



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

VANESSA NOVELETTO

ANÁLISE DO CONTROLE LITO-ESTRUTURAL NAS PROPRIEDADES
GEOTÉCNICAS E ESTABILIDADE DE TALUDE DE DEPÓSITOS DE
COLÚVIO, RIO DO SUL, SANTA CATARINA

FLORIANÓPOLIS

2017

Vanessa Noveletto

ANÁLISE DO CONTROLE LITO-ESTRUTURAL NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS
E ESTABILIDADE DE TALUDE DE DEPÓSITOS DE COLÚVIO, RIO DO SUL, SANTA
CATARINA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Programa de Graduação da Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Bacharelado em Geologia
Orientador: Prof. Dr. Marivaldo dos Santos
Nascimento
Coorientador: Prof. Dr. Murilo da Silva
Espíndola

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Noveletto, Vanessa

Controle Lito-Estrutural nas Propriedades Geotécnicas
de Depósitos de Colúvio, Rio Do Sul, SC / Vanessa Noveletto
; orientador, Marivaldo dos Santos Nascimento,
coorientador, Murilo da Silva Espíndola, 2017.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Controle geológico. 3. Comportamento
geotécnico. 4. Depósito coluvionar. I. Nascimento,
Marivaldo dos Santos . II. Espíndola, Murilo da Silva .
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Geologia. IV. Título.

Vanessa Noveletto

ANÁLISE DO CONTROLE LITO-ESTRUTURAL NAS PROPRIEDADES
GEOTÉCNICAS E ESTABILIDADE DE TALUDE DE DEPÓSITOS DE COLÚVIO, RIO
DO SUL, SANTA CATARINA

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

Local, 1 de dezembro de 2017.

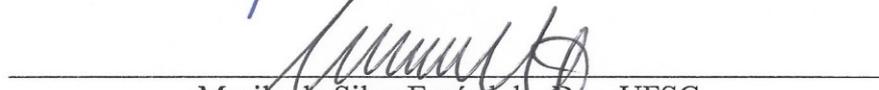


Prof. Marivaldo dos Santos Nascimento, Dr
Coordenador do Curso de Graduação em Geologia

Banca Examinadora:



Marivaldo dos Santos Nascimento, Dr- UFSC
Orientador



Murilo da Silva Espíndola, Dr. - UFSC
Coorientador



Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr. - UFSC



Jöel Robert Georges Marcel Pellerin, Dr. - UFSC

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nicolau e Teresinha, por sempre me apoiarem e me proporcionarem a enorme oportunidade de frequentar uma universidade.

À minha irmã Amanda e a meu cunhado Jonas por sempre me incentivarem e me alegrarem.

Ao meu orientador Marivaldo e coorientador Murilo, por aceitarem me orientar e por me ajudarem e me acompanharem desde o início à conclusão deste trabalho.

À todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a execução deste trabalho, seja nas viagens de campo ou durante a realização dos ensaios laboratoriais, em especial aos colegas do ANBA e do Laboratório de Mecânica do Solos da UFSC, e ao Vitor Santini Müller pela ajuda prestada.

À UFSC e à FAPEU, pela infraestrutura de salas, laboratórios e bibliotecas, e pelo apoio financeiro nos ensaios laboratoriais.

A todos os professores do curso de Geologia da UFSC, por todo o conhecimento compartilhado durante a graduação, sem o qual não conseguiria escrever este TCC.

A todos os meus colegas de graduação, por compartilharem 5 anos de aulas, provas, seminários, campos, relatórios, *banners...*, e por me proporcionarem momentos divertidos durante a rotina de faculdade.

E por fim, agradeço novamente à minha família por todo o amor, apoio e carinho, sem os quais não conseguiria ter chegado até onde estou.

RESUMO

Regiões com relevo acidentado são caracterizadas pela alta instabilidade e processos geodinâmicos que resultam em uma variedade de movimentos de massa, como queda de blocos e fluxos de detritos. Os movimentos de massa representam um dos maiores riscos naturais da cidade de Rio do Sul, localizada no nordeste do estado de Santa Catarina. Este trabalho investiga a relação entre litologia, estruturas tectônicas, propriedades geotécnicas e deslizamentos nesta área. Os resultados demonstraram que o controle litológico é expresso tanto no grau de alteração das diferentes rochas, sendo que os folhelhos e depósitos de colúvio são mais suscetíveis ao intemperismo e erosão, quanto no conteúdo de argilominerais presentes, sendo que a illita representa a maior porção de argila nas unidades estratigráficas da área. O controle estrutural é expresso em dois conjuntos de falhas e fraturas, o principal NE-SW e o secundário NW-SW, que afetam todas as unidades. A relação aproximadamente perpendicular entre os dois padrões teve grande contribuição para o maior acesso de agentes intempéricos e conseqüente fragmentação das litologias. O depósito coluvionar estudado representa o resultado de movimentos de massa ocorridos na área. As propriedades geotécnicas e os parâmetros de resistência mostraram uma boa correspondência com a textura granulométrica, que é relacionada à composição mineral da rocha de origem e aos processos de intemperismo, erosão e alteração ocorridos, com conseqüências nas características físicas das partículas. A análise de estabilidade do talude que compreende folhelhos da UE2 e o depósito de colúvio (UE5) mostra que a presença de nível d'água elevado é responsável por diminuir substancialmente o fator de segurança, o que leva a interpretação de que este talude é instável durante eventos de precipitação atípica. Os resultados obtidos neste trabalho possibilitam afirmar que as propriedades geotécnicas de depósitos de colúvio na cidade de Rio do Sul são influenciadas pela litologia e contexto estrutural. Desta forma, a consideração destes fatores na análise de áreas de risco é de fundamental importância, sendo que estudos de detalhe que investigam estes fatores têm grande utilidade na prevenção de desastres geológicos e em uma expansão urbana consciente.

Palavras-chave: Controle geológico. Comportamento geotécnico. Depósito coluvionar

ABSTRACT

Mountain regions are characterized by high-instability and geodynamic processes which result in a wide variety of mass movement, like rockfalls and debris flow. Mass movement constitutes one of the major hazard in the Rio do Sul city, northeast of Santa Catarina state. This study investigates the relationship between rock types, tectonic structures, geotechnical properties and land-slide hazard in these regions. The structural control of specific types of failure zones are related to mass flow types and to the geotechnical properties of soil and rocks. The lithological control is mainly expressed at different weathering grades of distinct types of rocks, therefore, shales, followed by poorly cemented medium to finegrained, are the most susceptible to landsliding. Results show that failures and fractures directions, and the sedimentary stratigraphic succession are directly related with mass movements in the study area. This mass movements are expressed by thick colluvial deposits that overlay the sedimentary units of Rio do Sul Formation. Therefore, it is possible to assume that mass movements in Rio do Sul city can be explained by the geological context and by the geotechnical behaviour of rocks and soils.

Keywords: Geological controls. Geotechnical behaviour. Colluvial deposit

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Contexto geológico e estrutural da área de estudo | 15 |
| Figura 2 - Classificação dos movimentos de massa | 18 |
| Figura 3 - Sequência de Goldish | 22 |
| Figura 4 - Estruturas tectônicas e intemperismo: | 23 |
| Figura 5 - Geração das formas de relevo..... | 24 |
| Figura 6 - Formação de argilominerais conforme aumento na intensidade do intemperismo:..... | 26 |
| Figura 7. Curvas granulométricas comuns em solos. | 28 |
| Figura 8 - Prensa de cisalhamento..... | 30 |
| Figura 9. Localização da área de estudo..... | 31 |
| Figura 10 - Bacia do Paraná | 35 |
| Figura 11 - Geomorfologia da área de estudo | 37 |
| Figura 12 - Amostragem de corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto | 40 |
| Figura 13 - Contexto geológico da área de estudo | 44 |
| Figura 14 - Principais características das UE1 e UE2..... | 47 |
| Figura 15. Principais características da UE4..... | 48 |
| Figura 16 - Contato entre UE2 e o depósito de colúvio | 50 |
| Figura 17 - Comparação entre as diferentes técnicas de imageamento | 51 |
| Figura 18 - Composição mineralógica da litofácies FB.1 | 52 |
| Figura 19 - Composição mineralógica da litofácies FC | 53 |
| Figura 20 - Fotomicrografias do arenito da UE3..... | 54 |
| Figura 21 - Fotomicrografias MEV e espectro EDS da UE4 | 55 |
| Figura 22 - Fotomicrografias MEV e espectro EDS do solo coluvionar da UE5..... | 56 |
| Figura 23 - Lineamentos estruturais interpretados | 58 |
| Figura 24 - Estruturas tectônicas presentes na UE2 e UE4 | 59 |
| Figura 25 - Distribuição granulométrica das amostras..... | 62 |
| Figura 26 - Classificação textural das amostras | 63 |
| Figura 27 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para a matriz coluvionar | 64 |
| Figura 28 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para o solo coluvionar..... | 64 |
| Figura 29 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para o material vulcânico..... | 64 |
| Figura 30 - Análise de estabilidade para condição sem nível d'água..... | 67 |
| Figura 31. Análise de estabilidade para condição com nível d'água a 1 m da superfície | 68 |
| Figura 32 - Integração dos dados mineralógicos, estruturais e de resistência ao cisalhamento direto | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Principais características das litofácies sedimentares | 45 |
| Tabela 2 - Índices físicos e granulometria geral..... | 60 |
| Tabela 3 - Porcentagem das frações granulométricas | 60 |
| Tabela 4 - Parâmetros da curva de distribuição granulométrica | 62 |
| Tabela 5: Parâmetros de resistência das amostras cisalhadas..... | 65 |
| Tabela 6: Parâmetros utilizados na análise de estabilidade..... | 66 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A.G.- Areia Grossa

A.M.- Areia Média

An – Anatásio

ANA – Agência Nacional de Águas

A.F - Areia Fina

ASTM – American Society for Testing and Materials

BP – Bacia do Paraná

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CD – Consolidado Drenado

CEPED - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DRX - Difração de Raios X

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy*)

EPAGRI/CIRAM - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina

F - Feldspato

Fm – Formação

FS – Fator de Segurança

GPS – Global Position System

HSV – Matiz, Saturação e Valor (*Hue, Saturation and Value*)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IAEG – Associação Internacional para Engenharia Geológica (*International Association for Engineering Geology*)

ICDD – Centro Internacional de Dados de Difração (*International Centre for Diffraction Data*)

il – Illita

il/S – Illita e Esmectita interestratificadas

Kf – Feldspato potássico

LABLAM - Laboratório de Laminação

LABSED - Laboratório de Sedimentologia

LAMIR - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas

LCME - Laboratório Central de Microscopia Eletrônica

LMS - Laboratório de Mecânica dos Solos

LST – Laser Scanner Terrestre

Lt – Fragmento Lítico

Mc - Microclínio

MDE - Modelo Digital de Elevação

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MO – Matéria Orgânica

Ms - Muscovita

mx - Matriz

NBR – Norma Brasileira

P - Plagioclásio

Pedr.- Pedregulho

Q – Quartzo

UE – Unidade Estratigráfica

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture*)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Al - Alumínio

c – Coesão

C_{10} - Diâmetro efetivo

C_c - Coeficiente de Curvatura

Ca - Cálcio

C_u - Coeficiente de uniformidade

e - Índice de vazios

Fe - Ferro

K - Potássio

kN/m^3 - Quilo Newton/metro cúbico

kPa – Quilo Pascal

Mg - Magnésio

mm - Milímetro

N - Nitrogênio

n - Porosidade

Na: Sódio

nm - Nanômetro

O - Oxigênio

R^2 - Coeficiente de correlação de Pearson

Si - Silício

Sr - Grau de saturação

Ti - Titânio

W_{nat} - Teor de umidade natural

γ_d - peso específico aparente seco

γ_s - peso específico dos sólidos

γ_{sat} - peso específico saturado

μm - Micrômetro

σ_n : Tensão normal

τ_{cis} : Tensão cisalhante

ϕ - Ângulo de atrito interno ($\phi=30^\circ$, c

$^\circ\text{C}$ - Graus Celsius

% - Porcentagem

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 PRINCIPAIS | 16 |
| 2.2 ESPECÍFICOS | 16 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 3.1 MOVIMENTOS DE MASSA..... | 17 |
| 3.1.1 Fluxo de detritos | 19 |
| 3.1.2 DEPÓSITOS DE COLÚVIO | 20 |
| 3.2 CONTROLES GEOLÓGICO-GEOMÓRFOLÓGICOS | 21 |
| 3.2.1 Composição mineralógica | 21 |
| 3.2.2 Estruturas Tectônicas | 22 |
| 3.2.3 Aspectos geomorfológicos | 23 |
| 3.2.4 Intemperismo e erosão | 24 |
| 3.2.5 Argilominerais | 25 |
| 3.3 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS..... | 26 |
| 3.4 A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS..... | 28 |
| 3.4.1 Ensaio de cisalhamento direto | 29 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 31 |
| 4.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS | 31 |
| 4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO | 32 |
| 4.2.1 Arcabouço Estratigráfico da Bacia do Paraná | 32 |
| 4.2.2 Arcabouço Estrutural da Bacia do Paraná | 35 |
| 4.2.2 Contexto Geomorfológico | 36 |
| 5 MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 38 |
| 5.2 ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS | 38 |
| 5.3 COLETA DE DADOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS..... | 39 |
| 5.3.1 ANÁLISE LITOLÓGICA | 40 |
| 5.4 AQUISIÇÃO DE NUVEM DE PONTOS | 41 |
| 5.5 MICROSCOPIA..... | 41 |
| 5.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) | 42 |
| 5.7 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA | 43 |
| 5.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE..... | 43 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 44 |
| 6.1 UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS | 44 |
| 6.1.1 Unidade Estratigráfica (UE1) | 45 |
| 6.1.2 Unidade Estratigráfica 2 (UE2) | 46 |
| 6.1.3 Unidade Estratigráfica 3 (UE3) | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.4 Unidade Estratigráfica 4 (UE4) | 48 |
| 6.1.5 Depósito de colúvio (UE5) | 49 |
| 6.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA | 52 |
| 6.3 ESTRUTURAS TECTÔNICAS | 56 |
| 6.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO COLÚVIO | 60 |
| 6.4.1 Caracterização geotécnica | 60 |
| 6.4.2 Resistência ao cisalhamento direto | 63 |
| 6.4.2 Análise de estabilidade | 65 |
| 7. CONCLUSÕES | 69 |
| 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 72 |
| REFERÊNCIAS | 73 |
| ANEXO A - Artigo aceito para publicação no IAEG 2018 – San Francisco / USA | 78 |

1 INTRODUÇÃO

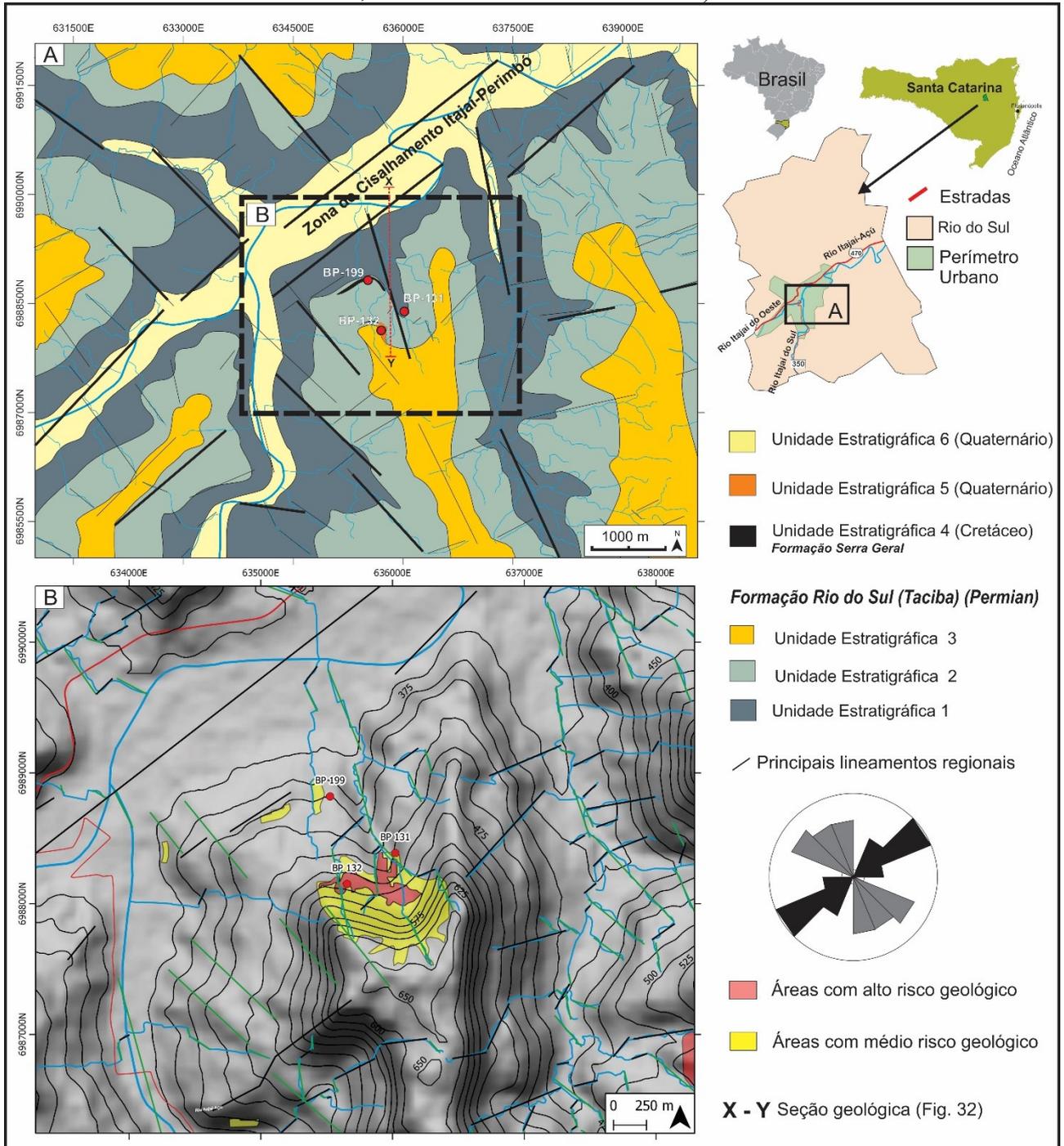
Movimentos de massa em áreas urbanas, especialmente com relevo acidentado, combinados a épocas de alta pluviosidade, podem causar desastres naturais que põem em risco a vida da população, além de promoverem danos sociais e prejuízos econômicos. No Estado de Santa Catarina, principalmente em áreas de bacias sedimentares como a Bacia do Paraná e a Bacia do Itajaí, os movimentos de massa são muito frequentes. Desastres naturais provocados por estes processos são recorrentes em regiões do Vale do Itajaí, que inclui os municípios de Rio do Sul, Blumenau e Alfredo Wagner, por exemplo.

A área de pesquisa deste Trabalho de Conclusão de Curso, está localizada no município de Rio do Sul, sudeste do bairro Santana, leste do perímetro urbano (Figura 1). Nesta área há histórico de movimentos de massa, especialmente nos anos em que houve alta taxa de pluviosidade, com consequentes inundações. Segundo estudos prévios realizados pelo Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), muitas casas e conjuntos residenciais foram construídos sobre depósitos de tálus antigos provenientes de folhelhos do Membro Rio do Sul, Formação Taciba (FRANÇA e POTTER, 1988), Supersequência Gondwana I da Bacia do Paraná. Estes depósitos são constituídos de blocos de arenito sustentado por matriz areno-argilosa e silto-argilosa e apresentam grande expressão em área e espessura considerável que recobre um solo residual (CEPED, 2011).

O objetivo da pesquisa aqui apresentada foi realizar um estudo da relação dos aspectos lito-estruturais e estratigráficos nas propriedades geotécnicas de depósitos de colúvio no sudeste do bairro Santana, Município de Rio do Sul. O estudo utilizou diferentes métodos que inclui: caracterização mineral do substrato rochoso, a partir do estudo de três afloramentos (Figura 1), e dos depósitos coluvionares, a partir do estudo de um afloramento, definição de um arcabouço estratigráfico da área, descrição de estruturas sedimentares e tectônicas, imageamento de afloramentos e testes de resistência ao cisalhamento direto.

Apesar de os movimentos de massa ocorrerem naturalmente, eles são processos dinâmicos, que podem ser acelerados pela ação antrópica. Fatores responsáveis por condicionar a dispersão de massas, como a estabilidade das encostas e o conteúdo de água, podem ser influenciados por atividades humanas que modificam os taludes naturais. A interpretação integrada destes dados permitiu discutir a influência dos aspectos geológicos na dinâmica dos movimentos de massa na área de estudo, tendo em vista a aplicação direta na elaboração de cartas geotécnicas para planejamento da ocupação urbana e a mitigação de riscos à desastres naturais.

Figura 1 - Contexto geológico e estrutural da área de estudo: (A) Mapa geológico com as principais unidades estratigráficas e o contexto estrutural. Os maiores lineamentos NE-SW são paralelos à Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó; (B) Mapa geomorfológico com áreas de alto e médio risco geológicos. Os lineamentos estruturais principais NE-SW são associados com a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP), enquanto que os lineamentos menores e mais dispersos refletem o padrão estrutural subordinado NW-SE; Os afloramentos estudados são representados pelos pontos vermelhos (BP131 - 636021.025mE / 6988387.74mS; BP132 - 635655.15mS / 6988150mS; BP199 - 635526mE / 6988820mS)



Fonte: Da autora (2017) (base de dados do IBGE, ANA, EPAGRI/CIRAM e CENAD-CPRM/SEDEC)

2 OBJETIVOS

2.1 PRINCIPAIS

Investigar a relação entre os aspectos lito-estruturais e geotécnicos no comportamento geomecânico de depósitos de colúvio oriundos de sucessões sedimentares da Formação Taciba, sudeste do bairro Santana, em Rio do Sul. Discutir a relação entre a composição mineralógica e a resistência ao cisalhamento direto de depósitos de colúvio e à suscetibilidade ao movimento de massa desta natureza.

2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos incluem: (1) caracterizar e mensurar as estruturas tectônicas na área; (2) Descrever a geometria espacial e as relações entre as unidades estratigráficas; (3) Determinar a composição mineral das unidades geológicas e dos depósitos de colúvio da área; e (4) Obter dados de resistência ao cisalhamento direto do depósito coluvionar.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa são processos dinâmicos que, geralmente, estão relacionados a ambiente de encosta com declividades suficientes para favorecer o deslocamento de material sob ação da força da gravidade. O início do processo de movimento massa não é causado pela ação de um agente erosivo, mas sim quando a força coesiva do material é superada pela força da gravidade (GROTZINGER; JORDAN, 2013). A perda da força coesiva pode ser desencadeada por terremotos ou pela súbita absorção de grande quantidade de água após eventos de precipitação extrema.

Os fatores primários que influenciam a dispersão do material em uma encosta são: a natureza do material (consolidado ou inconsolidado); a declividade e estabilidade das encostas; e a quantidade de água contida nos materiais. Estes fatores provocam a diminuição da resistência ao movimento do material, por isso, quando a combinação certa destes agentes leva ao desequilíbrio de uma encosta, o movimento de massa se torna inevitável. (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

A classificação geológica dos movimentos de massa é feita de acordo com três características: natureza do material, velocidade do movimento e natureza do movimento (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

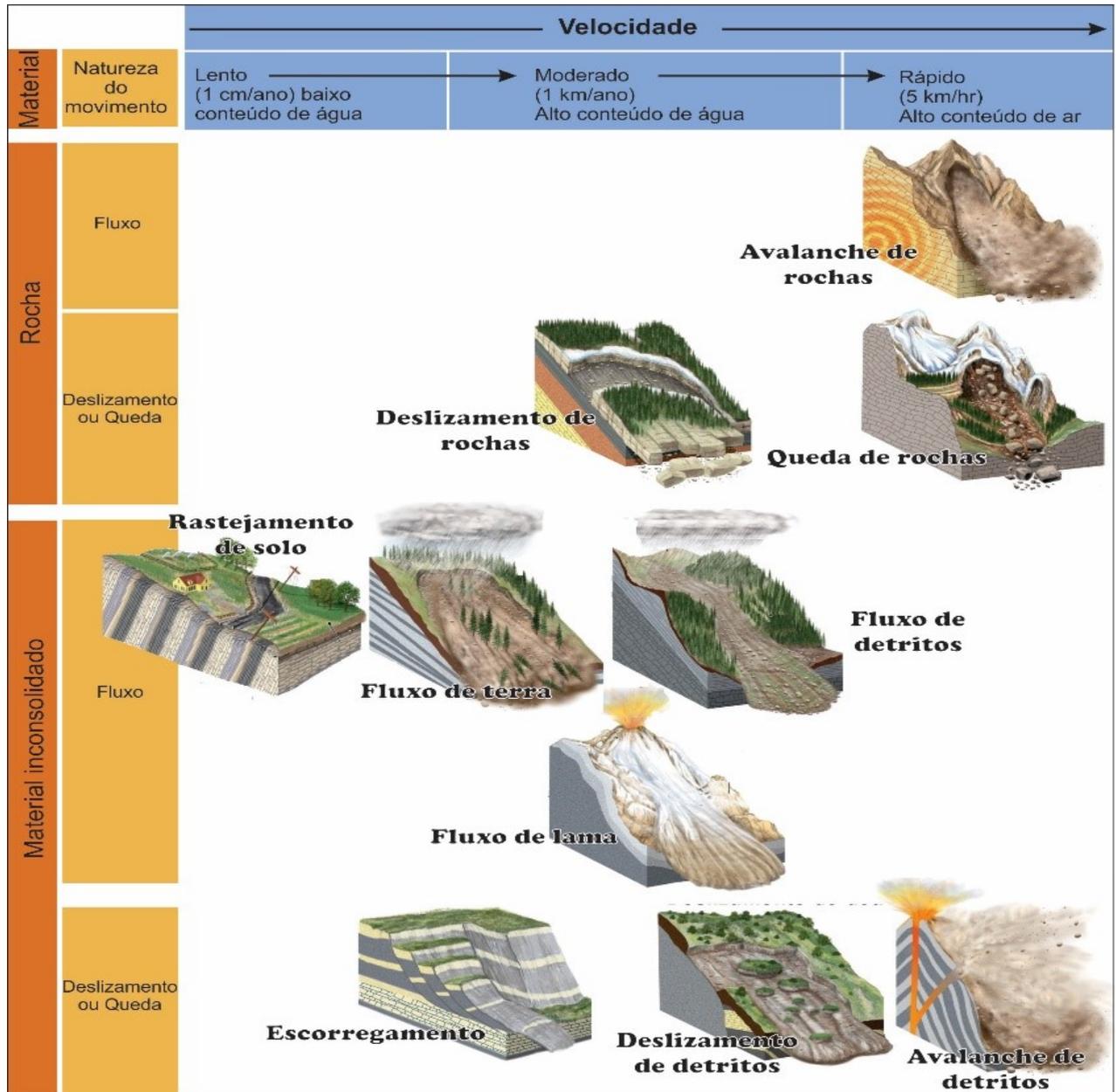
Dentre os materiais consolidados há a **avalanche de rochas**, movimento rápido que ocorre na forma de fluxo, devido ao material deslocado estar fragmentado em tamanhos menores. Estas características levam o material disperso a atingir uma distância de deslocamento maior.

Se o movimento ocorre por deslizamento, há o **deslizamento de rochas**, de velocidade moderada, em que o material disperso desliza pela encosta como um corpo unitário, geralmente através de planos de juntas ou da superfície de acamamento, quando são paralelos à declividade da encosta. Na **queda de rochas** o material é constituído de fragmentos individuais que caem, de súbito, em queda livre. Desta forma, a velocidade do movimento é muito rápida e a distância de deslocamento menor, em relação aos outros tipos de movimento (GROTZINGER e JORDAN, 2013).

Dentre os materiais inconsolidados, os movimentos que ocorrem na forma de fluxo compreendem o rastejamento de solo e os fluxos de terra, detrito e lama. O **rastejamento de solo** tem a menor velocidade, pois o movimento constitui uma deformação muito lenta do regolito, onde há uma diferença na velocidade de deslocamento entre as camadas superiores (mais velozes) e as inferiores. Nos **fluxos de terra** (ou solo) o material disperso é composto por grãos finos que se desprendem quando o solo permeável que constitui a encosta é saturado por excesso de água. O **fluxo de detritos** se diferencia do anterior pelo material ser composto de fragmentos de rocha, solo e as vezes matéria orgânica, que, combinados com água, formam uma matriz lamosa que sustenta os fragmentos. Nos fluxos de lama, além de grãos mais finos que areia, há grande quantidade de água.

Devido à pouca resistência ao movimento do material, este tipo de fluxo atinge alta velocidade de deslocamento.

Figura 2 - Classificação dos movimentos de massa: O tipo de material da encosta e o tipo e velocidade do movimento são os fatores classificatórios.



Fonte: Modificado de Grotzinger e Jordan (2013).

Se o movimento ocorre por deslizamento ou queda, o movimento pode ser classificado como escorregamento, deslizamento de detritos ou avalanche de detritos. O **escorregamento** ocorre quando o material desliza como um corpo unitário com velocidade variável, geralmente através de uma superfície basal côncava na encosta. No **deslizamento de detritos**, tanto o material rochoso quanto o solo deslizam como uma ou mais unidades de grandes proporções através de planos de fraqueza na encosta. A avalanche de detritos ocorre geralmente em regiões montanhosas e úmidas. Nestes locais, a combinação de excesso de água (ou ar) e encostas com alta declividade proporciona um movimento rápido, na forma de queda, de solo e rocha.

3.1.1 Fluxo de detritos

Fluxo de detritos é um tipo de movimento de massa com velocidade moderada a rápida e alto conteúdo de água. São compostos por uma mistura de solo e rochas provenientes da acumulação de tálus ou da mobilização de solos residuais sotopostos por depósitos coluvionares (SILVEIRA, 2016). Frequentemente podem iniciar como um deslizamento rotacional ou translacional e evoluírem para um fluxo de detritos, à medida que o movimento ganha velocidade e o material perde coesão ou água é adicionada, havendo a drástica diminuição da resistência ao cisalhamento e o aumento da fluidez (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

A ocorrência de fluxo de detritos é comum tanto em regiões de clima subtropical, em que há períodos de chuvas intensas e contínuas, como em áreas com a geomorfologia composta por vales fechados e anfiteatros de dimensões reduzidas formando pequenas sub-bacias, com a rocha aflorando geralmente em escarpas. O movimento tende a acelerar quando a infiltração da água pluviométrica aumenta a poro-pressão e reduz a sucção dentro dos taludes. O aumento da poro-pressão geralmente resulta na diminuição da tensão efetiva e da resistência ao cisalhamento do material da encosta (SILVEIRA, 2016).

Massad et al. (1997) aponta que, no fluxo de detritos, os fragmentos rochosos são movimentados em suspensão no topo da camada de lama (de deslocamento mais rápido), até o relevo suavizar ou o fluxo se dispersar em uma grande área. Com a progressiva diminuição do movimento, os fragmentos rochosos são depositados, criando uma barreira para a continuidade do fluxo. Entretanto o fluxo pode ser facilmente retomado à medida que a acumulação de material promovida pela própria barreira é capaz de desestabilizá-la. O desenvolvimento e ruptura destas barreiras confere

ao fluxo de detritos um caráter de movimento em pulsos, o que dificulta a delimitação de áreas de risco.

De acordo com Silveira (2016), diversos autores concordam que a mobilidade dos fluxos de detritos depende do conteúdo de argila presente na matriz da massa em movimento, uma vez que esta textura granulométrica provoca a redução da condutividade hidráulica e o aumento da poro-pressão.

Segundo uma visão mais geotécnica, as causas para a ocorrência de um fluxo de detritos podem ser divididas em internas e externas (TERZAGHI, 1967). O aumento da poro-pressão e a diminuição do intercepto coesivo e do ângulo de atrito efetivo são alguns exemplos de causas internas, responsáveis por reduzir a resistência ao cisalhamento do solo. Modificações na geometria do talude, responsáveis por aumentar as tensões cisalhantes, são exemplos de causas externas.

3.1.2 DEPÓSITOS DE COLÚVIO

Os colúvios são depósitos, onde predominam os movimentos de massa, acumulados nas porções médias e inferiores das encostas (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2009), originados pela relação entre os processos de intemperismo/erosão e o transporte por gravidade, sem haver a ação canalizada do escoamento superficial (MELO et al., 2005). São constituídos por partículas de qualquer dimensão, desde grãos a matacões, transportadas por gravidade e acumuladas a meia encosta (LACERDA; SANDRONI, 1985). Estes mesmos autores consideram que estes depósitos são provenientes de taludes mais íngremes ou de escarpas rochosas. Apesar da possível presença de fragmentos rochosos de grande dimensão, a matriz de solo que envolve os fragmentos é sempre o material predominante. A constituição mineralógica e granulométrica dos depósitos coluvionares depende dos materiais de origem, da forma de transporte e do grau de alteração do colúvio (BRESSANI, 2005).

A formação dos depósitos de colúvio está associada a processos erosivos que têm ação contínua e intermitente, geralmente relacionadas à episódios de precipitação atípica (LACERDA, 2002). O processo de erosão superficial ou laminar transporta partículas de solo para elevações mais baixas onde são depositadas suavemente. Outro processo de formação dos colúvios ocorre quando uma porção do solo residual é movimentada abruptamente como uma única unidade. Em locais onde há exposição de rocha, há o desprendimento de fragmentos que são transportados por queda livre ou escorregamento e são depositados junto ao colúvio. Os fragmentos rochosos transportados por gravidade constituem o depósito de tálus, que passa a fazer parte do próprio colúvio quando há o deslocamento conjunto dos fragmentos e do solo coluvionar, geralmente na forma de fluxo de detritos (PERAZZOLO, 2003).

Soares e Politano (1997), diferenciam os termos tálus de colúvio, ao considerarem o tálus um tipo específico de solo coluvionar. Para estes autores, o tálus é composto por uma quantidade maior

de blocos e matacões, que podem estar misturados a um solo silto-arenoso, depositados no sopé ou nos talvegues das encostas. Para Lara, Marques e Almeida (1997), tálus é um depósito constituído por fragmentos rochosos provenientes da encosta a montante, que apresenta indícios de terem sido transportados por movimentos de massa pretéritos. Estes fragmentos têm tamanho e formas variadas, são dispostos caoticamente e envoltos em uma matriz coluvionar.

Se a deposição é contínua ao longo do tempo, o colúvio pode ser constituído pelo acúmulo de várias camadas, o que contribui para a heterogeneidade do depósito. Devido as diferentes características, é comum a presença de diferentes zonas de condutividade hidráulica dentro do colúvio, sendo que há a tendência da diminuição da condutividade a jusante, conforme diminui também o tamanho das partículas. Diferentes zonas de condutividades hidráulicas podem ser geradas pela presença de intrusões magmáticas, acamadamento de rochas sedimentares, superfícies de dobras e foliações metamórficas, descontinuidades estruturais e características anisotrópicas na rocha. A heterogeneidade da condutividade hidráulica favorece o aumento de poro-pressões em camadas específicas, situação que, se combinada com a presença abundante de argilas, pode levar ao rompimento do colúvio (PERAZZOLO, 2003).

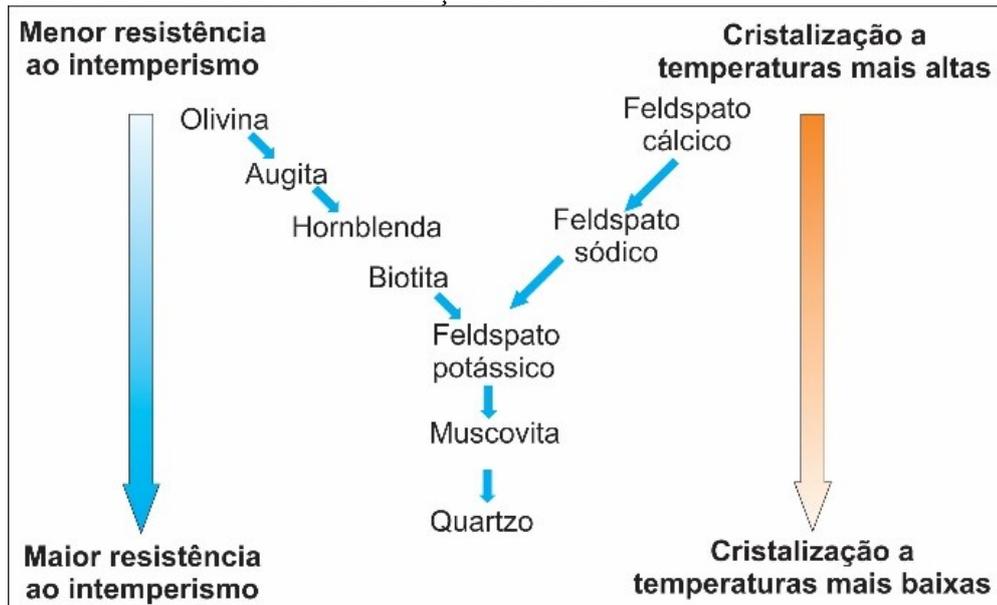
3.2 CONTROLES GEOLÓGICO-GEOMÓRFOLÓGICOS

3.2.1 Composição mineralógica

A composição mineralógica é um dos principais fatores que condicionam o intemperismo. De acordo com a suscetibilidade de alteração dos minerais presentes, o grau de alteração do material que constitui a encosta pode ser maior ou menor. A série de Goldish apresenta um ordenamento dos minerais de acordo com sua resistência ao intemperismo (Figura 3). Esta resistência pode ser relacionada à temperatura de cristalização do mineral durante a formação da rocha ígnea, sendo que a resistência ao intemperismo aumenta conforme a temperatura de cristalização for menor. Além da temperatura de cristalização, os minerais que possuem boa clivagem, como micas e feldspatos, são mais suscetíveis ao faturamento e a consequente fragmentação e aumento da área superficial (IRFAN, 1994).

A granulometria é outra característica petrográfica que influencia na taxa de alteração, pois quanto mais fino o grão, maior é a razão entre sua superfície e seu volume, e desta forma, a exposição aos agentes intempéricos também é maior (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Figura 3 - Sequência de Goldish: A resistência ao intemperismo da maioria dos minerais de silicato pode ser considerada como o inverso da série de cristalização de Bowen.



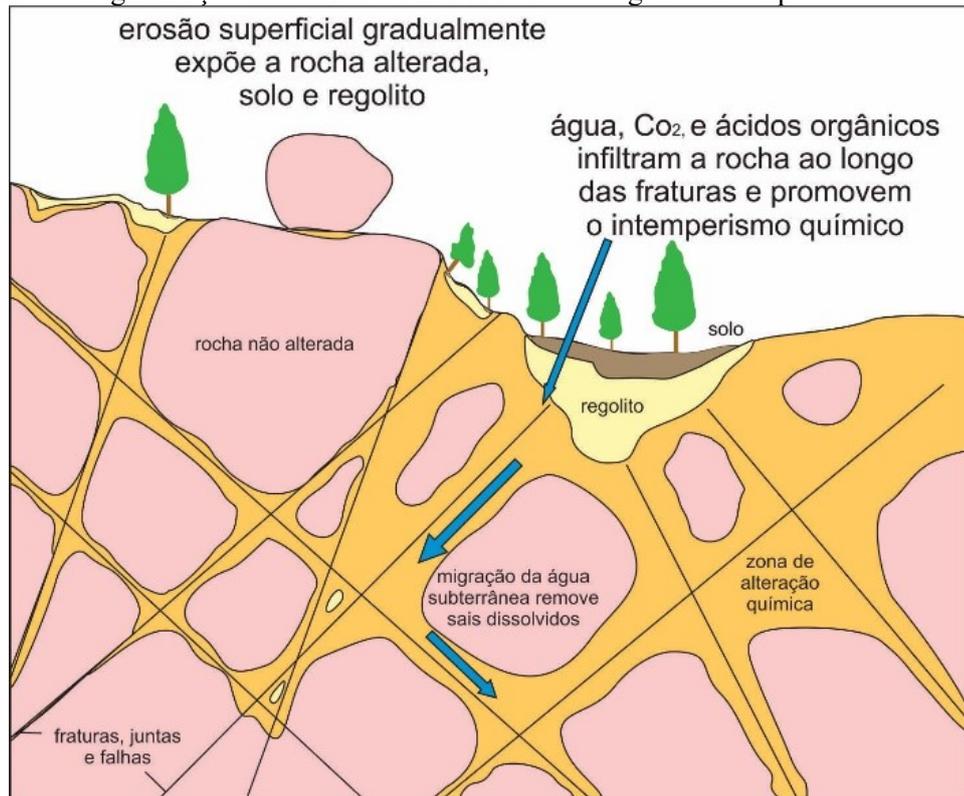
Fonte: Modificado de Goldish (1938).

3.2.2 Estruturas Tectônicas

As estruturas tectônicas representam superfícies de fraqueza no material e têm papel fundamental na suscetibilidade a movimentos de massa. A presença de falhas, fraturas e superfícies de acamamento proporcionam maior acesso aos agentes intempéricos, o que aumenta o grau de alteração das rochas. O aumento da área superficial onde o intemperismo atua, gerado pelas discontinuidades estruturais, promove a formação de minerais secundários e a fragmentação das rochas (Figura 4)

Além disto, a movimentação tectônica pode alterar a orientação de superfícies como o acamamento sedimentar, a foliação metamórfica ou o bandamento composicional. Se a orientação for paralela à face do talude, a força da gravidade torna-se mais efetiva e o movimento do material é facilitado. Estas características geológicas, não se restringem ao material rochoso, uma vez que são herdadas em solos residuais (CHRISTOFOLETTI, 1980). Desta forma, o conhecimento geológico de um local é fundamental em uma análise de movimentos de massa.

Figura 4 - Estruturas tectônicas e intemperismo: Os planos de fraqueza gerados pelas discontinuidades promovem a maior fragmentação das rochas e o maior acesso de agentes intempéricos.



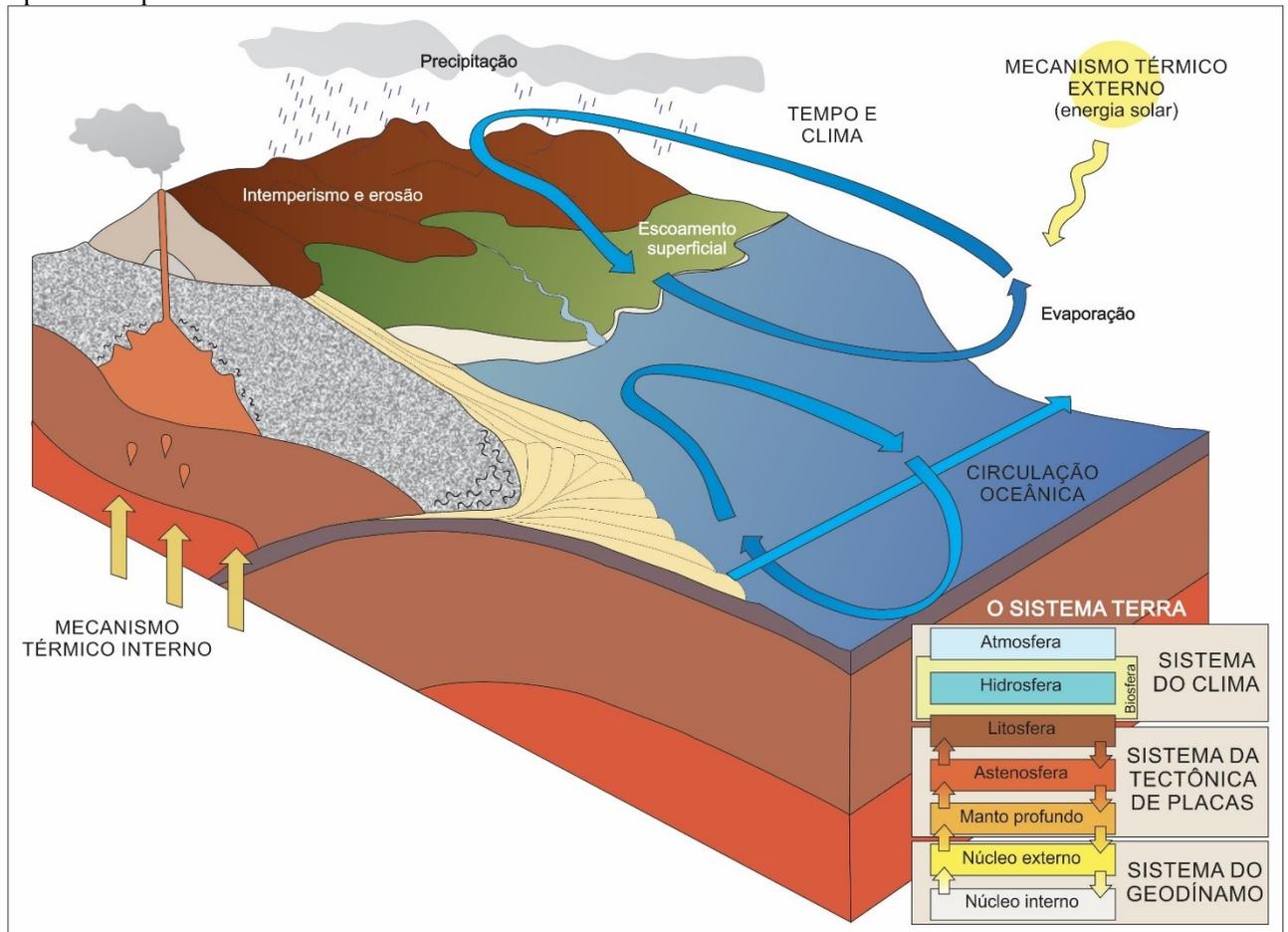
Fonte: Modificado de Stoffer (2017).

3.2.3 Aspectos geomorfológicos

A Geomorfologia trata do estudo das formas de relevo e investiga suas origens e evolução (GROTZINGER; JORDAN, 2013). As formas de relevo são o resultado da interação entre a tectônica de placas, que promove o soergimento das rochas, e entre o clima, que favorece ou não os processos intempéricos e erosivos (Figura 5). Portanto são feições geradas pela tectônica e esculpidas pela erosão e sedimentação.

A dispersão de massa é um dos agentes erosivos responsáveis por configurar a geomorfologia do terreno. As cicatrizes e os depósitos de detritos, observados em campo ou em fotografias aéreas, podem ser usadas como indícios de antigos movimentos de massa. Reciprocamente, a análise do material transportado e da geometria de acomodação do mesmo podem ser indícios dos processos responsáveis por perturbar e transformar a paisagem.

Figura 5 - Geração das formas de relevo: A geomorfologia é controlada pela interação dos mecanismos térmicos internos e externos da Terra. O calor interno controla a tectônica, que soergue a superfície. O mecanismo térmico externo controla o clima e o intemperismo, que, junto com a erosão, desgastam a superfície e preenchem as bacias com sedimentos.



Fonte: Modificado de Grotzinger; Jordan (2013).

3.2.4 Intemperismo e erosão

Intemperismo e erosão são processos geológicos fundamentais no ciclo das rochas, principalmente na formação das rochas sedimentares, além de contribuírem para a remodelagem do relevo.

Intemperismo é o processo químico ou físico de deterioração das rochas após serem expostas na superfície terrestre (GROTZINGER e JORDAN, 2013). No intemperismo químico os minerais que compõem as rochas são quimicamente alterados ou dissolvidos. No intemperismo físico há a fragmentação mecânica das rochas, sem haver mudanças mineralógicas na sua composição. Apesar de diferentes condições climáticas promoverem uma maior relevância de um tipo de intemperismo em relação ao outro, os dois não se reprimem, pelo contrário, eles se intensificam mutuamente. Enquanto a decomposição química facilita a fragmentação física das rochas, esta última promove maior superfície para ação do intemperismo químico.

Erosão é o conjunto de processos que desagregam e transportam o material produzido pelo intemperismo de um local de origem até um local de deposição. Água (no estado líquido ou sólido) e

vento são os agentes de transporte. A ação conjunta do intemperismo e erosão modela a superfície terrestre e altera as rochas expostas. A intensidade destes processos, além de dependerem de fatores exógenos, como clima e atividade biológica, é controlada pelos fatores endógenos, diretamente relacionados à natureza do protólito e à tectônica associada (PORTO, 2000). Outro fator que pode acelerar o intemperismo e a erosão é a atividade antrópica, através de escavações para ocupação humana e exploração mineral, e por meio da poluição, que promove a chuva ácida.

A dispersão de massa é uma das consequências do intemperismo e erosão das rochas expostas na superfície terrestre. Desta forma, a estabilidade das encostas, um dos fatores que influenciam nos movimentos de massa, é condicionada por estes dois processos. Materiais que foram dispersos e depositados devido à movimentos de massa antigos sofrem erosão de forma ampla e fácil, porque já se encontram fragmentados em grãos finos dispostos em grandes áreas da superfície, tornando-os ainda mais suscetíveis ao intemperismo (GROTZINGER e JORDAN, 2013). Em uma dada região, as propriedades da rocha de origem, o clima, a presença de solo e o tempo de exposição da rocha à superfície são fatores que controlam as taxas de intemperismo e erosão e, conseqüentemente, influenciam na estabilidade das encostas.

A condição climática de uma região tem grande importância nos processos de intemperismo e erosão, principalmente no que diz respeito ao controle exercido pela precipitação pluviométrica. A infiltração da água pluviométrica provoca a saturação do solo e, conseqüentemente, a diminuição da coesão aparente, o surgimento de força de percolação, a elevação das poro-pressões e a eventual erosão interna da encosta (SILVEIRA, 2016).

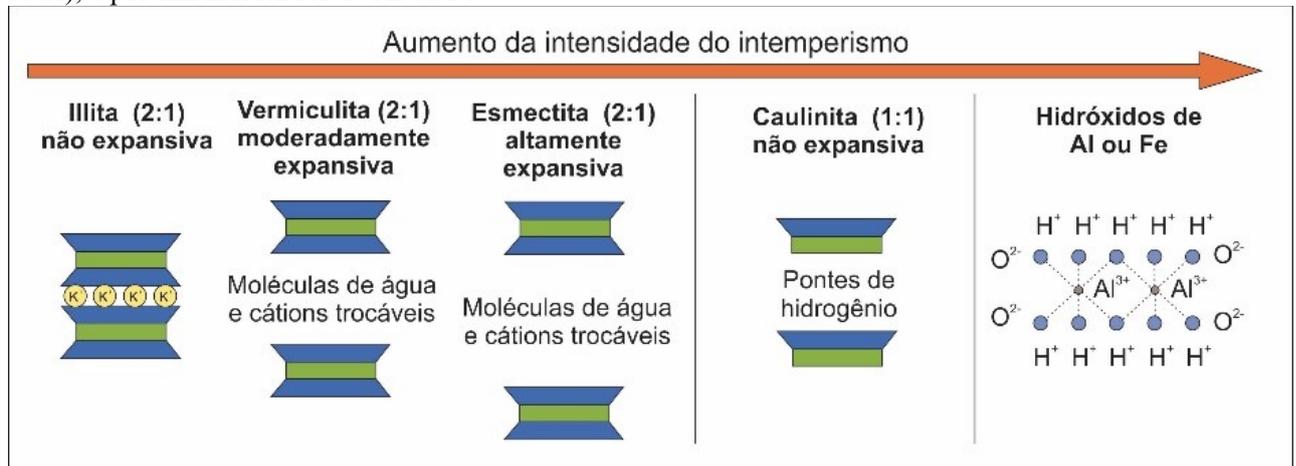
3.2.5 Argilominerais

Argilominerais são minerais de tamanho argila (menor que 0,002 mm – escala granulométrica de Wentworth) formados a partir da alteração química de outros minerais de silicato, como feldspatos, anfibólios e micas. A alteração ocorre durante o intemperismo químico ou a diagênese de rochas sedimentares. Os argilominerais são produto do intemperismo e refletem tanto a natureza e a intensidade deste processo, quanto a composição da rocha de origem (BOGGS JR, 2006).

A formação dos argilominerais depende da intensidade do intemperismo e lixiviação (Figura 6). A ação moderada e recente do intemperismo químico favorece a formação de illitas (silicato de Al e K) ou esmectitas (silicato de Al, Mg e Ca hidratado). Estes argilominerais com estrutura 2:1 têm uma ampla variedade de propriedades, composições químicas e capacidades de trocas catiônicas (CTC), devido a substituição de íons entre suas camadas. Se o intemperismo for mais intenso e prolongado, argilominerais estruturalmente mais simples, como a caulinita (silicato de Al hidratado)

são formados. E quando o intemperismo químico é extremamente intenso, a formação de hidróxidos de alumínio, como a gibbsita, é favorecida.

Figura 6 - Formação de argilominerais conforme aumento na intensidade do intemperismo: Argilominerais 2:1 (com uma camada octaédrica de Al entre duas camadas tetraédricas de Si) são primeiramente formados, seguidos por argilominerais 1:1 (com intercalação de uma camada octaédrica de Al e uma camada tetraédricas de Si), e por fim hidróxidos de Al ou Fe.



Fonte: Modificado de WEATHERING... (2014).

Além do tipo de argilomineral indicar a natureza e a intensidade do intemperismo no qual o material foi submetido, as características e teor dos argilominerais têm influência no comportamento do solo, quando a umidade é presente. Quando o teor de argila representa 50% ou mais da fração granulométrica do solo, as propriedades de engenharia do solo são determinadas fundamentalmente pelos argilominerais (DAS, 2007).

3.3 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

As propriedades geotécnicas de um solo refletem suas propriedades físicas e mecânicas. Estas propriedades são influenciadas pelo contexto geológico da rocha de origem e pelos processos geológicos e pedogenéticos que atuaram na evolução do solo. O teor de umidade, peso específico e granulometria são algumas propriedades geotécnicas que podem ser obtidas por meio de ensaios de caracterização.

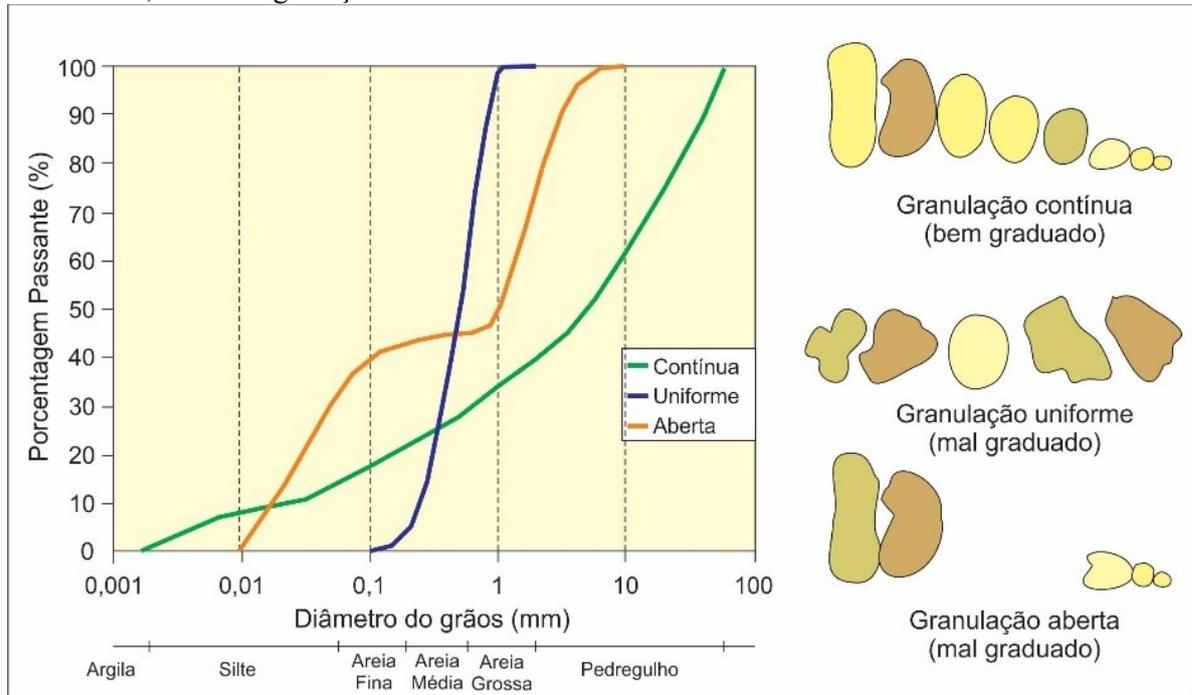
O teor de umidade expressa a relação entre a massa de água e a massa de partículas sólidas presentes em um mesmo volume de solo (DNER, 1994). Pode ser obtido através da diferença entre a massa de solo em estado de umidade natural e a massa deste mesmo solo após secagem em estufa.

O peso específico (ou massa específica) dos sólidos representa a relação entre o peso específico de um material e o peso específico da água (DAS, 2007). O peso específico de um material dependerá, principalmente, de sua constituição mineral. Em geral, o peso específico dos minerais formadores de rocha mais comuns fica em torno de 2,6 a 2,9 g/cm³. A diferença entre peso e massa específica é

apenas uma questão de unidades, sendo que o peso específico é igual a massa específica multiplicada pela aceleração da gravidade (PINTO, 2006). O peso específico é determinado pela diferença de volume ocasionada por um material imerso em um líquido, conforme explica o Princípio de Arquimedes.

A análise granulométrica objetiva a determinação da distribuição do tamanho das partículas que constituem o material. A faixa de tamanho é expressa em porcentagem do peso total (DAS, 2007). É comum separar a análise em duas etapas: o peneiramento, em que a fração grossa é analisada (partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro), e a sedimentação, em que a fração fina é analisada (partículas menores que 0,075 mm de diâmetro). O ensaio de peneiramento envolve a agitação de uma massa conhecida do material em um conjunto de peneiras montadas de forma que o tamanho de abertura da tela seja progressivamente menor. O ensaio de sedimentação consiste na separação das frações granulométricas através do princípio da sedimentação dos grãos em água (DAS, 2007). Este princípio assume que a velocidade de decantação de uma partícula é influenciada pela sua forma, tamanho e peso, e também pela viscosidade da água. Com os resultados dos ensaios é possível construir uma curva de distribuição granulométrica, em que a forma da curva indica o tipo de distribuição do tamanho das partículas (Figura 7).

Figura 7. Curvas granulométricas comuns em solos: As diferentes curvas indicam tipos diferentes de distribuição do tamanho dos grãos. A curva contínua representa um solo bem graduado, ou seja, constituído por uma grande variedade de tamanhos de grãos; a curva uniforme representa um solo constituído apenas por partículas de mesmo tamanho; e a curva aberta indica um solo com uma combinação de duas ou mais frações granulométricas, sem uma gradação entre elas.



Fonte: Modificado de Varela (2015).

3.4 A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna que a massa pode oferecer por área unitária, quando for submetida à esforços gerados por processos de ruptura ou deslizamento (DAS, 2007). A coesão e o ângulo de atrito interno de um material são parâmetros que conferem resistência ao cisalhamento, portanto são utilizados na interpretação do processo de ruptura.

A coesão é uma tensão que provoca a atração entre as partículas do material. Esta atração é dita verdadeira, quando é resultado da atração iônica entre as partículas, geradas por forças eletroquímicas, ou quando é resultado da cimentação, herdada da rocha de origem ou gerada por processos deposicionais ou pedogenéticos. A atração gerada pela coesão é dita aparente, quando depende diretamente das condições de umidade do material, uma vez que é resultado das forças capilares geradas quando há saturação parcial, portanto, se a saturação for mínima ou máxima esta atração desaparece (Higashi; Espíndola, 2011).

O ângulo de atrito interno (ϕ) é o máximo ângulo que pode ser formado entre a força normal e a horizontal (resultante das forças normal e tangencial) sem que haja movimento de deslizamento. A força normal atua sobre a superfície da partícula, e a força horizontal tende a deslocar uma partícula em relação à outra e promover o deslizamento. O atrito interno pode ser gerado por deslizamento

entre superfícies de partículas adjacentes, ou pelo embricamento (arranjo) das mesmas. (CAPUTO, 1987)

Além da composição e arranjo das partículas, a presença de estruturas de deformação influencia na resistência ao cisalhamento. Tal situação pode ser comprovada, por exemplo, em um ensaio de cisalhamento direto, em que um mesmo material submetido às mesmas tensões apresentará resultados de resistência diferentes, dependendo da relação entre a orientação da descontinuidade e da direção do plano de ruptura. A resistência será mínima quando as orientações dos dois planos coincidirem e aumentará conforme o ângulo entre as duas superfícies for maior (Higashi; Espíndola, 2011).

A poro-pressão tem grande importância na resistência ao cisalhamento de um solo, pois seu aumento faz com que o estado de tensões efetivas se aproxime das condições de ruptura do solo (SILVEIRA, 2016). O aumento da poro-pressão não é necessariamente homogêneo em todo o talude, pois sua distribuição depende da variabilidade da permeabilidade e da condutividade hidráulica do solo. Esta variabilidade é grande em depósitos com heterogeneidade no tipo e tamanho das partículas, como é o caso dos depósitos coluvionares.

Bressani (2005) estudou a resistência ao cisalhamento com ensaios triaxiais em um solo coluvionar de arenito da escarpa da Serra Geral em Timbé do Sul (SC). Os autores apontaram que o mecanismo de ruptura de fluxos de detritos desenvolvidos no solo coluvionar está intimamente associado ao comportamento mecânico dos solos e ao fluxo de água sub-superficial que se estabelece nos mesmos. Perazzolo (2003) demonstrou que a resistência ao cisalhamento é dependente do tipo de argilomineral presente no solo ao estudar dois taludes da Formação Serra Geral, no Rio Grande do Sul, onde a abundante presença de esmectita, argilomineral expansivo, controlava o comportamento mecânico da encosta.

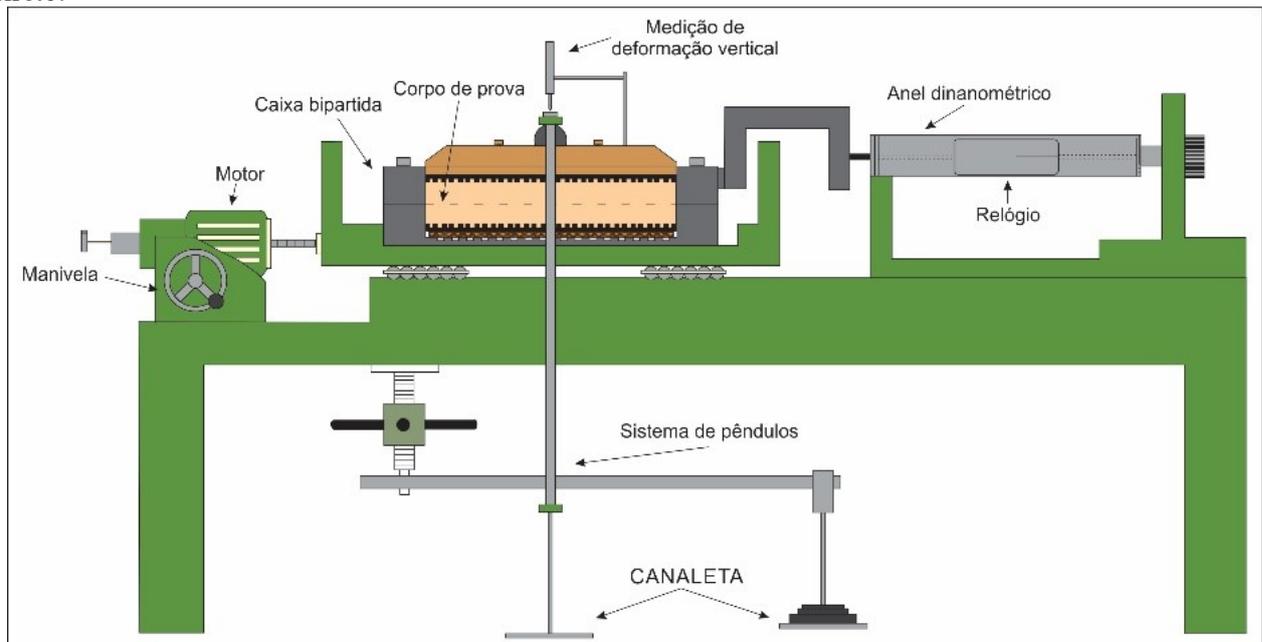
3.4.1 Ensaio de cisalhamento direto

Dentre os ensaios de laboratório tradicionais para determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, o ensaio de cisalhamento direto é o mais comum, pois oferece maior facilidade de coleta de amostras em campo e de modelagem em laboratório. O ensaio pode ser realizado em diferentes condições de ruptura (consolidado ou não consolidado e drenado ou não drenado), dependendo das características reais em que o solo se encontra em campo. A seguir é apresentado as etapas referentes ao ensaio de material consolidado drenado (CD), uma vez que esta é a condição de campo das amostras coletadas para o presente trabalho (Higashi; Espíndola, 2011).

A preparação da amostra envolve a modelagem em um anel metálico de corpos de prova, a pesagem e a determinação do teor de umidade e dos índices físicos. Após a preparação, os corpos de prova são posicionados na prensa de cisalhamento (Figura 8), dentro de uma caixa bipartida longitudinalmente, e são inundados. (DAS, 2007). Na etapa de consolidação, cada corpo de prova é

submetido à diferentes tensões normais, através de um sistema de pêndulos, a fim de representar os estados de confinamento do solo. Após o fim de toda compressão causada pela tensão normal, segue-se a etapa de cisalhamento, em que tensões cisalhantes são aplicadas, geralmente a velocidade constante e força crescente através de um motor, promovendo o deslocamento de uma porção da caixa em relação a outra (Higashi; Espíndola, 2011).

Figura 8 - Prensa de cisalhamento: Desenho esquemático da prensa usada para os ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Modificado de Higashi; Espíndola, 2011.

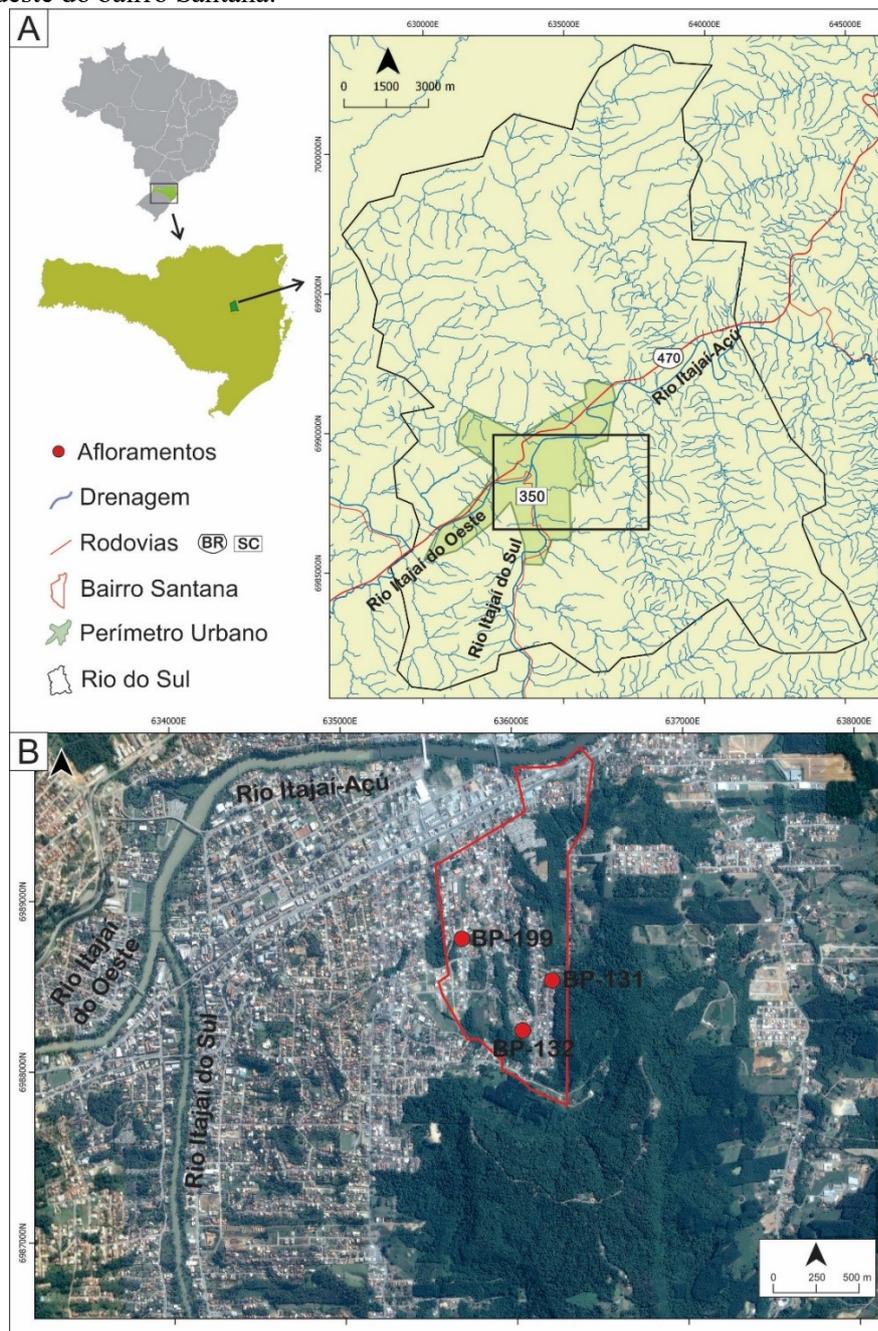
Os parâmetros de resistência ao cisalhamento podem ser obtidos pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, método gráfico baseado na teoria de que um material se rompe devido à combinação da tensão normal e de cisalhamento. As medições das forças horizontais aplicadas e dos deslocamentos verticais ocorridos em função do tempo de ensaio possibilitam a construção de gráficos de tensão *versus* deformação horizontal, deformação vertical *versus* deformação horizontal e, por fim, de tensão cisalhante máxima *versus* tensão normal. Este último descreve uma função linear, em que o intercepto do eixo y representa a coesão e o coeficiente angular da reta representa o ângulo de atrito interno. Para determinar os parâmetros de resistência, é necessário a realização de, no mínimo três ensaios, com a aplicação de diferentes tensões de confinamento (HIGASHI; ESPÍNDOLA, 2011).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FIOGRÁFICOS

A área de estudo localiza-se no município de Rio do Sul, centro-leste do estado de Santa Catarina, sul do Brasil (Figura 9A e B). Os afloramentos estudados nas etapas de campo que serviram para reconhecimento da litologia e coleta de dados, localizam-se no sudeste do bairro Santana (Figura 9C).

Figura 9. Localização da área de estudo: em (A) no Sul do Brasil e centro-leste do estado de Estado de Santa Catarina e no leste do perímetro urbano do município de Rio do Sul; (B) Localização dos afloramentos estudados no sudeste do bairro Santana.



Fonte: Da autora (2017). (base cartográfica do IBGE e ANA; imagem de satélite extraída do Google Earth Pro®).

O município de Rio do Sul está inserido na região do Alto Vale do Itajaí, entre a Serra do Mar e a Serra Geral, com uma altitude média de 339,88 m acima do nível do mar. O clima zonal é temperado, predominantemente mesotérmico úmido com verão quente. As temperaturas médias variam de 18 a 22 °C e o clima é subtropical Cfa, segundo classificação climática Köppen-Geiger (PANDOLFO et al., 2002). O município tem população estimada de 69 188 pessoas em 2017 e densidade demográfica de 235,05 hab/km² (BRASIL, 2017).

A distribuição temporal e frequencial das chuvas na região do Alto Vale do Itajaí foi estudada por Hillesheim e Neves (2015). O registro de chuvas de quatro estações meteorológicas com 32 anos de monitoramento (de 1986 a 2012) mostram uma média mensal anual de aproximadamente 133,7 mm e tempo de retorno menor do que três anos para todos os meses. Janeiro, fevereiro e outubro têm a maior probabilidade de superar a média mensal de chuvas e possuem tempo de retorno de aproximadamente 1,2 anos. O município de Rio do Sul teve eventos atípicos de precipitação pluviométrica que culminaram em inundações, sendo que há 59 registros de cheias nos últimos 106 anos (RIO DO SUL, 2017).

4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO

O município de Rio do Sul compreende rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná. Esta bacia sedimentar se estende pelo Brasil meridional, Paraguai, Argentina e Uruguai, com cerca de 1,5 milhão de km², forma oval alongada de eixo maior com direção NE-SW (Figura 10). Constitui uma sucessão sedimentar-magmática com desenvolvimento durante o Neo-Ordoviciano e o Neo-Cretáceo. Sua evolução ocorreu no contexto do paleocontinente Gondwana, durante o Paleozoico, representando uma sedimentação em meio a amplo golfo aberto ao paleoceanos Panthalassa (MILANI, 2004). O mesmo autor descreve que a estruturação da bacia foi desenvolvida em meio a frequente atividade orogênica paleozoica, concentrada no interior dos continentes devido à presença de lineamentos do arcabouço pré-cambriano. O expressivo magmatismo, registrado tanto na forma intrusiva (diques e soleiras) e extrusiva (derrames) em meio às rochas sedimentares, está associado à ruptura do Gondwana.

4.2.1 Arcabouço Estratigráfico da Bacia do Paraná

O registro estratigráfico é amplo lateral e verticalmente, tendo a sucessão sedimentar-magmática espessura total máxima de sete mil metros (MILANI et al., 2007). Vários são os trabalhos que propõem e discutem a subdivisão estratigráfica da bacia (WHITE, 1908; SCHNEIDER et al., 1974; SOARES et al., 1978; ZALÁN et al., 1990; MILANI et al., 1997). O mais adotado é a subdivisão de Milani (1997), que considera seis supersequências: Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Baurú. Estas grandes unidades constituem pacotes rochosos que

representam um intervalo de tempo de dezenas de milhões de anos e são balizadas por superfícies regionais de discordância. Os sistemas deposicionais interpretados a partir do registro estratigráfico têm tendência a uma continentalização progressiva ao longo da evolução geológica da bacia (MILANI, 2004).

A Supersequência Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano) é composta por sucessões sedimentares depositadas sobre o embasamento, e é subdividida nas formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria. A Formação Alto Garças compreende arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada e arenitos finos a médios com estratificação truncada. A Formação Iapó é composta por diamictitos com clastos polimíticos, e a Formação Vila Maria por folhelhos fossilíferos e arenitos finos com estratificação cruzada e laminação truncada.

A Supersequência Paraná (Devoniano) inclui arenitos feldspáticos/caoliníticos grossos e arenitos conglomeráticos da Formação Furnas; e folhelhos com lentes de arenito fino, rochas arenosiltosas e pelitos da Formação Ponta Grossa.

A Supersequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico) é constituída pelos: Grupo Itararé e Formação Aquidauana, correlatos estratigraficamente segundo França e Potter (1988); Grupo Guatá, Grupo Passa Dois e formações Pirambóia e Sanga do Cabral.

A Supersequência Gondwana II (Meso-Neotriássico) abrange pacotes fossilíferos de pelitos avermelhados da Formação Santa Maria; e siltitos avermelhados, arenitos finos a médios e folhelhos avermelhados da Formação Caturrita.

A Supersequência Gondwana III (Neojurássico-Neocretáceo) compreende espessos pacotes de arenitos finos a médios da Formação Botucatu; e rochas ígneas efusivas, predominantemente basálticas, da Formação Serra Geral.

A Supersequência Bauru (Neocretáceo) topo da Bacia do Paraná, é constituída por pacotes fossilíferos de arenitos e conglomerados alúvio-fluviais do Grupo Bauru, e conglomerados eólicos do Grupo Caiuá.

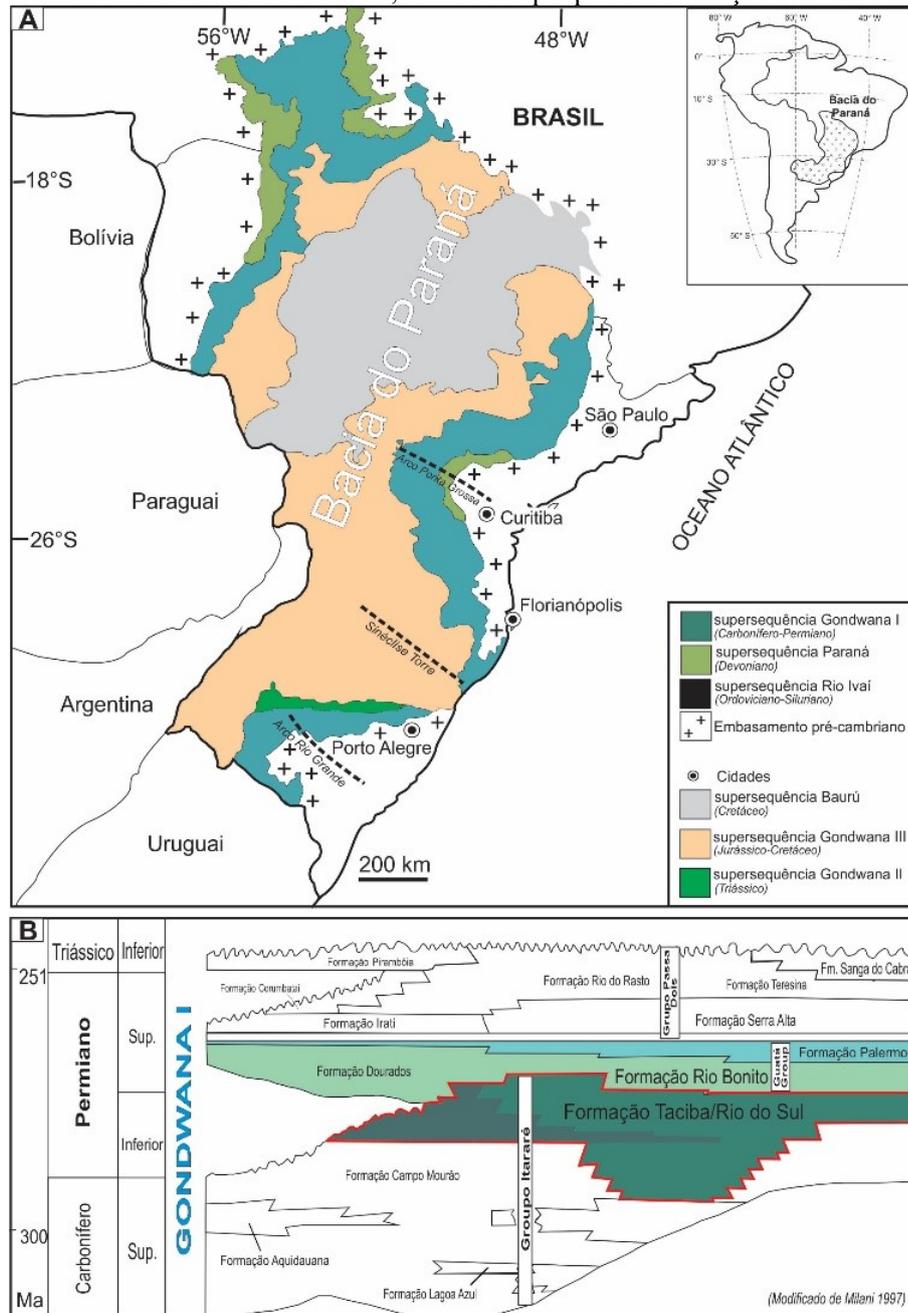
As rochas sedimentares da área de estudo estão agrupadas na Supersequência Gondwana I, mais especificamente no Grupo Itararé, Formação Rio do Sul. (Figura 10). O Gondwana I constitui o maior volume sedimentar da Bacia do Paraná e as unidades que o compõem retratam uma evolução de condições deposicionais que variam desde uma sedimentação com influência glacial até um ambiente de interior continental (MILANI et al., 2007). O Grupo Itararé compreende uma sucessão de sedimentação cíclica granodecrescente ascendente, que grada de pacotes arenosos até argilosos. Este registro representa as variações climáticas dentro de um contexto periglacial (FRANÇA e POTTER, 1988).

A Formação Rio do Sul (SCHNEIDER et al., 1974) é a unidade litoestratigráfica superior do Grupo Itararé. Os litotipos característicos desta formação são os folhelhos cinza-escuros a negros, finas camadas de ritmitos laminados e argilitos, diamictitos com matriz siltico-argilosa e arenitos

finos (LIMA et al., 2015). Os ritmitos incluem os varvitos, que representam uma sedimentação sob condições de variação climática sazonal em lagos periglaciais. A Formação Rio do Sul é equivalente à Formação Taciba descrita por França e Potter (1988), exceto pelo posicionamento do folhelho Lontras. Para Schneider (1974), o folhelho é a unidade basal da Formação Rio do Sul, enquanto que França e Potter o consideram como a unidade superior da Formação Campo Mourão. Outra diferença entre Schneider e França e Potter, é que estes últimos autores subdividem a unidade em três membros, de acordo com a litologia predominante, sendo eles: arenitos do Membro Rio Segredo, diamictitos do Membro Chapéu do Sol, e ritmitos, siltitos e folhelhos do Membro Rio do Sul.

A geologia da área de estudo também é composta por rochas vulcânicas associadas à Formação Serra Geral que compõe a Supersequência Gondwana III. A Formação Serra Geral é constituída predominantemente por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, e subordinadamente por riolitos e riolacitos (PEATE et al., 1992). As rochas vulcânicas ocorrem na forma de cobertura de lavas, que recobrem a Formação Botucatu, e como diques e soleiras que intrudem as unidades sedimentares de toda a Bacia do Paraná. O magmatismo da Formação Serra Geral é resultado do intenso vulcanismo fissural que afetou as bacias sedimentares intracratônicas sul-americanas durante o Mesozoico, evento vinculado aos processos endógenos que levaram a fragmentação do supercontinente Pangea (MILANI et al., 2007).

Figura 10 - Bacia do Paraná: (A) Mapa geológico simplificado e (B) Arcabouço estratigráfico da Supersequência Gondwana I da Bacia do Paraná, com destaque para a Formação Rio do Sul/Taciba.



Fonte: Modificado de Milani et al. (2007).

4.2.2 Arcabouço Estrutural da Bacia do Paraná

O arcabouço tectono-estratigráfico da Bacia do Paraná se desenvolveu no interior do Supercontinente Gondwana e, também, esteve associado ao desenvolvimento de ativos cinturões colisionais na borda do continente. Sanford e Lange (1960) foram os primeiros a abordar a relação entre a origem e evolução da bacia com o contexto tectônico do Gondwana. Estes autores associaram os ciclos de sedimentação e erosão aos eventos tectônicos ocorridos na borda ativa do paleocontinente. Este pensamento também foi defendido por Zalán (1991) e Milani (2004), sendo que

para este último autor a evolução paleozoica-mesozoica da Bacia foi diretamente influenciada pela geodinâmica da borda ativa do Gondwana. Assim como, segundo Ramos et al (1986), a história da Bacia no Fanerozoico está relacionada à grande atividade de episódios orogênicos. Em contrapartida, para

Almeida et al (1980) e Assine (1996), a evolução sedimentar não está necessariamente relacionada às orogenias.

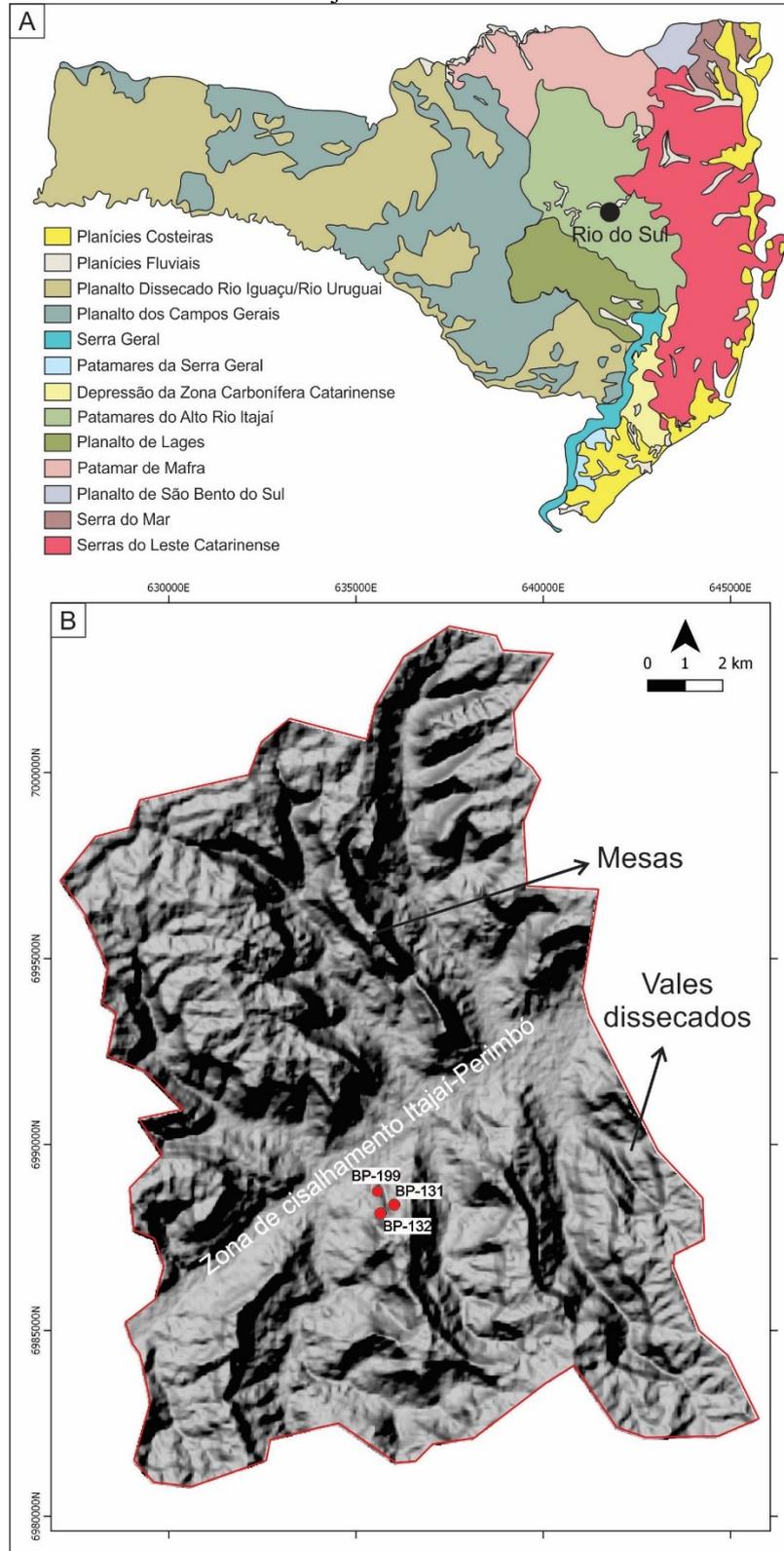
A Bacia do Paraná apresenta três padrões estruturais principais com direções NE-SW, NW-SE e E-W, obtidos a partir de levantamentos aeromagnetométricos (ZALÁN, 1987), sendo que os dois primeiros são associados a descontinuidades do embasamento que foram reativadas sucessivamente durante a evolução da bacia (ROLDAN et al., 2010). A estruturação tectônica do substrato pré-cambriano definiu o estabelecimento da Bacia do Paraná, segundo depressões alongadas na direção NE-SW (MILANI et al., 1997).

Uma importante descontinuidade do embasamento na região estudada é a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP) (SILVA e DIAS, 1981). A ZCIP tem direção média de N45E, é subvertical e apresenta caráter dúctil a dúctil-rúptil. Sua história de reativação é complexa e polifásica, sendo evidenciada pelo cavalgamento de unidades do Complexo Metamórfico Brusque sobre litologias da Bacia do Itajaí (BASEI, 1985), e também por falhas normais e transcorrentes sinistrais, resultantes da Orogenia La Ventana ocorrida no Permiano e Permo-Triássico (ROSTIROLLA et al., 2003). Estes últimos autores referem-se à descontinuidade como Zona de Falha Perimbó, caracterizada como uma falha associada à borda do continente no Proterozoico, que evoluiu para uma falha intracratônica no Fanerozoico, sendo que durante seu principal período de reativação (Permiano ao Permo-Triássico) afetou camadas dos grupos Itararé, Guatá e Passa Dois.

4.2.2 Contexto Geomorfológico

Na região estudada predomina a unidade de relevo dos Patamares do Alto Rio Itajaí (Figura 11), que se dispõe em uma faixa de direção geral NW-SE e se estreita para o sul. Esta unidade é caracterizada pela intensa dissecação do relevo, com patamares, vales estruturais e relevos residuais de topo plano (mesas) limitados por escarpas. Estas características morfológicas devem-se à presença de rochas sedimentares com diferentes resistências aos processos de intemperismo e erosão (SANTA CATARINA, 1991). Os arenitos, mais resistentes constituem as mesas e os folhelhos, menos resistentes, os vales.

Figura 11 - Geomorfologia da área de estudo: (A) Mapa simplificado das unidades de relevo de Santa Catarina (escala 1:2.000.000), com destaque para a região da área de estudo; (B) Relevo sombreado, com iluminação 315 Az, do município de Rio do Sul, com destaque para os afloramentos de estudo. O eixo principal do Rio Itajaí-Açú é paralelo à Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó.



Fonte: Modificado de Santa Catarina (1991); (base de dados EPAGRI/CIRAM).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica é parte fundamental da pesquisa acadêmica. Ela abrange a consulta de trabalhos já publicados acerca do tema, a fim de fundamentar e sustentar cientificamente as ideias e conclusões propostas ao final do trabalho acadêmico (SILVA; MENEZES, 2005).

A revisão bibliográfica foi realizada por meio de consulta de livros e artigos reconhecidos em meio científico e acadêmico, disponíveis no acervo da Biblioteca Central da UFSC ou publicados em meio digital nos portais de periódicos da CAPES, Scopus, *Science Direct*, e entre outros. Contemplou o contexto geológico regional da cidade de Rio do Sul, que abrange rochas sedimentares da Formação Taciba, Bacia do Paraná (MILANI et al., 2007; CEPED, 2011; WILDNER, 2014; (MILANI et al., 1997); o processo de movimentos de massa (GROTZINGER e JORDAN, 2013) os fatores geológico-geomorfológicos nos movimentos de massa (SANTA CATARINA, 1991); os processos geológicos (CHRISTOFOLETTI, 1980; GROTZINGER e JORDAN, 2013); fluxo de detritos (SILVEIRA, 2016); depósitos coluvionares (LACERDA, 2002); a resistência ao cisalhamento de solos (DAS, 2007; CAPUTO, 1987); os métodos utilizados, como o levantamento lito-estratigráfico e estrutural (READING & LEVELL, 1996; BOGGS JR., 2009), coleta de amostras e análise petrográfica (BOGGS JR., 2009; DEDAVID et al. 2007); e dos ensaios, como o de cisalhamento direto (DAS, 2007; GERSCOVICH, 2010).

5.2 ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

O mapa geológico foi elaborado através de métodos direto e indireto. O método direto foi mais pontual, consistiu na descrição e medição de feições de três afloramentos e na observação da geomorfologia local. Os dados levantados em campo serviram para balizar o reconhecimento indireto da geologia. Este último foi realizado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) a partir da análise de imagens obtidas por sensoriamento remoto. A interpretação foi feita na escala de 1:50000, o que possibilitou o reconhecimento dos contatos entre formações, atitudes e espessuras de camadas e estruturas geológicas. As diferentes unidades foram individualizadas principalmente pelas formas de relevo.

O mapa com os lineamentos interpretados foi realizado a partir da observação e medição de fraturas em campo e da interpretação de lineamentos por meio de técnicas de geoprocessamento. Para a interpretação dos lineamentos da área de estudo foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE), georreferenciado e com resolução espacial de 30m, referente ao setor Vale do Itajaí, disponibilizado pela EPAGRI/CIRAM. A partir do MDE foram criados relevos sombreados no *software* GRASS GIS 7.0.5, nas escalas de 1:50000 e 1:25000, com altitude de 60° e iluminações de 315Az, NS e 045Az, levando-se em consideração o padrão estrutural regional (ZALÁN, 1987). Os lineamentos foram

interpretados a partir da identificação de feições lineares, mapeáveis nas escalas de estudo, que representam o alinhamento das cristas dos morros e dos canais de drenagem. Os lineamentos foram primeiramente traçados de forma manual e posteriormente foram vetorizados, adensados e corrigidos em SIG, com o *software* QGIS 2.14. Os padrões estruturais foram reconhecidos em mosaicos dos relevos sombreados e na plotagem de diagrama de rosetas, gerados dentro do SIG com o complemento *Line Direction Histogram*.

5.3 COLETA DE DADOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

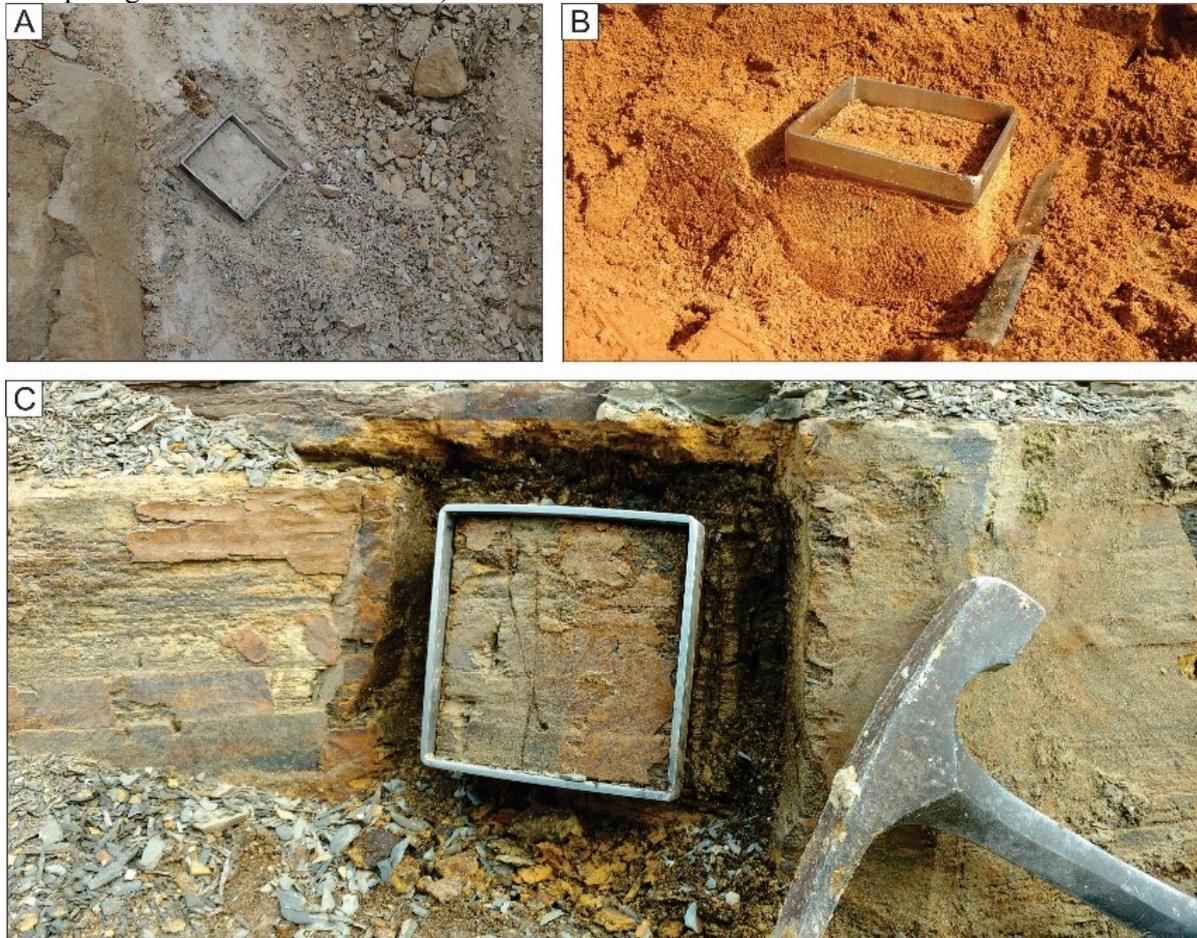
O processo de amostragem tem grande importância em uma pesquisa de campo. As amostras escolhidas devem representar as características principais do material a fim de caracterizá-lo através dos ensaios laboratoriais. Há diferentes maneiras de coletar amostras, dependendo dos objetivos da pesquisa e das condições de campo. Neste trabalho foi utilizada a amostragem pontual, em que uma área pequena e representativa é selecionada e apenas uma porção ou camada homogêneas do afloramento é amostrada (FOLK, 1974).

A coleta de dados geológicos foi executada em duas etapas, nos dias 30 e 31 de janeiro e 01 e 02 de julho de 2017, e envolveu a observação e identificação das feições geológicas em três afloramentos selecionados, além da descrição e medição das mesmas. Foi realizado a elaboração de seções colunares, a medição de estruturas tectônicas, o registro fotográfico e a coleta de material do substrato rochoso e do depósito de colúvio, posicionados nas seções colunares, para a análise petrográfica e composicional. A amostragem foi feita de forma a abranger os diferentes litotipos e representar as principais características dos afloramentos.

A coleta de dados geotécnicos ocorreu na segunda etapa de campo e envolveu a amostragem de material, do afloramento BP132, para a análise do comportamento mecânico através do ensaio de cisalhamento direto. Após a observação e identificação dos diferentes tipos de material presentes, foram coletadas três amostras deformadas para os ensaios de caracterização e três amostras indeformadas para os ensaios de cisalhamento direto. O uso de amostras indeformadas do solo em estudo garante uma melhor caracterização da tensão cisalhante, uma vez que a estrutura do solo é mantida. Cada amostra indeformada é representada, necessariamente por três corpos de prova, de acordo com as especificações do ensaio de cisalhamento direto. Os corpos de prova foram modelados em campo, em moldes metálicos biselados com seção quadrada de $103,226 \text{ cm}^2$ e 2 cm de altura. O processo de modelagem consistiu na gradual cravação do molde na face do talude e da escarificação

do material ao redor, de forma que todo o molde foi preenchido pelo solo ao mesmo tempo em que sua estrutura original foi preservada (Figura 12).

Figura 12 - Amostragem de corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto. (A) Matriz do depósito coluvionar (BP132F); (B) Solo coluvionar (BP132G); e (C) Saprólito do nível vulcânico da UE4 (BP132 H); (martelo petrográfico serviu como escala).



Fonte: Da autora (2017).

5.3.1 ANÁLISE LITOLÓGICA

A fácies de um corpo rochoso é a combinação de características litológicas, texturais, estruturais e do conteúdo fossilífero, que refletem as condições de formação da rocha (READING & LEVELL, 1996). Desta forma, é um modo eficaz de descrever e, principalmente, de agrupar as litologias sedimentares, além de ser a base para a análise faciológica e para a associação de fácies, métodos que permitem a interpretação do ambiente e dos processos de formação das rochas.

A descrição de fácies abrangiu a elaboração de perfis colunares que apresentam graficamente informações da espessura das camadas, no eixo vertical, e da granulometria, no eixo horizontal. Além disto foram incorporados dados texturais, estruturais, estratigráficos e de amostragem, a fim de

facilitar a integração das diferentes informações e a posterior análise. As características litológicas das sucessões estudadas foram agrupadas em litofácies sedimentares e descritas em tabela.

5.4 AQUISIÇÃO DE NUVEM DE PONTOS

O imageamento dos afloramentos BP131 e BP132 foi realizado com laser *scanner* terrestre GLS-1500 da TOPCON® e com *drone* Dji phantom 4 durante as etapas de campo. Este método foi usado em caráter experimental e original para complementar as tradicionais coletas de dados geológicos, visualizar feições em locais de difícil acesso e preservar a integridade dos afloramentos em formato digital.

No imageamento com LST, foram adquiridos coordenadas X, Y, Z e valores de reflectância para cada ponto da nuvem. A cor real dos pontos foi obtida com uma câmera interna ao equipamento, de 3 megapixels. As duas nuvens de pontos obtidas pelo LST são compostas por 6 053 624 pontos, no BP131, e por 3 648 369 pontos, no BP132. As medidas reais de comprimento, altura e inclinação dos afloramentos foram extraídas com as ferramentas do *software* ScanMaster®, e a extração de facetas, a fim de visualizar os planos de falhas e fraturas, foi conduzida no *software* CloudCompare.

5.5 MICROSCOPIA

A análise mineralógica das rochas foi realizada com microscópio óptico, microscópio eletrônico de varredura e difratômetro de raios X este tipo de análise. A microscopia óptica é baseada nas características de transmissão ou reflexão dos feixes de luz na superfície dos minerais. Como cada mineral tem resposta diferente à propagação da luz, devido seus aspectos cristalográficos e composicionais, é possível identificá-los. A microscopia eletrônica possibilita a observação da textura e estrutura dos materiais, através do reconhecimento de seus hábitos característicos em imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O método se baseia na varredura da superfície da amostra por um feixe de elétrons de pequeno diâmetro. Os elétrons e ondas eletromagnéticas, geradas pela interação entre o feixe incidente e a superfície da amostra, compõem a imagem do MEV (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

A análise composicional semiquantitativa EDS possibilita a identificação de alguns dos constituintes minerais. O método tem como base a diferente resposta que cada elemento químico tem, quando submetido à emissão de feixe de elétrons. Este feixe de elétrons arranca os elétrons das camadas superiores e menos energéticas dos átomos, sendo que elétrons mais energéticos migram para estes espaços desocupados. Esta migração gera energia excedente que é emitida na forma de fótons na faixa dos raios X. Cada elemento químico emite raios X com comprimento de ondas diferentes, o que possibilita sua identificação (GESICKI, 2007).

A descrição microscópica de uma amostra de arenito da UE3 foi realizada através da análise de seção delgada com o microscópio petrográfico de luz transmitida AxioScope A1, equipado com um

sistema de captura de imagem, no Laboratório de Pesquisa em Bacias Sedimentares e Caracterização de Reservatórios (LABAC) da UFSC. A seção delgada foi confeccionada no Laboratório de Laminação (LABLAM) da UFSC, com a técnica de impregnação com uma mistura de resina epóxi, endurecedor e solvente (álcool etílico), em uma câmara de vácuo. A impregnação foi necessária devido ao elevado grau de intemperismo da amostra.

A microscopia eletrônica foi realizada no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC, com microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6390LV. Quatro amostras foram analisadas: os folhelhos (BP131A e BP132A), o saprólito vulcânico (BP132H) e o solo coluvionar (BP132G). A preparação foi realizada no Laboratório de Sedimentologia (LABSED) da UFSC. As amostras foram fragmentadas em pedaços de aproximadamente 1cm³ e coladas, com fita adesiva de carbono, em *stubs*. Durante a fragmentação e colagem no *stub*, foi levado em consideração a seção com feições mais interessantes para serem imageadas. No caso das amostras rochosas, a seção escolhida foi aquela que evidenciava a intercalação da granulometria. Já nas amostras inconsolidadas ou muito alteradas, a seção escolhida foi aquela em que a estrutura do material estava preservada. Após a montagem nos *stubs*, as amostras foram encaminhadas ao LCME para o recobrimento com fina película de ouro e o posterior imageamento. A análise semiquantitativa foi realizada em conjunto com a petrografia eletrônica no LCME, devido ao microscópio eletrônico utilizado também ser equipado com EDS.

5.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A difração de raios X é uma técnica utilizada na determinação da estrutura atômica e molecular de um cristal por meio da detecção dos ângulos dos raios X difratados em contato com a estrutura cristalina do sólido, e suas respectivas intensidades (MORA et al, 2010). No método do pó, o material analisado é finamente fragmentado e homogeneizado para a determinação da composição média em massa. As mesmas amostras analisadas em MEV/EDS foram submetidas à técnica de difração de raios X para a identificação e quantificação de argilominerais. A preparação das amostras foi realizada no LABSED e consistiu na fragmentação com grau e pistilo de cerâmica, secagem da amostra do solo coluvionar por cerca de 24 horas a uma temperatura de 60°C, e armazenagem em sacos plásticos para serem encaminhadas à análise. A análise foi realizada a partir da técnica do pó no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná. Os minerais foram identificados por comparação com os padrões do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). Os grupos de argilominerais foram identificados por comparação das distâncias interplanares em

diferentes condições de tratamento, que consistiram na amostra seca ao ar, solvatada com etilenoglicol e calcinada a 550° C.

5.7 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

As três amostras deformadas do solo (BP132G) e matriz coluvionar (BP132F), e do saprólito vulcânico (BP132H), coletadas no afloramento BP132, foram preparadas no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia civil da UFSC, segundo a norma NBR 6457 (NBR, 1986). Os ensaios de caracterização consistiram na determinação do teor de umidade natural do solo, do peso específico dos sólidos e da fração granulométrica, segundo NBR 6457 (NBR, 1986), NBR 6508 (NBR, 1984) e NBR 7181 (NBR, 1984) respectivamente. A partir dos resultados dos ensaios de caracterização, foi possível calcular os índices físico do solo.

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos segundo a norma ASTM D3080 (ASTM, 2003) no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina. A condição de ruptura do ensaio foi consolidada e drenada. As amostras foram submetidas à três diferentes tensões normais: 50kPa, 150kPa e 250kPa; a fim de construir a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

5.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

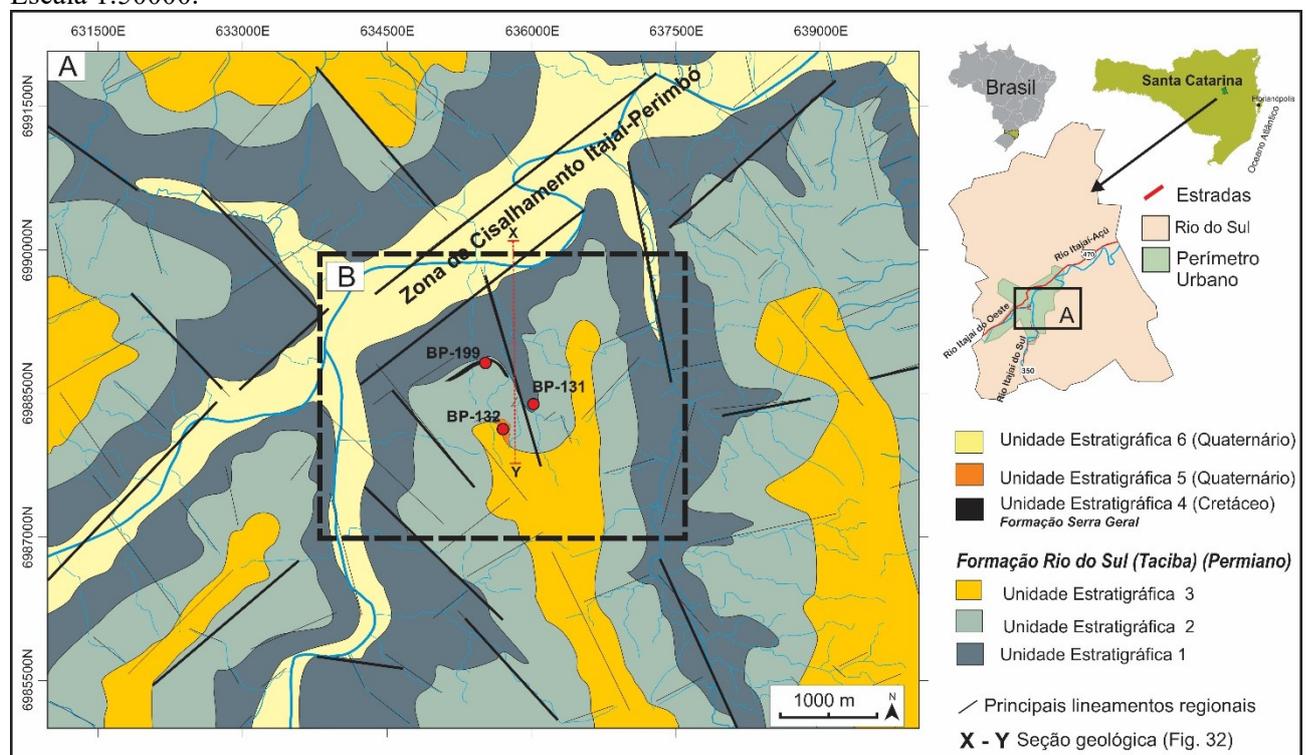
A análise de estabilidade foi realizada com o *software* Slide 5.027 da Rocscience[®]. Os métodos de equilíbrio-limite de Bishop simplificado e Janbu simplificado foram utilizados para o cálculo do fator de segurança do talude estudado. Estes dois métodos são considerados não-rigorosos pois não satisfazem todas as três equações da estática consideradas no cálculo (FERREIRA, 2012). A avaliação da estabilidade do talude seguiu a norma NBR 11682 (1991), que considera valores de FS acima de 1,5 com alto grau de segurança; FS entre 1,3 e 1,5 com médio grau de segurança; e FS abaixo de 1,3 com baixo grau de segurança.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

A geologia local da área de estudo compreende unidades sedimentares de folhelhos e arenitos da Formação Rio do Sul e soleiras da Formação Serra Geral, ambos da Bacia do Paraná, além de depósitos de colúvio (Figura 13). A integração das características geomorfológicas, como formas de relevo e padrão de drenagem, e das características geológicas, como litologia, textura, estruturas sedimentares e geometria das camadas permitiu a interpretação da geologia local. O relevo é predominantemente tabular, em forma de mesas, composto no topo por camadas com bordas bem escarpadas, características da litologia arenítica. O arenito é sotoposto por folhelhos cinza escuros, que constituem os vales fortemente dissecados por um padrão de drenagem que varia de dendrítico a angular. O padrão de drenagem angular é concordante com os lineamentos da região, o que indica o controle estrutural. As unidades mais recentes são compostas por depósitos de colúvio acumulados a meia encosta e sedimentos de alúvio que formam o relevo mais plano da região, associado aos canais fluviais atuais e planícies de inundação.

Figura 13 - Contexto geológico da área de estudo: As unidades sedimentares compreendem ritmitos (Unidade Estratigráfica 1), folhelhos (Unidade Estratigráfica 2) e arenitos (Unidade Estratigráfica 3) da Fm. Rio do Sul; soleiras da Formação Serra Geral (Unidade Estratigráfica 4); depósitos coluvionares (Unidade Estratigráfica 5) e depósitos aluvionares (Unidade Estratigráfica 6); Os maiores lineamentos NE-SW são paralelos à ZCIP. Escala 1:50000.



Fonte: Da autora (2017) (base cartográfica do IBGE e ANA).

As características litológicas, texturais e estruturais das unidades sedimentares da Formação Rio do Sul foram individualizadas em 4 litofácies, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características das litofácies sedimentares identificadas nos afloramentos estudados.

| <i>Código</i> | <i>Descrição</i> | <i>Geometria</i> | <i>Interpretação</i> |
|---------------|---|--|--|
| <i>FA</i> | Arenito médio feldspático com estratificação cruzada tabular | Camadas tabulares | Deposição sob ação de fluxo unidirecional |
| <i>FB.1</i> | Folhelho síltico amarelo médio maciço | Camadas tabulares de topo e base plano ou ondulados; 7 a 20cm de espessura | Regimes de fluxos hiperconcentrados |
| <i>FB.2</i> | Folhelho síltico amarelo médio com laminação cruzada assimétrica. | Camada tabular de topo e base ondulados; 7cm de espessura | Regimes de fluxos associados a períodos de baixa energia. |
| <i>FC</i> | Folhelho cinza-médio a negro, pontualmente com estrutura de carga | Camadas tabulares de topo e base planos; 5 a 10cm de espessura | Deposição por decantação em nível de água abaixo da ação das ondas |

6.1.1 Unidade Estratigráfica (UE1)

A Unidade Estratigráfica 1 é composta pela intercalação de folhelhos cinza-médio a negros (**FC**) e folhelhos sílticos amarelo-médio (**FB.1**). Foi identificada e descrita no afloramento BP131, que consiste em um corte de talude com face para oeste, cerca de 21,45m de extensão, 7,75m de altura e 8° de inclinação (Figura 14). A litofácies **FC** é representada por folhelhos com laminação plano-paralela incipiente, dispostos em camadas de 5 a 10 cm de espessura, com geometria tabular de topo e base ondulados (Figura 14C e F). Os folhelhos **FC** podem ser associados à deposição por decantação em nível de água abaixo da ação das ondas (MIALL, 1996). A litofácies **FB.1** compreende folhelhos sílticos maciços, dispostos em camadas com 7 a 20 cm de espessura, com geometria tabular de topo e base planos ou ondulados. Os folhelhos sílticos **FB.1** podem ser relacionados à uma deposição por regimes de fluxos associados a períodos de baixa energia. (MIALL, 1996). Estas litologias estão intercaladas em uma sucessão rítmica, onde a alternância da mudança granulométrica síltica e pelítica é evidenciada principalmente pela coloração, que grada de amarelo-médio a cinza escuro.

As camadas tabulares têm espessura constante, formando um padrão agradacional em todo o pacote. Neste padrão agradacional, a intercalação entre os folhelhos sílticos e negros é integralmente contínua, sendo que a espessura das camadas é constante. Esta ritmicidade e ciclicidade das litologias

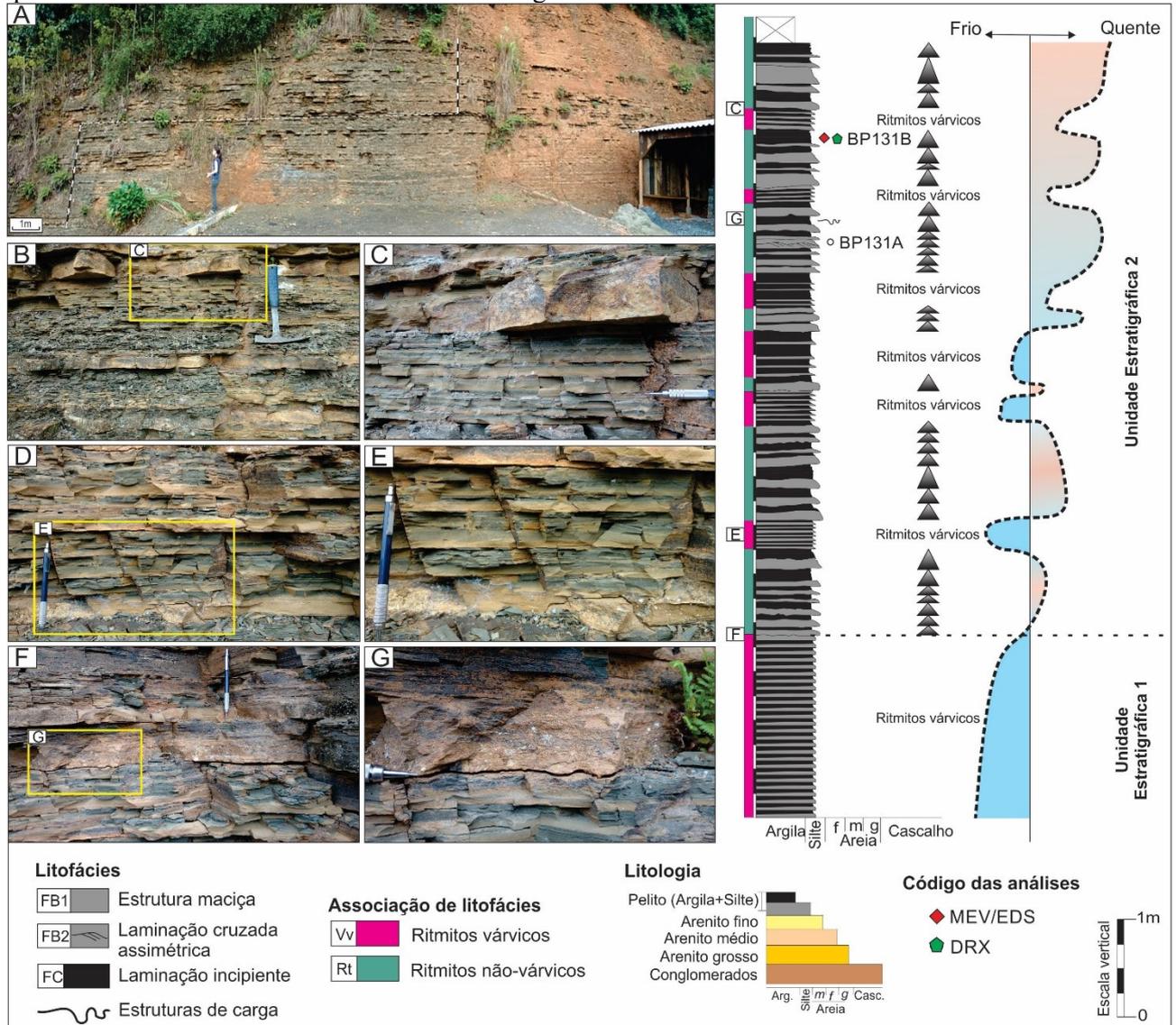
e espessuras são características típicas dos ritmitos várvidos, também conhecidos apenas como varvitos (Figura 14D). Este padrão agradacional pode ser associado aos ritmitos várvidos que ocorrem na Fm. Rio do Sul, representando uma sedimentação, em lagos próximos às geleiras, controlada pela mudança cíclica das estações climáticas. Desta forma, quando havia o degelo na estação quente, sedimentos mais grossos eram depositados, e quando havia o congelamento do lago na estação fria, apenas sedimentos muito finos, que estavam em suspensão, eram depositados por decantação em um ritmo constante. O contato entre a UE1 e UE2 é abrupto, evidenciado tanto pela presença de base erosiva na camada do folhelho (**FB.1**; Figura 14G), quanto pela mudança de espessura das camadas e do padrão gradacional.

6.1.2 Unidade Estratigráfica 2 (UE2)

A Unidade Estratigráfica 2 é composta pela intercalação de folhelhos sílticos **FB.1** e **FB.2**, e folhelhos negros **FC**, que se dispõem em uma sucessão rítmica (Figura 14 e Figura 16). A litofácies **FB.2** ocorre pontualmente, como uma camada tabular com laminação cruzada assimétrica, podendo ser associada à deposição por regimes de fluxos hiperconcentrados (MIALL, 1996). Os folhelhos da litofácies **FC** têm, localmente, estrutura de carga (Figura 14). Os folhelhos negros também ocorrem levemente avermelhados, com laminação plano-paralela incipiente e textura em *blocky* (internamente friáveis).

Ao longo da sucessão de ritmitos há a intercalação de dois padrões de gradação: um agradacional e outro granodecrescente ascendente. A porção agradacional representa a sedimentação controlada pela ciclicidade das estações climáticas, que culminou na formação dos ritmitos várvidos. Em contrapartida, na porção granodecrescente ascendente a espessura das camadas não se mantém a mesma, sendo que há leve predominância na frequência e espessura da granulometria síltica (Figura 14D). A mudança intercada dos padrões agradacionais pode ser associada a alternância das estações climáticas em um ambiente influenciado por geleiras. (Figura 14).

Figura 14 - Principais características das UE1 e UE2: (A) Vista panorâmica do afloramento BP131, com o perfil colunar posicionado; (B) Sucessão rítmica silte-argila com padrão granodrecrescente ascendente, que constitui os ritmitos não-várvidos; (C) Detalhe da superfície irregular na base da camada síltica; (D) Sucessão rítmica silte-argila com padrão agradacional, que constitui a porção varvítica da unidade; (E) Detalhe das fraturas presentes em todo o afloramento, com atitudes 70Az e 120Az-115Az; (F) Diferença entre a sucessão rítmica várvida e a não-várvida; (G) Detalhe do contato irregular entre os diferentes padrões agradacionais, que caracteriza o contato entre as unidades estratigráficas 1 e 2.



Fonte: Da autora (2017).

6.1.3 Unidade Estratigráfica 3 (UE3)

A Unidade Estratigráfica 3 é representada pela litofácies FA, que compreende camadas tabulares de arenito médio a grosso, feldspático, com grãos moderadamente a bem selecionados e subangulares, e com estratificação cruzada planar e tabular. Os grãos são sustentados, levemente envolvidos por matriz esbranquiçada a alaranjada, devido a possível pigmentação com ferro. Os arenitos FA podem ser associados a uma deposição sob ação de fluxo unidirecional (MIALL, 1996).

Esta unidade não ocorre aflorante nos pontos estudados, porém foi identificada em campo a partir da descrição de clastos de arenito imersos em depósito coluvionar que encobre a UE2 (Figura

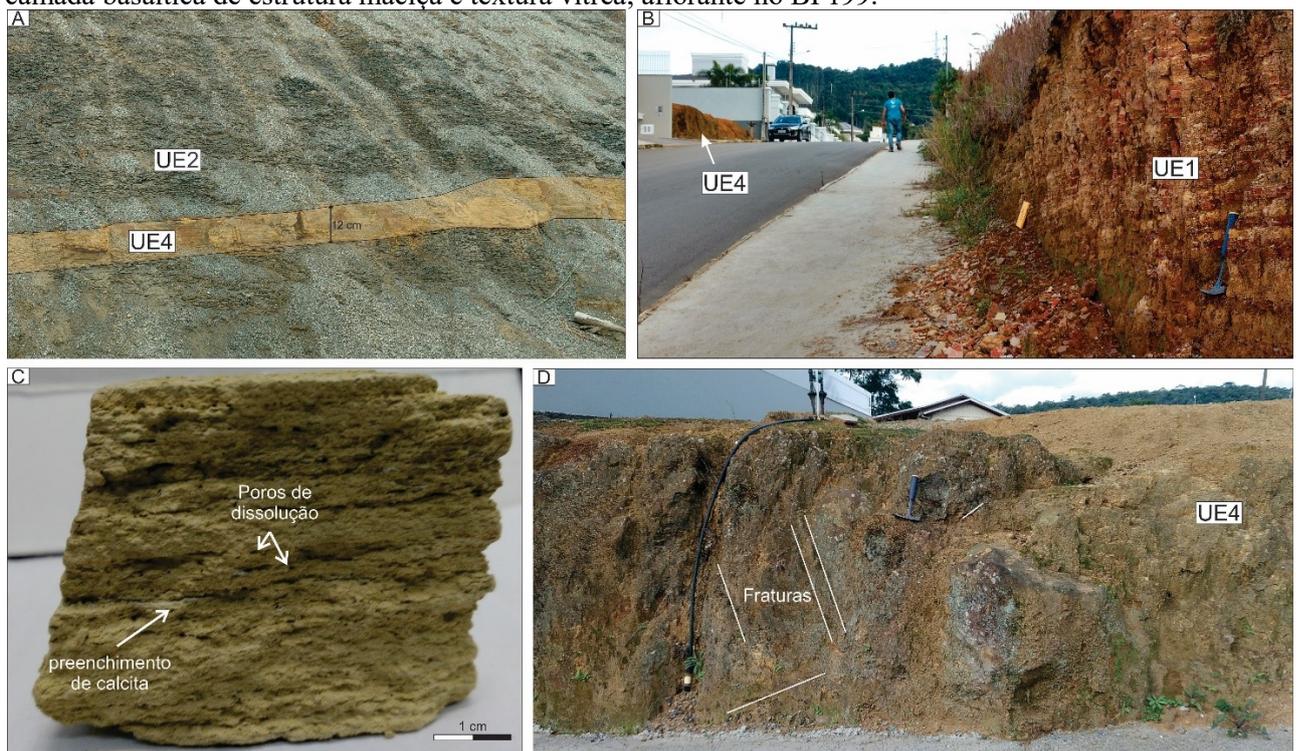
16F). O fato de matacões métricos e de clastos angulosos do arenito constituírem o colúvio, aliado a uma geomorfologia composta por morros de topo aplainado, possibilita a interpretação de que o arenito representa a porção superior das unidades estratigráficas da área de estudo, associado à Formação Rio do Sul.

6.1.4 Unidade Estratigráfica 4 (UE4)

A Unidade Estratigráfica 4 ocorre pontualmente como soleiras intercaladas entre os folhelhos das UE1 e UE2. Compreende camada basáltica com cerca de 3 m de espessura, estrutura maciça e textura vítrea (Figura 15B e D). Também ocorre como camada lenticular com cerca de 3,5cm de espessura, coloração amarelo-esbranquiçado, estratificação planar e alto grau de alteração, densidade muito baixa e presença de poros de dissolução, sendo que alguns estão preenchidos por calcita (Figura 15A e C).

A natureza vulcânica da UE4 é atestada tanto pela sua textura, quanto pela influência exercida nos folhelhos imediatamente adjacentes às soleiras. A influência da injeção do nível vulcânico é marcada pela maior compactação das camadas de folhelho imediatamente adjacentes. Estes folhelhos apresentam fratura conchoide, denotando o “cozimento” devido à diferença de temperatura causada pela intrusão.

Figura 15. Principais características da UE4: (A) Camada lenticular vulcânica com estratificação planar e alto grau de alteração intempérica, que ocorre no afloramento BP132; (B) Camada basáltica intercalada aos ritmitos da UE1 no BP199; (C) Amostra de mão do nível vulcânico coloração amarelo-esbranquiçado, estratificação planar e alto grau de alteração, densidade muito baixa e presença de poros de dissolução; (D) Detalhe da camada basáltica de estrutura maciça e textura vítrea, aflorante no BP199.



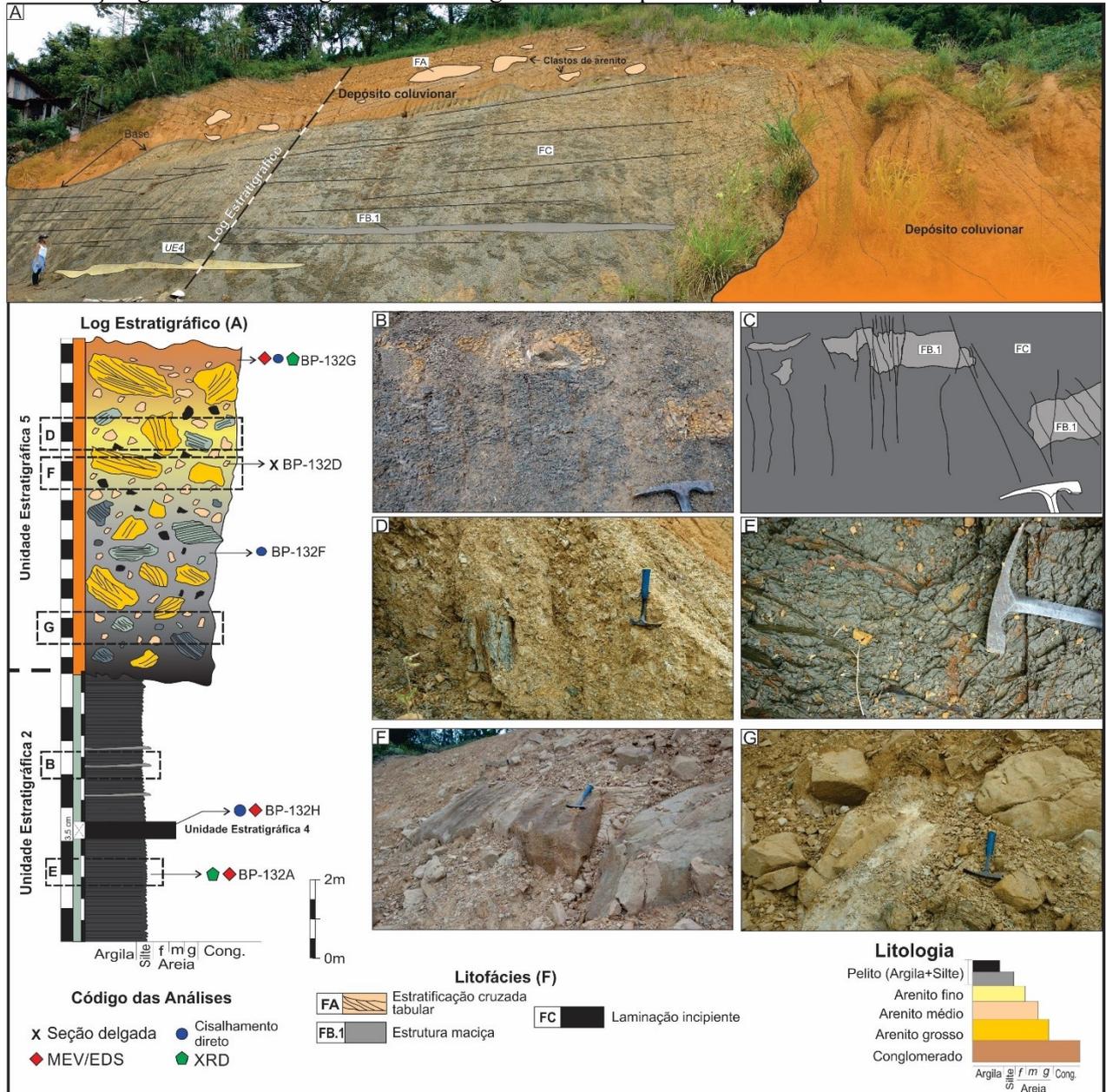
Fonte: Da autora (2017)

6.1.5 Depósito de colúvio (UE5)

Os depósitos de colúvio compreendem espessos pacotes constituídos por clastos subangulosos de folhelho (FC) e por clastos de arenito (FA), imersos caoticamente em meio a uma matriz argilosa na base, que grada para areno-argilosa no topo (Figura 16). Têm grande expressão na área de estudo, sendo que muitas casas foram assentadas sobre estes colúvios.

Outras mudanças notáveis em direção ao topo do depósito são a concomitante diminuição da presença e tamanho dos clastos pelíticos e o aumento da presença dos clastos arenosos, além da gradação na coloração, que muda de cinza-médio até laranja-avermelhado. A origem dos colúvios pode ser relacionada a movimentos de massa que ocorreram em níveis superiores ao sopé de uma encosta (DEERE; PATTON, 1971). Tal consideração, aliada a litologia dos clastos que constituem o depósito, permite a interpretação de que o colúvio representa o material, produto do intemperismo das unidades estratigráfica 2 e 3, que foi erodido e depositado sobre a UE2.

Figura 16 - Contato entre UE2 e o depósito de colúvio: (A) Vista panorâmica do afloramento BP132 com o perfil colunar posicionado; (B) folhelho negro com laminação incipiente (FC), intensamente fraturado e friável, com deslocamento de camadas sílticas (FB.1); (C) Conjunto de fraturas e falhas verticais a subverticais com direção 135Az, 130Az, 215Az, 200Az e 195Az; (D) Depósito coluvionar (brecha coluvionar) com estrutura caótica e maciça composto por clastos de folhelho negros; (E) Folhelho negro (FC), intensamente fraturado e friável; (F) Matacões de arenito médio a grosso FA da UE3; (G) Matriz do depósito coluvionar, com variação granulométrica argilosa a areno-argilosa da base para o topo do depósito.

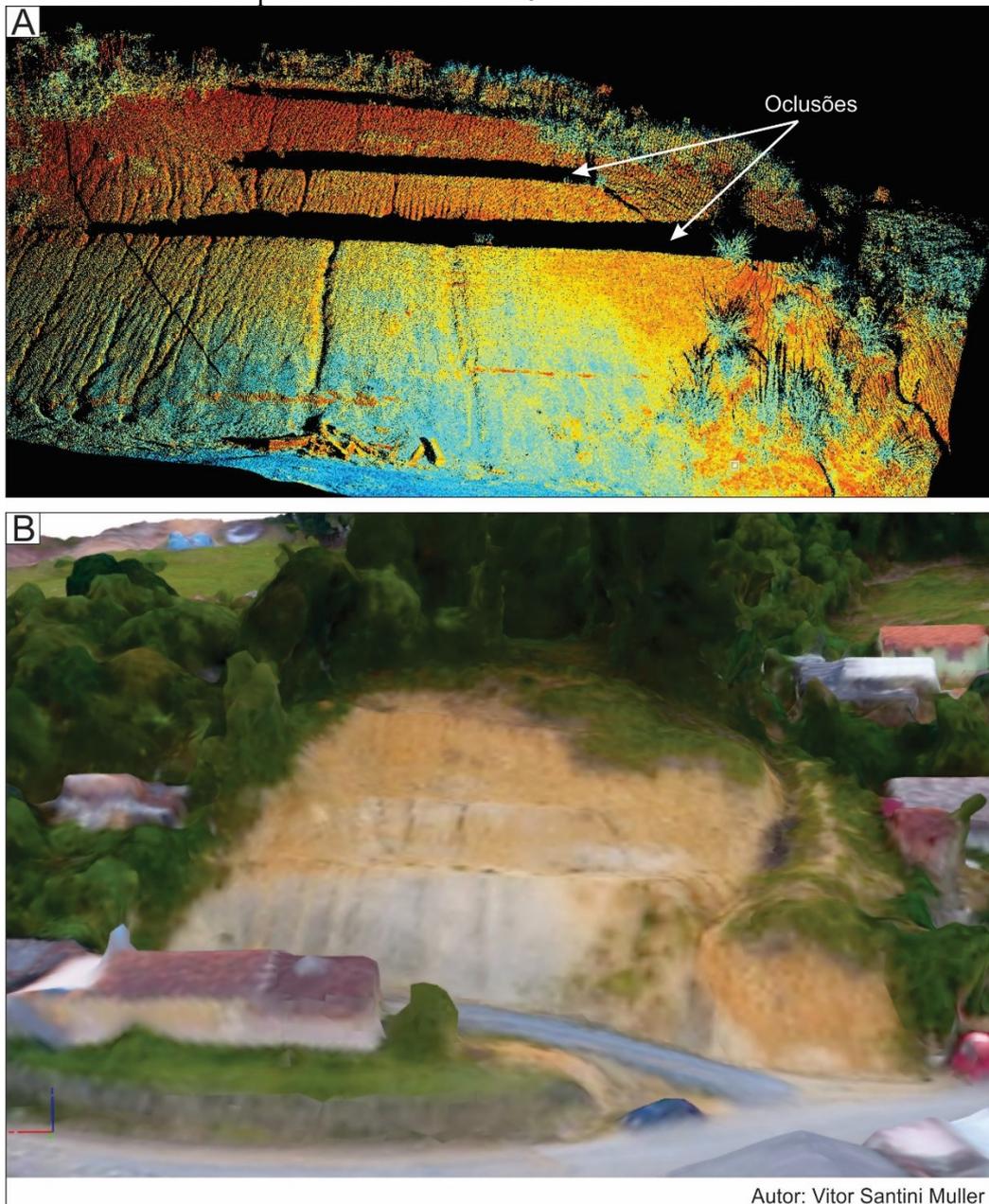


Fonte: Da autora (2017)

A heterogeneidade do depósito de colúvio é bem evidente nos resultados do imageamento do afloramento BP132 (Figura 17). A nuvem de pontos obtida com o LST ressaltou a mudança na coloração, que reflete na mudança da composição litológica das unidades estratigráficas 2, 3 e 4 e a presença dos maiores fragmentos de arenito da UE3. Os valores de reflectância mais baixos (tons de azul) estão relacionados aos folhelhos da UE2, já os valores mais altos (tons de amarelo e laranja) estão relacionados ao depósito de colúvio, sendo que, quanto mais arenoso, maior a reflectância. O retaludamento realizado no local após a ocorrência de deslizamento em julho de 2011, prejudicou a

coleta de dados com o LST, pois a face do talude na forma de bancadas gerou oclusões. Estas oclusões representam a falta de dados devido a irregularidade na superfície e ao posicionamento do LST na base do talude. A nuvem de pontos gerada a partir de fotografias tiradas com o *drone* não apresentam o problema de oclusões, porém não há a informação do valor de reflectância no levantamento aéreo. Neste caso, a presença e continuidade do nível vulcânico da UE4 e a mudança litológica são mais claros na nuvem de pontos obtida com o LST. Um bom exemplo é a gradação mais discriminada dos valores de reflectância, quando comparadas com a simples gradação entre cinza e castanho observada nas fotografias.

Figura 17 - Comparação entre as diferentes técnicas de imageamento: (A) Nuvem de pontos obtida com o LST evidenciou as diferenças litológicas e geometria das camadas, mas, devido a geometria de retaludamento, há áreas sem informações (olusões); (B) O levantamento aéreo realizado com o *drone* possibilitou a visualização mais ampla do contato entre o depósito de colúvio da UE5 e os folhelhos da UE2.



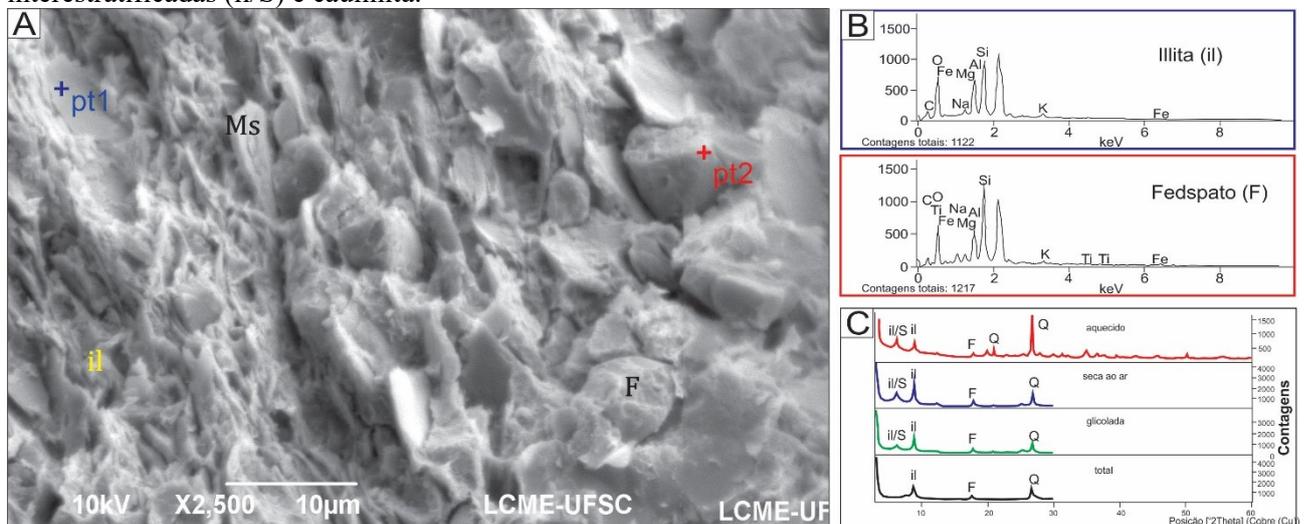
Fonte: Da autora (2017).

6.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

O folhelho siltico (amostra BP131B) da litofácies **FB.1** é constituído por grãos de feldspato alcalino e plagioclásio (F), muscovita (Ms) e quartzo (Q; Figura 18). Os feldspatos têm forma subédrica, com arestas subangulosas a subarredondadas, tem granulometria siltica, com cerca de 10µm (Figura 18A). A análise EDS revela picos de Si, O, Al, K e Na, indicando a presença do feldspato. A análise DRX indica a presença de feldspatos do tipo alcalino e plagioclásio (F; Figura 18C). A muscovita ocorre como plaquetas laminadas, com cerca de 8µm (Figura 18A).

O principal argilomineral identificado nestes litotipo é a illita que ocorre como palhetas dispostas horizontalmente, por vezes com hábito em favos (Figura 18A). A análise por EDS revela picos de Si, O, Al, K, Mg e Fe indicando a presença de illita (Figura 18B). A análise DRX aponta, além da illita (mica), a provável presença de caulinita e de esmectita interestratificada com cristais de illita (il/S) (Figura 18C).

Figura 18 - Composição mineralógica da litofácies **FB.1**: (A) Fotomicrografias MEV mostra a gradação granulométrica entre a porção pelítica, composta por argilominerais de illita (il), e a siltosa, composta por grãos detriticos de muscovita (Ms) e feldspato (F); (B) Espectro EDS revela picos de Si, O, Al, K, Mg e Fe indicando a presença de illita; e picos de Si, O, Al, K e Na, indicando a presença de feldspato (C) Difractograma DRX aponta, por meio das diferentes condições de tratamento, a presença de quartzo (Q), feldspatos do tipo alcalino e plagioclásio (F), além de argilominerais de illita (il) e a provável presença de illita/esmectita interestratificadas (il/S) e caulinita.



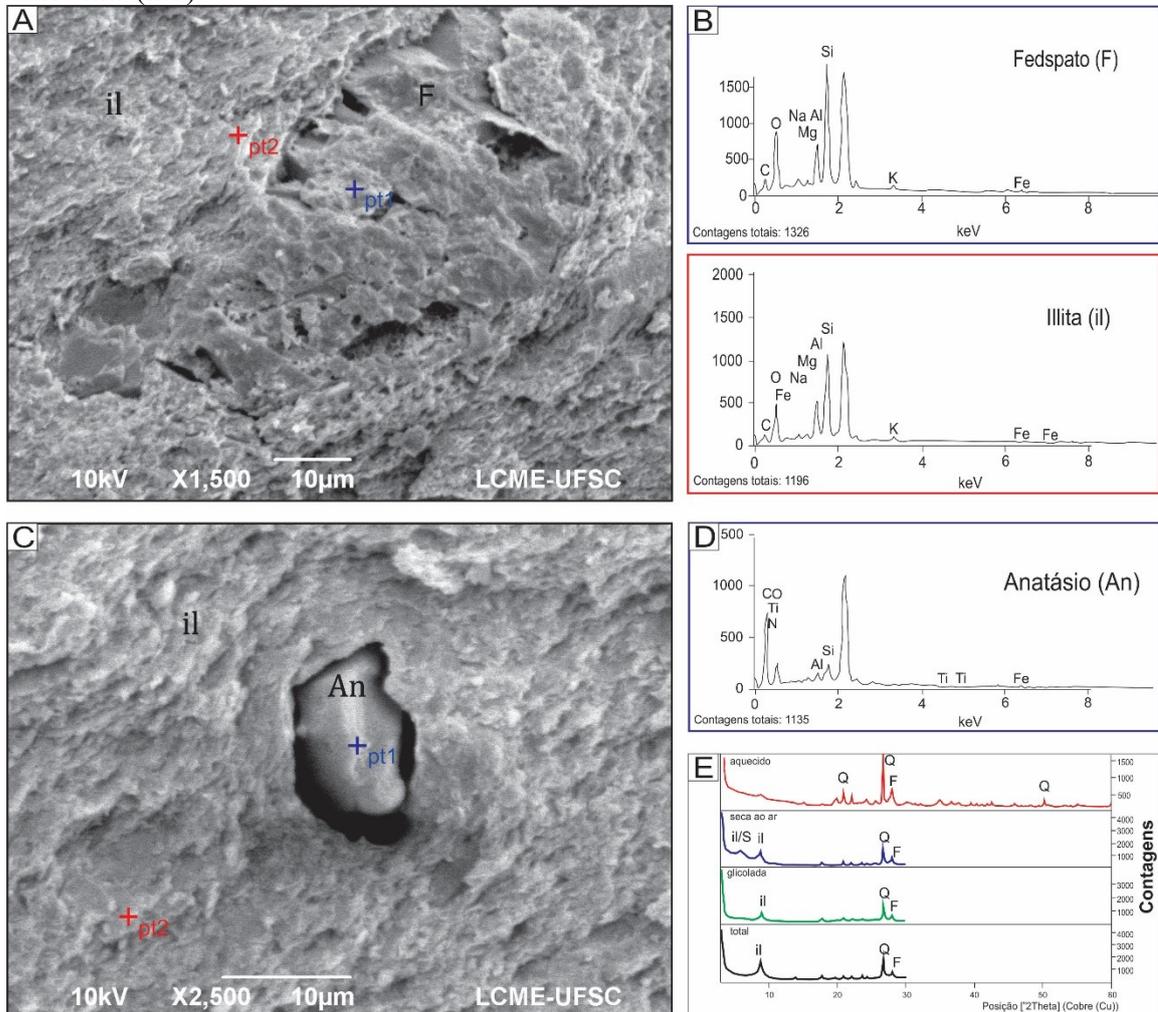
Fonte: Da autora (2017)

O folhelho negro (amostra BP132A) da litofácies **FB.1** é constituído por grãos de feldspato alcalino e plagioclásio (F), quartzo (Q), além de anatásio (An; Figura 19). O feldspato tem forma subédrica com arestas subangulosas e ocorre com granulometria siltica e, pontualmente, como grãos relativamente maiores, com cerca de 61µm de comprimento (Figura 19A). Nos grãos de feldspato maiores é possível observar *coating* de argilominerais, principalmente illita, e feição de corrosão. A análise EDS para o grão de feldspato, mostra picos de Si, Al, Mg, K e Fe (Figura 19B). O anatásio ocorre como grão subarredondado, com cerca de 10 µm e faces sem corrosão, diferentemente do

feldspato (Figura 19C). A análise EDS para o anatásio mostra pico de O, presença de Ti e baixo valor de Si (Figura 19D).

O principal argilomineral identificado é a illita que ocorre como cristais agregados de difícil individualização, associados principalmente aos feldspatos, recobrando sua superfície como uma crosta (Figura 19A). A análise por EDS revela picos de Si, Al, Mg, K, Na e Fe indicando a presença de illita (Figura 19B). A análise DRX aponta, além da illita (mica), a provável presença de caulinita e de esmectita interestratificada com cristais de illita (il/S), e (Figura 19D).

Figura 19 - Composição mineralógica da litofácies FC: (A) Fotomicrografia MEV mostra grão de feldspato (F) corroído, coberto por crosta de argilominerais de illita (il); (B) Espectro EDS revela picos de Si, O, Al, K e Na, indicando a presença de feldspato, e picos de Si, Al, Mg, K, Na e Fe indicando a presença de illita; (C) Difratoograma DRX aponta, por meio das diferentes condições de tratamento, a presença de quartzo (Q), feldspatos do tipo alcalino e plagioclásio (F), além de argilominerais de illita (il) e interestratificação de illita/esmectitita (il/S).

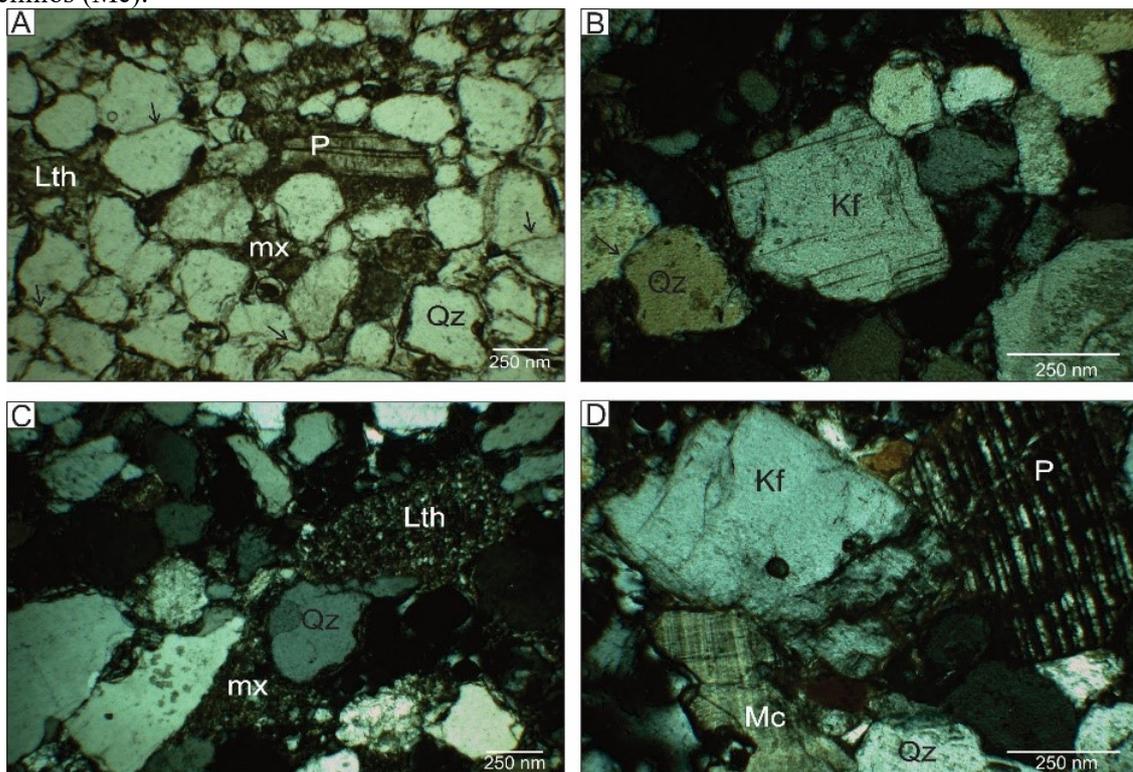


Fonte: Da autora (2017).

Os arenitos moderadamente a bem selecionados (UE3) são constituídos de quartzo (Q), feldspatos (Kf e P) e fragmentos líticos (Lt) (Figura 20). Os contatos entre grãos são principalmente longos a côncavo-convexos. Os feldspatos são representados, principalmente por feldspatos potássicos (Kf) e plagioclásios (P) e, subordinadamente por microclínios (Mc) (Figura 20D). Os grãos

de feldspato potássico e plagioclásio são subédricos e levemente maiores do que os quartzos, com comprimento médio de 500nm. Os grãos de quartzo têm cerca de 300nm, são monocristalinos e exibem extinção paralela a ondulada. Os fragmentos líticos estão levemente deformados e têm cerca de 350nm. Argilominerais detríticos e autigênicos compõem a matriz (mx) e quartzo autigênico ocorre cimentando os grãos.

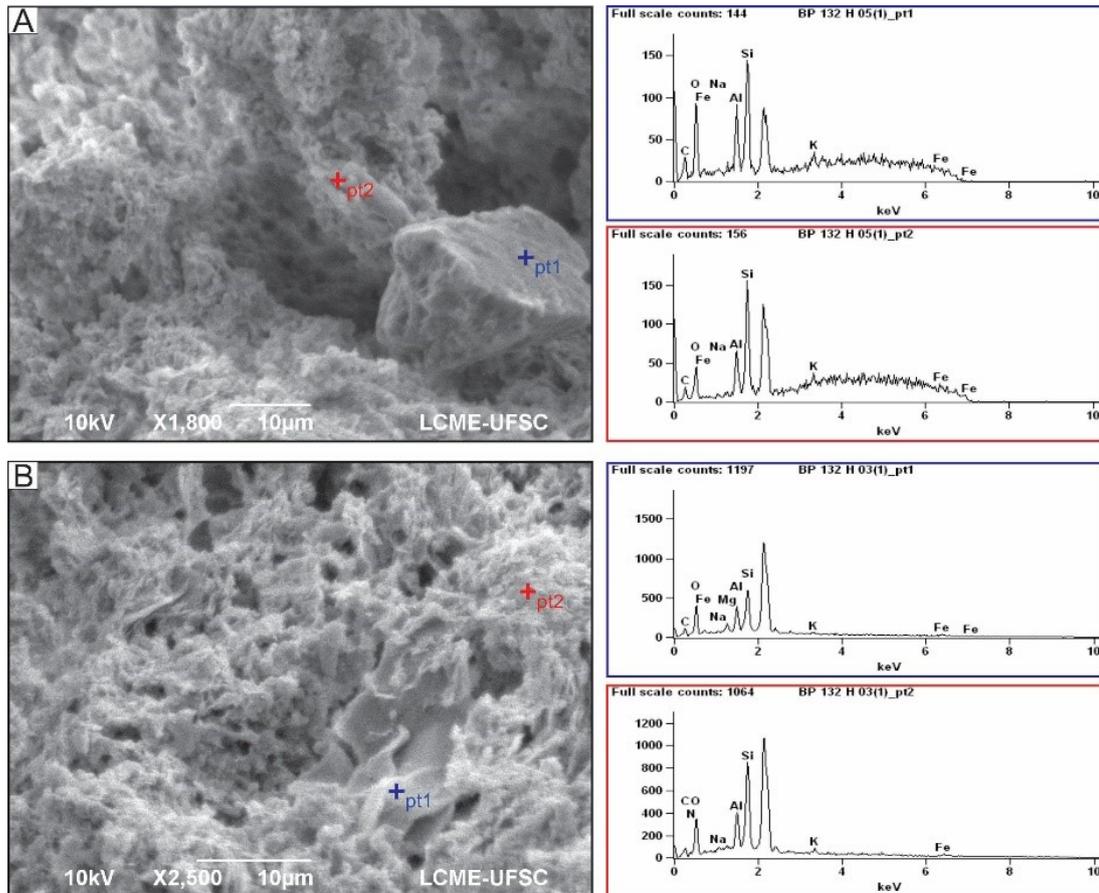
Figura 20 - Fotomicrografias do arenito da UE3: (A), (B) e (C) O arcabouço é composto por grãos de quartzo (Q), feldspatos (F e P) e líticos; a matriz (mx) é argilosa e quartzo autigênico cimenta os contatos entre grãos (setas); (D) Macla do tipo polissintética, típica dos plagioclásios (P), e macla do tipo tartan, típica dos microclínios (Mc).



Fonte: Da autora (2017).

A rocha vulcânica (UE 4) teve sua análise semicomposicional influenciada pelo seu alto grau de alteração. As fotomicrografias do MEV ressaltam sua estrutura muito porosa e boa agregação das partículas. Esta agregação pode ser associada a presença de minerais de alteração, principalmente de argilominerais. Dados de EDS registram picos de Si, O, Al, Fe, C, K, Na, Mg e N, sendo que o tipo de argilomineral não foi identificado com este método.

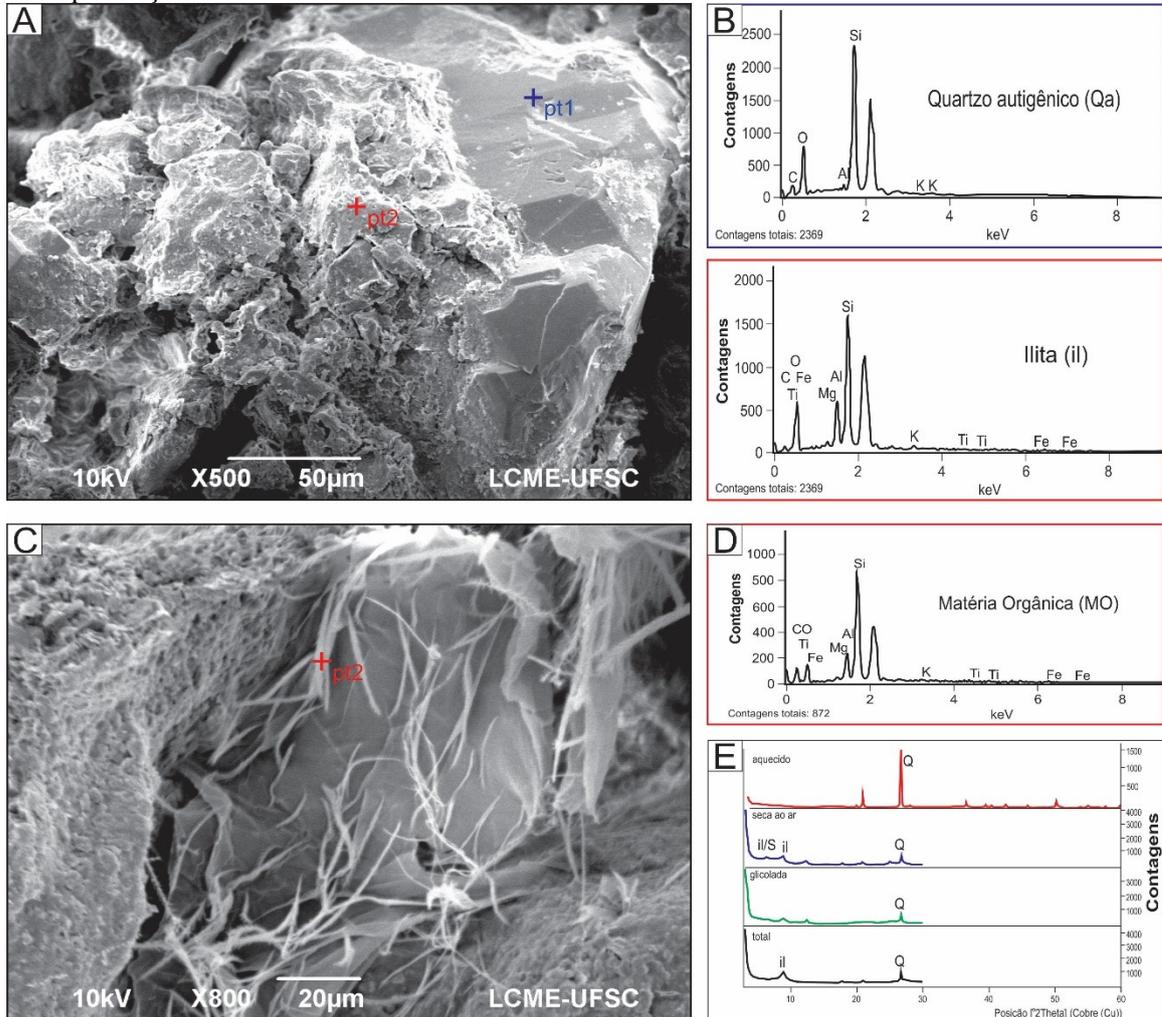
Figura 21 - Fotomicrografias MEV e espectro EDS da UE4: (A e B) O arcabouço tem estrutura porosa e é composto por partículas bem agregadas, associada a presença de minerais de alteração, principalmente de argilominerais. Dados de EDS registram picos de Si, O, Al, Fe, C, K, Na, Mg e N, sendo que o tipo de argilomineral não foi identificado com este método.



Fonte: Da autora (2017).

O depósito de colúvio tem sua composição mineralógica influenciada tanto pelos diferentes fragmentos e partículas oriundas de mais de um litotipo, quanto pelos processos de formação de minerais secundários e da pedogênese. As fotomicrografias do MEV mostram alta porosidade e alta agregação de matriz com aspecto esquelético (Figura 22). A illita é o principal argilomineral identificado nesta unidade estratigráfica. Dados de EDS atestam que as partículas destes depósitos possuem alto conteúdo de O, Si e Al (Figura 22B), relacionados à presença de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio também identificados pelo DRX (Figura 22E). O quartzo autigênico, embora esporádico, ocorre como sobrecrecimento sintaxial (Qa; Figura 22A) associada à porosidade secundária. Em alguns poros ocorrem filamentos, possivelmente de origem orgânica (Figura 22C), difícil de se identificar mesmo por análise EDS (Figura 22D). Os dados de DRX mostram a presença de interestratificados il/S, assim como de caulinita, embora em pouca quantidade (Figura 22E).

Figura 22 - Fotomicrografias MEV e espectro EDS do solo coluvionar da UE5: (A) As partículas do solo coluvionar são cimentadas por argilominerais, principalmente illita (il), e localmente por quartzo autigênico (Qa); (B) Estrutura porosa e partículas do arcabouço bem agregadas; (C) Filamentos de origem orgânica preenchem alguns poros do solo coluvionar; (D) Espectograma EDS do filamento de MO mostra grande variedade de elementos químicos devido à espessura do filamento ser menor do que o ponto analisado pelo método; (E) Difratoograma DRX mostra a presença de quartzo (Q), illita (il), interestratificados il/S, assim como a provável presença de caulinita.



Fonte: Da autora (2017).

6.3 ESTRUTURAS TECTÔNICAS

Todas as unidades da Formação Rio do Sul foram afetadas na área de estudo por falhas e fraturas subverticais, sendo que dois padrões estruturais foram interpretados em relevos sombreados e medidos em campo (Figura 23). O padrão principal tem direção NE-SW e é associado a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (SILVA e DIAS, 1981). O padrão subordinado tem direção NW-SE e se relaciona às reativações mesozoicas da ZCIP (ROSTIROLLA et al., 2003).

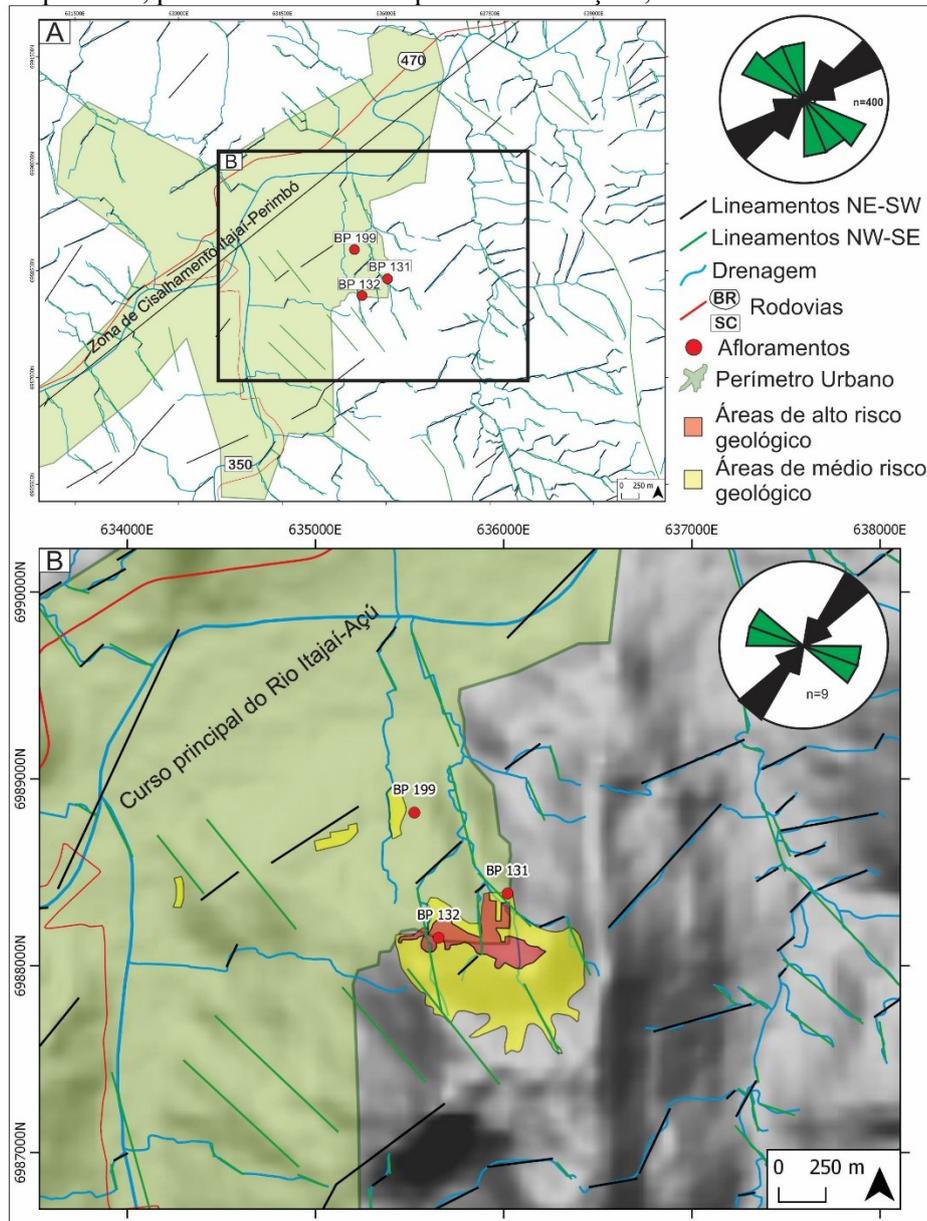
O principal padrão, NE-SW, é representado pelos maiores lineamentos da região, responsáveis por controlar a direção de curso de grande parte da drenagem, entre elas a do Rio Itajaí-Açú, o

principal da região (Figura 23B). O padrão subordinado, NW-SE, é expresso em lineamentos de comprimento menor, mas de alta frequência.

O diagrama de rosetas de comprimentos acumulados, gerado a partir da extração de 404 lineamentos na escala 1:25000, mostra uma distribuição bimodal entre os lineamentos, sendo que o padrão principal tem direção N30E-SW a N45E-SW e o secundário N10E-SE a N40W-SE (Figura 23A). O padrão estrutural NE-SW é mais expressivo, em relação ao comprimento e a uniformidade da direção dos lineamentos. O padrão NW-SE tem grande frequência na área de estudo, mas, em comparação com o padrão principal, têm expressão menor em comprimento e sua direção é mais heterogênea.

A Figura 23B mostra áreas de alto e médio risco geológico. Estes polígonos foram demarcados por meio de mapeamento das encostas e talude com risco de ocorrência de desastres naturais, feito de acordo com a combinação dos critérios de suscetibilidade à movimentos de massa e/ou processos hidrológicos, vulnerabilidade das edificações, e distância da moradia do processo de movimento de massa (CENAD-CPRM/SEDEC, 2013). Este mapeamento é um dos resultados do Projeto "Setorização Emergencial de Áreas de Risco", coordenado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e desenvolvido pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), do qual o município de Rio do Sul foi contemplado. Todos os afloramentos estudados no presente trabalho estão localizados dentro ou próximos das áreas de risco anteriormente delimitadas, sendo que o depósito coluvionar do afloramento BP132 está contido em uma área de alto risco geológico (Figura 23B).

Figura 23 - Lineamentos estruturais interpretados: (A) O padrão estrutural principal tem direção NE-SW (linhas pretas) e é concordante à ZCIP, o padrão subordinado tem direção NW-SE (linhas verdes; escala 1:50000) (B) As estruturas tectônicas NE-SW controlam o curso principal do Rio Itajaí-Açú, além de condicionarem áreas de alto e médio risco geológico (sobreposição dos lineamentos e do mosaico do relevo sombreado na escala 1:25000). O diagrama de rosetas com as medidas de campo segue a mesma tendência dos lineamentos interpretados, porém com menor dispersão nas direções, devido ao menor número de medidas.

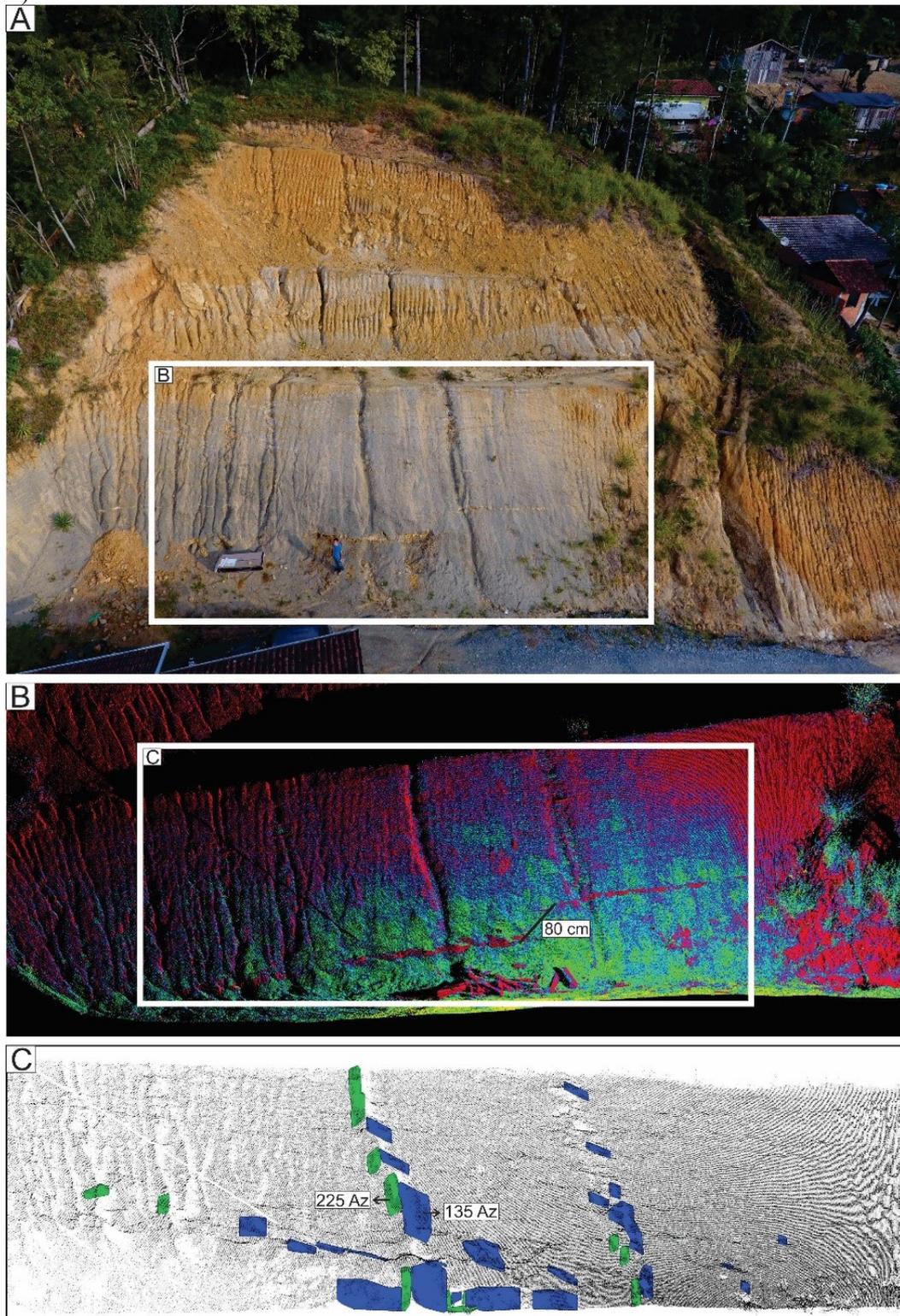


Fonte: Da autora (base de dados do IBGE, ANA, EPAGRI/CIRAM e CENAD).

Os folhelhos sílticos e negros das UE1 e UE2 são cortados por falhas e fraturas subverticais predominantemente com direções de 70Az e 195-215 Az e subordinadamente com direções de 120Az-115Az e 130-135 Az (Figura 23B). A alta frequência de superfícies de fraqueza em duas direções praticamente perpendiculares leva a grande desagregação das litologias, principalmente dos níveis pelíticos dos folhelhos. Foi observado rejeito de até 20 cm em camada síltica, relacionado às falhas NE-SW (Figura 16B e C). As soleiras da UE4 apresentam padrão de clivagem vertical, com direção de 240-245 Az, e fraturas com direção 335 Az. Foi observado rejeito de até 80 cm relacionado às falhas NW-SE (Figura 24B). Os dois padrões tectônicos também foram evidenciados por meio da

extração de facetas no processamento da nuvem de pontos (Figura 24C). As facetas foram classificadas em dois grupos de direções predominantes: 225 Az, associado ao padrão principal NE-SW, e 135 Az, relacionado à direção subordinada NW-SE.

Figura 24 - Estruturas tectônicas presentes na UE2 e UE4: (A) Visão geral da UE2 sobreposta por depósito coluvionar da UE5 em foto obtida com *drone*; (B) Rejeito de falha associado ao padrão NW-SE em soleira da UE4, observada na nuvem de pontos colorida com os valores de reflectância no padrão de cores HSV; (C) Facetas extraídas da nuvem de pontos do LST mostram os dois padrões estruturais NE-SW (225 Az) e NW-SE (135 Az).



Fonte: Da autora (2017).

6.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO COLÚVIO

A caracterização geotécnica e ensaio de cisalhamento direto do solo e matriz coluvionares para determinação do comportamento mecânico do colúvio foi realizada apenas no afloramento BP132 (Figura 16). As amostras destes depósitos são representativas da matriz argilo-siltosa (BP132F) e do solo (BP132G). Esta análise também foi conduzida na rocha vulcânica (intercalada) que também constitui a encosta, e que pelo seu aspecto friável permitiu a coleta do corpo de prova (BP132H). A composição mineral do depósito de colúvio (arcabouço e matriz) é constituída de material oriundo da erosão e intemperismo das unidades estratigráficas subjacentes (UE1, UE2 e UE3), atribuindo à UE5 uma alta heterogeneidade mineralógica e estrutural, condição que é refletida nas características físicas e mecânicas deste depósito.

6.4.1 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica consistiu na determinação, através de ensaios laboratoriais, da granulometria, textura e índices físicos das amostras. Estas características representam a composição mineral e os processos geológicos que os materiais foram submetidos, desde sua formação até as condições atuais de campo. Os índices físicos e a granulometria geral das amostras analisadas estão sumarizados na Tabela 2 e os resultados da análise granulométrica estão sumarizados na Tabela 3.

Tabela 2 - Índices físicos e granulometria geral

| Amostra | Wnat (%) | γ_s (kN/m ³) | e | n (%) | Sr (%) | Granulometria (%) | | |
|-----------|----------|---------------------------------|------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
| | | | | | | areia | silte | argila |
| Matriz | 11,68 | 26,6 | 0,5 | 35,4 | 60,1 | 23,05 | 59,09 | 15,37 |
| Solo | 8,4 | 28,6 | 0,65 | 39,31 | 38,46 | 76,52 | 17,96 | 4,15 |
| Vulcânica | 44,43 | 27,2 | 1,44 | 59,10 | 85,58 | 29,14 | 48,01 | 21,38 |

Nota: Wnat = Teor de umidade natural; γ_s = peso específico dos sólidos; e = Índice de vazios; n = Porosidade; Sr = Grau de saturação.

Tabela 3 - Porcentagem das frações granulométricas.

| Amostra | Granulometria | | | | | |
|-----------|---------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| | Argila (%) | Silte (%) | A.F. (%) | A.M. (%) | A.G. (%) | Pedr. (%) |
| Matriz | 15,37 | 59,09 | 6,82 | 15,23 | 1,00 | 2,49 |
| Solo | 4,15 | 17,96 | 13,23 | 61,66 | 7,95 | 1,49 |
| Vulcânica | 21,38 | 48,01 | 8,37 | 22,56 | 10,88 | 2,12 |

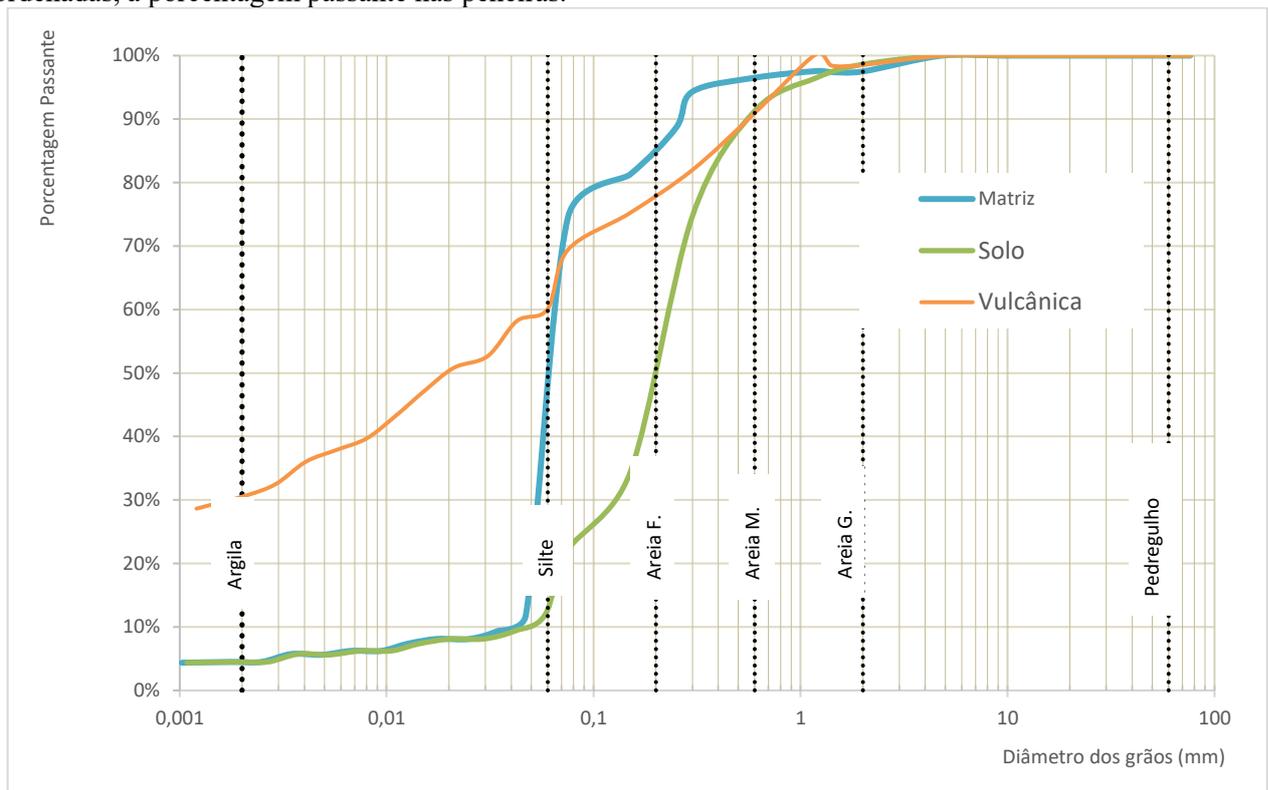
Nota: A.F. = Areia Fina; A.M. = Areia Média; A.G. = Areia Grossa; Pedr. = Pedregulho.

Os maiores valores de teor de umidade natural, índice de vazios, porosidade e grau de saturação estão associados ao material vulcânico, o qual também apresenta a menor densidade dos sólidos. Estes valores são corroborados pelas imagens de MEV, que mostram a grande quantidade de poros existentes na estrutura da soleira. O saprólito vulcânico tem porosidade muito alta, de acordo com a

classificação da porosidade e índice de vazios, e é considerado um solo saturado, conforme classificação pelo grau de saturação (IAEG, 1979). Ao se comparar as duas amostras referentes ao depósito coluvionar, os maiores valores de teor de umidade natural, índice de vazios, porosidade e grau de saturação estão associados a matriz do colúvio, a qual também apresenta a menor densidade dos sólidos. A matriz e o solo coluvionar têm porosidade média, em que a matriz é considerada um solo muito úmido, e o solo coluvionar um solo úmido (IAEG, 1979). O índice de vazios dos colúvios é maior do que os solos residuais devido ao empolamento gerado pelo escorregamento e a lixiviação causada pelo fluxo d'água (PERAZZOLO, 2003).

O material vulcânico é o mais argiloso, com 69,39% de finos sendo que 21,38% é de fração argila. Sua curva de distribuição granulométrica se aproxima relativamente de uma curva aberta, o que indica que há certa predominância das frações argila a silte e de areia média a grossa, sem uma gradação muito contínua entre elas (Figura 25). Quanto ao depósito coluvionar, a matriz tem o maior conteúdo de finos, com 74,46%, sendo 59,09% de silte. Já o solo é o mais arenoso, com 76,52% de fração areia. A mudança na distribuição granulométrica dentro do depósito coluvionar relaciona-se com a concomitante diminuição de clastos pelíticos e o aumento de clastos areníticos em direção ao topo do depósito. Este fato ocorre devido a própria geometria do colúvio e o processo de movimentação de massa por fluxo de detritos, sendo que os fragmentos de maior tamanho tendem a formar barreiras a medida que o movimento perde velocidade, diferentemente das partículas mais finas que alcançam distâncias maiores. Os parâmetros calculados a partir da curva granulométrica estão sumarizados na Tabela 4.

Figura 25 - Distribuição granulométrica das amostras: Representação por meio de curvas cumulativas, com o eixo das abscissas correspondendo ao diâmetro dos grãos (em escala logarítmica de base 10), e o eixo das ordenadas, a porcentagem passante nas peneiras.



Fonte: Da autora (2017).

Tabela 4 - Parâmetros da curva de distribuição granulométrica

| Amostra | D_{10} (mm) | C_u | C_c |
|-----------|---------------|-------|-------|
| Matriz | 0,042 | 1,547 | 1,068 |
| Solo | 0,058 | 1,03 | 1,908 |
| Vulcânica | 0,002 | 30 | 0,033 |

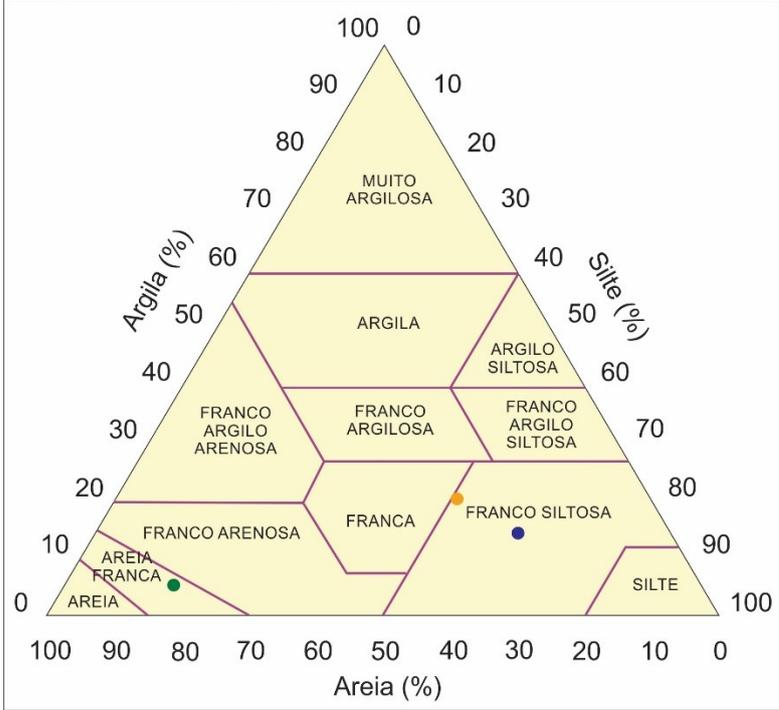
Nota: C_{10} = Diâmetro efetivo; C_u = Coeficiente de uniformidade; C_c = Coeficiente de curvatura;

A matriz tem diâmetro efetivo (C_{10}) menor do que o solo, sendo que 10% do peso total das partículas da matriz são menores do que 0,042mm, e do solo são menores do que 0,058mm. Tanto a distribuição granulométrica da matriz quanto do solo tem coeficientes de uniformidade (C_u) menores que 5, o que as caracterizam como curvas muito uniformes. O solo tem o C_u mais próximo de 1, o que indica que os diâmetros dos grãos variam em um intervalo bem pequeno. Os dois materiais têm coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 e 3, o que os caracteriza como bem graduados, sendo que a matriz tem a melhor graduação. O material vulcânico tem 30% do peso total das partículas menores que o tamanho argila. Sua curva granulométrica tem C_u maior que 15, o que a caracteriza como desuniforme, e C_c menor que 1, o que a caracteriza como descontínua ou aberta, o que significa que há predomínio de determinadas faixas granulométricas sem uma gradação entre elas, ou seja, há a ausência de alguns tamanhos de grãos.

As porcentagens granulométricas foram recalculadas para serem plotadas no diagrama de classificação textural proposto pelo *United States Department of Agriculture* (USDA, 1951), que

desconsidera granulometrias maiores do que a areia (2 mm). De acordo com esta classificação, a textura da matriz coluvionar e do material vulcânico é franco siltosa, e a textura do solo coluvionar é areia franca (Figura 26)

Figura 26 - Classificação textural das amostras matriz coluvionar (azul), solo coluvionar (verde) e material vulcânico (laranja) em diagrama ternário proposto pela USDA (1951)

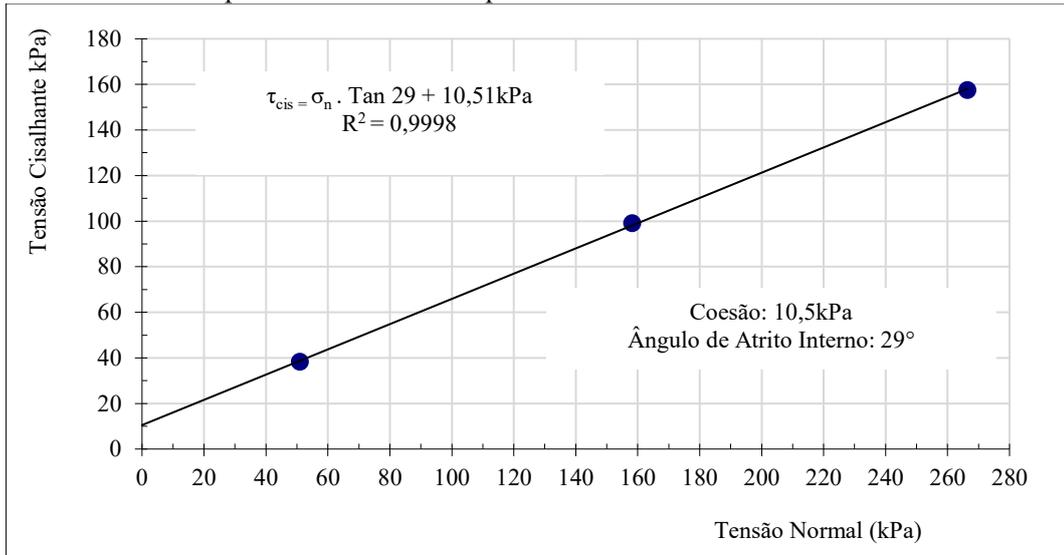


Fonte: Da autora (2017).

6.4.2 Resistência ao cisalhamento direto

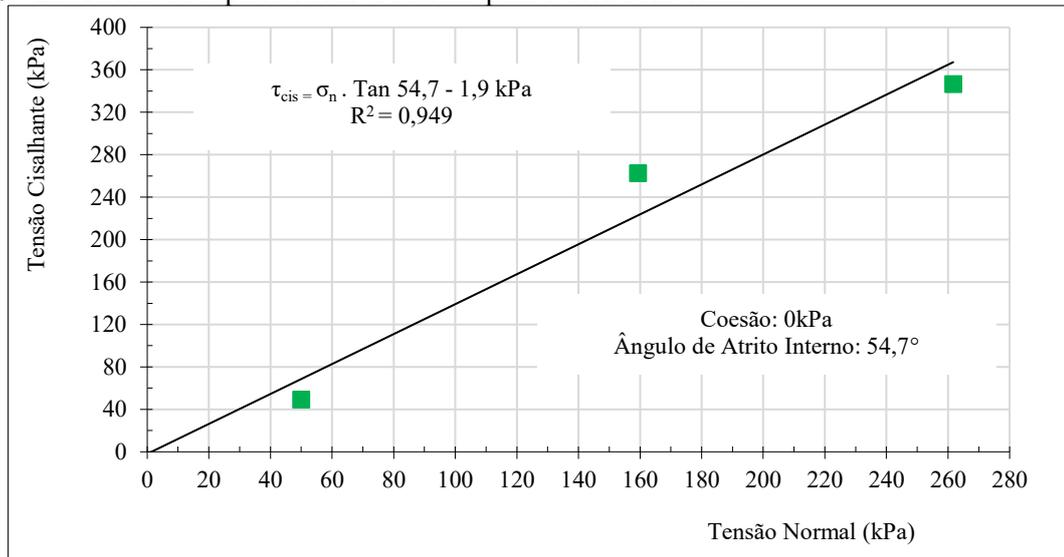
A partir dos valores de tensão cisalhante obtidos nos três estágios do ensaio de cisalhamento direto, as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb foram construídas (Figura 27, Figura 28 e Figura 29). Por meio dos parâmetros da envoltória, obteve-se os parâmetros de resistência, que estão sumarizados na Tabela 5.

Figura 27 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para a matriz coluvionar.



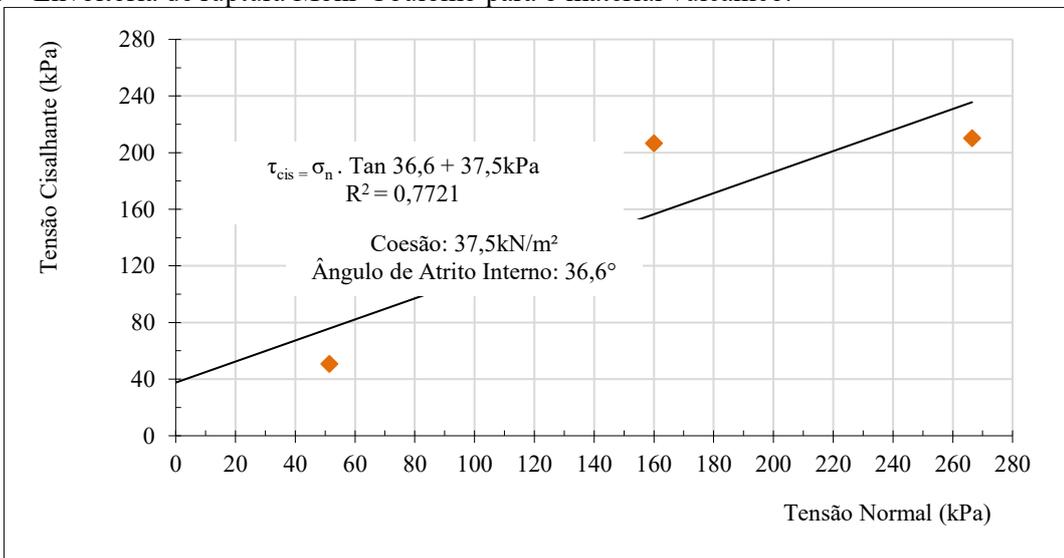
Fonte: Da autora (2017).

Figura 28 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para o solo coluvionar.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 29 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para o material vulcânico.



Fonte: Da autora (2017).

Tabela 5 - Parâmetros de resistência das amostras cisalhadas.

| <i>Amostra</i> | <i>Ângulo de atrito interno (°)</i> | <i>Coesão (kPa)</i> |
|------------------|-------------------------------------|---------------------|
| <i>Matriz</i> | 29 | 10,5 |
| <i>Solo</i> | 54,7 | 0 |
| <i>Vulcânica</i> | 36,6 | 37,5 |

Os valores de coesão apresentaram grande correspondência com a granulometria dos materiais, no que diz respeito ao teor de finos existentes. A maior coesão, de 37,5 kPa foi apresentada pelo material vulcânico, que tem a textura mais argilosa. O valor de coesão intermediário, equivalente a 10,5 kPa, foi obtido no ensaio da matriz do colúvio, o material mais siltoso. Por sua vez, a menor coesão está relacionada com a amostra mais arenosa, o solo coluvionar, que possui coesão nula.

A mesma relação com a granulometria é válida para os valores de ângulo de atrito interno, no que se refere à fração de areia existente. O maior ângulo de atrito interno, de 54,7° está relacionado com o material mais arenoso, o solo coluvionar. Este valor é seguido pelo saprólito vulcânico, que apresenta 36,6° de atrito interno e 29,14% de areia; e pela matriz do depósito coluvionar, com 29° de atrito interno e 23,05% de areia.

Devido a heterogeneidade do depósito coluvionar, é difícil comparar os valores de coesão e ângulo de atrito com a bibliografia, pelo menos em termos de litologia do material de origem. A UE5 é o produto do intemperismo de folhelhos e arenitos e é constituída por fragmentos rochosos destas unidades, além de solo e matriz coluvionar que já passaram por processos geológicos e pedogenéticos. BRESSANI (2005), obteve parâmetros de resistência ao cisalhamento de colúvio de arenito da Fm. Botucatu, com ensaios triaxiais, de: 14kPa e 14,5-15,5kPa de coesão e 30,3 e 35-39 de ângulo de atrito interno.

6.4.2 Análise de estabilidade

A análise de estabilidade foi conduzida para a encosta do afloramento BP132, que compreende um talude em bancadas com face para norte, cerca de 30 m de extensão, 14,5 m comprimento e 25° de inclinação (Figura 24A). Os modelos foram propostos de acordo com as seguintes considerações:

- A constituição do talude foi agrupada em quatro materiais, sendo eles: folhelhos negros e sílticos da UE2, soleira vulcânica da UE4, matriz coluvionar e solo coluvionar;
- Os parâmetros de resistência (sumarizados na Tabela 6) derivam dos ensaios de cisalhamento direto, sendo que para os folhelhos, os parâmetros foram retirados da bibliografia (FARMER, 1968)

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na análise de estabilidade

| Material | Ângulo de atrito interno (°) | Coesão (kPa) | γ_d (kN/m ³) | γ_{sat} (kN/m ³) |
|-----------|------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Folhelho | 15 | 300 | 26 | 26 |
| Vulcânica | 36,6 | 37,5 | 16,38 | 16,95 |
| Matriz | 29 | 10,5 | 19,91 | 22,55 |
| Solo | 54,7 | 0 | 18,63 | 22,38 |

Nota: γ_d = peso específico aparente seco; γ_{sat} = peso específico saturado

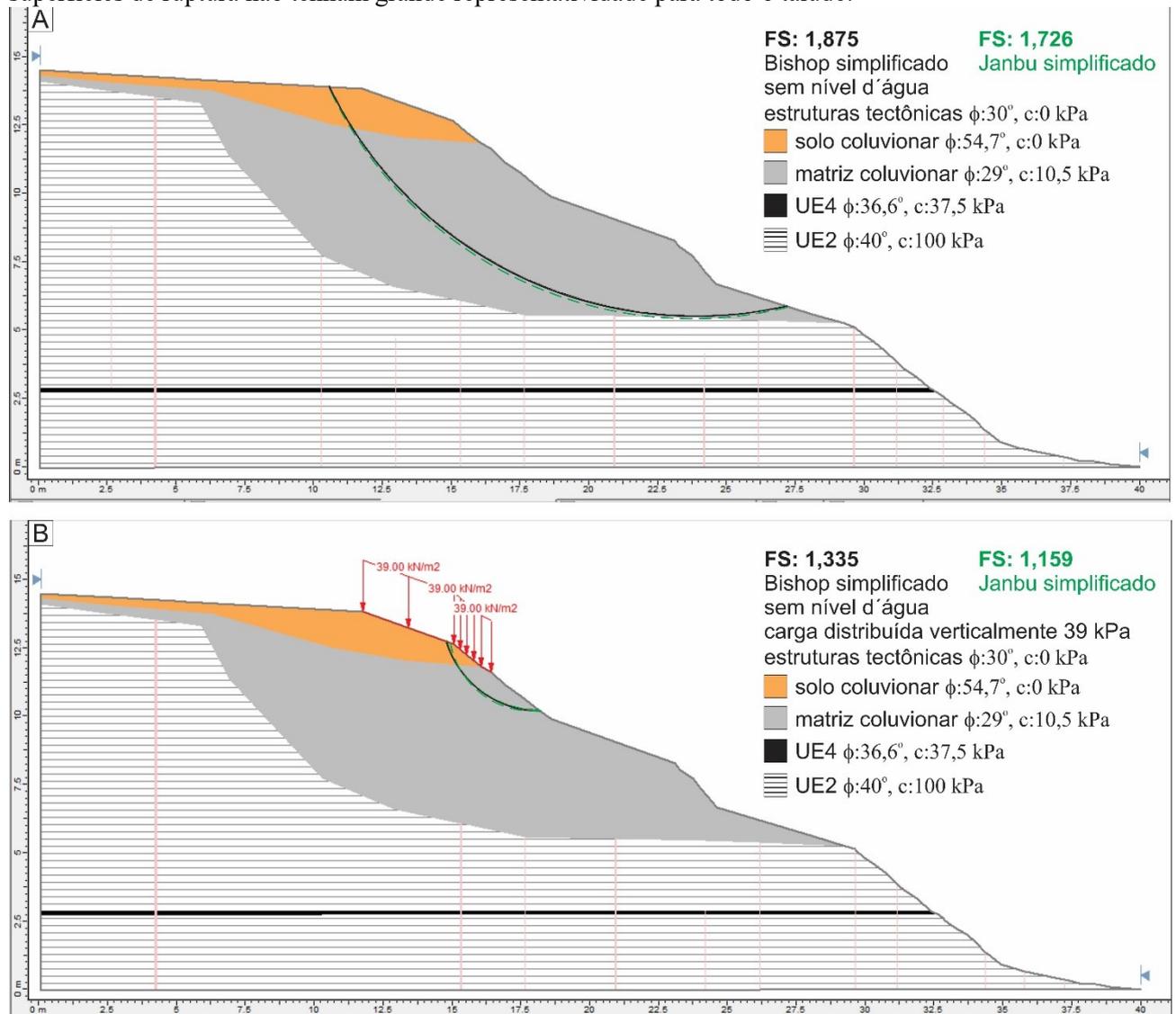
- A superfície do talude foi extraída da nuvem de pontos obtida pelo LST, sendo que sua profundidade foi estimada em 40 m;
- A fim de incorporar a influência das estruturas tectônicas nos modelos de estabilidade, finas camadas verticais foram criadas, sendo que foi adotado os parâmetros de resistência de Burton ($\phi=30^\circ$, $c=0$ kPa e $\gamma_d=20$ kN/m³);
- A fim de incorporar a influência dos matacões de arenito presentes no topo do depósito coluvionar, foi acrescentado ao modelo uma carga de 39 kPa distribuída verticalmente no local onde os maiores clastos se encontram. Considerou-se o peso específico de um arenito sendo 26 kN/m³ (FARMER, 1968), sendo que o volume dos clastos foi estimado em um total de 1,5 m³;
- Os modelos propostos consideram os métodos críticos de Bishop simplificado e Janbu simplificado, ambos com superfícies de ruptura circulares;

O talude analisado já sofreu rupturas pretéritas, assinaladas pela deposição do próprio colúvio e pelo retaludamento realizado após fluxo de detritos ocorrido em julho de 2011, durante um evento de precipitação extrema. Apesar da condição de estabilidade esperada devido às acomodações dos esforços pós-movimento de massa e retaludamento, o caráter de movimento em pulsos dos fluxos de detritos pode levar a novas instabilidades. Relatos dos moradores de que pequenos fluxos ocorrem frequentemente, principalmente em períodos de alta precipitação, além da presença de ravinamentos na superfície do talude, comprovam esta consideração.

Duas condições foram analisadas: a condição original de campo (sem a presença de nível d'água; Figura 30) e uma condição de elevada saturação (com nível d'água a 1 m da superfície; Figura 31). O modelo sem nível d'água apresentou FS = 1,875 para Bishop simplificado e FS = 1,726 para Janbu simplificado (Figura 30A). Os dois fatores de segurança são considerados altos segundo NBR 16682 (1991), ou seja, nesta condição o talude está estável. Quando a presença dos matacões de arenito é contabilizada na análise, o FS diminui sensivelmente, sendo igual a 1,335 para Bishop simplificado e 1,159 para Janbu simplificado, entretanto as superfícies de ruptura não têm grande expressão (Figura 30B). Apesar de estes fatores de segurança não representarem necessariamente

todo o talude, eles podem ser associados aos pequenos fluxos de detritos que foram relatados pelos moradores, além do fato de que estes fluxos, embora pequenos, contribuem para a erosão da encosta.

Figura 30 - Análise de estabilidade para condição sem nível d'água: (A) Os valores de FS calculados se enquadram no grau de segurança alto; (B) O aumento de carga gerada pela presença de matacões de arenito no topo do colúvio foi considerada na análise. Os valores de FS diminuíram consideravelmente, embora as superfícies de ruptura não tenham grande representatividade para todo o talude.

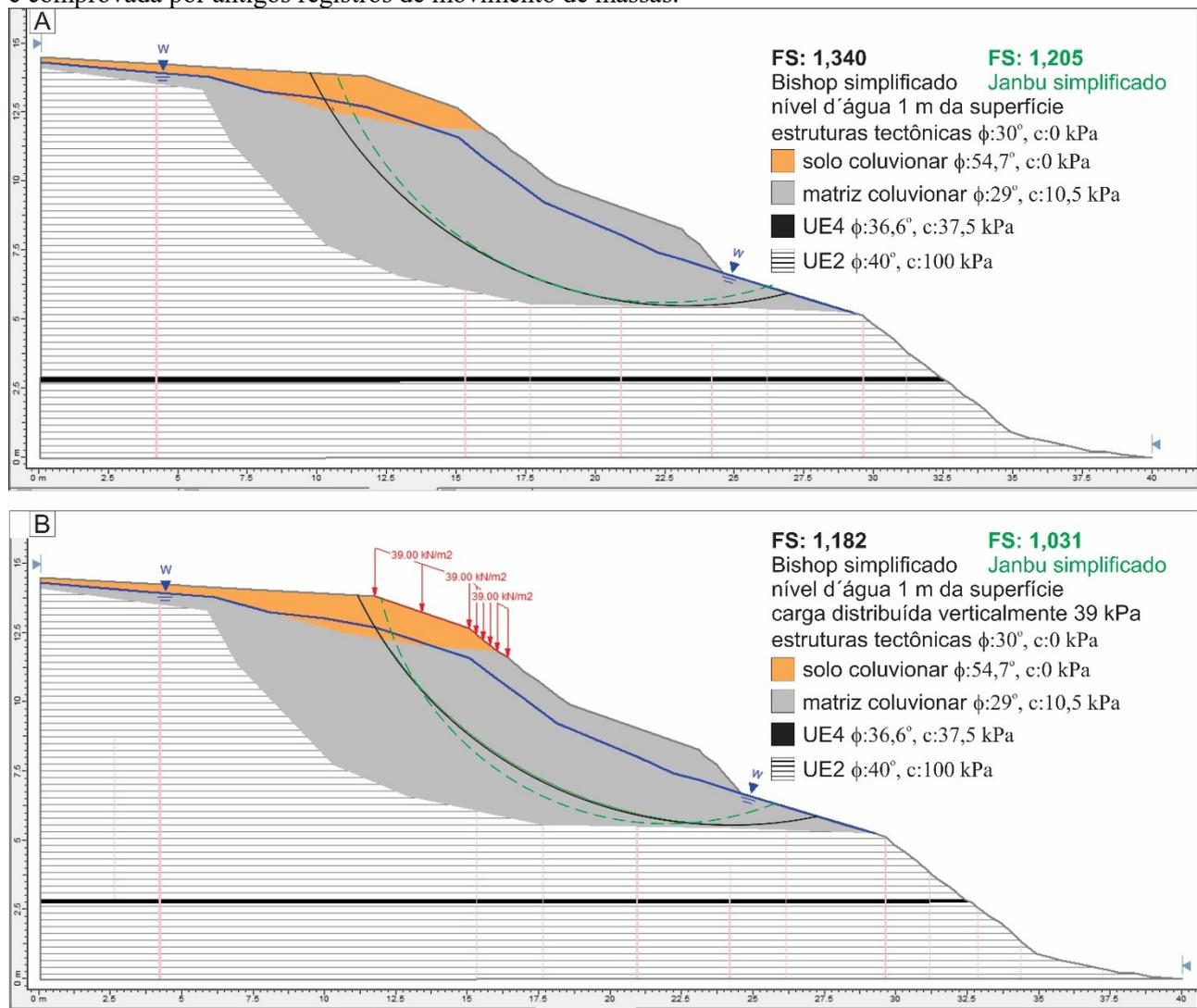


Fonte: Da autora (2017).

O modelo com nível d'água a 1 m da superfície, representativo de períodos com pluviosidade extrema, apresentou FS = 1,340 para Bishop simplificado e FS = 1,205 para Janbu simplificado (Figura 31A). A presença do nível d'água e suas consequências na saturação dos materiais e no aumento das poro-pressões teve influência direta nos fatores de segurança, que diminuíram sensivelmente. A presença dos matacões de arenito no topo do talude novamente acarreta na diminuição dos valores de FS, sendo igual a 1,182 para Bishop simplificado e 1,031 para Janbu simplificado. Nestas duas condições, o talude tem grau de segurança médio, considerando-se o modelo de Bishop simplificado, e grau de segurança baixo, considerando-se o modelo de Janbu

simplificado (NBR 16682, 1991). Esta instabilidade, causada pelo grande aumento do nível d'água, pode ser comprovada pelo último registro de movimento de massa na área, ocorrido em julho de 2011 após grande volume de chuvas.

Figura 31 - Análise de estabilidade para condição com nível d'água a 1 m da superfície: (A) Os valores de FS calculados se enquadram no grau de segurança médio (Bishop ssimplificado) e baixo (Janbu simplificado); (B) O aumento de carga gerada pela presença de matacões de arenito no topo do colúvio foi considerada na análise. Os valores de FS diminuiram consideravelmente, sendo que a instabilidade do talude nesta condição é comprovada por antigos registros de movimento de massas.

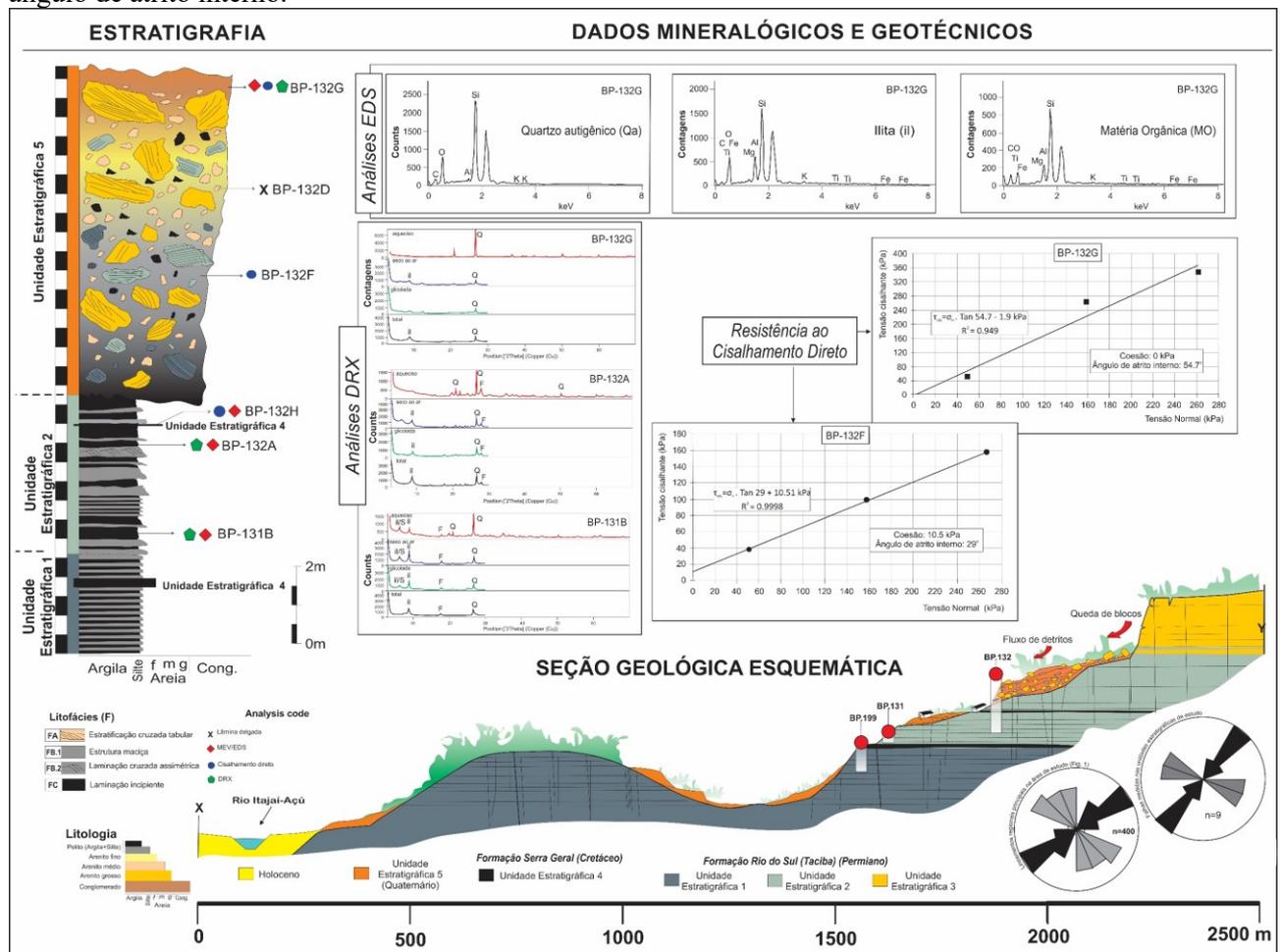


Fonte: Da autora (2017).

7. CONCLUSÕES

O controle lito-estrutural nas propriedades geotécnicas de depósitos de colúvios de uma área específica da cidade de Rio do Sul foi investigado a partir da integração de dados mineralógicos, estruturais e de resistência ao cisalhamento direto, integrados na Figura 32.

Figura 32 - Integração dos dados mineralógicos, estruturais e de resistência ao cisalhamento direto. A estratigrafia da área inclui as unidades estratigráficas UE1, UE2 e UE3 (Formação Rio do Sul); UE4 (Formação Serra Geral) e UE5 (depósito coluvionar). A presença de clastos de arenitos e folhelhos como constituintes do depósito coluvionar, aliado a geomorfologia local, permite a interpretação de que estes depósitos são o produto do intemperismo e erosão das UE 2, UE3 e UE5. Illita detrítica (muscovita) (il) e grãos de feldspatos (F), e uma pequena quantidade de esmectita (il/S) e caulinita compõe os folhelhos sílticos e negros. A interpretação dos lineamentos mostra o padrão NE-SW, associado a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó. Os parâmetros de cisalhamento direto mostram que o maior valor de coesão e o menor ângulo de atrito interno estão associados à matriz coluvionar, enquanto que o solo coluvionar tem coesão equivalente a 0 kPa e tem o maior ângulo de atrito interno.



Fonte: Da autora (2017).

A estratigrafia da área inclui 5 unidades estratigráficas: UE1, UE2 e UE3 (Formação Rio do Sul); UE4 (Formação Serra Geral); e UE5 (depósitos coluvionares). A UE5 consiste em um depósito coluvial conglomerático, de matriz suportada, composto por clastos de folhelhos (da UE1 e UE2) e

por blocos e matacões de arenito (da UE3), depositados como queda de blocos e fluxo de detritos nas encostas.

A análise mineralógica indica que os folhelhos negros e os sílticos das unidades estratigráficas UE1 e UE2 são compostos principalmente por illita detrítica (muscovita), grãos de feldspato e, em menor quantidade, por esmectita e caulinita. Os arenitos (UE3) são constituídos principalmente por quartzo monocristalino, feldspato, fragmentos líticos, matriz com argilominerais detríticos e quartzo autigênico cimentando os grãos do arcabouço. A illita é o principal mineral constituinte dos depósitos coluvionares, onde as micrografias do MEV mostram uma agregação de matriz esquelética com alta porosidade. A grande presença de illita é explicada pela simples desagregação dos folhelhos, em sua maioria constituídos por argila illítica são frequentemente retrabalhadas sem grandes mudanças, com exceção da perda de K (FOLK, 1974) As illitas têm estrutura com forte ligação iônica, o que acarreta na aproximação das camadas TOT, evitando que água e outras moléculas polares ocupem a posição intercamadas, ao contrário do que ocorre com as esmectitas (MURRAY, 2007). Este poder de adsorção da água, característico das illitas, promove uma menor expansão e plasticidade ao depósito de colúvio, o que pode influenciar na capacidade de retenção da água e na condutividade hidráulica do depósito.

Os lineamentos extraídos do relevo sombreado, assim como as fraturas e falhas medidas em campo mostram dois padrões estruturais: NE-SW, principal, e NW-SE, subordinado. O principal padrão NE-SW, representado pelos maiores lineamentos é concordante com a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (SILVA e DIAS, 1981). Estas estruturas tectônicas representam superfícies de fraqueza, que promovem o aumento do acesso da água e, conseqüentemente, o aumento da taxa de intemperismo das rochas. Um conteúdo de água maior também pode refletir em um aumento das poro-pressões dentro do colúvio, o que representa mais uma variável que contribui para o movimento de massa. A influência do intemperismo na área de estudo é evidente pela presença de minerais de alteração, principalmente a illita, feições de dissolução nos feldspatos presentes nas UE1 e UE2, pela alta fragmentação dos folhelhos e também, pela própria deposição do depósito coluvionar.

Os parâmetros de resistência mostram uma boa correspondência com a textura granulométrica, que é relacionada à composição mineral da rocha de origem e aos processos de intemperismo, erosão e alteração ocorridos, com conseqüências nas características físicas das partículas. A matriz coluvionar, o material mais fino da UE5, tem o maior valor de coesão e o menor ângulo de atrito interno. Por outro lado, o solo coluvionar, com o maior conteúdo de areia, tem coesão nula e o maior ângulo de atrito interno. A dispersão dos pontos na envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para o solo coluvionar pode ser justificada pela heterogeneidade do colúvio. O próprio processo de origem

do depósito contribui para a dispersão nos valores, uma vez que fragmentos grossos tendem a acumular-se no topo do colúvio.

O depósito coluvionar estudado representa o resultado de movimentos de massa ocorridos na área. Estes movimentos ocorreram no Quaternário e foram responsáveis por remodelar a geomorfologia local. Matacões e blocos de arenitos da UE3 se desprenderam por queda de blocos, sendo que o intemperismo e erosão foram influenciados principalmente pelo contexto estrutural da ZCIP e suas reativações recentes. As condições climáticas favoreceram o intemperismo e erosão das unidades mais suscetíveis composta pelos folhelhos, desenvolvendo solos residuais. Este solo, juntamente com os fragmentos rochosos, foi movimentado como fluxo de detritos e depositado a meia encosta como depósito coluvionar.

A análise de estabilidade do talude que compreende a UE2 e o depósito de colúvio (UE5) mostra que a presença de nível d'água elevado é responsável por diminuir substancialmente o fator de segurança. O talude passou de uma condição de alta estabilidade para média a baixa estabilidade devido a incorporação do nível d'água a 1 m da superfície no modelo. Este resultado leva a interpretação de que o talude é instável durante eventos de precipitação atípica

As moradias de grande parte do sudeste do Bairro Santana estão assentadas sobre depósitos de colúvio. Tal situação é um risco, pois o movimento de fluxo de detritos não cessou, tanto é que um novo deslizamento foi registrado em julho de 2011 após evento atípico de pluviosidade que causou grandes danos sociais e financeiros ao município devido aos movimentos de massa e as inundações. Este fluxo recente está provavelmente relacionado a característica de movimentação em pulsos dos fluxos de detritos. Os resultados obtidos neste trabalho possibilitam afirmar que as propriedades geotécnicas de depósitos de colúvio na área de estudo são influenciadas pela litologia e contexto estrutural. Desta forma, a consideração destes fatores na análise de áreas de risco é de fundamental importância, sendo que estudos de detalhe que investigam estes fatores têm grande utilidade na prevenção de desastres geológicos e em uma expansão urbana consciente.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Adensar a coleta de dados estruturais em campo a fim de permitir uma análise estatística da influência das estruturas tectônicas nos processos de movimento de massa no município de Rio do Sul
- Adensar e setorizar a coleta de amostras utilizadas na avaliação da composição mineralógica e nos ensaios de caracterização no talude de estudo a fim de minimizar o efeito da grande heterogeneidade dos depósitos de colúvio.
- Adotar resoluções horizontais e verticais maiores no imageamento com LST, a fim de analisar estatisticamente as estruturas. Entretanto, deve-se considerar que o aumento na resolução acarretará em um tempo de levantamento maior e em um arquivo mais pesado, que necessitará de um poder de processamento computacional maior.
- Propor mais condições de instabilidade para o talude no cálculo do fator de segurança a fim de tornar os resultados cada vez mais detalhados e robustos.
- Instalar indicadores de nível de água na encosta estudada, de modo que os fatores de segurança possam ser levantados em função do nível de água real;
- Realizar sondagem geofísica 3D para aferição do perfil estratigráfico estimado;
- Executar sondagens de simples reconhecimento e rotativas, de modo que o perfil estratigráfico possa ter um levantamento e comparado as sondagens geofísicas.
- Sugere-se ainda a execução de drenos sub-horizontais profundos (DHPs), de forma que a condição de saturação do maciço não seja alcançada, mesmos em dias de elevada precipitação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. **Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil**. São Paulo, Paulipetro, 1980. 187 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken: ASTM International, 2003.
- ASSINE, M. L. **Aspectos da estratigrafia das sequências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil**. 1996. 207 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- BASEI, M. A. S. **O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina**. 1985. 191 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1985.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D. e SANTOS, G. F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2009.
- BOGGS JR, S. Weathering and Soils. In: **Principles of Sedimentology and Stratigraphy**. 4. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006. Cap. 1. p. 3-20.
- BOGGS JR., S. Part I: Principles. In: BOGGS JR., Sam. **Petrology of Sedimentary Rocks**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2009. p. 1-18.
- BRASIL. IBGE. **Cidades**. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/rio-do-sul/panorama>>. Acesso em: 04 nov. 2017.
- BRESSANI L.A.; BICA, A.V. D.; SILVEIRA, R.M. Resultados de ensaios triaxiais em um solo coluvionar de arenito da escarpa da Serra Geral em Timbé do Sul (SC). In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 4., 2005, Salvador. **Anais...**Salvador: ABMS, 2005. P. 183-192
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos: e suas aplicações**. 6. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1987
- CENAD – DEFESA CIVIL DO BRASIL – MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL **RELATÓRIO CONSOLIDADO SOBRE AS INTERVENÇÕES NO MUNICÍPIO**: Local: RIO DO SUL – SC CONTRATO Nº 04/2013 GeoEnvi - Geologia e Meio Ambiente LTDA. Florianópolis, 30 de Setembro de 2013.
- CEPED. **Relatório De Vistoria Geológica-Geomorfológica**: Rio Do Sul. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres – CEPED, Florianópolis. 2011
- CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188p.
- DAS, B. M. Resistência ao Cisalhamento do Solo. In: DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. Cap. 11. p. 301-348. Tradução de All Tasks.
- DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura**: Aplicações e Preparação de Amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre : EDIPUCRS, 2007. [recurso eletrônico].

- DEERE, D. V.; PATTON, F. D. Slope Stability in Residual Soil. 4th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico, v. 1, 87-170.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 213/94**: Solos - determinação do teor de umidade. 1994. 3 p.
- FARMER, I. W. **Engineering Properties of Rock**. Nova Iorque: Barnes And Noble, 1968. 180 p.
- FERREIRA, J. L. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2012.
- FOLK, Robert L. Collection and Preparation of Samples fo Analysis. In: **Petrology of Sedimentary Rocks**. Austin: Hemphill Publishing Company, 1974. p. 15-28.
- FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p.147-191, 1988. Parte 1.
- GESICKI, A. L. D. **Evolução Diagenética das Formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquifero Guarani) no Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 175p. 2007.
- GOLDISH. A Study in Rock Weathering. **Journal of Geology**, n. 46, p.17-58, 1938.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. Intemperismo, Erosão e Dispersão de Massa: Interações entre os Sistemas e da Tectônica de Placas. In: GROTZINGER, John; JORDAN, Tom. **Para Entender a Terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Cap. 16. p. 439-474. Tradução de: Iuri Duquia Abreu.
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides**. Virginia: U.S. Geological Survey, 2008. 147 p.
- HIGASHI, R. R.; ESPINDOLA, M. **Mecânica dos Solos II**. 2011. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Apostila).
- HILLESHEIM, W. T.; NEVES, L. de O. Análise Freqüencial e Distribuição Temporal das Chuvas na Região de Rio Do Sul/ SC. **Ciência e Natura**, [s.l.], v. 37, p.119-124, 7 mar. 2015. Universidade Federal de Santa Maria.
- IAEG. **Classification of rocks and soils for engineering geological mapping**. Bulletin of Engeneering Geology and the Environment, v. 19. n. 1, 1979.
- IRFAN, T.Y. **Mineralogy and fabric characterization and classification of weathered granitic rocks in Hong Kong**. GEO Report n°41, Honk Kong, 1994. p. 159.
- LACERDA, W. A. Comportamento geotécnico de massas coluviais. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DE REGIÃO SUL (GEOSUL), 3., 2002, Joinville. **Anais... .** Joinville: ABMS, 2002. p. 219 - 231.
- LACERDA, W. A; SANDRONI, S. S. Movimentos de massas coluviais. In: MESA REDONDA SOBRE OS ASPECTOS GEOTÉCNICOS DE ENCOSTAS, 1985, Rio de Janeiro. **Anais... .** Rio de Janeiro: Clube de Engenharia, 1985. p. 1 - 19.

- LARA; MARQUES; ALMEIDA. Mapeamento de risco de acidentes associados a escorregamentos: morro da Serrinha. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. v. 2, p. 837 - 846.
- LIMA, J. H. D. et al. Ichnology of deglaciation deposits from the Upper Carboniferous Rio do Sul Formation (Itararé Group, Paraná Basin) at central-east Santa Catarina State (southern Brazil). **Journal Of South American Earth Sciences**, v. 1, n. 63, p.137-148. 2015.
- MASSAD, F. et al. **Comparisons Between Estimated and Measured Debris Flow Discharges and Volume of Sediments**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2., 1997, Rio de Janeiro: COBRAE, 1997. p. 213 - 222.
- MELO et al. Processos e produtos morfogenéticos continentais. In: SOUZA et al (Org.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005. p. 258-275.
- MIALL, A. D. **The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology**. 4. ed. Berlim: Springer, 582 p. 1996.
- MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental**. 1997. 255 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, Virgínio et al (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.**: Beca, 2004. Cap. 16. p. 265-279.
- MILANI, E. J. et al. Cartas Estratigráficas: Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 15, p.265-287, maio/nov 2007.
- MORA, N. D. et al (Comp.). Algumas Técnicas de Caracterização de Materiais In: MORA, N. D. et al. **Apostila de Materiais Elétricos**. 2010. Laboratório de Materias, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap5.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2016.
- MURRAY. **Applied Clay Mineralogy**. Amsterdã: Elsevier, 2007. 180 p.
- _____ **NBR 6457**: solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986. 9 p
- _____ **NBR 6508**: grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. 1984. 8 p
- _____ **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. 1984. 13 p.
- _____ **NBR 11682**: estabilidade de taludes. 1991. 39 p.
- PANDOLFO, C. et al. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis, SC: Epagri, 2002.
- PEATE, D. W.; HAWKESWORT, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. **Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution**. Bulletin of Volcanology, Berlin, v. 55, p. 119-139, 1992

- PERAZZOLO, L. **ESTUDO GEOTÉCNICO DE DOIS TALUDES DA FORMAÇÃO SERRA GERAL, RS.** 2003. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- PORTO, C. G. Intemperismo em Regiões Tropicais. In: GUERRA, Antônio José Teixeira et al. **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. Cap. 1. p. 25-54.
- PINTO, C. D. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- RAMOS, V. A. et al. **Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes.** *Tectonics*, Washington, v. 5, n. 6, p. 855-880, 1986.
- READING, H. G.; LEVELL, B. K. Controls on the sedimentary record. In: READING, H. G. (Ed.). **Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy.** Oxford: Blackwell Science, 1996. p. 5-36.
- RIO DO SUL. Defesa Civil. **Quadro de cheias ocorridas em Rio do Sul.** 2017. Disponível em: <<http://defesacivil.riodosul.sc.gov.br/index.php?r=externo/planilha>>. Acesso em: 12 set. 2017.
- ROLDAN, L. F. et al. Análise de Lineamentos Estruturais no Domo de Lages (SC) com Uso de Imagens de Satélite e Mapas de Relevo Sombreado. **Revista do Instituto de Geociências - Usp**, São Paulo, v. 10, n. 2, p.57-72, jul. 2010.
- ROSTIROLLA, S. P. et al. Structural styles of the intracratonic reactivation of the Perimbo fault zone, Paraná basin, Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, Curitiba, n. 16, p.287-300, 2003.
- SANFORD, R.M.; LANGE, F.N. **Basin study approach oil evaluation of Parana miogeosyncline of South Brazil.** American Association of Petroleum Geologist, Bulletin, v. 8, n. 44, p 1316, 1960
- SANTA CATARINA. Secretaria de Estado de Coordenação Geral e Planejamento. Subsecretaria de Estudos Geográficos e Estatísticos. **Microrregião Geográfica de Rio do Sul.** In: ATLAS ESCOLAR DE SANTA CATARINA. Florianópolis. 1991. Cap. 6. p. 104-105.
- SCHNEIDER, R. L. et al. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais do... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 1, p. 41-65.
- SILVA, E. L. da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** Florianópolis: UFSC, 2005. 139 p.
- SILVA, L C; A DIAS, A. **Projeto Timbó-Barra Velha, Brasil.** Convênio DNPM/BPRM. Porto Alegre, 1981. 282 p.
- SILVEIRA, R. M. da. **Comportamento Geotécnico das Encostas:** Crea-pr, 2016. 62 p. (Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar). Disponível em: <www.crea-pr.org.br>. Acesso em: set. 2017.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J. Tectonic cycles and sedimentary sequences in the Brazilian intracratonic basins. **Geological Society of America Bulletin**, v 89, p. 181-191,1978.

SOARES, J.E.S; POLITANO, C. F. Deslizamento de massa de solo de grandes dimensões, encosta de Piraquara. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rio de Janeiro: Abms, 1997. p. 475 - 484.

STOFFER, P. **Chapter 8: Weathering, Mass Wasting, and Erosion.** Disponível em: <<http://geologycafe.com/class/chapter8.html>>. Acesso em: 04 set. 2017.

TERZAGHI, K. **Mecanismos de Escorregamento de Terra.** São Paulo: Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, 1967. 41 p. Tradução de E. Pichler.

VARELA, M. **Granulometria,** 2015. 34 slides, color. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/marciovarela/disciplinas/materiais-de-construcao/granulometria-1/granulometria>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

WEATHERING and Soils, 2014. 19 slides, color. Disponível em: <<http://slideplayer.com/slide/4740204/>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

WHITE, I.C. **Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil.** Rio de Janeiro: DNPM, 1988. Parte I, p.1-300 ; Parte II, p. 301-617. (ed. Fac- similar), 1908.

ZALÁN, P. V. et al. **Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná.** In: SIMPÓSIO SULBRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. Atas... Curitiba: SBG, 1987, p. 441-474.

ZALÁN, P.V. et al. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, KOLATA, OLTZ, EIDEL (eds.) Interior cratonic basins. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, **AAPG Memoir 51**, p. 681-708, 1990.

ZALÁN, P.V. et al. **Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin.** In: ULBRICH, H., ROCHA CAMPOS, A. C. (eds.) Gondwana Seven. Proceedings. São Paulo, 1991. p. 83-117.

ANEXO A - Artigo aceito para publicação no IAEG 2018 – San Francisco / USA

Litho-Structural control on the geotechnical properties of colluvial deposits, Rio do Sul city, Santa Catarina, Brazil

Submitted by: Marivaldo Nascimento

Submitter mail: marivaldo.nascimento@ufsc.br

ID: 051

Authors: Vanessa Noveletto*, Marivaldo S. Nascimento*, Murilo Espindola, Vitor Müller - *: Marked as contact

Keywords: Geology; Geotechnic, colluvial deposit, Santa Catarina

Label: Case Histories

Abstract: Mountain regions are characterized by high-instability and geodynamic processes which result in a wide variety of mass movement, rockfalls and debris flow or ava-lanches. Mass movement constitutes one of the major hazard in the Rio do Sul city, northeast Santa Catarina state, Brazil. Early researches have been suggesting relationships between rock types, tectonic structures, geotechnical properties and landslide hazard in these regions. It also seems possible that specific types of failure zones are related to mass flow types and to the geotechnical properties of soil and rocks. Shales and rhythmites are the most susceptible to landsliding followed by poorly cemented medium to finegrained sandstones and siltite. This order is appropriate considering that the weathered rocks appear to be more susceptible to erosion and mass flow. The latest data show direct influence of the plain joints directions (product of tectonic stresses) and stratigraphic sedimentary succession on the landslides in the studied areas. Landslide inventory evidence which the process are high-controlled by rock-type and tectonic structures. Most of the landslides occur along the dip direction of the planar structures, during or immediately after rainfall. In these regions, the human activity is often influenced by the nature of slopes, including the type and depth of material deposited on the slopes. Therefore, it is possible to assume that landsliding in the Rio do Sul city can be explained and predicted by the nature of the geological framework and geotechnical behavior of the rocky masses and soil.

Name: IAEG/AEG Annual Meeting, San Francisco, 2018

Description: Mark your calendar to join us for the 61st AEG Annual Meeting/13th IAEG Congress in San Francisco, California on September 17-21, 2018! AEG is partnering with the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) to host the first ever Congress in the United States in IAEG's 54-year history. The 2018 meeting will have a five-day format featuring prominent national and international keynote speakers, four days of technical sessions and symposia, and an all-day Wednesday tour of local geology for full meeting registrants. <http://www.aegweb.org/mpage/iaeg18m>

PC Chairs: Abdul Shakoor