$$

Onde c_A e c_b são as coesões dos solos presentes, respectivamente, sobre os planos A e B; γ_w é o peso específico da água; ϕ_A e ϕ_B são os ângulos de atrito internos dos solos presente sobre os planos A e B, respectivamente.

Conforme o valor de FS obtido for menor ou maior que 1,5, a cunha analisada pode, respectivamente, estar ou não na eminência de um escorregamento.

2.2.3 Cálculo das tensões atuantes em um plano inclinado com percolação de água pelo método de Culmann (1875).

Para calcular as tensões atuantes em um plano inclinado de um talude finito pelo método de Culmann, deve-se definir os parâmetros geométricos desse talude conforme a Figura 18, onde se tem: sua altura (H); o ângulo que tal plano faz com a horizontal (θ) e o ângulo que a face do talude faz com a horizontal (i):

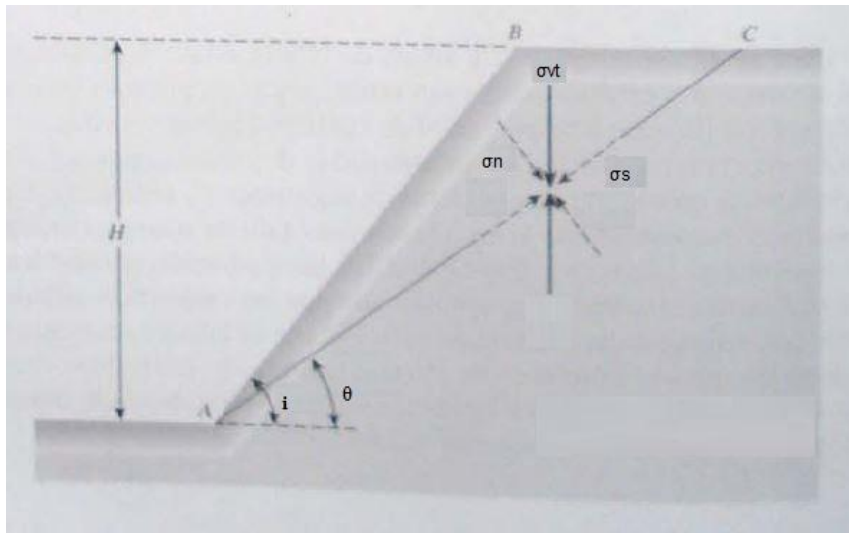


Figura 18. Altura do talude (H) definido como a distância vertical entre a intersecção do plano analisado com a face do talude (ponto A) e o topo do talude (ponto B); Ângulo de inclinação da face do talude (i) e Ângulo que o plano analisado faz com a horizontal (θ); Tensão vertical total (σ_{vt}), tensão normal (σ_n) e tensão cisalhante (σ_s) atuantes no plano analisado (Das, 2007 - modificado).

Ainda na Figura 18, encontra-se ilustrada a atuação da tensão vertical total (σ_{vt}) atuante no plano analisado. Tal tensão, existe devido à atuação do peso total do maciço rochoso ou terroso nesse plano e é definida pela equação 7, a qual considera a percolação de água subterrânea e foi extraída de Fiori e Carmignani (2009):

$$\sigma_{vt} = \frac{\gamma_{sat} \cdot H \cdot \cos \alpha \cdot \sin(i - \theta)}{2} \quad (7)$$

A Figura 18 também ilustra a atuação de outras duas tensões derivadas de σ_{vt} : As tensões normal (σ_n) e cisalhante (σ_s) ao plano, definidas, respectivamente, pelas equações 8 e 9, extraídas de Fiori e Carmignani (2009):

$$\sigma_n = \sigma_{vt} \cdot \cos \theta \quad (8)$$

$$\sigma_s = \sigma_{vt} \cdot \sin \theta \quad (9)$$

2.2.4 Critério de ruptura Mohr-Coulomb

Esse critério combina a teoria de Mohr (1900) de que tensão de cisalhamento necessária para romper um material, chamada de resistência ao cisalhamento (τ), pode ser expressa como uma função da tensão normal e a teoria de Coulomb (1776) de que essa função pode ser expressa como uma função linear representada pela equação 10:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (10)$$

Onde c e ϕ são, respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito interno do material. Tal função é também chamada de “envoltória de ruptura” e está representada graficamente na Figura 19, onde o ponto A está localizado em um plano do talude onde não há possibilidade de ruptura, enquanto que o ponto B está num plano onde a ruptura certamente ocorrerá e o ponto C numa posição inexistente dentro do talude pois a ruptura já ocorreu:

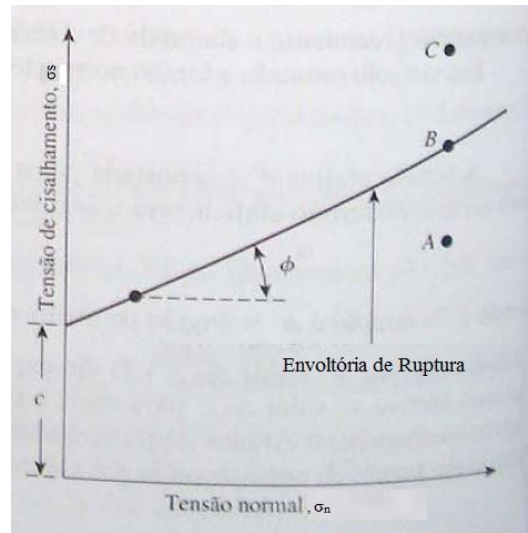


Figura 19. Envoltória de Ruptura e os pontos: A – Localizado em um plano do talude onde não há possibilidade de ruptura; B – Localizado em um plano do talude onde a ruptura certamente ocorrerá e o ponto C – Localizado em uma posição inexistente do talude (Das, 2007 - modificado).

2.3 PETROGRAFIA

É uma ferramenta da Petrologia que, segundo Maciel Filho e Nummer (2014), consiste na descrição das principais propriedades macroscópicas e microscópicas de uma Rocha, tais como: Composição mineralógica, estrutura, textura, presença de microfraturas e propriedades físico-mecânicas que possam ser determinadas facilmente. Esses aspectos servem de base para a classificação petrográfica e para o cálculo do Índice Micropetrográfico da rocha analisada que, por sua vez, é utilizado para atribuir seu Grau de Alteração.

2.3.1 Índice micropetrográfico (I_p)

Esse índice foi proposto por Irfan e Dearman (1978) para avaliar o grau de alteração das Rochas e foi definido como a razão entre a porcentagem de constituintes sãos pela porcentagem de constituintes de alteração da rocha (equação 11), onde os constituintes sãos correspondem a minerais primários inalterados e os constituintes de alteração correspondem à minerais secundários (tais como argilominerais, Sericita, Clorita e Óxidos de ferro), microfraturas e vazios presentes na rocha.

$$I_p = \frac{\% \text{ Constituintes Sãos}}{\% \text{ Constituintes de Alteração}} \quad (11)$$

2.3.2 Grau de Alteração de Irfan e Dearman (1978)

Após proporem o índice micropetrográfico, Irfan e Dearman definiram intervalos de valores de I_p para 5 graus de alteração de uma rocha: W_0 (rocha fresca), W_1 (rocha levemente alterada), W_2 (rocha moderadamente alterada), W_3 (rocha muito alterada), W_4 (rocha completamente alterada). Os graus de alteração de Granitos, Basaltos e Quartzitos com seus respectivos intervalos de I_p estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Intervalos de I_p para os graus de alteração de Basaltos, Granitos e Quartzitos.

Tipo de Rocha	Grau de Alteração	Intervalo de I_p
Basaltos	W_0	49,5 - 4,82
	W_1	4,81 - 2,37
	W_3	2,36 - 0,73
	W_4	0,72 - 0,01
Granitos	W_0	49,5 - 4,85
	W_1	4,84 - 2,65
	W_2	2,64 - 0,80
	W_4	0,79 - 0,01
Quartzitos	W_0	165,66 - 90
	W_1	89,9 - 18,61
	W_2	18,6 - 9,42
	W_3	9,41 - 2,9
	W_4	2,89 - 0,01

Adaptado de Gupta (1999).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A fim de contextualizar geologicamente a Área de Estudo deste trabalho, esta seção apresenta a Geologia Regional da porção oeste do município de Lauro Muller.

Em seguida, apresenta-se sua Geologia Local, detalhando seus aspectos litológicos, estruturais e hidrogeológicos em uma maior escala.

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo deste trabalho insere-se na Bacia do Paraná, que corresponde a uma Sinéclise constituída de um pacote sedimentar-magmático de perfil ovalado com eixo maior N-S e que abrange a maior parte da região sul, sudeste e centro-oeste brasileira, porções do leste do Paraguai, nordeste da Argentina e norte do Uruguai (Figura 20), totalizando uma área de aproximadamente 1,5 milhões de quilômetros quadrados (MILANI *et al.*, 2007).

Seu registro estratigráfico tem espessura máxima de 7 mil metros, a qual coincide com a calha do Rio Paraná e divide-se em seis supersequências: quatro representando sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivos – regressivos relacionados às oscilações do nível relativo do mar no Paleozoico - Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico); e duas representando pacotes de sedimentitos continentais associados à rochas ígneas - Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). Ambas têm intervalos temporais de dezenas de milhões de anos e são encerradas por discordâncias de caráter inter-regional (MILANI *et al.*, 2007).

A supersequência em que se situa a Área de Estudo deste trabalho corresponde à Supersequência Gondwana III (Figura 20), que é constituída pelo Grupo São Bento, cuja história evolutiva inicia-se com a deposição sedimentos eólicos do deserto de Botucatu e posterior formação dos arenitos da Formação Botucatu e encerra-se com os derrames basálticos decorrentes do vulcanismo fissural que afetou a Bacia durante o Mesozoico e sua posterior solidificação, dando origem às rochas básicas da Formação Serra Geral (MILANI *et al.*, 2007).

Por sua vez, a formação em que a Área de Estudo se encontra corresponde à Formação Serra Geral (Figura 20), a qual, segundo Milani *et al.* (2007) e Wildner *et al.* (2004), constitui-se de uma cobertura de derrames com até 2 mil metros de espessura que são alimentados por diques e sills (que acompanham as principais discontinuidades estruturais da

Bacia) e que recobrem três quartos da área da Bacia estendendo-se por toda região centro-sul do Brasil e sua fronteira com o Paraguai, Argentina e Uruguai. Tais derrames, diques e sills, em termos petrológicos, constituem-se predominantemente de Basaltos Toleíticos e Andesitos Basálticos e subordinadamente de Riolitos e Riodacitos.

Segundo Milani *et al.* (2007), em termos geoquímicos e geocronológicos respectivamente, os derrames se caracterizam por apresentar um aumento de conteúdo de TiO_2 de sul para norte da Bacia e por ter se originado de um magmatismo que durou entre 137 e 127 Ma.

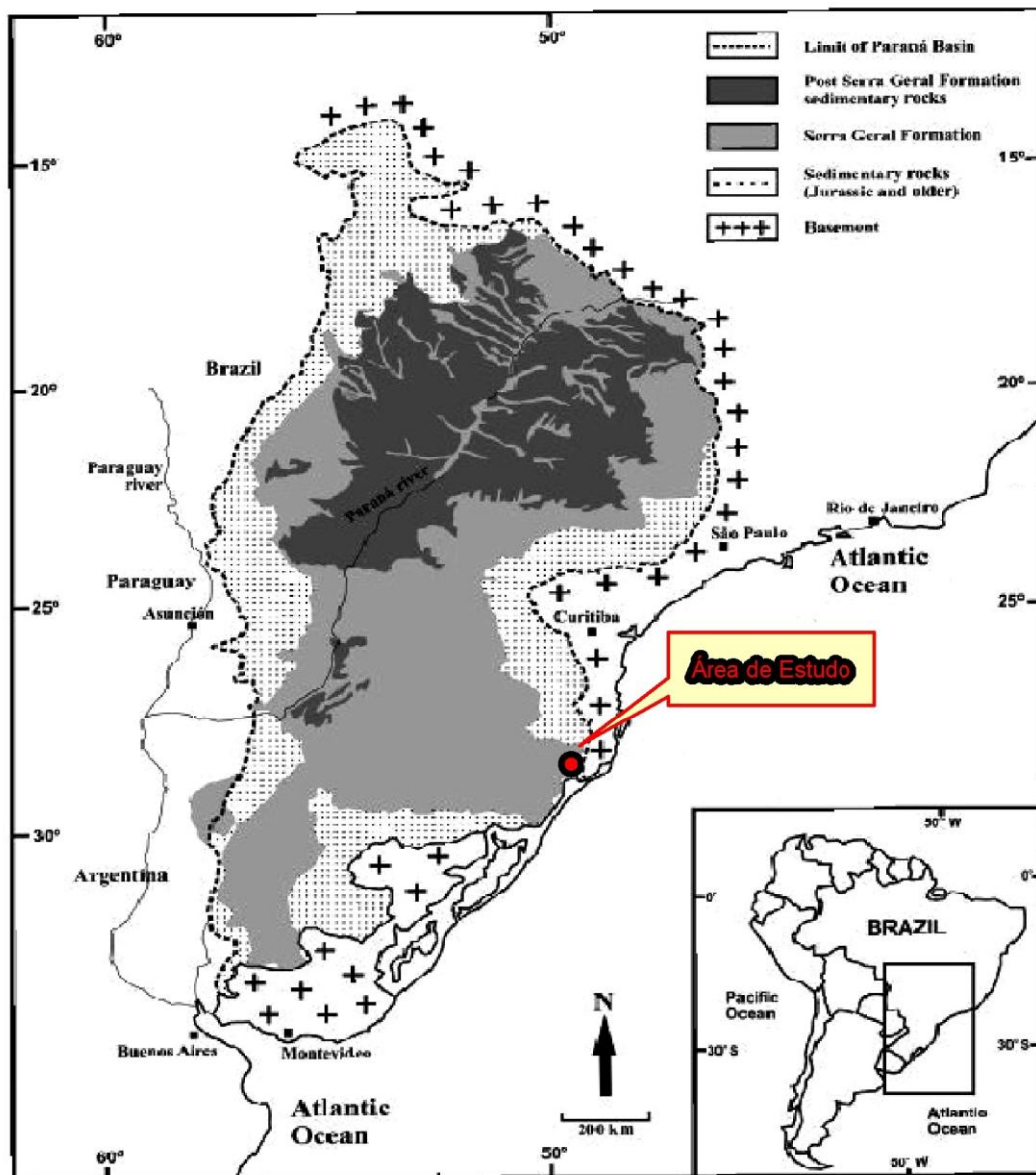


Figura 20. Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná com a distribuição da Formação Serra Geral e localização da Área de Estudo (Frank *et al.*, 2009 - modificado).

Variações texturais, composicionais, geocronológicas e de arranjo dos derrames e das rochas intrusivas levaram a divisão da Formação em nove fácies distintas: cinco relacionadas ao magmatismo máfico – Fácies Gramado, Fácies Paranapanema, Fácies Pitanga, Fácies Esmeralda, Fácies Campo Erê e Fácies Lomba Grande; e quatro relacionadas ao magmatismo intermediário a félsico – Fácies Palmas, Fácies Chapecó, Fácies Varzea do Cedro e Fácies Alegrete (WILDNER *et al.*, 2004).

3.2 GEOLOGIA LOCAL

Nesta seção, são abordados aspectos litológicos, estruturais e hidrogeológicos da área de estudo em uma maior escala a fim de caracterizar a área de estudo de uma maneira mais detalhada.

3.2.1 Aspectos Litológicos

A unidade geológica sobre a qual a Área de Estudo se localiza é a Fácies Gramado da Formação Serra Geral (Figura 21) que, segundo Wildner (2004), correspondem a derrames vulcânicos com espessuras de até 350 metros e expressões laterais pequenas, que afloram principalmente nas bordas Sul e Sudeste da Bacia e são constituídos de Rochas Máficas de Baixo Titânio que geralmente apresentam: geometrias aproximadamente tabulares; granulação fina a média; texturas afaníticas ou microfaneríticas a Plagioclásio; arranjo de cristais de plagioclásio euédricos aos quais somam-se o par de clinopiroxênios Augita-Pigeonita (Figura 22) e quantidades esporádicas de Olivinas; espaço entre cristais preenchido por Vidro ou por cristálitos de Plagioclásio e Quartzo; Óxidos de Titânio e Ferro, Apatita e Quartzo como minerais acessórios; quando intemperizadas, solo argiloso castanho-avermelhado.

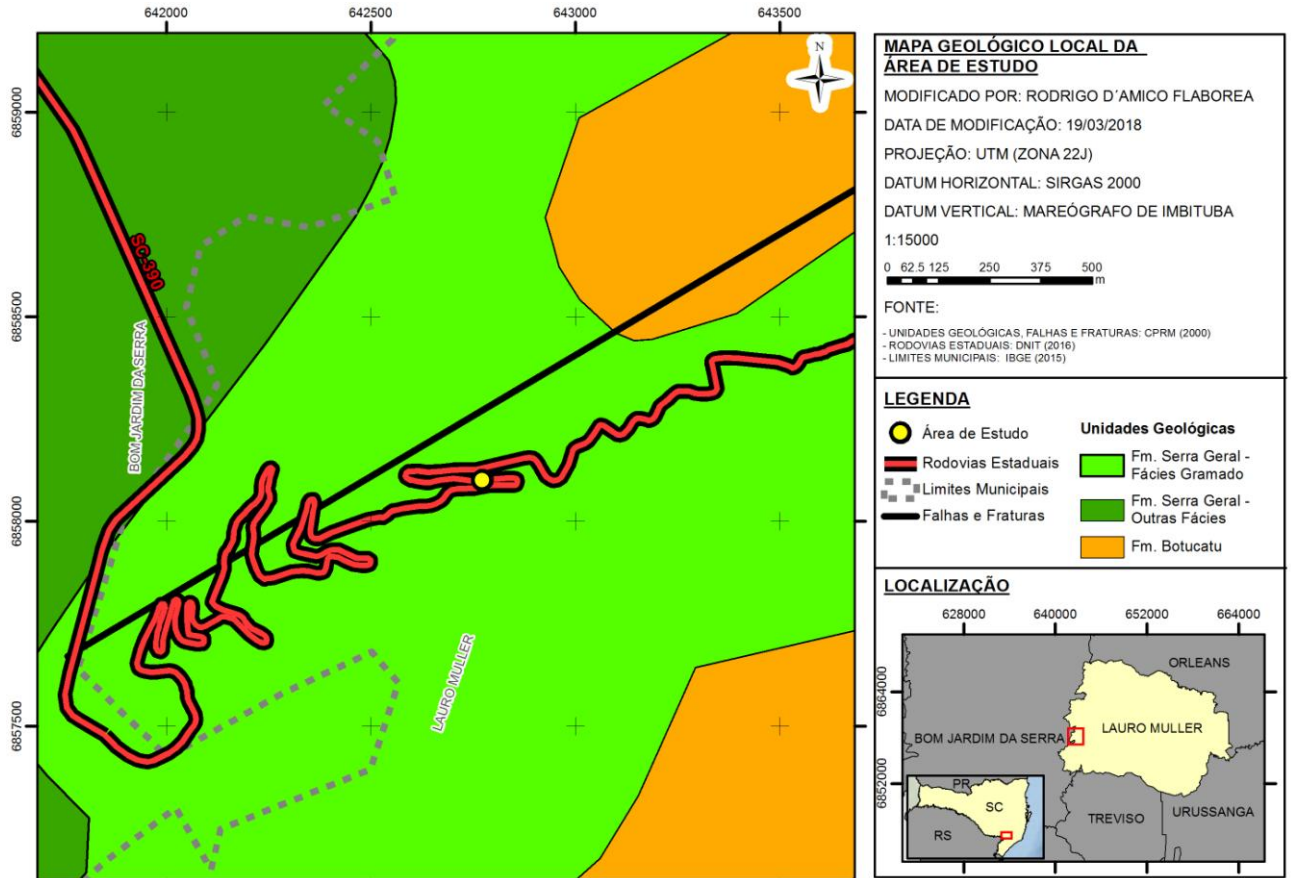


Figura 21. Mapa Geológico Local da Área de Estudo. Modificado por: FLABOREA, 2018.

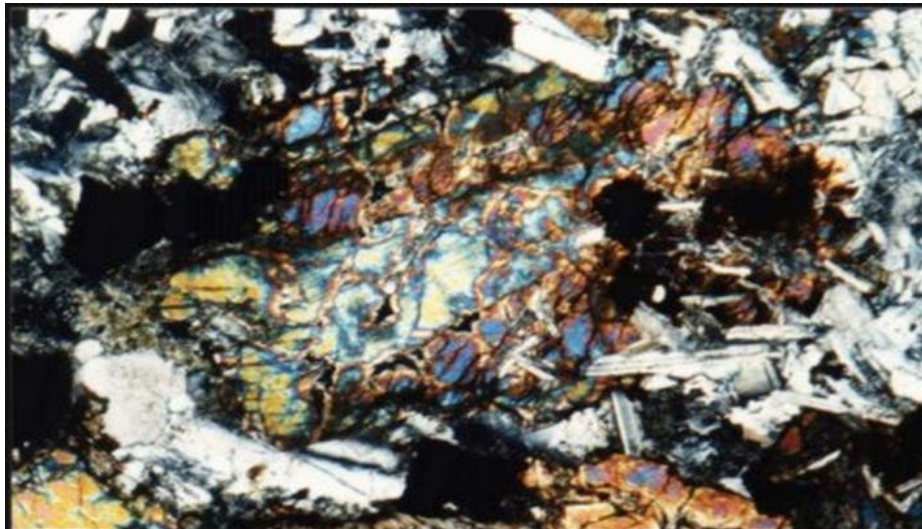


Figura 22. Fotomicrografia de uma amostra da fácies gramado, onde identifica-se o par augita-pigeonita, característico dos basaltos baixo titânio (WILDNER *et al.*, 2004).

Numa análise mais detalhada, Wildner (2004) registrou que a coluna estratigráfica de tais derrames compõe-se: Na base, de texturas de fluxo frequentes e zonas amigdaloides incipientes, normalmente do tipo *pipe*, que são preenchidas por Zeolitas, Carbonatos e

Saponitas e resultaram da rápida perda de calor da lava para o substrato; Na porção central, de estrutura maciça, coloração cinza-escuro a cinza-esverdeado, disjunções colunares irregulares (Figura 23) com contornos pseudo-hexagonais, granulação fina a média, textura microfanerítica e espessuras que representam de 60 a 70% da espessura dos derrames; No topo, de texturas, estruturas e preenchimento das amígdalas similares às rochas da base, apresentando, no entanto, amígdalas bem desenvolvidas que resultaram do trapeamento, na superfície da lava, de voláteis exsolvidos a partir do espaçamento da lava.



Figura 23. Disjunções colunares envergadas de uma frente de derrame da Fácies Gramado (WILDNER *et al.*, 2004).

3.2.2 Aspectos Estruturais

Segundo o Levantamento Geológico Básico da Folha Criciúma feito pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM no ano de 2000, a área de estudo está inserida em um contexto tectônico onde a deformação dútil foi dominante e condicionaram linhas estruturais que são contínuas desde o embasamento até as coberturas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná. Tais coberturas ocorrem geralmente como camadas horizontais e raramente como camadas basculadas junto a zona de falhas. Essas falhas, por sua vez, são predominantemente de gravidade e obedecem a lineamentos com strikes NE-SW e NW-SE predominantes e E-W subordinados. Esses lineamentos resultam também das fraturas.

Em uma escala mais detalhada, Leinz (1949) observou nos derrames vulcânicos da SC-438, entre São Joaquim e Lauro Muller, disjunções horizontais na base, disjunções verticais no centro e disjunções verticais e horizontais no topo.

Já na escala da Área de Estudo, há registro, segundo a CPRM (2000), de um lineamento de fraturas definidas e não encobertas de strike NE-SW, o qual é ilustrado pela Figura 21.

3.2.3 Aspectos Hidrogeológicos

A Formação Serra Geral na Folha Cricúma do “Programa Levantamentos Geológicos Básicos” feito pela CPRM (2000), se enquadra no sistema “Coberturas impermeáveis sobre aquíferos do tipo fraturado” onde o armazenamento e a circulação de águas estão condicionados, respectivamente, à existência de fraturas abertas e de suas interligações. Tal sistema engloba aquíferos que ocorrem ora na forma livre, ora confinada cobertos por camadas impermeáveis de solos argilosos avermelhados (gerados pelo intemperismo da Fm. Serra Geral) com espessuras variáveis que, quando pequenas, facilitam a infiltração de precipitações pluviométricas sobre a rocha sã.

Suas condições topográficas são desfavoráveis ao armazenamento de águas subterrâneas e as principais fontes de captação de água são nascentes de rios, as quais apresentam vazões que variam de 2 a 3m³/h. Esses dados somados à outros dados hidrodinâmicos resultam em quantidade relativamente pequena devido à escassez de informações provindas de poços tubulares construídos na região. Contudo, a semelhança com basaltos de outras regiões com maior quantidade de dados hidrodinâmicos levam a crer que os aquíferos desse sistema possuem elevada anisotropia tridimensional e podem gerar pressões artesianas (CPRM, 2000).

Numa escala mais detalhada, observa-se no shapefile do Mapa Hidrogeológico do Brasil obtido do Geobank – CPRM que a área de estudo se encontra na “Unidade Fraturada de produtividade muito baixa, porém localmente baixa” (Figura 24) num polígono onde o grau de fraturamento é médio e a vazão é de 1 a 10m³/h.

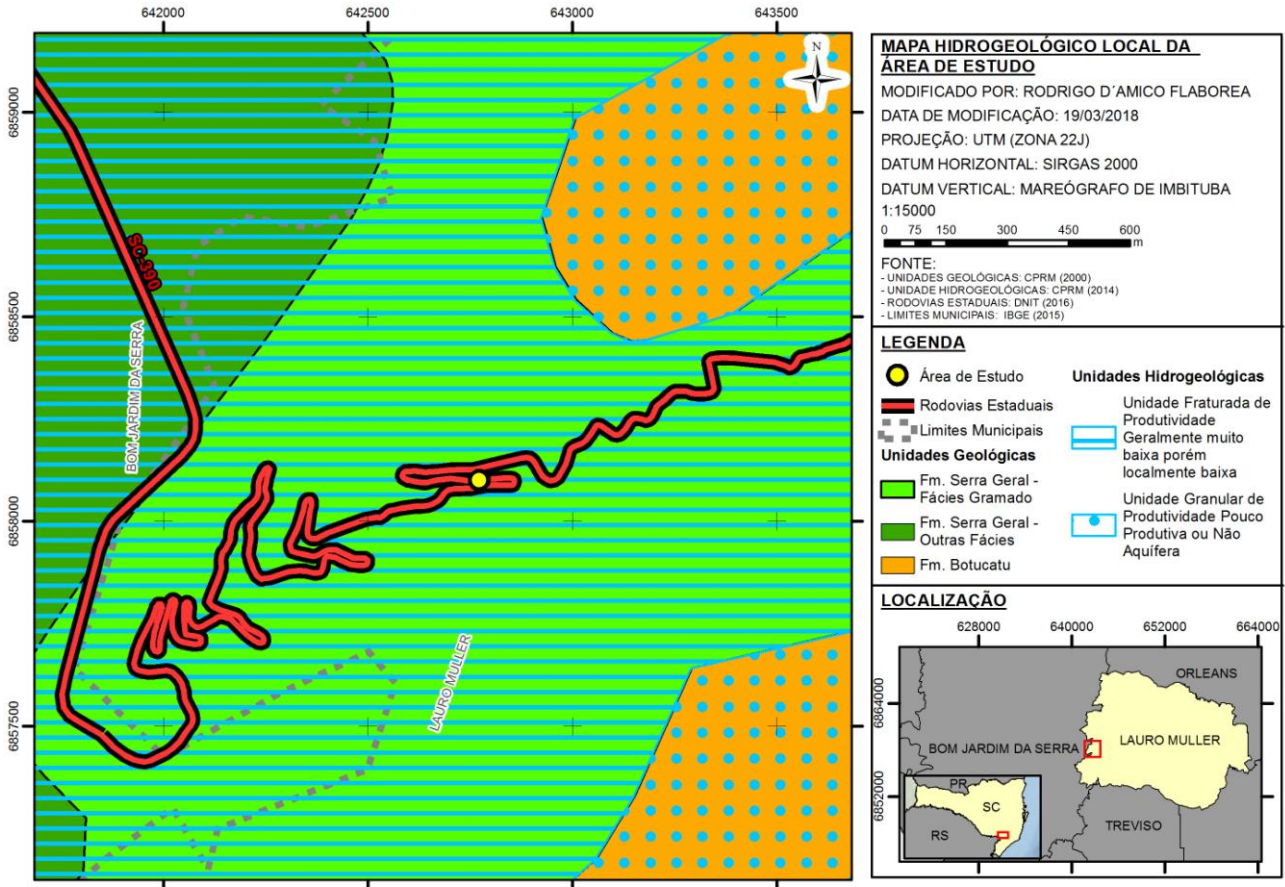


Figura 24. Mapa Hidrogeológico Local da Área de Estudo. Modificado por: FLABOREA, 2018.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de analisar os aspectos geológicos que podem ter atuado como condicionantes dos movimentos de massa ocorridos na área de estudo, adotou-se uma abordagem empírica fundamentada em levantamento de informações sobre o tema e a área de estudo, observações de campo, ensaios de laboratório, utilização de estereogramas e gráficos, cálculos geotécnicos, interpolação e inserção de dados em Sistema de Informações Geográficas - SIG e observações em microscópio petrográfico.

Os aspectos analisados foram: as atitudes das descontinuidades do talude da área de estudo, a coesão do solo presente nessas descontinuidades, a pressão neutra da água subterrânea sob a área de estudo, o peso específico do maciço rochoso acima dos planos de ruptura e o grau de alteração do tipo rochoso constituinte do talude. Tal análise teve a intenção de abordar quase que integralmente os condicionantes geológicos dos movimentos de massa listados por Bigarella *et al.* (2003), deixando de lado a análise do manto de intemperismo acima do talude estudado por ter pequena espessura (se comparada à altura do talude rochoso), indicando que sua influência não foi significativa nos movimentos de massa ocorridos em 2016

4.1 ETAPA PRÉ-CAMPO

Essa etapa do trabalho consistiu na análise integrada de dados espaciais em SIG e no levantamento bibliográfico a respeito do tema e da área de estudo, cujos materiais e métodos estão melhor detalhados a seguir:

4.1.1 Análise integrada e elaboração de mapas em SIG

Consistiu em:

- a) consulta em base de dados geográficos do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes - DNIT, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, da CPRM e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI;
- b) *download* de *shapefiles* de rodovias estaduais e limites municipais de SC, litologia e estruturas da Folha SH-22, unidades hidrogeológicas do Brasil e curvas de nível da Folha de Bom Jardim da Serra;

- c) análise integrada, utilizando o *software* Arc GIS 10.2, da localização, do contexto litológico, estrutural e hidrogeológico e das cotas altimétricas em que se insere a área de estudo;
- d) elaboração de mapas de localização, geológico e hidrogeológico para auxiliar na visualização desses dados.

Tal etapa serviu como passo inicial para o aprofundamento do conhecimento à respeito da área de estudo.

4.1.2 Levantamento bibliográfico

Consistiu no levantamento de: notícias relacionadas aos movimentos de massa ocorridos em 2016; conceitos relacionados à movimentos de massa e seus condicionantes geológicos, à estabilidade de taludes, à mecânica de rocha e à petrografia; e informações à respeito dos aspectos geológicos da área de estudo e seu entorno. Tais estudos tiveram como finalidade o esclarecimento à respeito da Área de Estudo, dos fatos e das áreas de conhecimento relacionados ao tema desse trabalho.

4.2 ETAPA DE CAMPO

Com o transporte fornecido pela Defesa Civil de Lauro Muller, o coordenador desse órgão, José Geraldo da Conceição, conduziu até o local onde ocorreram os Movimentos de Massa em dois dias seguidos. Tal intervalo foi suficiente para anotar, em caderneta de campo, os seguintes dados:

- a) coordenadas em projeção Universal Transversa de Mercator - UTM (em metros) e elevação do local utilizando GPS (marca Garmin, modelo e-Trex Vista CX);
- b) dados litológicos da área de estudo, utilizando lupa Intex com aumento de 20x;
- c) características geométricas e estruturais do talude são, tais como: Altura do talude, utilizando trena; Atitudes, em trama, da face e do topo do talude, bem como as atitudes de suas descontinuidades, utilizando bússola geológica modelo Brunton; e tipo de solo presente entre as descontinuidades.
- d) características geométricas e estruturais da superfície do talude rompido, tais como: atitudes dos planos de ruptura, utilizando a bússola; altura da cunha de ruptura e distância da base da cunha para o topo do talude, utilizando trena.

- e) outras feições da área de estudo, tais como as presentes na estrada acima do talude e as relacionadas à sua hidrografia.

Tais dados serviram de base para a análise em estereogramas, cálculos do Fator de Segurança, análises das tensões e análise petrográfica.

Após isso, foram coletados blocos de rocha da área de estudo que geraram três amostras, as quais foram guardadas em sacos plásticos e numeradas com caneta esferográfica. Tais amostras foram utilizadas nos ensaios de peso específico e na confecção de lâmina petrográfica.

4.3 ETAPA PÓS-CAMPO

Após a etapa de campo, utilizando os conceitos relacionados ao tema, as informações à respeito da área de estudo e os dados e as amostras coletadas em campo, finalmente realizou-se ensaios e confecção de lâmina petrográfica com tais amostras e análises desses dados, cujos materiais e métodos estão melhor detalhados a seguir:

4.3.1 Análise das descontinuidades do Talude São

As atitudes em trama dos três “sets” de descontinuidades presentes no talude são foram inseridas no software Stereonet versão 9.8 e, em seguida, calculou-se seus polos e os polos médios resultantes, cuja posição no gráfico foi comparada à projeção do cone de atrito do solo presente entre as descontinuidades conforme descrito por Wyllie e Mah (2005). Tal projeção foi feita utilizando o valor do ângulo de atrito interno atribuído ao tipo de solo encontrado em campo no diagrama de Resistência ao Cisalhamento de Descontinuidades Preenchidas (Figura 25) publicado por Wyllie e Mah (2005).

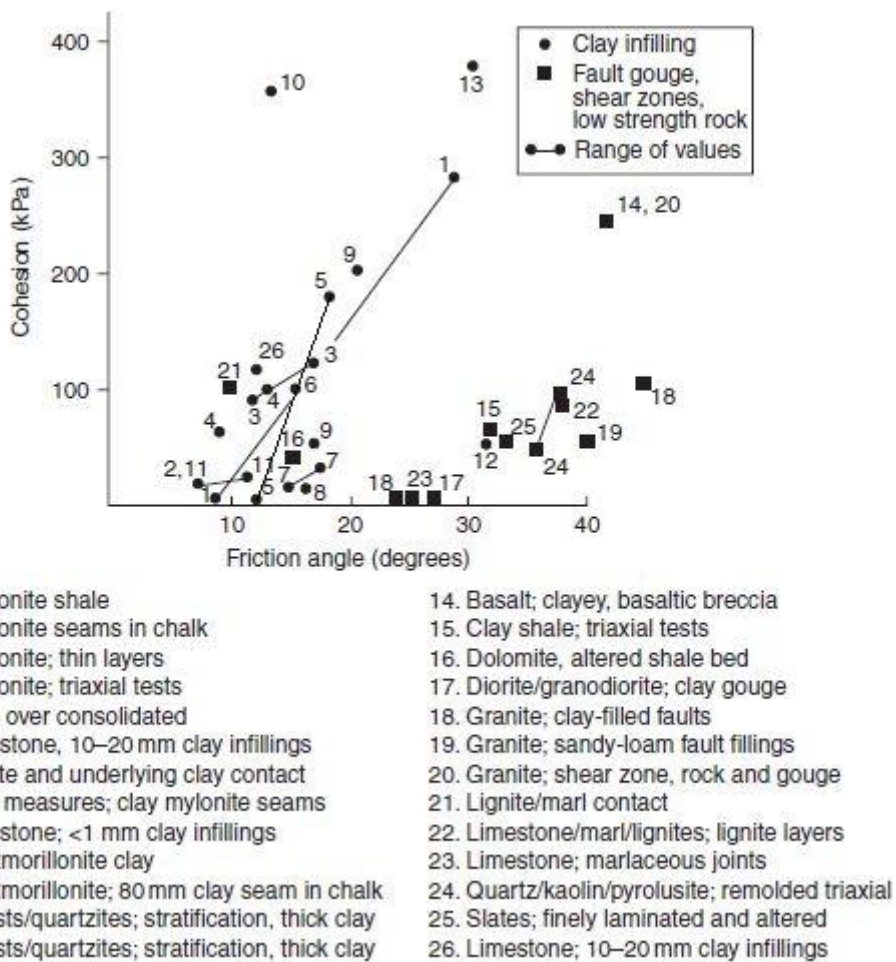


Figura 25. Diagrama de intervalos de valores de coesão e ângulo de atrito interno de descontinuidades preenchidas (Wyllie e Mah, 2005 - modificado).

Conforme os polos médios dos três *sets* de descontinuidades se situarem fora ou dentro da projeção do cone de atrito, as descontinuidades podem, respectivamente, ser ou não ser consideradas condicionantes geológicas dos escorregamentos ocorridos em 2016.

4.3.2 Ensaios de determinação das massas específicas e cálculo dos pesos específicos

Uma amostra de rocha coletada em campo foi dividida em dois blocos que foram cortados, por uma serra disponibilizada pela marmoraria Sperandio (SC-401), em forma de paralelepípedos resultando nos corpos de prova 1 e 2 (Figura 26).



Figura 26. Corpos de Prova 1 (à esquerda) e 2 (à direita). Foto: FLABOREA, 2017.

O Corpo de Prova 1 foi pesado em balança de precisão (marca Marte, modelo UX6200H) disponibilizada pelo Laboratório de Mecânica de Solos da UFSC, na condição natural subaérea e na condição natural submersa em balde cheio d'água suportado por duas correntes presas em uma haste (Figura 27), cujas massas foram taradas. A diferença entre os valores da primeira e da segunda massa, respectivamente, resultou no valor do volume aparente. Os valores da massa na condição natural subaérea e da massa submersa foram divididos pelo valor do volume aparente resultando, respectivamente, no valor da Massa Específica Seca e da Massa Específica Submersa da amostra conforme descrito pela NBR NM 53/2003.



Figura 27. Pesagem do Corpo de Prova em condição submersa. Foto: FLABOREA, 2017.

Antes da realização do ensaio com o corpo 2, foi aplicado nele pressão negativa em meio aquoso com uma Bomba de Vácuo fornecida pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC (Figura 28). Tal procedimento teve a finalidade de saturá-lo completamente de água.



Figura 28. Corpo de Prova 2 imerso em meio aquoso e submetido à pressão negativa da Bomba de Vácuo. Foto: FLABOREA, 2017.

Com a mesma balança do primeiro ensaio, pesou-se o Corpo de Prova 2 porém em condição saturada subaérea e em condição saturada submersa com o mesmo suporte utilizado na pesagem do corpo de prova 1. A diferença entre a primeiro e do segundo valor de massa, respectivamente, resultou no valor do volume real. A divisão do valor da massa na condição saturada subaérea pelo valor do volume real resultou no valor da Massa Específica Saturada da Amostra conforme descrito pela NBR NM 53/2003.

Os valores obtidos nesses ensaios foram multiplicados pelo valor da aceleração da gravidade resultando nos pesos específicos naturais e saturados, os quais foram utilizados nos cálculos dos Fatores de Segurança e na Análise de Tensões detalhados nas seções seguintes.

4.3.3 Inserção dos parâmetros geométricos da Cunha Estudada e cálculo de seus ângulos no Stereonet

Antes dos cálculos do Fatores de Segurança, foi definida a cunha a ser estudada, cuja altura é a maior dentre todas as cunhas observadas em campo e, em seguida, foram inseridos, no estereograma do software Stereonet, seus parâmetros geométricos, tais como: atitudes dos planos semiverticais delimitadores da cunha (A e B), que foram escolhidos devido a possibilidade do escorregamento ter sido desencadeado por planos semiverticais ser maior, e seus respectivos polos; atitudes dos planos da face e do topo do talude são; e linhas de intersecção entre todos os planos mencionados, as quais foram numeradas conforme estabelecido por Wyllie e Mah (2005) e ilustrado na Figura 17.

Em seguida, foram calculados os ângulos entre as linhas de intersecção mencionadas através da opção “Angle Between Selected Lines” do menu “Calculations” do mesmo Software.

Tais ângulos, juntamente aos ângulos de mergulho dos planos A e B, foram utilizados nos cálculos dos Fatores de Segurança descritos nas seções 4.3.4 e 4.3.5.2

4.3.4 Cálculo do Fator de Segurança considerando a coesão do solo presente sobre os planos A e B

Com os ângulos mencionados na seção anterior, foram calculados os parâmetros A, B, X e Y, conforme, respectivamente, as Equações 2, 3, 4 e 5 extraídas de Wyllie e Mah (2005).

Em seguida, utilizando esses quatro parâmetros, foi calculado o Fator de Segurança considerando a coesão do solo presente entre as descontinuidades do talude da área de estudo, o qual presume-se que esteve presente também sobre os planos A e B, conforme a Fórmula 6 extraída de Wyllie e Mah (2005). Para tal cálculo, foram utilizados valores de coesão e ângulo de atrito interno atribuídos a esse solo no diagrama de Wyllie e Mah (2005) apresentado na Figura 25.

Conforme o valor do Fator de Segurança obtido for menor ou maior que 1,5, a coesão do solo supostamente presente sobre os planos A e B antes da ruptura do talude pode, respectivamente, ser ou não ser considerada como condicionante geológico dos Escorregamentos ocorridos em 2016.

4.3.5 Análise da influência da água subterrânea nos escorregamentos

Tal análise consistiu na obtenção do Nível Piezométrico sob a Área de Estudo e, em seguida, no cálculo do Fator de Segurança da cunha estudada considerando a Pressão Neutra da água subterrânea atuante sob as descontinuidades do talude estudado:

4.3.5.1 Obtenção do nível piezométrico sob a Área de Estudo

Utilizando o *shapefile* de Poços Representativos do Sul de Santa Catarina adquiridos no Geobank (CPRM) e seus valores de Nível Estático, foi gerado um *Triangulated Irregular Network* - TIN através da ferramenta “*Create TIN*” do *Arc Tool Box* do software Arc GIS 10.2 como método de interpolação do nível piezométrico no sul de SC.

Em seguida, utilizando a ferramenta “*Identify*” do mesmo *software*, foi verificado o nível piezométrico sob a área de estudo, o qual foi comparado à distância entre o topo do talude e a base da cunha estudada.

Tal método foi considerado plausível para verificar se o nível piezométrico sob a Área de Estudo alcança ou não a base da cunha estudada e se é necessária a consideração da pressão neutra da água no cálculo do Fator de Segurança descrito na seção seguinte.

4.3.5.2 Cálculo do Fator de Segurança considerando a pressão neutra da água subterrânea

Após a verificação da posição do nível piezométrico acima da base da cunha estudada, foi calculado o Fator de Segurança considerando a pressão neutra da água atuante sob os planos A e B. Para tal cálculo, foram utilizados os mesmos parâmetros do cálculo do Fator de Segurança descritos na seção 4.3.3, acrescentando, agora, o valor do peso específico da água ($9,81\text{kN/m}^3$) na Fórmula 6.

Conforme o valor de Fator de Segurança obtido for menor ou maior que 1,5, a circulação de água subterrânea sob a Cunha Estudada, que resulta no seu nível piezométrico, pode, respectivamente, ser ou não ser considerada como um condicionante geológico dos escorregamentos ocorridos em 2016.

4.3.6 Análise da influência do peso específico nos escorregamentos

Essa análise consistiu no cálculo das tensões atuantes nos planos A e B da cunha estudada e na comparação dos valores obtidos dessas tensões com a envoltória de ruptura do solo argiloso presente entre as descontinuidades do talude da área de estudo:

4.3.6.1 Cálculo das Tensões atuantes nos planos A e B da Cunha Estudada

Para tais cálculos, considerou-se que tais planos estão na condição inclinada com percolação de água, conforme verificado na seção 5.6.1. Desse modo foram calculadas, separadamente, as tensões verticais totais, normais e cisalhantes atuantes nos planos A e B, utilizando as fórmulas 7, 8 e 9 extraídas de Fiori e Carmignani (2009), nas quais foram inseridos os valores dos parâmetros geométricos e físicos observados em campo e em laboratório, tais como: altura da coluna rochosa acima da base da cunha estudada (H),

inclinação do talude são (i), ângulo de mergulho dos planos (θ_a ou θ_b) e peso específico saturado da rocha.

Os valores de σ_n e σ_s obtidos nessa etapa serão inseridos no gráfico $\sigma_n \times \sigma_s$ para comparação com a envoltória de ruptura do solo presente entre as descontinuidades do talude, procedimento que está melhor detalhado na seção seguinte.

4.3.6.2 *Comparação das tensões atuantes nos planos com a envoltória de ruptura do solo presente nas descontinuidades*

Utilizando o *software Winplot 1.41*, foram inseridos os valores de σ_n e σ_s atuantes nos planos A e B em um gráfico $\sigma_n \times \sigma_s$ através da ferramenta “point” do menu “Equa”.

Em seguida, foi gerada a envoltória de ruptura do solo argiloso presente nas descontinuidades através da ferramenta “Explicit” do mesmo menu anterior, onde se inseriu a Equação 10, extraída de Das (2007), utilizando valores de c e ϕ extraídos de Wyllie e Mah (2005).

Conforme as posições, no gráfico, dos pontos das tensões atuantes nos planos A e B forem acima ou abaixo da envoltória de ruptura do solo supostamente presente sobre tais planos antes da ruptura do talude, o peso específico do maciço rochoso acima da Cunha Estudada pode, respectivamente, ser ou não ser considerado, de uma maneira indireta, um condicionante geológico dos Escorregamentos ocorridos em 2016.

4.3.7 *Produção da Lâmina Petrográfica*

Uma amostra de rocha constituinte do talude da Área de Estudo coletada em campo foi encaminhada ao Laboratório de Laminação da UFSC, onde o Técnico Sergio Paiva produziu uma Lâmina Petrográfica (Figura 29) através do maquinário disponibilizado pela UFSC.



Figura 29. Lâmina Petrográfica produzida pelo Laboratório de Laminação da UFSC. Foto: FLABOREA, 2018.

Tal lâmina foi analisada em um Microscópio Petrográfico conforme descrito nas seções seguintes.

4.3.8 Análise Petrográfica

Essa análise consistiu na descrição petrográfica, na análise volumétrica, na classificação segundo diagrama de Streckeisen, no cálculo do Índice Micropetrográfico e na atribuição do Grau de Alteração da Lâmina Petrográfica produzida.

4.3.8.1 Descrição Petrográfica da Lâmina

Observando a Lâmina Petrográfica sob Microscópio Petrográfico Meiji - modelo ml-30 disponibilizado pelo Laboratório de Microscopia Óptica da UFSC, realizou-se uma descrição levando em conta sua estrutura, suas texturas e seus minerais constituintes, a qual foi feita com auxílio do manual “Optical Mineralogy. Principles and Practice” (GRIBBLE e HALL, 1992) e registrada em forma de texto e fotos capturadas por uma câmera digital de 1mp acoplada acima do microscópio.

Tal descrição permite a divisão entre feições primárias e feições secundárias da lâmina, passo que é essencial para o cálculo do Índice Micropetrográfico da Rocha, e possibilita uma rápida identificação dos minerais no momento da análise volumétrica.

4.3.8.2 *Análise Volumétrica da Lâmina*

Primeiramente foram identificadas espécies minerais, microfraturas ou vazios de 413 pontos em caminhamento em forma de S e com intervalos de 0,1mm que foram definidos em um contador manual disponibilizado pelo Laboratório de Microscopia Óptica (Figura 30).



Figura 30. Contador manual acoplado em Microscópio Petrográfico. Foto: FLABOREA, 2018.

Em seguida, as feições e minerais encontrados foram divididos em primários e secundários e suas quantidades de pontos foram convertidas em porcentagens, resultando, assim, na Análise Volumétrica da Lâmina.

Tal análise forneceu os valores necessários para a classificação da rocha e para o cálculo do Índice Micropetrográfico que estão melhor detalhados nas seções seguintes.

4.3.8.3 *Classificação da Rocha segundo diagrama de Streckeisen (1967) e intervalos de Índices de Cor de Streckeisen (1978)*

Primeiramente, a porcentagem de Plagioclásio, Feldspato Alcalino e Quartzos foram calculadas levando-se em conta que a quantidade desses minerais somados é 100%.

Após isso, tais porcentagens foram inseridas em um diagrama ternário do tipo QAP do *software* Triplot, onde os campos de classes de rocha de Streckeisen (1967) foram sobrepostos utilizando o *software* Corel Draw X6.

Devido ao fato de que tal diagrama não diferencia Basaltos de Andesitos, utilizou-se os intervalos de Índices de Cor para esses tipos de rocha estabelecido por Streckeisen (1978) para finalmente definir a classe de rocha em questão.

Tal definição serviu de base para a escolha da escala de graus de alteração de Irfan e Dearman (1978) para a rocha analisada.

4.3.8.4 Cálculo do Índice Micropetrográfico e atribuição do Grau de Alteração de Irfan e Dearman (1978) à rocha analisada

Com a análise volumétrica em mãos, dividiu-se a soma das porcentagens de minerais primários pela soma das porcentagens de minerais secundários, microfraturas e vazios, resultando no Índice Micropetrográfico, conforme a Equação 11 estabelecida por Irfan e Dearman.

O valor de I_p obtido atribuiu à rocha analisada o Grau de Alteração de Irfan e Dearman (1978), cuja escala escolhida (escala de Basaltos, Granitos ou Quartzitos) dependeu da classificação da Rocha segundo diagrama e intervalos de índice de cor de Streckeisen.

Conforme o Grau de Alteração da Rocha for alto (W_3 ou W_4) ou baixo (W_0 , W_1 ou W_2), tal aspecto geológico pode, respectivamente, ser ou não ser considerado um fator condicionante dos Escorregamentos ocorridos em 2016. Tal método se baseia no princípio de que quanto maior o grau de alteração da rocha, maior sua propensão ao destaque do talude, conforme descrito na seção 2.1.2.1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, contemplando: os dados coletados em campo; a análise das descontinuidades da porção sã do talude estudado; os cálculos dos Fatores de Segurança de uma cunha da porção rompida desse talude; a análise das tensões atuantes nessa cunha; os ensaios de pesos específicos sobre rocha coletada de tal talude; e a análise petrográfica dessa rocha.

5.1 DADOS COLETADOS EM CAMPO

Foram coletados, na área de estudo do presente trabalho, os seguintes dados:

- a) coordenadas UTM (datum SIRGAS 2000) do km 407,56: X= 642758m;Y= 6858106m;
- b) elevação: 1009 m;
- c) tipo do Talude: Rochoso semivertical de corte de estrada (Figura 31);
- d) litologia: Basaltos com estrutura amigdalóide onde as amígdalas são aproximadamente esféricas, preenchidas por cristais brancos de 1 a 2cm de largura e estão inseridas em rocha holocristalina melanocrática afanítica (Figura 32);
- e) características físicas da rocha: Rocha com baixa resistência à ruptura pelo impacto da marreta.
- f) altura do talude: 20m;
- g) atitude da face do talude sã: 155/090;
- h) atitude do topo do talude sã: 155/000;
- i) Geologia Estrutural do talude sã: Há uma alta incidência de descontinuidades semiverticais e semihorizontais (Figura 33) que são preenchidas por solos argilosos compactados (Figura 34);
- j) atitudes, em trama, das descontinuidades semiverticais: 320/085, 315/090, 285/080, 25/090, 30/055, 25/085;
- k) atitudes, em trama, das descontinuidades semihorizontais: 310/025, 305/025, 305/020;

- l) características da superfície do talude rompido: É formada por diversas cunhas de ruptura posicionadas na parte superior do talude e delimitadas sempre por dois planos semiverticais e um plano semihorizontal (Figura 35);
- m) atitudes, em trama, dos planos da maior cunha de ruptura: 22/070 (plano A), 315/080 (plano B) e 305/010 (plano C) (Figura 35);
- n) altura da maior cunha: 1,8m
- o) distância do topo do talude à base da maior cunha: 2,3m
- p) outras observações: Manto de intemperismo com espessura de aproximadamente 10cm, presença frequente de rachaduras preenchidas por água sobre o asfalto da estrada acima do talude da área de estudo (Figura 36), desvio do fluxo de água pluvial da valeta do acostamento para o asfalto da SC-390 devido ao acúmulo de restos vegetais nas valetas (Figura 37) e presença de uma pequena queda d'água a 10m do topo da talude.



Figura 31. Talude Rochoso semivertical são (em azul) e rompido (em vermelho) à beira da SC-390, no km 407,56 (Governo de Santa Catarina, 2016 - modificado).



Figura 32. Basaltos com estrutura amigdalóide onde as amígdalas são preenchidas por cristais brancos de 1 a 2cm de espessura e estão inseridas em rocha holocristalina afanítica melanocrática. Foto: FLABOREA, 2017.



Figura 33. *Sets* de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NE (polígonos em azul), semiverticais com mergulho sentido NW (linhas e polígonos em vermelho) e semihorizontais com mergulho sentido NE (linhas e polígonos em amarelo) no talude são. Foto: CONCEIÇÃO, 2017.



Figura 34. Solo argiloso compactado preenchendo as discontinuidades do talude são (IGUATEMI CONSULTORIA E SERVIÇOS EM ENGENHARIA LTDA, 2016).

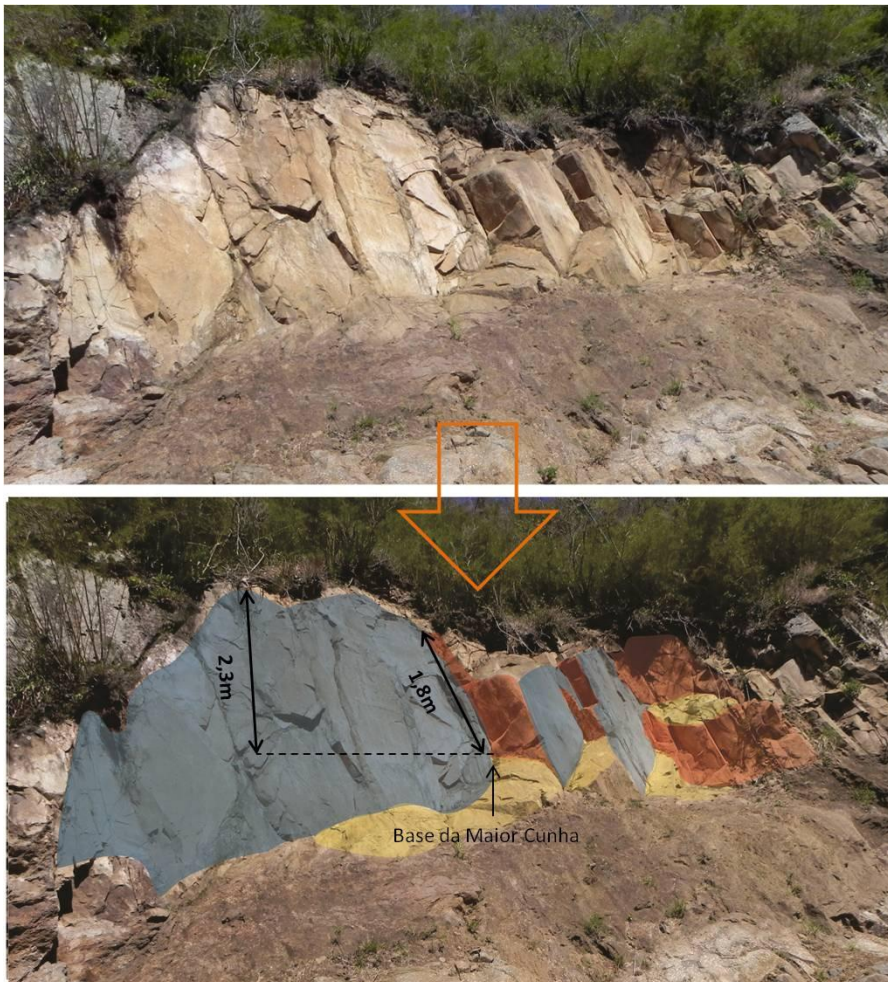


Figura 35. Planos A em azul , B em vermelho e C em amarelo, delimitadores das cunhas da superfície de ruptura e medidas da altura da maior cunha e da distância de sua base ao topo do talude. Foto: FLABOREA, 2017.



Figura 36. Rachadura preenchida por água na SC-390 acima do Talude da Área de Estudo. Foto: FLABOREA, 2017.

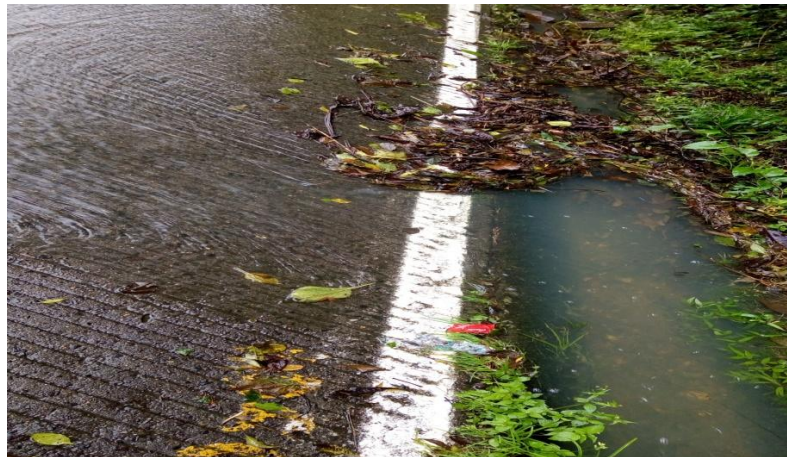


Figura 37. Fluxo de água pluvial sendo desviado da valeta do acostamento para o asfalto da SC-390 acima do talude da área de estudo. Foto: FLABOREA, 2017.

A presença de um *set* de descontinuidades com strike NW-SE é um aspecto encontrado em campo que difere do que foi encontrado na bibliografia à respeito da Área de Estudo.

A integração de tais dados conduz às seguintes hipóteses:

- a) os três *sets* de descontinuidades presentes no Talude formaram cunhas de blocos rochosos que deslizaram sobre os solos argilosos que as preenchem durante os períodos de chuvas intensas que atingiram o local em 2016. Tais chuvas penetraram nas descontinuidades, tornando escorregadios os solos argilosos e criando condições para o desencadeamento dos Movimentos de Massa. Tal hipótese conduz à classificação desses Movimentos como Escorregamentos em Cunha envolvendo rocha e solo;

- b) o fluxo de água da chuva é conduzido pelas valetas do acostamento até chegar na barreira de restos vegetais acumulados. A partir daí o fluxo d'água alcança o asfalto da estrada penetrando em suas frequentes rachaduras e, conseqüentemente, nas descontinuidades do talude estudado abaixo do asfalto. Isso provavelmente contribui para o aumento do nível piezométrico da área de estudo e para o surgimento de um estado escorregadio do solo argiloso que preenche as descontinuidades, funcionando como um mecanismo deflagrador dos Escorregamentos.

5.2 ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES DO TALUDE SÃO

Conforme observado na área de estudo, há três *sets* de descontinuidades no talude são: semiverticais com mergulho sentido NW, semiverticais com mergulho sentido NE e semihorizontais com mergulho sentido NW. Tais *sets* foram inseridos no *software* Stereonet, onde foram obtidos seus respectivos polos, os quais serviram para obtenção dos polos médios (Figuras Figura 38, Figura 40 e Figura 42), que por sua vez foram comparados com a projeção do cone de atrito do solo argiloso que preenche as descontinuidades (Figuras Figura 39, Figura 41 e Figura 43). O ângulo de atrito interno considerado para tal projeção foi de $14,64^\circ$ conforme o valor médio do intervalo atribuído para descontinuidades preenchidas por material argiloso sobreadensado segundo Wyllie e Mah (2005).

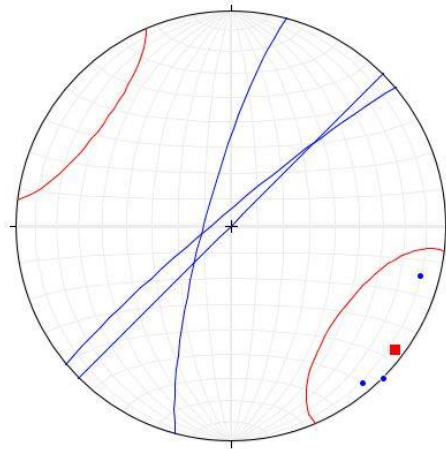


Figura 38 - *Set* de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NW (linhas azuis), seus polos (pontos azuis) e o polo médio resultante (quadrado vermelho). Elaborado por: FLABOREA, 2018.

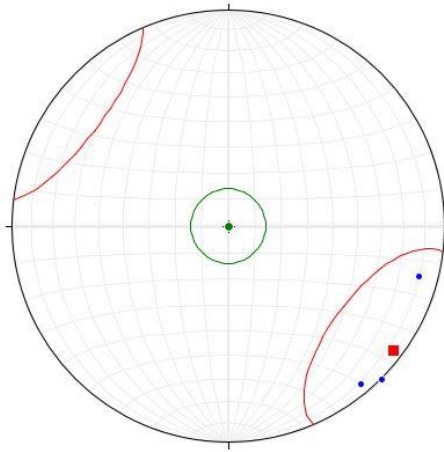


Figura 39 - Disposição do polo médio (quadrado vermelho) do *set* de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NW em relação a projeção do cone de atrito (círculo verde) do solo argiloso que preenche as descontinuidades. Elaborado por: FLABOREA, 2018.

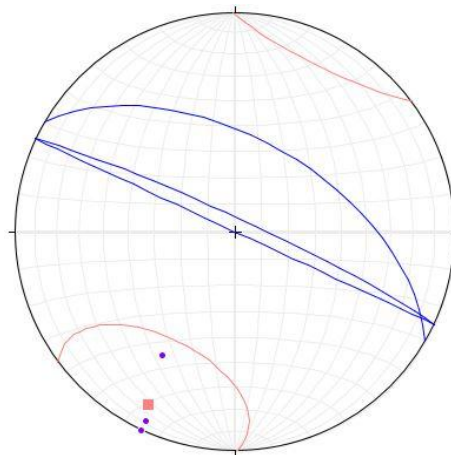


Figura 40 - *Set* de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NE (linhas azuis), seus respectivos polos (pontos azuis) e o polo médio resultante (quadrado vermelho). Elaborado por: FLABOREA, 2018.

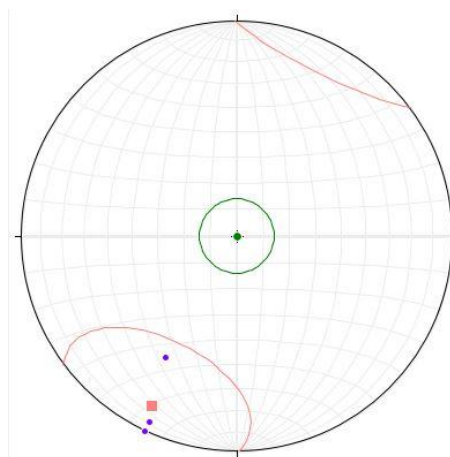


Figura 41 - Disposição do polo médio (quadrado vermelho) do *set* de descontinuidades semiverticais com mergulho sentido NE em relação à projeção do cone de atrito (círculo verde) do solo argiloso que preenche as descontinuidades. Elaborado por: FLABOREA, 2018.

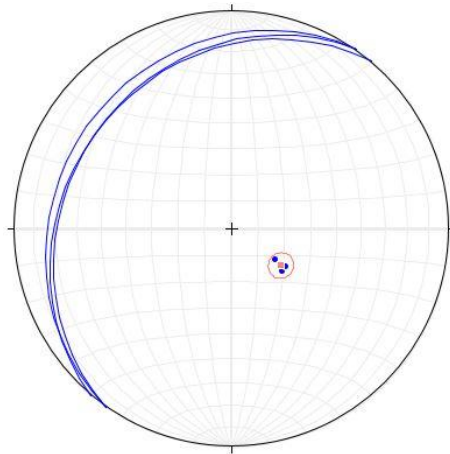


Figura 42 - *Set* de descontinuidades semihorizontais com mergulho sentido NW (linhas azuis), seus respectivos polos (pontos azuis) e o polo médio resultante (quadrado vermelho). Elaborado por: FLABOREA, 2018.

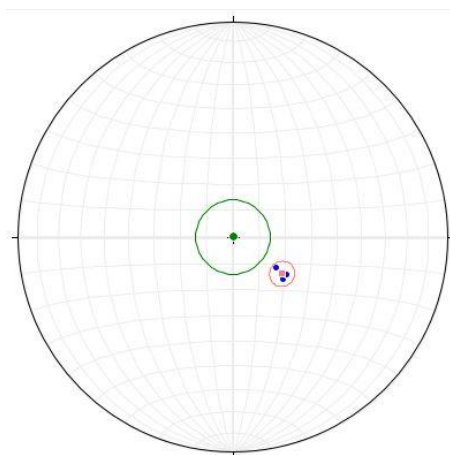


Figura 43 - Disposição do polo médio (quadrado vermelho) do *set* de descontinuidades semihorizontais com mergulho sentido NW em relação à projeção do cone de atrito (círculo verde) do solo argiloso que preenche as descontinuidades. Elaborado por: FLABOREA, 2018.

A posição dos polos médios dos três *sets* de descontinuidades fora do cone de atrito do solo argiloso que as preenchem leva à conclusão de que esse solo não apresenta atrito interno suficiente para impedir as movimentações dos blocos rochosos sobre tais descontinuidades, reforçando a hipótese da alínea a mencionada na seção 5.1.

5.3 MASSAS E PESOS ESPECÍFICOS

Os corpos de prova 1 e 2, obtidos das amostras coletadas da Área de Estudo, foram submetidos a ensaio de determinação de massas específicas seca, submersa e saturada, cujos resultados estão apresentados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Resultados obtidos no ensaio de determinação das massas específicas seca, submersa e saturada das amostras coletadas.

Amostra	Bloco 1	Bloco 2
Massa Total Seca(g)	124,9	88,5
Massa Submersa (g)	75,7	54,7
Massa Total Seca - Massa Submersa (g)	49,2	-
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,5386	-
Massa Específica Submersa (g/cm ³)	1,5386	-
Massa Saturada (g)	-	90
Massa Saturada - Massa Submersa (g)	-	35,5
Massa Específica Saturada (g/cm ³)	-	2,54

Elaborado por FLABOREA, 2017.

Multiplicando o valor da Massa Específica Seca e da Massa Específica Saturada pelo valor da aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) obtém-se o valor de $24,87 \text{ kN/m}^3$ e de $24,89 \text{ kN/m}^3$ para os pesos específicos naturais e saturados respectivamente.

5.4 INSERÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA CUNHA ESTUDADA NO ESTEREOGRAMA

A Cunha de Ruptura escolhida para os cálculos dessa seção, bem como das seções 5.5, 5.6.2 e 5.7, é a maior cunha de ruptura observada na Área de Estudo, sendo identificada neste trabalho como “**Cunha Estudada**”.

Definida a cunha estudada, foram inseridos no estereograma: Os planos A (azul) e B (verde) que a delimitam semiverticalmente, bem como seus polos; os planos do topo (vermelho) e da face do talude (amarelo); e as intersecções (pontos pretos) 1, 2, 3, 4 e 5 (Figura 7).

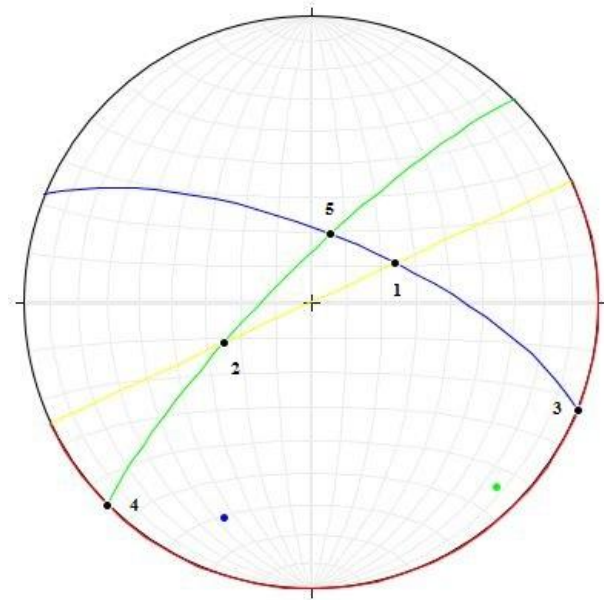


Figura 44 - Estereograma com os planos A, B, da face do talude e do topo do talude; e as interseções 1,2,3,4 e 5.
Elaborado por: FLABOREA, 2018.

5.5 CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA DA CUNHA ESTUDADA CONSIDERANDO A COESÃO DO SOLO SUPOSTAMENTE PRESENTE SOBRE OS PLANOS A E B

Com base nos parâmetros observados no estereograma, em campo, no ensaio de pesos específicos e em valores médios de coesão e ângulo de atrito interno de intervalos atribuídos a descontinuidades preenchidas por material argiloso sobreadensado extraídos de Wyllie e Mah (2005), produziu-se a tabela para cálculo do Fator de Segurança da cunha estudada considerando a coesão do solo argiloso que preenche as descontinuidades do talude da Área de Estudo, o qual presume-se que esteve presente também sobre os planos A e B.

Tabela 3 - Cálculo do Fator de Segurança na Cunha de Ruptura considerando-se somente a coesão dos solos argilosos supostamente presentes sobre os planos A e B.

Dados de Entrada	Valor da Função	Cálculos
$\psi_a = 70^\circ$	$\text{Cos}\psi_a = 0,342$	A = (0,342- 0,1736.0,421)/(0,939.0,8227)=0,3481
$\psi_b = 80^\circ$	$\text{Cos}\psi_b = 0,1736$	
$\psi_5 = 69,9^\circ$	$\text{Sin}\psi_5 = 0,939$	B = (0,1736- 0,342.0,421)/(0,939.0,8227)=0,0383
$\theta_{\text{nanb}} = 65,1^\circ$	$\text{Cos}\theta_{\text{nanb}} = 0,421$	
	$\text{Sin}\theta_{\text{nanb}} = 0,907$	X= 0,9025/(0,9537.0,6211)=1,5236
$\theta_{24}=64,5^\circ$	$\text{Sin}\theta_{24}=0,9025$	
$\theta_{45}=107,5^\circ$	$\text{Sin}\theta_{45}=0,9537$	Y = 0,9526/(0,9993.0,3023) = 3,1533
$\theta_{2\text{na}}=51,6^\circ$	$\text{Cos}\theta_{2\text{na}}=0,6211$	
$\theta_{13}=72,3^\circ$	$\text{Sin}\theta_{13}= 0,9526$	Fs=0,067.(90,38.1,5236+90,38.3,1533)+0, 3481.0,2612+0,0383.0,2612 = 28,42
$\theta_{35}=92^\circ$	$\text{Sin}\theta_{35}= 0,9993$	
$\theta_{1\text{nb}}=72,7^\circ$	$\text{Cos}\theta_{1\text{nb}}=0,2973$	
$\varphi=14,64^\circ$	$\text{tg}\varphi=0,2612$	
$\gamma_{\text{nat}}= 24,87\text{kN/m}^3$	$3/(\gamma_{\text{nat}}\cdot\text{H})= 0,067$	
$c = 90,38\text{kPa}$		
$\text{H}= 1,8\text{m}$		

Elaborado por FLABOREA, 2018.

Tendo em mãos esse valor de Fator de Segurança (>1,5), conclui-se que o valor da coesão do solo argiloso supostamente presente sobre os planos A e B antes da ruptura do talude não foi baixo o suficiente para colocar a Cunha Estudada numa condição instável.

É possível que a conclusão oposta (que a coesão do solo mencionado foi baixa o suficiente para colocar a cunha estudada numa condição instável) seja verdadeira devido à existência de valores menores de coesão dentro do intervalo estabelecido por Wyllie e Mah (2005).

5.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NOS ESCORREGAMENTOS

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao nível piezométrico na Área de Estudo e ao Fator de Segurança da Cunha Estudada considerando a pressão neutra resultante da circulação de águas subterrâneas:

5.6.1 Obtenção do nível piezométrico sob a Área de Estudo

Utilizando o *software* Arc GIS, gerou-se O TIN do Nível Piezométrico no sul de Santa Catarina a partir do Nível Estático de poços representativos dessa região. Após isso, utilizando a ferramenta “identify”, foi verificado um valor de nível piezométrico de 1,848m para o centro da área de estudo (Figura 45), o que revelou a posição desse nível acima da profundidade da base da cunha estudada.

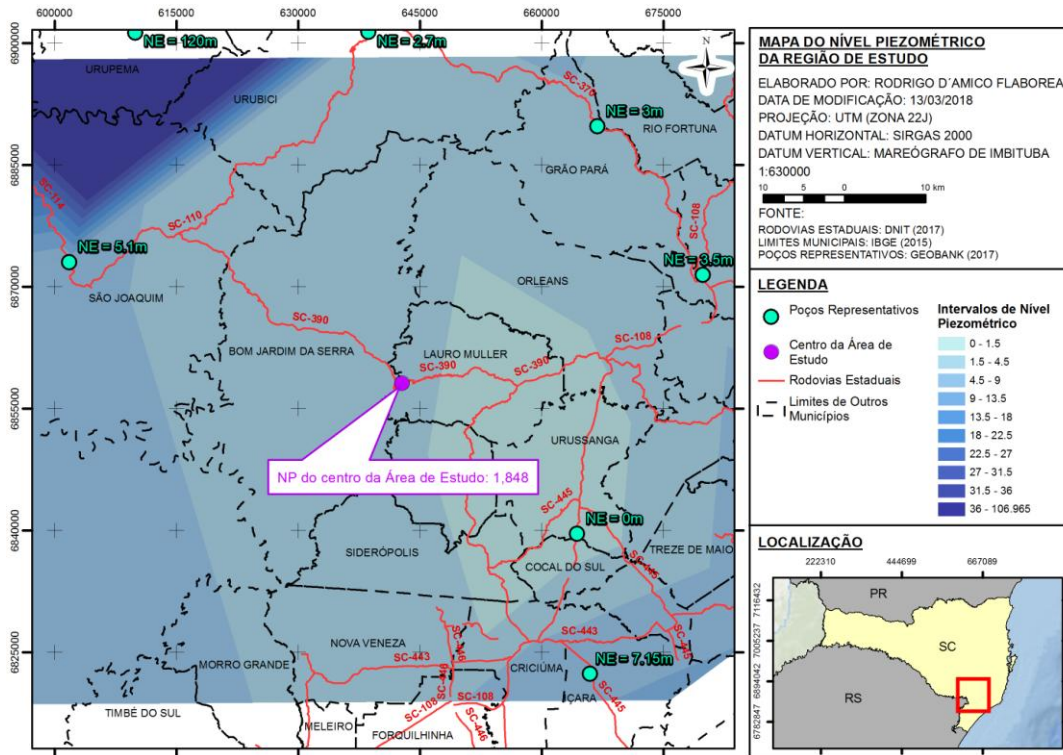


Figura 45. Rede Triangular Irregular do Nível Piezométrico no Sul de Santa Catarina obtida através do Nível Estático dos poços representativos da região e nível piezométrico do centro da Área de Estudo. Elaborado por: FLABOREA, 2018.

5.6.2 Cálculo do Fator de Segurança da Cunha Estudada considerando a Pressão Neutra

Considerando então a influência de água subterrânea e, conseqüentemente, de sua pressão neutra sob o solo supostamente presente sobre os planos A e B da cunha estudada, calculou-se seu Fator de Segurança considerando, no cálculo, a atuação de tal pressão.

Tabela 4 – Cálculo do Fator de Segurança na Cunha Estudada considerando a pressão neutra atuante sob o solo supostamente presente sobre os planos A e B.

Dados de Entrada	Valor da Função	Cálculos
$\varphi = 14,64^\circ$	$\text{tg}\varphi=0,2612$	
$\gamma_{\text{nat}}= 24,87\text{kN/m}^3$	$3/(\gamma_{\text{nat}}\cdot H)= 0,067$	$F_s=0,067\cdot(90,38\cdot 1,5236+90,38\cdot 3,1533)+(0,348$ $1-0,1972\cdot 1,5236)\cdot 0,2612+(0,0383-$ $0,1972\cdot 3,1533)\cdot 0,2612 = 28,1803$
$\gamma_w= 9,81\text{kN/m}^3$	$\gamma_w/2\cdot \gamma_{\text{nat}}= 0,1972$	
$c = 90,38\text{kPa}$		
$H= 1,8\text{m}$		

Elaborado por FLABOREA, 2018.

Esse resultado de FS ($>1,5$) leva à conclusão de que o nível piezométrico sob os planos A e B não comprometeu a estabilidade da Cunha Estudada antes da ruptura do talude. É possível que a conclusão oposta seja verdadeira devido ao mesmo motivo citado na seção 5.5.

5.7 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PESO ESPECÍFICO SATURADO NOS ESCORREGAMENTOS

Nesta seção são apresentados os resultados referentes às tensões atuantes nos planos A e B da Cunha Estudada e à posição dessas tensões em relação à envoltória de ruptura do solo supostamente presente sobre tais planos:

5.7.1 Cálculo das tensões atuantes nos planos A e B

Tendo observado a presença de água subterrânea na base da cunha estudada e tendo em mãos: a altura do bloco rochoso acima da base da cunha, o ângulo de inclinação do talude são e os ângulos de inclinação dos planos A e B; calculou-se, considerando planos inclinados e percolação de água, as tensões vertical total, normal e cisalhante atuantes sobre os planos A e B:

Tabela 5 - Cálculo das tensões verticais totais, normais e cisalhantes atuantes nos planos A e B

Planos das Cunhas de Ruptura	Dados de Entrada	Valor da Função	Cálculos
Plano A	$\gamma_{\text{sat}} = 24,89\text{kN/m}^3$	$\text{coseci} = 1,0124$	$\sigma_{\text{vt}} = (24,89 \cdot 2,3 \cdot 1,0124 \cdot 0,342)/2 = 9,91\text{kPa}$
	$H = 2,3\text{m}$	$i - \theta_A = 20$	$\sigma_n = 9,91 \cdot 0,342 = 3,3894\text{kPa}$
	$\Theta_A = 70^\circ$	$\text{sen}(i - \theta_A) = 0,342$	$\sigma_s = 9,91 \cdot 0,9396 = 9,3114\text{kPa}$
	$i = 90^\circ$	$\text{Cos}\theta_A = 0,342$	
		$\text{Sen}\theta_A = 0,9396$	
Plano B	$\gamma_{\text{sat}} = 24,89\text{kN/m}^3$	$\text{coseci} = 1,0124$	$\sigma_{\text{vt}} = (24,89 \cdot 2,3 \cdot 1,0124 \cdot 0,1736)/2 = 5,0306\text{kPa}$
	$H = 2,3\text{m}$	$i - \theta_B = 10$	$\sigma_n = 5,0306 \cdot 0,1736 = 0,8733\text{kPa}$
	$\Theta_B = 80^\circ$	$\text{sen}(i - \theta_B) = 0,1736$	$\sigma_s = 5,0306 \cdot 0,9848 = 4,9541\text{kPa}$
	$i = 90^\circ$	$\text{Cos}\theta_B = 0,1736$	
		$\text{Sen}\theta_B = 0,9848$	

Elaborado por FLABOREA, 2018.

5.7.2 Comparação dos valores de tensões atuantes nos planos A e B com a envoltória de ruptura do solo supostamente presente sobre esses planos

Os valores de tensões normais e cisalhantes atuantes sobre os planos A (ponto azul) e B (ponto verde) obtidos pelos cálculos da seção anterior foram inseridos no gráfico de $\sigma_n \times \sigma_s$ para verificação da posição dessas tensões em relação à envoltória de ruptura do solo argiloso (linha vermelha) supostamente presente sobre os planos mencionados, a qual foi construída através da inserção de valores de coesão e ângulo de atrito internos médios do intervalo atribuído às descontinuidades preenchidas por solo argiloso sobreadensado extraídos de Wyllie e Mah (2005):

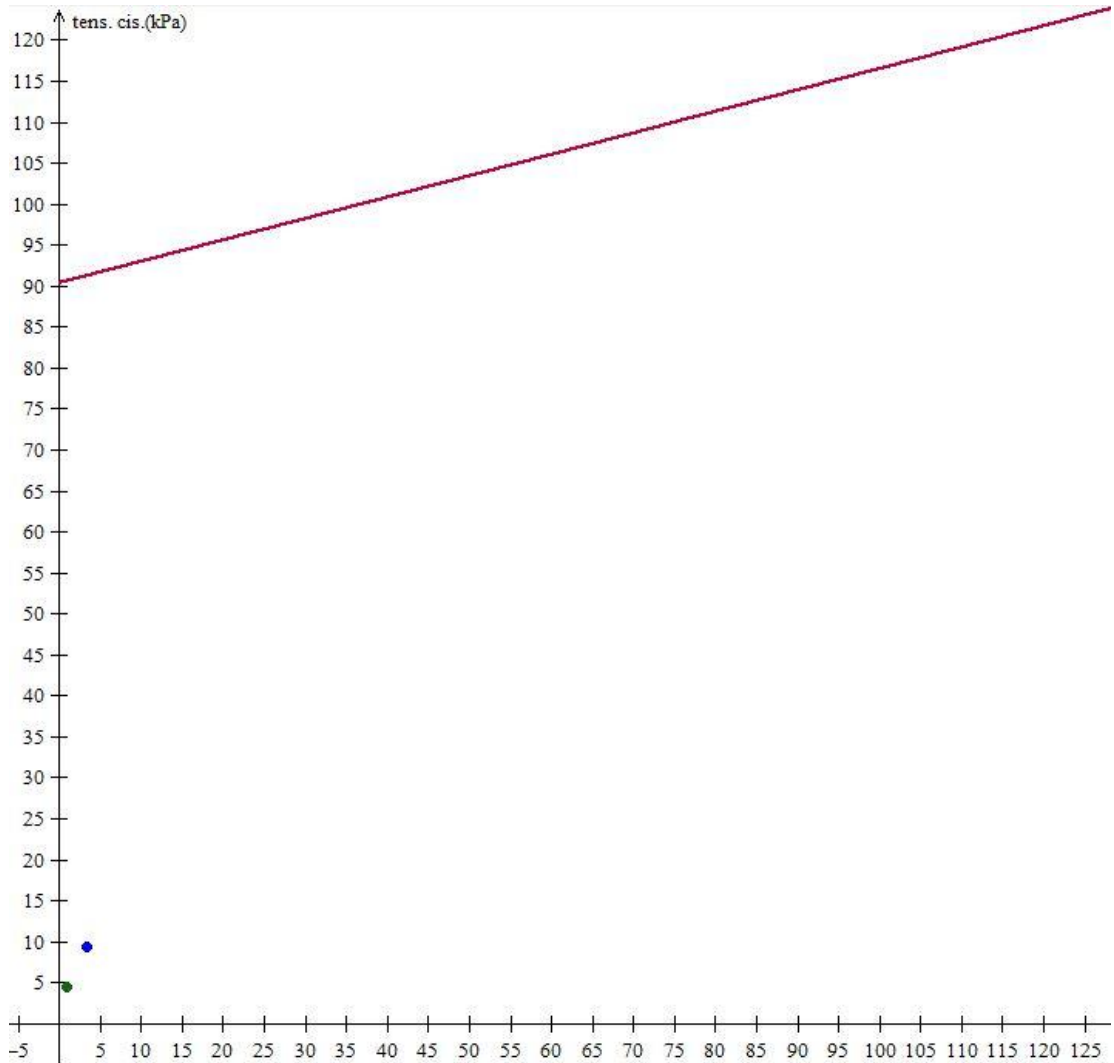


Figura 46 - Envoltória de Ruptura do solo argiloso presente nas discontinuidades do talude (linha vermelha) e tensões normais e cisalhantes atuantes nos planos A (ponto azul) e B (ponto verde) da Cunha Estudada. Elaborado por FLABOREA, 2018.

Observa-se no gráfico que os valores que representam as tensões atuantes tanto no plano A quanto no plano B se situam bem abaixo da envoltória de ruptura do solo supostamente presente sobre tais planos, o que leva à conclusão de que o valor do peso específico do bloco rochoso acima desses planos não foi alto o suficiente para resultar em valores de tensões cisalhantes que colocassem a Cunha Estudada numa condição instável.

É possível que a conclusão oposta (que as tensões cisalhantes superaram a envoltória de ruptura) seja verdadeira devido à possibilidade da coesão do solo mencionado ser mais baixa do que a considerada nesse estudo, resultando em um abaixamento da envoltória no gráfico de $\sigma_n \times \sigma_s$ até os pontos representativos das tensões atuantes nos planos A e B (o que colocaria esses planos em uma condição instável).

5.8 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os resultados referentes à descrição petrográfica, à análise volumétrica, à classificação segundo Streckeisen, ao Índice Micropetrográfico e ao Grau de Alteração da lâmina petrográfica produzida com a amostra de rocha coletada do talude estudado:

5.8.1 Descrição Petrográfica da Lâmina

Analisando a lâmina da amostra de rocha coletada do talude da área de estudo, observou-se uma estrutura amigdalóide onde as amígdalas apresentam crescimento sintaxial e formas aproximadamente esféricas (Figura 47-A) ou lenticulares (Figura 47-B) com 0,4 a 1mm de diâmetro e são preenchidas por Clorita no centro e Zeolita nas bordas. Alguns cristais de Clorita têm suas bordas alteradas por Hidróxido de Ferro (Figura 47-C), enquanto que outros apresentam sua superfície completamente alterada por tal mineral (Figura 47-D).

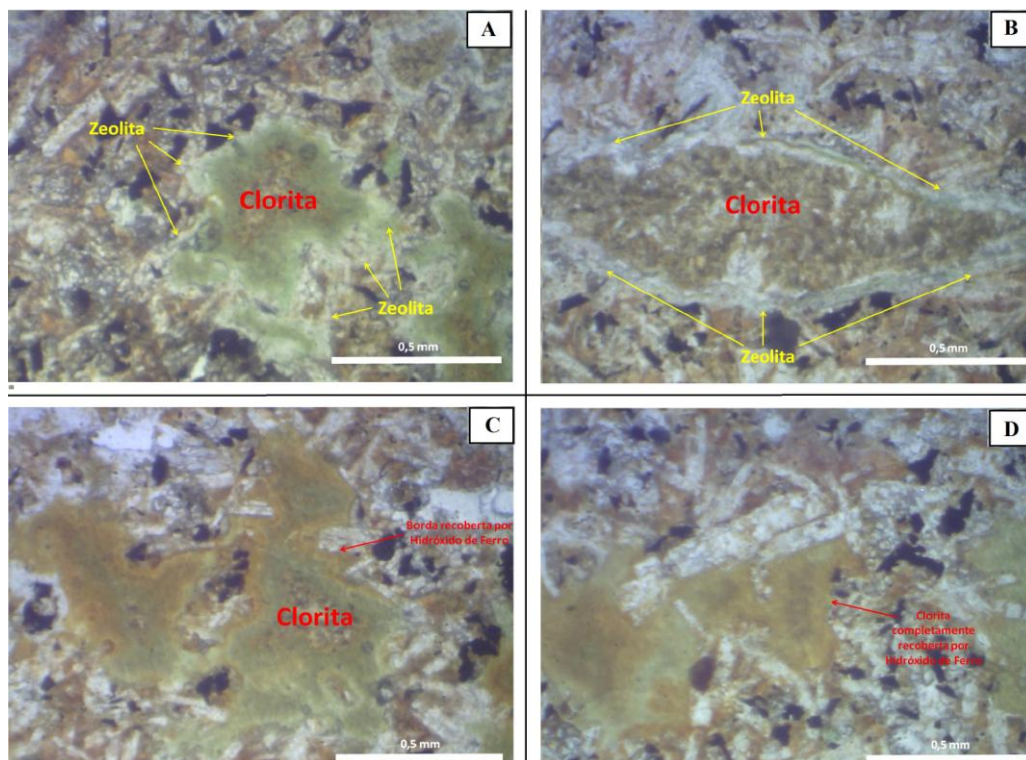


Figura 47. A- Amígdala com forma aproximadamente esférica preenchida por Clorita no centro e Zeolita na borda (nicóis paralelos); B- Amígdala com forma aproximadamente lenticular com o mesmo preenchimento (nicóis paralelos); C- Clorita com borda recoberta por Hidróxido de Ferro (nicóis paralelos); D- Clorita completamente recoberta por Hidróxido de Ferro (nicóis paralelos). Foto: FLABOREA, 2018.

Tais feições encontram-se inseridas em rocha de textura intergranular com cristais prismáticos de Plagioclásio (Figura 48-A) com 0,2 a 1mm de comprimento e cristais tabulares e microfraturados de Augita e Pigeonita (Figura 48-B) com 0,2 a 0,6mm de comprimento. Esses cristais estão dispostos de maneira desorientada e estão inseridos em matriz constituída de cristais de formas irregulares com 0,1mm de comprimento de Augita e Pigeonita microfraturadas e minerais opacos primários. Tanto os cristais maiores quanto os menores estão amplamente recobertos por uma camada de Hidróxido de Ferro (Figura 48-C) e alguns se encontram alterados por minerais opacos secundários (Figura 48-D).

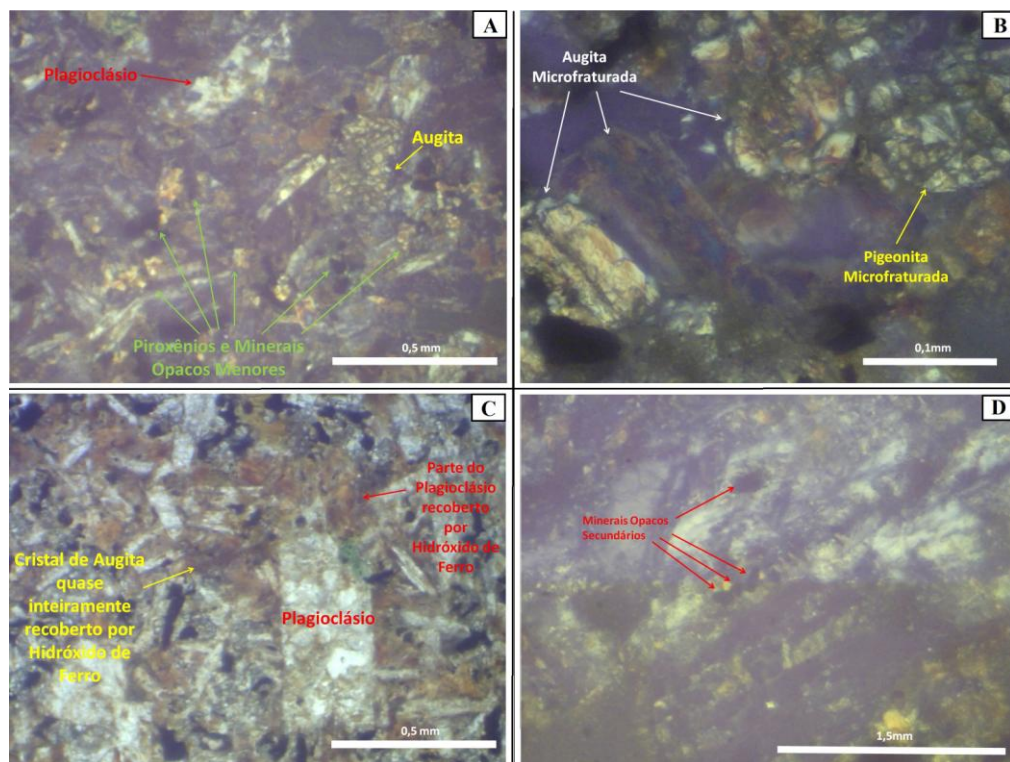


Figura 48.A- Cristais de Plagioclásio e Augita inseridos em matriz composta de Augita, Pigeonita e Minerais Opacos Primários (nicóis perpendiculares); B- Cristais microfraturados de Augita e Pigeonita (nicóis perpendiculares); C- Cristais de Augita e Plagioclásio recobertos por Hidróxido de Ferro (nicóis paralelos); D- Minerais Opacos secundários alterando cristais de Plagioclásio (nicóis perpendiculares). Foto: FLABOREA, 2018.

Cristais prismáticos de Enstatita com 0,5mm de comprimento ocorrem como minerais acessórios e Vazios aproximadamente esféricos ocorrem de maneira pouco frequente.

A presença de Clorita preenchendo as amígdalas e de Enstatita como mineral acessório são aspectos encontrados na lâmina que diferem do que foi encontrado na bibliografia à respeito da Fácies Gramado.

5.8.2 Análise Volumétrica da Lâmina

As identificações dos minerais, microfraturas e vazios presentes em 413 pontos ao longo da Lâmina Petrográfica resultaram nos dados apresentados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6. Análise Volumétrica da Lâmina Petrográfica

Minerais, Vazios ou Microfraturas	Tipo de Mineral	Quantidade de Pontos	Porcentagem
Augita	Primário	26	6,29%
Clorita	Secundário	43	10,41%
Enstatita	Primário	2	0,48%
Hidróxido de Ferro	Secundário	189	45,76%
Microfraturas	-	14	3,38%
Minerais Opacos Primários	Primário	11	2,66%
Minerais Opacos Secundários	Secundário	3	0,72%
Pigeonita	Primário	10	2,42%
Plagioclásio	Primário	71	17,19%
Vazios	-	24	5,81%
Zeolita	Secundário	9	2,17%
Total	-	413	100%

Elaborado por FLABOREA, 2018.

5.8.3 Classificação da Rocha segundo diagrama de Streckeisen (1967) e segundo intervalos de Índice de Cor de Streckeisen (1978)

Devido ao fato de que a porcentagem de Plagioclásio em relação à quantidade de Quartzo+Feldspato Alcalino+Plagioclásio ser 100%, a Rocha analisada (quadrado vermelho) se posicionou no campo de Basaltos e Andesito no diagrama de Streckeisen (Figura 49).

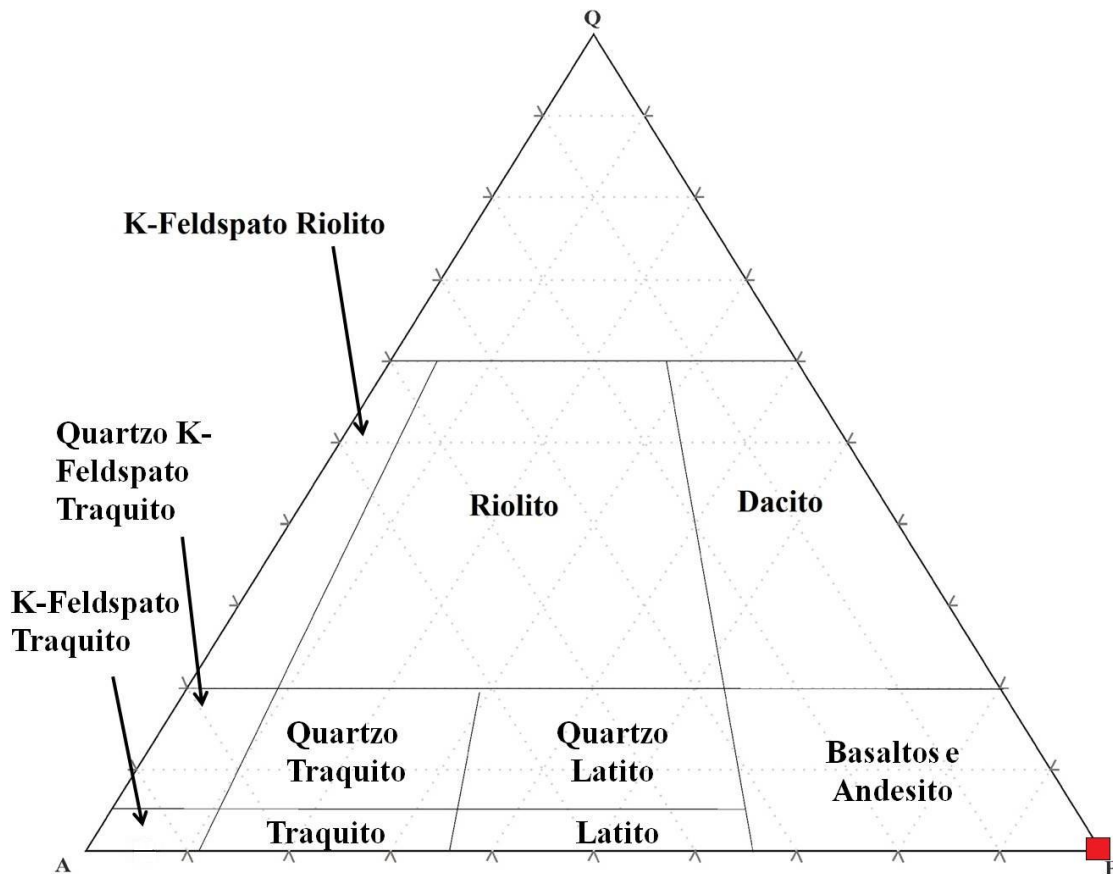


Figura 49. Posição da Rocha analisada (quadrado vermelho) dentro do campo de Basaltos e Andesito do diagrama de Streckeisen. Elaborado por FLABOREA, 2018.

Após isso, somou-se as porcentagens de Clorita (10,41%), Augita (6,29%), Enstatita (0,48%), Minerais Opacos Primários (2,66%) e Secundários (0,72%), Hidróxido de Ferro (45,76%) e Pigeonita (2,42%) e obteve-se um índice de cor de 68,74% (>35%), fato que conduz à classificação da rocha como Basalto.

5.8.4 Cálculo do Índice Micropetrográfico e atribuição do Grau de Alteração de Irfan e Dearman (1978) à lâmina analisada

A soma das porcentagens de Augita (6,29%), de Enstatita (0,48%), de Minerais Opacos Primários (2,66%), de Pigeonita (2,42%) e de Plagioclásio (17,19%) resultou na porcentagem de constituintes sãos, cujo valor é 29,03%.

A soma das porcentagens de Clorita (10,41%), de Hidróxido de Ferro (45,76%), de Microfraturas (3,38%), de Minerais Opacos Secundários (0,72%), de Vazios (5,81%) e de Zeolita (2,17%) resultou na porcentagem de constituintes de alteração, cujo valor é 68,25%.

A divisão da primeira soma pela segunda resultou no I_p da lâmina analisada, cujo valor é 0,42. Tal valor, quando inserido na escala de Graus de Alteração de Basaltos atribui o Grau W_4 (Rocha completamente alterada) à lâmina analisada. Tal aspecto é um indicativo de que as ligações intergranulares da rocha constituinte do talude estudado estão muito fracas, ou seja, a rocha apresenta baixa coesão (aspecto também observado em campo), facilitando a ocorrência de rupturas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta seção são apresentadas as conclusões referentes ao tema desse trabalho e ao confronto dos resultados obtidos nele com informações de trabalhos anteriores e, em seguida, as sugestões para evitar novos escorregamentos na área de estudo e para realização de trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Com base nas observações de campo na área de estudo e das fotografias das notícias coletadas sobre os movimentos de massa ocorridos em 2016, conclui-se que tais movimentos provavelmente foram do tipo Escorregamento em Cunha envolvendo rocha e solo e que a infiltração de grande quantidade de água pluvial nas rachaduras da SC-390 (devido ao desvio de seu fluxo, por barreiras de restos vegetais, das valetas do acostamento para o asfalto da SC-390) provavelmente funcionou como um dos mecanismos deflagradores desses Escorregamentos.

A observação, em campo, da baixa resistência à ruptura da rocha do talude estudado, a atribuição de grau de alteração W_4 à lâmina produzida com a rocha coletada de tal talude e as posições, no estereograma, dos polos médios dos três *sets* de discontinuidades (semiverticais com mergulho sentido NE, semiverticais com mergulho sentido NW e semihorizontais com mergulho sentido NW) presentes nesse talude fora da projeção do Cone de Atrito do solo argiloso que as preenchem conduzem à conclusão de que a intensidade da ligação intergranular da rocha formadora do talude e o atrito interno do solo mencionado não foram altos o suficientes para impedir, respectivamente, a ruptura e o escorregamento dos blocos rochosos sobre os três *sets* de discontinuidades na parte superior do talude. Essas conclusões levam ao enquadramento das discontinuidades do talude estudado e do grau de alteração das rochas formadoras desse talude na categoria de condicionantes geológicos dos escorregamentos ocorridos em 2016.

Em contrapartida, a obtenção de altos valores dos Fatores de Segurança ($>1,5$) considerando a coesão do solo supostamente presente sobre os planos A e B (delimitadores semiverticais da Cunha Estudada) e, depois, considerando a pressão neutra sob esses planos, juntamente às posições, no gráfico $\sigma_n \times \sigma_s$, dos pontos representantes das tensões normais e cisalhantes atuantes sobre esses planos bem abaixo da envoltória de ruptura do solo mencionado levam às seguintes conclusões:

- a) o valor da coesão do solo supostamente presente sobre os planos A e B antes da ruptura do talude não foi baixo o suficiente para colocar a Cunha Estudada em uma condição instável;
- b) a pressão neutra da água subterrânea sob a Cunha Estudada não afetou sua estabilidade;
- c) o valor do peso específico do bloco rochoso acima da Cunha Estudada antes da ruptura do talude não foi alto o suficiente para resultar em valores de tensões cisalhantes que comprometessem a estabilidade do bloco rochoso acima da Cunha Estudada.

Tais conclusões descartam os papéis da coesão do solo argiloso que preenche as descontinuidades do talude estudado, da circulação das águas subterrâneas sob tal talude e do peso específico dos blocos rochosos acima das cunhas de ruptura desse talude como condicionantes geológicos dos escorregamentos ocorridos em 2016.

Indo além do tema desse trabalho, comparou-se os dados observados em campo e em microscópio petrográfico com os dados relativos à região de estudo, obtidos através de levantamento bibliográfico, e concluiu-se que certos aspectos da Área de Estudo diferem daqueles observados na bibliografia, são eles:

- a) presença de Clorita nas amígdalas da rocha do talude estudado;
- b) presença de Enstatita como mineral acessório em tal rocha;
- c) presença de um *set* de descontinuidades com strike NW-SE, indicando um lineamento com essa orientação.

6.2 SUGESTÕES

Nesta seção são apresentadas sugestões de medidas simples e baratas a medidas mais complexas e custosas para evitar novos escorregamentos e, em seguida, sugestões para temas de trabalhos futuros.

6.2.1 Para evitar novos Escorregamentos

Esclarecidas as condições pelas quais os Escorregamentos de 2016 ocorreram, sugere-se, para evitar novos escorregamentos, as seguintes providências:

- a) Coleta regular de restos vegetais das valetas dos acostamentos da SC-390 no trecho acima do talude estudado: Desse modo, as valetas conduzirão de maneira desimpedida o fluxo de água pluvial que não se desviará novamente para o asfalto e suas rachaduras, que antes permitiam a infiltração desse fluxo e, conseqüentemente, contribuíam para o aumento do nível piezométrico sob o talude estudado.
- b) Fazer um recapeamento asfáltico sobre as rachaduras da SC-390 no trecho acima do talude estudado: Tal medida diminuirá a infiltração de água pluvial no talude através dessas rachaduras;
- c) Construção de uma Cortina Atirantada em Concreto Armado com tirantes fixados perpendicularmente aos planos de descontinuidades semiverticais com mergulhos sentido NE e NW: Desse modo, a água pluvial é impedida, pelo concreto, de alterar mais ainda a Rocha constituinte do talude estudado, evitando a perda de força de suas ligações intergranulares e, conseqüentemente, a ruptura de novos blocos rochosos. Enquanto que os blocos rochosos superficiais existentes, antes separados do interior do talude pelos três *sets* de descontinuidades, serão impedidos de escorregar devido sua fixação, através dos tirantes, ao interior do talude.

6.2.2 Para trabalhos futuros

Considerando que existem outros aspectos, além dos geológicos, que condicionaram os Escorregamentos ocorridos em 2016, sugere-se uma análise dos aspectos geomorfológicos (altura, orientação, declividade e forma do talude estudado), climáticos (pluviometria e variações térmicas da área de estudo) e antrópicos (inclinação do corte de estrada e vibrações de automóveis na estrada acima do talude estudado) inerentes à área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 53:2003:Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2002. 8p.

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: ABMS/ABGE/PUCRJ, 1992. V.2, p.721-733.

BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003. 3 v.

CORREIO OTACILIENSE. **Queda de barreira destrói veículo e interdita Serra do Rio do Rastro.** 14/06/2016. Disponível em: <http://www.correiootaciliense.com.br/geral/queda-de-barreira-destr%C3%B3i-ve%C3%ADculo-e-interdita-serra-do-rio-do-rastro-1.1924096>. Acesso em 18/05/2017.

COULOMB, C. A. An attempt to apply the rules of maxima and minima to several problems of stability related to architecture. **Mémoires de l'Académie Royale des Sciences**, v. 7, p. 343-382, 1776.

CPRM. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Criciúma, Folha SH.22-X-B. Estado de Santa Catarina.** Escala 1:250.000. Brasília, 2000. Relatório digitado. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Projeto-Criciuma-402.html>. Acesso em: 09/05/2018.

CULMANN, C. **Die Graphische Statik.** Zurique: Meyer and Zeller, 1875.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Tradução de Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 577p. Título original: Principles of geotechnical engineering.

FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA A.J.; CUNHA S.B. **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand, 1996. p. 123-194.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das Rochas: aplicação na estabilidade de taludes.** 2 ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2009. 604 p.

FRANK, H. T.; GOMES, M.E.B.; FORMOSO, M.L.L. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 36, p. 49-57, jan. de 2009. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/Sitenovo/3601/05-3601.pdf>. Acesso em: 09/05/2018

G1. **Rodovia da Serra do Rio do Rastro é interditada após deslizamento de terra. Santa Catarina.** 02/01/2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2016/01/rodovia-da-serra-do-rio-do-rastro-e-interditada-apos-deslizamento-de-terra.html>. Acesso em: 18/05/2017.

GOVERNO DE SANTA CATARINA: Departamento estadual de infraestrutura. **Acidentes geológicos na rodovia SC 390, trecho Serra do Rio do Rastro**. Criciúma, 2016. Relatório digitado.

GRIBBLE, C. D.; HALL, A. D. **Optical Mineralogy: Principles and Practice**. Boca Raton: CRC Press, 1992. 297p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2.ed.São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1984. 194p.

HERRMANN, M. L. P. **Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: Período de 1980 a 2010**. 2. ed. Florianópolis: IHGSC/Cadernos Geográficos, 2014. 219 p. Disponível em: <http://www.labclima.ufsc.br/files/2010/04/Atlas-2010.pdf>. Acesso em: 09/05/2018.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock Slope Engineering**. 3 ed. Barking: Elsevier Science Publishers LTD., 1981. 358 p.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles**. 1 ed. Londres: Pergamon, 2007.

IGUATEMI CONSULTORIA E SERVIÇOS DE ENGENHARIA LTDA. **Caracterização de Instabilidade de Corte – SC-390, subtrecho de Bom Jardim da Serra – Lauro Muller**. Lauro Muller, 2016. Relatório digitado.

INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. Processos da Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO S.N.A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo, 1998. p. 131-152.

IRFAN, T.Y.; DEARMAN, W.R. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. n. 11, p.223–244, 1978.

LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras**, n. 5, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, São Paulo, n. 5, p. 1-59, 1949. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/bffcluspgeologia/article/view/10792/10247>. Acesso em: 09/05/2018.

LOPES, E. S. S. **Modelagem Espacial Dinâmica Aplicada ao Estudo de Movimentos de Massa Em uma Região da Serra do Mar Paulista em uma Escala de 1:10000**.2006. 276f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/102962/lopes_ess_dr_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 09/05/2018.

MACIEL FILHO, C. L .; NUMMER, A. V. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 5 ed, Santa Maria: Ed. da UFSM, 2014. 456p.

MILANI, E. J. *et al.* Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (ordovician to cretaceous), southern Brazil. **Bol. IG USP**, São Paulo, n^o29, 1998. Disponível em:

<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/bigsc/article/view/4294/3806>. Acesso em: 09/05/2018.

MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA P.A.; FERNANDES L.A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265291564_Bacia_do_Parana. Acesso em: 09/05/2018.

MOHR, O. **Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials**. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, v.46, p. 1524 – 1530, 1900.

NATIONAL PARKS TRAVELER. **Rockfalls closes Zion scenic drive near Zion lodge**. Park City. 14 jan. 2017. Disponível em: <https://www.nationalparkstraveler.org/2017/01/rockfall-closes-zion-scenic-drive-near-zion-lodge>. Acesso em: 08 mai. 2018.

NOTÍCIAS DO DIA. **Chuva causa alagamentos no estado e deixa áreas isoladas na Serra**. 26/03/2016. Disponível em: <https://ndonline.com.br/florianopolis/noticias/chuva-causa-alagamentos-no-estado-e-deixa-areas-isoladas-na-serra>. Acesso em: 18/05/2017.

PINTO, R. C. *et al.* Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa. **GEOINGÁ**, Maringá, v.5, n.1, p.102-124, 2013. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/Geoinga/article/view/20426/11590>. Acesso em: 09/05/2018.

PORTO JR, R. *et al.* Caracterização geológico-geotécnica do movimento de massa ocorrido entre as praias da prainha e grumari, no município do Rio de Janeiro, RJ. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 35, p.05-13, 2012. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/anigeo/article/view/5947/5455>. Acesso em: 09/05/2018.

RECKZIEGEL, E. W. **Identificação e Mapeamento das áreas com perigo de movimento de massa no município de Porto Alegre, RS**. 2012. 90f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38651/000823713.pdf?sequence=1>. Acesso em: 09/05/2018.

SMERDUM. **SC-390 - Serra do Rio do Rastro**. Santos. 2014. Disponível em: <https://smerdum.wordpress.com/viagens/sc-390-serra-do-rio-do-rastro/>. Acesso em: 06/04/2018.

STRECKEISEN, A. L. **Classification and nomenclature of igneous rocks**. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, v. 107, p.144-240, 1967.

STRECKEISEN, A. L., **Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilitic Rocks. Recommendations and Suggestions**. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, v. 141, p.1-14, 1978.

TOMINAGA, L. D. *et al.* **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196p. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>. Acesso em: 09/05/2018.

TOMINAGA, L. D. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: Aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 2007. 240F. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18102007-155204/publico/TESE_LIDIA_KEIKO_TOMINAGA.pdf. Acesso em: 09/05/2018.

VANACÔR, R. N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento de áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 132f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8344/000574101.pdf?sequence=1>. Acesso em: 09/05/2018.

WICANDER, R. **Fundamentos de Geologia**. Tradução de Harue O. Avritcher. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 507p. Título original: *Essentials of Geology*.

WILDNER, W. Estratigrafia do Magmatismo Serra Geral – Conceitos básicos e Divisão Faciológica. In: Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia, n. 1, 2004, Porto Alegre. **Anais da Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia**. Porto Alegre: 15 de janeiro de 2004. p. 62 – 75. Disponível em: http://www.geologiadobrasil.com.br/pdfs/racbe_2004_vf.pdf. Acesso em: 09/05/2018.

WILDNER, W.; ORLANDI FILHO, V.; GIFFONI, L. E. **Excursão Virtual aos Aparados da Serra – RS/SC**. Porto Alegre. Out. de 2004. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geoparques/Aparados/ap_geol_pag05.htm. Acesso em: 19/02/2018.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. 4. ed. Taylor & Francis e-library, 2005. 456 p. Disponível em: https://civilengineering.files.wordpress.com/2014/10/rock_slope_engineering_civil_and_mining.pdf. Acesso em: 09/05/2018.